

Was ist ein MoSi₂ Heizelement

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Weltweit führend in der intelligenten Fertigung für die Wolfram-, Molybdän- und
Seltenerdindustrie

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

EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft mit unabhängiger Rechtspersönlichkeit, die von CHINATUNGSTEN ONLINE gegründet wurde, widmet sich der Förderung der intelligenten, integrierten und flexiblen Entwicklung und Herstellung von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets. CHINATUNGSTEN ONLINE, gegründet 1997 mit www.chinatungsten.com als Ausgangspunkt – Chinas erster erstklassiger Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes mit Fokus auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Industrien. CTIA GROUP nutzt fast drei Jahrzehnte umfassende Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän, erbt die außergewöhnlichen Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten, die erstklassigen Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihres Mutterunternehmens und wird so zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, hochdichte Legierungen, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den vergangenen 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE über 200 mehrsprachige professionelle Websites zu den Themen Wolfram und Molybdän in mehr als 20 Sprachen erstellt, die über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen zu Wolfram, Molybdän und Seltenen Erden enthalten. Seit 2013 wurden auf dem offiziellen WeChat-Konto „CHINATUNGSTEN ONLINE“ über 40.000 Informationen veröffentlicht, die fast 100.000 Follower erreichen und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen bieten. Mit Milliarden von Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto hat sich das Unternehmen zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Branche entwickelt, die rund um die Uhr mehrsprachige Nachrichten, Informationen zu Produktleistung, Marktpreisen und Markttrends bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die individuellen Bedürfnisse ihrer Kunden zu erfüllen. Mithilfe von KI-Technologie entwickelt und produziert sie gemeinsam mit ihren Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Angebot umfasst integrierte Dienstleistungen für den gesamten Prozess, vom Formenöffnen und der Probeproduktion bis hin zur Veredelung, Verpackung und Logistik. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE weltweit über 130.000 Kunden in Forschung und Entwicklung, Design und Produktion von über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten unterstützt und so den Grundstein für eine maßgeschneiderte, flexible und intelligente Fertigung gelegt. Auf dieser Grundlage vertieft die CTIA GROUP die intelligente Fertigung und integrierte Innovation von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets weiter.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer über 30-jährigen Branchenerfahrung auch Fachwissen, Technologien, Wolframpreise und Markttrendanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und geben diese kostenlos an die Wolframbranche weiter. Dr. Han, mit über 30 Jahren Erfahrung seit den 1990er Jahren im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen, ist im In- und Ausland ein renommierter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte. Getreu dem Grundsatz, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zu liefern, verfasst das Team der CTIA GROUP kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte auf Grundlage der Produktionspraxis und der Kundenbedürfnisse und findet dafür breite Anerkennung in der Branche. Diese Erfolge stellen eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP dar und verhelfen ihr zu einem führenden Unternehmen in der globalen Herstellung von Wolfram- und Molybdänprodukten sowie bei Informationsdienstleistungen.



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

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Einleitung

- 1.1 Übersicht über MoSi₂ -Heizelemente
- 1.2 Entwicklungsgeschichte der MoSi₂ -Heizelemente
- 1.3 Anwendungsstatus von MoSi₂ -Heizelementen
- 1.4 Anwendungsbranchen von MoSi₂ -Heizelementen

Kapitel 2 Eigenschaften von MoSi₂ -Heizelementen und ihre Einflussfaktoren

- 2.1 Physikalische Eigenschaften von MoSi₂ -Heizelementen
- 2.2 Spezifischer Widerstand von MoSi₂ -Heizelementen
- 2.3 Hochtemperaturbeständigkeitseigenschaften von MoSi₂ -Heizelementen
- 2.4 Hochtemperaturoxidationsbeständigkeit von MoSi₂ -Heizelementen
- 2.5 Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit von MoSi₂ -Heizelementen
- 2.6 Thermoschockstabilität von MoSi₂ -Heizelementen
- 2.7 Thermoschockstabilität von MoSi₂ -Heizelementen
- 2.8 Thermisches Ermüdungsverhalten von MoSi₂ -Heizelementen
- 2.9 Oberflächenzustand des MoSi₂ -Heizelements
 - 2.9.1 Häufig verwendete Schutzbeschichtungsarten
 - 2.9.2 Untersuchung von Oberflächenrissen und Beschichtungshaftung
 - 2.9.3 Bildung und Schutz des SiO₂ -Oxidfilms auf der Oberfläche
- 2.10 Oberflächenprobleme von MoSi₂ -Heizelementen und deren Lösungen
- 2.11 Faktoren, die die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi₂ -Heizelementen beeinflussen
 - 2.11.1 Einfluss der Betriebstemperatur
 - 2.11.2 Einfluss der Atmosphäre
 - 2.11.3 Einfluss der Heiz-/Kühlfrequenz
 - 2.11.4 Einfluss der Betriebsspannung
 - 2.11.5 Einfluss der Stromdichte
 - 2.11.6 Einfluss der Installationsmethode
 - 2.11.7 Einfluss der Komponentenqualität und -reinheit
 - 2.11.8 Wirkung der Beschichtungsschutzbehandlung
- 2.12 CTIA GROUP LTD MoSi₂ Heizelement Sicherheitsdatenblatt

Kapitel 3 Aufbau und Design von MoSi₂ -Heizelementen

- 3.1 Gängige Strukturen von MoSi₂ -Heizelementen
 - 3.1.1 U-förmiges MoSi₂ -Heizelement
 - 3.1.2 W-Typ MoSi₂ -Heizelement
 - 3.1.3 Spiralförmiges MoSi₂ -Heizelement
 - MoSi₂ -Heizelement mit geradem Stab
 - 3.1.5 Vergleich von U-förmigen, W-förmigen und geraden Bauformen
- 3.2 Größendesign des MoSi₂ -Heizelements (üblich sind Φ 6/12 und Φ 9/18)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3 Optimale Gestaltung des Wärmefeldes und der Kaltendstruktur
- 3.4 Elektrischer Anschluss und Tragsystemdesign
- 3.5 Klemmenaufbau und Anschlusstechnik
- 3.6 Wichtige Punkte des Produktanpassungsdesigns

Kapitel 4 Herstellungsprozess des MoSi₂-Heizelements

- 4.1 Rohstoffauswahl und Dosierungsgrundsätze
- 4.2 Pulvermetallurgie und isostatisches Pressverfahren
- 4.3 Hochtemperatur-Sinter- und Nachbearbeitungstechnologie
- 4.4 Oberflächenschutzschichttechnologie
- 4.5 Schweiß- und Endenbearbeitungstechnik

Kapitel 5 Leistungstest des MoSi₂-Heizelements

- 5.1 Prüfung der Beziehung zwischen spezifischem Widerstand und Temperatur
- 5.2 Prüfung der Beziehung zwischen Hochtemperaturlebensdauer und Thermoschockverhalten
- 5.3 Stabilitätstest in oxidativer Umgebung
- 5.4 Härteprüfung des Heizelements
- 5.5 Prüfung des Zusammenhangs zwischen Oxidationsbeständigkeit und Temperatur
- 5.6 Zusammenhang zwischen Staboberflächenrauheit und spezifischem Widerstand
- 5.7 Einfluss der Gleichmäßigkeit der Stabbeschichtung auf die Lebensdauer
- 5.8 Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Spannungskopplung
- 5.9 Rissbildungs-, Biege- und Endenablationsmechanismen
- 5.10 Mikrostrukturanalyse und Untersuchung der Ausfallart

Kapitel 6 Installation von MoSi₂-Heizelementen

- 6.1 Vorbereitungen vor der Installation
- 6.2 Detaillierte Installationsschritte
- 6.3 Installationshinweise
- 6.4 Sicherheitstechnische Angaben
- 6.5 Häufige Fehler und Wartungshandbuch
 - 6.5.1 Ursachen und Lösungen bei Heizelementbruch
 - 6.5.2 Ursachen der Oxidschichtablösung und Regenerationsbehandlung
 - 6.5.3 Tägliche Wartungsmethoden für Heizelemente
 - 6.5.4 Heizelementwechsel- und Recyclingtechnik
- 6.6 Typische Einbauarten in Industrieöfen

Kapitel 7 Prüfnormen und Zertifizierung von MoSi₂-Heizelementen

- 7.1 Prüfverfahren für die Heizelementleistung
- 7.2 Analyse von ISO-, ASTM- und anderen Normen
- 7.3 Umweltanpassungstest
- 7.4 Ausfallarten und Methoden zur Lebensdauervorhersage
- 7.5 Sicherheits- und Elektrovorschriften

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

Kapitel 8 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen

8.1 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen in der metallurgischen Industrie

8.1.1 Metallschmelzen und Wärmebehandlung

8.1.2 Hochtemperatur-Sinterprozess

8.1.3 Wärmebehandlungsanlagen

8.2 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen in der Keramikindustrie

8.2.1 Keramikbrand und Glasur

8.2.2 Herstellung spezieller Keramikmaterialien

8.3 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen in der Photovoltaikindustrie

8.3.1 Hochtemperaturprozess zur Herstellung von Siliziumwafern

8.3.2 Anlagen zur Solarzellenproduktion

8.4 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen in der Halbleiterindustrie

8.4.1 Wafer-Annealing und Diffusionsprozess

8.4.2 Epitaktisches Wachstum von Halbleitern

8.4.3 Hochtemperatur-Ätzgeräte

8.4.4 Vakuumbeschichtungsanlagen

8.5 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen in der Glasherstellungsindustrie

8.5.1 Glasschmelzen

8.5.2 Glasbearbeitung

8.6 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen bei der Herstellung neuer Energiematerialien

8.6.1 Sintern von Lithiumbatteriematerialien

8.6.2 Wasserstoffenergie und Brennstoffzellen

8.7 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen im Umweltschutz und in der Katalyse

8.7.1 Abgasbehandlung

8.7.2 Katalysatorregeneration

8.7.3 Nutzung fester Abfallressourcen

8.8 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen in anderen Bereichen

8.8.1 Werkstoffprüfung in der Luft- und Raumfahrt

8.8.2 Hilfsausrüstung der Nuklearindustrie

8.8.3 Hochtemperatur-Synthesechemie

8.8.4 MoSi₂ -Stabtransformator

Kapitel 9 Vergleich von MoSi₂ -Heizelementen mit anderen Heizmaterialien

9.1 Vergleich mit Wolfram-Heizelementen

9.2 Vergleich mit Siliziumkarbid-Bauteilen

9.3 Analyse der Heizelementkosten, Effizienz und Anwendungseignung

Kapitel 10 Relevante Normen und Spezifikationen für MoSi₂ -Heizelemente

10.1 Chinesischer Nationalstandard für MoSi₂ -Heizelemente

10.2 Internationale Normen für MoSi₂ -Heizelemente

10.3 Normen für MoSi₂ -Heizelemente in Europa, Amerika, Japan, Korea und anderen Ländern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Glossar

Verweise



CTIA GROUP LTD Silizium-Molybdän-Stab

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

Kapitel 1 Einführung

1.1 Übersicht über MoSi₂-Heizelemente

Molybdändisilizid (MoSi₂) ist eine intermetallische Verbindung mit der chemischen Formel MoSi₂ . Es hat einen hohen Schmelzpunkt (ca. 2030 °C), eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen sowie eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit. Es wird häufig im Bereich der Hochtemperaturheizung verwendet, da es sowohl die Eigenschaften von Metall als auch von Keramik besitzt. Als Widerstandsheizmaterial werden Molybdändisilizid - Heizelemente hauptsächlich in elektrischen Heizgeräten in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären verwendet. Bei hohen Temperaturen bildet sich auf ihrer Oberfläche ein dichter Schutzfilm aus Siliziumdioxid (SiO₂), der weitere innere Oxidation wirksam verhindert und so die Lebensdauer verlängert. MoSi₂-Heizelemente können in einem Temperaturbereich von 500–1850 °C stabil arbeiten und eignen sich für industrielle und wissenschaftliche Forschungsbereiche wie Keramikintern, Glasschmelzen, Metallwärmebehandlung, Hochtemperaturintern und Hochtemperaturöfen im Labor. Im Vergleich zu anderen Heizmaterialien wie Siliziumkarbid (SiC) weist Molybdändisilizid eine höhere Betriebstemperatur und eine bessere Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen auf. Allerdings schränken seine geringe Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen und sein eingeschränktes Kriechverhalten bei hohen Temperaturen auch einige strukturelle Anwendungen ein. MoSi₂-Heizelemente sind derzeit in verschiedenen Formen erhältlich, darunter U-, W- und L-Form sowie in Sonderformen, die den Anforderungen verschiedener Industrieöfen weitgehend gerecht werden.

1.2 Entwicklungsgeschichte der MoSi₂-Heizelemente

Die Erforschung von Molybdändisilizid als Hochtemperaturmaterial begann im frühen 20. Jahrhundert, seine Anwendung als Heizelement begann jedoch erst Mitte des 20. Jahrhunderts. Im Jahr 1904 berichteten Wissenschaftler erstmals über die Kristallstruktur von MoSi₂ und bestätigten, dass es sich um einen tetragonalen α -Kristall mit hohem Schmelzpunkt und den Eigenschaften einer intermetallischen Verbindung handelte. Aufgrund der damaligen Einschränkungen der Herstellungstechnologie und der Materialreinheit wurde MoSi₂ jedoch hauptsächlich als Laborforschungsobjekt und nicht als Industriematerial verwendet. In den 1930er Jahren, mit der eingehenden Forschung zu Hochtemperaturlegierungen und keramischen Materialien, erregte MoSi₂ aufgrund seiner hervorragenden Oxidationsbeständigkeit und Leitfähigkeit bei hohen Temperaturen zunehmend Aufmerksamkeit. Forscher fanden heraus, dass der in einer oxidierenden Hochtemperaturatmosphäre auf der Oberfläche von MoSi₂ gebildete SiO₂-Schutzfilm dessen Haltbarkeit deutlich verbessern kann, was den theoretischen Grundstein für die spätere Entwicklung von Heizelementen legte.

Im Jahr 1947 übernahm das schwedische Unternehmen Kanthal die Führung bei der Herstellung des ersten industriell genutzten Heizstabs aus Molybdändisilizid und markierte damit den offiziellen Eintritt von MoSi₂ - Heizelementen in die kommerzielle Anwendung. Diese frühen Heizstäbe wurden hauptsächlich in industriellen Hochtemperaturöfen mit einer maximalen Betriebstemperatur von etwa 1600 °C eingesetzt. Durch Optimierung des Sinterprozesses und der Dotierungstechnologie von MoSi₂

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verbesserte Kanthal die mechanische Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit der Komponenten erheblich. In den 1950er und 1960er Jahren wurden mit dem Aufkommen moderner Herstellungstechnologien wie Vakuumsintern und Plasmaspritzen die Produktionseffizienz und Leistung von MoSi₂-Heizelementen weiter verbessert. Die Form des Elements hat sich von einem einzelnen geraden Stab zu einem U-förmigen und einem L-förmigen Stab entwickelt, um den Anforderungen verschiedener Ofentypen gerecht zu werden. Darüber hinaus haben Forscher die Sprödigkeit von MoSi₂ bei niedrigen Temperaturen und die Kriecheigenschaften bei hohen Temperaturen durch Dotierung mit Seltenerdelementen oder anderen Metallen (wie W und Nb) verbessert und so den Anwendungsbereich weiter erweitert. In den 1980er Jahren begann China mit der industriellen Produktion von Heizelementen aus Molybdändisilizid. Anfangs stützte man sich hauptsächlich auf importierte Technologie, baute aber nach und nach eigenständige Forschungs- und Entwicklungskapazitäten auf. In dieser Zeit wurde die maximale Betriebstemperatur von MoSi₂-Heizelementen auf 1800 °C erhöht, und sie finden breite Anwendung in der Keramik-, Glas- und Feuerfestindustrie. Gleichzeitig brachte das schwedische Unternehmen Kanthal das Heizelement Kanthal Super 1900 auf den Markt, das eine maximale Betriebstemperatur von 1850 °C erreicht und zum Branchenstandard geworden ist. Der Erfolg dieses Produkts beruht auf der Verwendung hochreiner Rohstoffe und der Verbesserung der Kalt- und Heißendschweißtechnologie, die die Stabilität des Elements bei Hoch- und Niedertemperaturzyklen deutlich erhöht.

Seit den 1990er Jahren konzentriert sich die Forschung und Entwicklung von MoSi₂-Heizelementen auf Leistungsoptimierung und Anwendungserweiterung. Neue Herstellungsverfahren wie Heißpressintern, Reaktionssintern und selbstausbreitende Hochtemperatursynthese (SHS) haben die Dichte und die mechanischen Eigenschaften des Materials deutlich verbessert. Gleichzeitig ermöglichte die Entwicklung der MoSi₂-Beschichtungstechnologie den Einsatz als Hochtemperatur-Schutzbeschichtung in der Luft- und Raumfahrt, beispielsweise für Gasturbinenschaufeln und Triebwerkskomponenten. Darüber hinaus ermöglichte die Entwicklung nanoskaliger MoSi₂-Pulver die Herstellung von Hochleistungsverbundwerkstoffen und löste so teilweise das Problem der Kältesprödigkeit. Auf dem Weltmarkt lag der Marktwert von MoSi₂-Heizelementen im Jahr 2016 bei etwa 103 Millionen US-Dollar und dürfte im Jahr 2022 bei 135 Millionen US-Dollar liegen, was einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 4,7 % entspricht, was die anhaltende Nachfrage im Hochtemperatur-Industriebereich widerspiegelt. Obwohl MoSi₂-Heizelemente im Hochtemperaturbereich gute Leistungen erbringen, ist ihre Entwicklung noch mit Herausforderungen verbunden. Kältesprödigkeit und unzureichende Kriecheigenschaften bei hohen Temperaturen schränken ihre Anwendung als Strukturwerkstoffe ein, während hohe Produktionskosten ihre Wettbewerbsfähigkeit im unteren Marktsegment beeinträchtigen. Zukünftige Forschungsschwerpunkte könnten die Entwicklung von Verbundwerkstoffen, Dotierungsmodifikationen und neue Herstellungsverfahren sein, um die Leistung weiter zu verbessern und die Kosten zu senken.

1.3 Anwendungsstatus von Molybdändisilizid - Heizelementen

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) spielen aufgrund ihrer hervorragenden Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, ihrer Betriebstemperatur von bis zu 1850 °C und ihrer stabilen elektrischen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaften in der globalen Hochtemperaturindustrie eine wichtige Rolle. Dieses Element wird häufig in Hochtemperatur-Elektroöfen in der industriellen Produktion, der wissenschaftlichen Forschung und der Verarbeitung spezieller Materialien eingesetzt.

Sein Hauptvorteil ist, dass es in oxidierender Atmosphäre lange Zeit stabil betrieben werden kann. Der dichte Schutzfilm aus Siliziumdioxid (SiO_2) auf der Oberfläche verhindert wirksam innere Oxidation und verlängert so seine Lebensdauer deutlich. In den letzten Jahren haben Fortschritte in der Materialwissenschaft und bei Herstellungsverfahren die Leistung von MoSi_2 -Heizelementen vorangetrieben. Beispielsweise wurden durch Dotierungsmodifikation und fortschrittliche Sintertechnologie die Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen und die Kriecheigenschaften bei hohen Temperaturen des Elements verbessert, sodass es an anspruchsvollere Arbeitsumgebungen angepasst werden kann.

Auf dem Weltmarkt steigt die Nachfrage nach MoSi_2 -Heizelementen weiter an, insbesondere in der Keramik-, Glas- und Halbleiterindustrie. Das schwedische Unternehmen Kanthal dominiert den Markt mit seiner Produktreihe Kanthal Super (wie z. B. Kanthal Super 1900), die für ihre hervorragende Hochtemperaturleistung und Zuverlässigkeit bekannt ist. Unternehmen in China, Japan und den USA entwickeln und produzieren ebenfalls aktiv MoSi_2 -Heizelemente, wobei China erhebliche Vorteile hinsichtlich der Kostenkontrolle und der Massenproduktion hat. Was den Herstellungsprozess betrifft, haben Technologien wie Heißpressintern, Reaktionssintern und selbstausbreitende Hochtemperatursynthese (SHS) die Dichte und die mechanischen Eigenschaften des Materials verbessert, und die Form des Elements hat sich ebenfalls von einem einzelnen geraden Stab zu U-förmigen, W-förmigen, L-förmigen und kundenspezifischen Formen weiterentwickelt, um den Anforderungen verschiedener Ofendesigns gerecht zu werden. Darüber hinaus hat die Entwicklung nanoskaliger MoSi_2 -Pulver neue Anwendungsbereiche für Hochleistungsverbundwerkstoffe und -beschichtungen erschlossen, beispielsweise Hochtemperatur-Schutzbeschichtungen in der Luft- und Raumfahrt sowie der Energieindustrie.

Obwohl MoSi_2 -Heizelemente im Hochtemperaturbereich gute Leistungen erbringen, sind sie dennoch mit einigen Herausforderungen konfrontiert. Die Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen begrenzt ihr Potenzial in bestimmten Strukturanwendungen und aufgrund der hohen Produktionskosten stehen sie im unteren Marktsegment in Konkurrenz zu alternativen Materialien wie Siliziumkarbid (SiC). Aktuelle Forschungsschwerpunkte sind die Verbesserung mechanischer Eigenschaften durch Dotierung mit Seltenerdelementen oder Metallen (wie W, Nb) und die Entwicklung neuer Verbundwerkstoffe zur Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit und Haltbarkeit.

Mit dem Aufkommen intelligenter Hochtemperaturöfen haben sich die Anforderungen an eine präzise Temperaturregelung und lange Lebensdauer von MoSi_2 -Heizelementen weiter verbessert, was die Entwicklung entsprechender Regelungstechnologien und Materialoptimierungen gefördert hat. Da die weltweite Nachfrage nach effizienten, energiesparenden und umweltfreundlichen Produktionsmethoden steigt, werden MoSi_2 -Heizelemente in Zukunft voraussichtlich in weiteren aufstrebenden Bereichen zum Einsatz kommen.

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

1.4 Anwendungsbranchen von MoSi₂-Heizelementen

aus Molybdändisilizid werden aufgrund ihrer hohen Temperaturstabilität, Oxidationsbeständigkeit und hervorragenden elektrischen Eigenschaften in vielen Branchen häufig verwendet. Die wichtigsten Anwendungsgebiete sind: In der Keramikindustrie sind MoSi₂-Heizelemente Schlüsselkomponenten in Sinter- und Hochtemperaturverarbeitungsprozessen zur Herstellung von Strukturkeramik, Funktionskeramik und feuerfesten Materialien. Ihre maximale Betriebstemperatur von 1850 °C erfüllt die Sinteranforderungen von Hochleistungskeramiken wie Aluminiumoxid, Zirkonoxid und Siliziumnitrid und gewährleistet so Produktqualität und Prozessstabilität. In der Glasindustrie werden MoSi₂-Heizelemente häufig in Hochtemperaturöfen und Glühöfen zur Herstellung von optischem Glas, Flachglas und Spezialglas eingesetzt. Ihre Oxidationsbeständigkeit und lange Lebensdauer ermöglichen einen Dauerbetrieb in einer oxidierenden Hochtemperaturatmosphäre, was die Produktionseffizienz deutlich verbessert.

Im Bereich der Metallwärmebehandlung werden MoSi₂-Heizelemente in Hochtemperaturglüh-, Abschreck- und Lötprozessen eingesetzt, insbesondere zur Behandlung von Edelstahl, Titanlegierungen und Hochtemperaturlegierungen. Die schnelle Erwärmung und die präzise Temperaturregelung verbessern die Produktqualität und die Prozesseffizienz. In der Halbleiterindustrie werden in Hochtemperatur-Diffusions- und Oxidationsöfen häufig MoSi₂-Heizelemente für die Wärmebehandlung von Siliziumwafern und die Dünnschichtabscheidung eingesetzt. Seine hohe Reinheit und Stabilität erfüllen die strengen Anforderungen der Halbleiterindustrie an eine saubere Umgebung und präzise Temperaturregelung.

In der Luft- und Raumfahrt wird MoSi₂ nicht nur als Heizelement, sondern auch als Beschichtung für Schutzschichten auf Gasturbinenschaufeln und Triebwerkskomponenten eingesetzt. Seine hohe Oxidationsbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit ermöglichen eine hohe Leistungsfähigkeit auch unter extremen Bedingungen. Im Bereich der wissenschaftlichen Forschung werden MoSi₂-Heizelemente häufig in Hochtemperatur-Versuchsöfen in Materialwissenschafts-, Physik- und Chemielaboren eingesetzt, beispielsweise in thermogravimetrischen Analysatoren, Differenzial-Scanning-Kalorimetern und Hochtemperatur-Synthesegeräten, um die Entwicklung neuer Materialien zu unterstützen. In der Feuerfest- und Metallurgieindustrie werden MoSi₂-Heizelemente zur Hochtemperaturbehandlung bei feuerfesten Sinter- und Metallurgieprozessen eingesetzt, beispielsweise bei der Herstellung hochreiner Metalle und Legierungen. Ihre hohe Effizienz und lange Lebensdauer senken die Produktionskosten.

Im Bereich Energie und Umweltschutz werden MoSi₂-Heizelemente in Hochtemperatur-Verbrennungsanlagen, Testgeräten für Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) und thermischen Abfallbehandlungssystemen eingesetzt und tragen so zu einer sauberen Produktion und effizienten Energienutzung bei. MoSi₂-Heizelemente profitieren von der Weiterentwicklung ihrer Materialeigenschaften und Fertigungstechnologie. Verschiedene Branchen haben unterschiedliche Leistungsanforderungen. So legen beispielsweise die Keramik- und Glasindustrie mehr Wert auf Hochtemperaturstabilität und Lebensdauer, während die Halbleiterindustrie Wert auf hohe Reinheit und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturregelgenauigkeit legt. Da verschiedene Branchen künftig höhere Anforderungen an die Leistung von Hochtemperaturgeräten stellen, werden MoSi₂ -Heizelemente durch Materialoptimierung und Prozessinnovation voraussichtlich in weiteren Bereichen Durchbrüche erzielen.



CTIA GROUP LTD Silizium-Molybdän-Stab

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
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

Kapitel 2 Eigenschaften von MoSi₂-Heizelementen und ihre Einflussfaktoren

2.1 Physikalische Eigenschaften von MoSi₂-Heizelementen

Molybdändisilizid (MoSi₂) ist eine intermetallische Verbindung, die die Eigenschaften von Metallen und Keramiken vereint. Seine physikalischen Eigenschaften bestimmen seine hervorragende Leistung als Hochtemperatur-Heizelement. Die Kristallstruktur von MoSi₂ ist vom tetragonalen α -Typ (C11b-Typ) mit der Raumgruppe I4/mmm, die eine hohe Symmetrie und Stabilität aufweist. Sein Schmelzpunkt liegt bei etwa 2030 °C, wodurch die strukturelle Integrität auch bei extrem hohen Temperaturen erhalten bleibt. Die Dichte beträgt 6,24 g/cm³, was relativ niedrig ist, was zur Gewichtsreduzierung des Heizelements beiträgt und es für die Gestaltung komplexer Formen geeignet macht. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von MoSi₂ beträgt etwa $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (Raumtemperatur bis 1000 °C), was gut zu gängigen keramischen Matrixmaterialien (wie Aluminiumoxid und Zirkoniumdioxid) passt und das Risiko von Rissen durch thermische Spannung verringert.

von MoSi₂ beträgt bei Zimmertemperatur etwa 45 W/(m·K) und nimmt mit steigender Temperatur allmählich ab, kann aber bei hohen Temperaturen noch immer effizient Wärme übertragen und so eine gleichmäßige Erwärmung des Heizelements sicherstellen. Es weist eine hohe Härte mit einer Vickershärte von etwa 1200 HV und eine gute Verschleißfestigkeit auf, ist jedoch aufgrund seiner Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen (Bruchzähigkeit von etwa 2 - 3 MPa·m^{1/2}) anfällig für mechanische Beschädigungen. Die Oxidationsbeständigkeit von MoSi₂ ist in oxidierenden Atmosphären mit hohen Temperaturen besonders herausragend. Über 800 °C bildet sich auf der Oberfläche ein dichter SiO₂- Schutzfilm, der wirksam weitere Sauerstoffdiffusion verhindert und die innere Struktur vor Oxidationserosion schützt. Dank dieser Eigenschaft kann das Material lange Zeit in oxidierender Atmosphäre bei einer maximalen Betriebstemperatur von bis zu 1850 °C arbeiten.

MoSi₂ wird von vielen Faktoren beeinflusst. Die Reinheit der Rohstoffe ist entscheidend. Hochreines MoSi₂ kann die durch Verunreinigungen verursachte Schwächung der Korngrenzen reduzieren und die mechanischen Eigenschaften sowie die Oxidationsbeständigkeit verbessern. Herstellungsverfahren wie Heißpressintern oder Reaktionssintern beeinflussen die Dichte des Materials. Je höher die Dichte, desto besser die Oxidationsbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Dotierungsmodifikationen (wie die Zugabe von Al, W oder Seltenerdelementen) können die Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen und die Kriecheigenschaften bei hohen Temperaturen verbessern, die Oxidationsbeständigkeit jedoch leicht verringern. Darüber hinaus hat auch die Arbeitsumgebung (wie Art der Atmosphäre und Häufigkeit der Temperaturzyklen) einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität der physikalischen Eigenschaften. Beispielsweise kann in einer reduzierenden Atmosphäre der SiO₂ -Schutzfilm versagen, was zu einer beschleunigten Degradation des Materials führt.

2.2 Spezifischer Widerstand von MoSi₂-Heizelementen

Der spezifische Widerstand von MoSi₂ -Heizelementen ist der wichtigste Leistungsparameter von MoSi₂ als elektrisches Heizmaterial, der sich direkt auf die Heizleistung und die Genauigkeit der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturregelung auswirkt. Der spezifische Widerstand von MoSi_2 zeigt bei Temperaturänderungen ein nichtlineares Verhalten. Bei Raumtemperatur beträgt sein spezifischer Widerstand etwa $2,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$. Mit steigender Temperatur erhöht sich der spezifische Widerstand allmählich und erreicht bei etwa 1000°C etwa $4,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$. Dieser positive Temperaturkoeffizient ermöglicht es dem MoSi_2 -Heizelement, die Leistung bei hohen Temperaturen automatisch anzupassen, Überhitzung zu verhindern und die Sicherheit zu verbessern. Oberhalb von 1000°C steigt der spezifische Widerstand langsam an und stabilisiert sich, was zur genauen Temperaturregelung im Hochtemperaturbereich beiträgt.

MoSi_2 wird durch die Materialzusammensetzung, die Mikrostruktur und die äußere Umgebung beeinflusst. Die Reinheit und der Verunreinigungsgehalt der Rohstoffe wirken sich erheblich auf den spezifischen Widerstand aus. Beispielsweise erhöhen Verunreinigungen wie Eisen und Aluminium den spezifischen Widerstand und verringern die Stabilität, während hochreines MoSi_2 konsistentere elektrische Eigenschaften aufweist. Korngröße und Korngreneigenschaften sind ebenfalls entscheidend. Kleinere Korngrößen gehen üblicherweise mit einem höheren Korngrenzenwiderstand einher, was zu einem etwas höheren spezifischen Widerstand, aber einer verbesserten mechanischen Festigkeit führt. Auch der Einfluss des Herstellungsprozesses auf den spezifischen Widerstand ist erheblich. Durch Heißpressintern hergestelltes MoSi_2 hat eine höhere Dichte, weniger Korngrenzendefekte und einen niedrigeren und stabileren spezifischen Widerstand, während reaktionsgesinterte Proben aufgrund einer höheren Porosität einen höheren spezifischen Widerstand aufweisen können.

Dotierung ist ein wichtiges Mittel zur Anpassung des spezifischen Widerstands von MoSi_2 . Die Zugabe von Wolfram (W) oder Niob (Nb) kann den spezifischen Widerstand senken und die Leitfähigkeit bei hohen Temperaturen verbessern, kann aber auf Kosten einiger Antioxidationseigenschaften gehen. Die Dotierung mit Seltenerdelementen (wie Y_2O_3) stabilisiert die temperaturabhängige Widerstandsänderung durch Verbesserung der Korngrenzenstruktur. Der Einfluss der Arbeitsumgebung auf den spezifischen Widerstand ist nicht zu vernachlässigen. In oxidierender Atmosphäre hat die Bildung einer SiO_2 -Schutzschicht kaum Auswirkungen auf den spezifischen Widerstand. In reduzierender oder Vakuumumgebung kann es jedoch zur Verflüchtigung von Si an der Oberfläche kommen, wodurch der spezifische Widerstand allmählich ansteigt und die Langzeitstabilität beeinträchtigt wird.

MoSi_2 -Heizelemente müssen anwendungsspezifisch optimiert werden. Beispielsweise benötigen Keramiksinteröfen einen stabilen Widerstand für eine gleichmäßige Erwärmung, während Halbleiter-Wärmebehandlungsöfen einen niedrigeren Widerstand für einen schnellen Temperaturanstieg benötigen. In der Praxis kann die Anpassung des Widerstands des kalten Endes (meist mit einem leitfähigeren Material dotiert) an das heiße Ende den Gesamtwirkungsgrad verbessern und Energieverluste reduzieren.

2.3 Hochtemperaturbeständigkeitseigenschaften von MoSi_2 -Heizelementen

Heizelemente aus Molybdändisilizid (MoSi_2) sind eine der Kerneigenschaften von elektrischen Heizmaterialien, die sich direkt auf Heizleistung, Temperaturregelgenauigkeit und Lebensdauer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auswirken. Im Hochtemperaturbereich ist der spezifische Widerstand von MoSi₂ relativ stabil. Verglichen mit dem schnellen Anstieg von Raumtemperatur auf 1000 °C verlangsamt sich der Anstieg des spezifischen Widerstands im Hochtemperaturbereich erheblich. Beispielsweise beträgt der spezifische Widerstand von MoSi₂ bei Raumtemperatur etwa $2,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ und steigt bei 1000 °C auf etwa $4,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ an, während er bei 1500 °C etwa $4,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ beträgt und sich dann mit weiter steigender Temperatur weniger ändert. Diese Eigenschaft des positiven Temperaturkoeffizienten (PTC) ermöglicht es MoSi₂, die Leistungsabgabe bei hohen Temperaturen automatisch anzupassen, Überhitzung zu vermeiden und die Sicherheit zu verbessern. Gleichzeitig bietet es eine stabile Leistung für Anwendungen, die eine präzise Temperaturkontrolle erfordern, wie etwa Keramiksintern und Wärmebehandlung von Halbleitern. Die Stabilität der Hochtemperaturbeständigkeitseigenschaften rührt von der intermetallischen Verbindungsstruktur von MoSi₂ her, deren Leitfähigkeitsmechanismus hauptsächlich auf metallischen Bindungen basiert. Sogar bei hohen Temperaturen führt die verstärkte Gitterschwingung zu einer erhöhten Elektronenstreuung, und die Leitfähigkeit bleibt auf einem hohen Niveau. Langfristiger Hochtemperaturbetrieb kann jedoch eine leichte Drift des spezifischen Widerstandes verursachen, die hauptsächlich durch Zusammensetzungsänderungen verursacht wird, die durch das Wachstum des SiO₂-Schutzfilms auf der Oberfläche oder die Verflüchtigung von Si-Spuren verursacht werden, sowie durch mikrostrukturelle Entwicklung, die durch thermische Spannungen induziert wird (wie etwa Kornwachstum oder Korngrenzenschwächung).

Faktoren, die die Hochtemperaturbeständigkeit beeinflussen, sind Materialreinheit, Dotierungsmodifikation und Arbeitsumgebung. Hochreines MoSi₂ kann die durch Verunreinigungen (wie Fe und Al) verursachte Widerstandsinstabilität reduzieren und eine gleichbleibende elektrische Leistung gewährleisten. Dotierung mit Metallelementen (wie W und Nb) kann den spezifischen Widerstand senken und die Hochtemperaturleitfähigkeit verbessern, kann aber die Oxidationsbeständigkeit leicht verringern. Dotierung mit Seltenerdelementen (wie Y₂O₃) stabilisiert die temperaturabhängige Widerstandsänderung durch Optimierung der Korngrenzenstruktur. In oxidierender Atmosphäre hat der SiO₂-Schutzfilm kaum Einfluss auf den spezifischen Widerstand. In reduzierender oder Vakuumumgebung führt die Si-Verflüchtigung jedoch zu einem allmählichen Anstieg des spezifischen Widerstands und beschleunigt die Bauteilalterung. Auch der Herstellungsprozess beeinflusst die Widerstandseigenschaften maßgeblich. Durch Heißpressintern hergestelltes MoSi₂ weist eine hohe Dichte, weniger Korngrenzendefekte und stabilere Widerstandseigenschaften auf. Reaktionsgesinterte Proben mit höherer Porosität können hingegen aufgrund lokaler Stromungleichmäßigkeiten Leistungseinbußen aufweisen. In der Praxis wird das kalte Ende üblicherweise mit hochleitfähigen Materialien dotiert, um den Widerstand zu reduzieren. Eine optimierte Widerstandsanpassung zwischen kaltem und heißem Ende kann die Energieeffizienz verbessern. Regelmäßige Wartung und die Vermeidung extremer Temperaturschwankungen tragen dazu bei, die Langzeitstabilität der Hochtemperaturwiderstandseigenschaften zu erhalten.

2.4 Hochtemperaturoxidationsbeständigkeit von MoSi₂-Heizelementen

Die Oxidationsbeständigkeit von Heizelementen aus Molybdändisilizid bei hohen Temperaturen ist das wichtigste Merkmal für einen langfristig stabilen Betrieb in oxidierender Atmosphäre und macht es zum

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bevorzugten Material für Hochtemperatur-Elektroden. Oberhalb von 800 °C bildet sich auf der Oberfläche von MoSi₂ schnell ein dichter Schutzfilm aus Siliziumdioxid (SiO₂). Dieser Film hat einen niedrigen Sauerstoffdiffusionskoeffizienten und eine gute Selbstreparaturfähigkeit, wodurch er das Eindringen von Sauerstoff ins Innere wirksam verhindert und das Substrat vor Oxidationskorrosion schützt. Seine Oxidationsreaktion ist: $2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$, wobei MoO₃ bei hohen Temperaturen verflüchtigt und das verbleibende SiO₂ eine durchgehende Schutzschicht bildet. Im Temperaturbereich von 1200–1850 °C ermöglicht dieser Schutzfilm MoSi₂ einen stabilen Langzeitbetrieb in oxidierender Atmosphäre und eignet sich daher für Hochtemperaturprozesse wie Keramiksintern und Glasschmelzen. Im Niedertemperaturbereich von 400–700 °C neigt MoSi₂ jedoch zum „Pesting“: Es oxidiert und bildet ein nicht schützendes Gemisch aus MoO₃ und SiO₂. Dies führt insbesondere bei häufigen Temperaturzyklen zur Materialpulverisierung. Um dieses Problem zu vermeiden, wird dieser Temperaturbereich in der Praxis meist schnell überschritten. MoSi₂ weist in reduzierender Atmosphäre (wie H₂) oder im Vakuum eine geringe Oxidationsbeständigkeit auf, da sich der SiO₂-Schutzfilm nicht bilden kann oder zerstört wird, was zur Verflüchtigung von Si und zur Materialzersetzung führt. Daher ist es für derartige Umgebungen nicht geeignet. Zu den Faktoren, die die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen beeinflussen, zählen Materialreinheit, Mikrostruktur und Dotierungsmodifikation. Hochreines MoSi₂ kann die durch Verunreinigungen verursachte Korngrenzenoxidation verringern und die Dichte von SiO₂-Filmen erhöhen. Dichte Mikrostrukturen (wie jene, die durch Heißpressen und Sintern erhalten werden) können Sauerstoffdiffusionswege verkürzen und die Oxidationsbeständigkeit verbessern. Dotierung mit Seltenerdelementen (wie Y₂O₃) oder Oxiden kann die Haftung und das Selbstheilungsfähigkeit von SiO₂-Filmen verbessern, während manche Metalldotierungen (wie W) die Oxidationsbeständigkeit durch Änderung der Oxidationskinetik verringern können. Auch die Luftfeuchtigkeit der Arbeitsumgebung kann die Oxidationsbeständigkeit beeinflussen. In Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit können SiO₂-Schichten Hydratationsreaktionen eingehen, was die Schutzwirkung verringert. Um die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen zu verbessern, nutzen moderne MoSi₂-Heizelemente häufig Oberflächenbeschichtungen (z. B. Al₂O₃- oder ZrO₂-Beschichtungen), um die Schutzwirkung zu verstärken oder die Materialdichte durch Optimierung des Sinterprozesses zu verbessern. In der Praxis sind die Aufrechterhaltung einer stabilen Oxidationsatmosphäre und die Vermeidung häufiger Niedertemperaturzyklen entscheidend für eine längere Lebensdauer des Antioxidans.

2.5 Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit von MoSi₂-Heizelementen

Die Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit von MoSi₂-Heizelementen sind wichtige Indikatoren für deren Wärmeleitfähigkeit, die sich direkt auf Heizrate, Temperaturgleichmäßigkeit und Energieeffizienz auswirken. Die Wärmeleitfähigkeit von MoSi₂ beträgt bei Raumtemperatur etwa 45 W/(m·K) und sinkt mit steigender Temperatur allmählich auf etwa 25 W/(m·K) bei 1000 °C und weiter auf etwa 15 W/(m·K) bei 1500 °C. Obwohl die Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen abnimmt, kann MoSi₂ Wärme immer noch effektiv übertragen und eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Ofen gewährleisten, was sich für Anwendungen wie das Sintern von Keramik und das Schmelzen von Glas eignet, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit erfordern. Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit ist hauptsächlich auf die Gitterschwingung und den elektronischen Wärmeleitfähigkeitsmechanismus von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoSi₂ zurückzuführen. Bei niedrigen Temperaturen dominiert die elektronische Wärmeleitfähigkeit, während bei hohen Temperaturen eine verstärkte Phononenstreuung zu einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeit führt. Die Wärmeleitfähigkeit von MoSi₂ ($\alpha = k / (\rho \cdot c)$), wobei k die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Dichte und c die spezifische Wärmekapazität ist) ändert sich ebenfalls mit der Temperatur.

Bei Raumtemperatur beträgt die spezifische Wärmekapazität von MoSi₂ etwa 0,45 J/(g·K), die Dichte 6,24 g/cm³ und der Wärmediffusionskoeffizient etwa $1,6 \times 10^{-5}$ m²/s; bei hohen Temperaturen steigt die spezifische Wärmekapazität leicht an und der Wärmediffusionskoeffizient sinkt aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit. Zu den Faktoren, die die Wärmeleitfähigkeit und den Wärmediffusionskoeffizienten beeinflussen, gehören Materialreinheit, Mikrostruktur und Dotierungsmodifikation. Verunreinigungen (wie Fe und C) erhöhen die Phononenstreuung und verringern die Wärmeleitfähigkeit, während hochreines MoSi₂ eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist. MoSi₂ mit hoher Dichte (wie heißgepresste gesinterte Proben) weist eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf, während Proben mit hoher Porosität aufgrund der Wärmestreuung aus den Poren eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Die Auswirkungen der Dotierungsmodifikation sind komplex. Die Zugabe von Wolfram kann die Wärmeleitfähigkeit leicht erhöhen, während die Dotierung mit Seltenerdoxiden die Wärmeleitfähigkeit aufgrund von Korngrenzenstreuung verringern kann. In der Praxis müssen Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit je nach Ofentyp und -prozess optimiert werden. Beispielsweise benötigen Wärmebehandlungsöfen für Halbleiter eine höhere Wärmeleitfähigkeit, um eine schnelle Erwärmung zu erreichen, während bei großen Keramiksinteröfen mehr Wert auf eine gleichmäßige Wärmeverteilung gelegt wird. Eine Optimierung des Herstellungsprozesses (z. B. durch Erhöhung der Dichte) und eine rationale Gestaltung der Bauteilform (z. B. durch Vergrößerung der Oberfläche des heißen Endes) können die Wärmeleitfähigkeit verbessern und den Energieverlust reduzieren.

2.6 Thermoschockstabilität von MoSi₂-Heizelementen

Heizelementen aus Molybdändisilizid (MoSi₂) handelt es sich um ihre Widerstandsfähigkeit gegen Rissbildung oder Bruch infolge thermischer Spannung bei schnellen Temperaturschwankungen. Dies ist ein wichtiger Indikator zur Bewertung ihrer Zuverlässigkeit in Umgebungen mit hohen Temperaturwechseln. Die Thermoschockstabilität von MoSi₂ hängt eng mit seinem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und seiner mäßigen Wärmeleitfähigkeit zusammen. Dank dieser Eigenschaften kann MoSi₂ thermische Spannungen bei schneller Erwärmung und Abkühlung besser verteilen und die durch Temperaturgradienten verursachte innere Spannungskonzentration verringern. Die Sprödigkeit von MoSi₂ bei niedrigen Temperaturen kann unter starken Thermoschockbedingungen jedoch immer noch Mikrorisse oder Brüche verursachen, insbesondere bei häufigen Hoch- und Niedertemperaturzyklen. Die Thermoschockstabilität wirkt sich direkt auf die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von MoSi₂-Heizelementen in Anwendungen wie Keramiksinteröfen und Glasschmelzöfen aus, die schnelles Erhitzen oder Abkühlen erfordern. Die Hauptfaktoren mit Einfluss auf die Thermoschockstabilität sind Materialreinheit, Mikrostruktur und Herstellungsverfahren. Hochreines MoSi₂ kann die durch Verunreinigungen (wie Fe und Al) verursachte Schwächung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korngrenzen verringern und so das Risiko einer durch Thermoschock verursachten Rissausbreitung reduzieren. Dichtes MoSi₂ (z. B. durch Heißpressen und Sintern hergestellt) weist mikrostrukturell weniger Poren und Defekte auf und kann Wärmespannungen wirksamer ableiten, während Proben mit höherer Porosität bei Thermoschock zu lokaler Spannungskonzentration und damit zu Rissbildung neigen. Auch Dotierungsmodifikationen wirken sich erheblich auf die Thermoschockstabilität aus. So kann beispielsweise die Zugabe von Seltenerdoxid (wie Y₂O₃) oder Aluminiumoxid (Al₂O₃) die Korngrenzenfestigkeit erhöhen und die Thermoschockbeständigkeit verbessern, während manche Metalldotierungen (wie W) die Thermoschockstabilität aufgrund veränderter Wärmeausdehnungseigenschaften leicht verringern können. Die Temperaturänderungsrate und die Zyklusfrequenz in der Arbeitsumgebung sind wichtige externe Faktoren. Schnelle Thermoschockzyklen (z. B. ein plötzlicher Temperaturabfall von 1500 °C auf Raumtemperatur) verstärken die thermische Spannungsakkumulation und verkürzen die Lebensdauer der Komponenten. In der Praxis kann die Thermoschockstabilität deutlich verbessert werden, indem die Temperaturregelung im Ofen optimiert wird (z. B. durch langsames Ansteigen und Abfallen der Temperatur) und eine sinnvolle Bauteilform (z. B. durch Vermeidung scharfer Kanten zur Reduzierung der Spannungskonzentration) gewählt wird. Darüber hinaus kann eine Oberflächenbeschichtung (z. B. SiC- oder Al₂O₃ - Beschichtung) die Thermoschockbeständigkeit von MoSi₂ weiter verbessern und die Lebensdauer verlängern .

2.7 Thermoschockstabilität von MoSi₂ -Heizelementen

Die Thermoschockstabilität von MoSi₂ -Heizelementen beschreibt ihre Widerstandsfähigkeit gegen Rissbildung und Leistungseinbußen bei extremen Temperaturgradienten oder plötzlichen Thermoschocks (z. B. bei direkter Einwirkung von kalter Luft oder Flüssigkeitskühlung). Sie ist eng mit der Thermoschockstabilität verbunden, betont aber plötzliche und drastische Temperaturwechsel. Die Thermoschockstabilität von MoSi₂ profitiert von seinem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und seiner moderaten Wärmeleitfähigkeit, die dem Material eine bessere Verteilung thermischer Spannungen bei plötzlichen Temperaturwechseln ermöglichen. Aufgrund der geringen Bruchzähigkeit von MoSi₂ kann es jedoch unter extremen Thermoschockbedingungen zu Mikrorissausbreitung oder sogar makroskopischen Brüchen kommen, insbesondere im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C, wo Thermoschocks Oxidation und Pulverbildung verstärken und so zu Materialversagen führen können. Die Thermoschockstabilität ist entscheidend für den Einsatz von MoSi₂ -Heizelementen in Hochtemperaturöfen mit schnellem An- und Abschalten oder in ungleichmäßigen Heizumgebungen, wie beispielsweise bei der Glasformung oder der Metallwärmebehandlung . Zu den Faktoren, die die Thermoschockstabilität beeinflussen, zählen Materialzusammensetzung, Mikrostruktur und äußere Umgebung.

MoSi₂ mit höherer Reinheit kann die durch Verunreinigungen an Korngrenzen verursachte Spannungskonzentration reduzieren und die Thermoschockbeständigkeit verbessern. Eine dichte Mikrostruktur (wie sie beispielsweise durch Heißpressen oder Reaktionssintern entsteht) kann die durch Thermoschock verursachte Rissausbreitung wirksam reduzieren, während Proben mit höherer Porosität aufgrund höherer Defekte eine geringere Thermoschockbeständigkeit aufweisen. Dotierungsmodifikationen haben einen doppelten Effekt auf die Thermoschockbeständigkeit.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beispielsweise kann die Zugabe von Seltenerdelementen (wie La_2O_3) die Korngrenzenbindung verbessern und die Rissbeständigkeit erhöhen, während bestimmte Metalldotierungen die Stabilität aufgrund von Wärmeausdehnungsungleichgewichten verringern können. Die Intensität des Thermoschocks (z. B. durch Kaltluftereinblasung oder Flüssigkeitskühlung) und die Anzahl der Zyklen in der Arbeitsumgebung können die Leistung erheblich beeinflussen. Starke Thermoschocks können Risse im oberflächlichen SiO_2 -Schutzfilm verursachen und die Oxidationsbeständigkeit verringern. In der Praxis können eine Optimierung des Komponentendesigns (z. B. die Verwendung von U- oder W-förmigen Strukturen zur besseren thermischen Spannungsverteilung) und die Kontrolle der Thermoschockbedingungen (z. B. die Vermeidung direkter Einwirkung kalter Medien) die Thermoschockbeständigkeit verbessern. Darüber hinaus können Technologien zur Oberflächenmodifizierung (wie etwa das Beschichten mit hochfesten Keramikbeschichtungen) die Wärmeschockbeständigkeit von MoSi_2 verbessern und die Rissausbreitung verringern.

2.8 Thermisches Ermüdungsverhalten von MoSi_2 -Heizelementen

Die thermische Ermüdungsbeständigkeit von MoSi_2 -Heizelementen beschreibt ihre Widerstandsfähigkeit gegen Leistungseinbußen (wie z. B. erhöhtem Widerstand, verringerter mechanischer Festigkeit oder Verschlechterung der Oberflächenschutzschicht) bei wiederholten Hoch- und Tieftemperaturzyklen und ist ein wichtiger Indikator für die Bewertung ihrer langfristigen Zuverlässigkeit. Die thermische Ermüdungsbeständigkeit von MoSi_2 wird durch seinen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten, seine moderate Wärmeleitfähigkeit und seine Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen beeinflusst. In oxidierender Atmosphäre kann die auf der MoSi_2 -Oberfläche gebildete SiO_2 -Schutzschicht über mehrere thermische Zyklen hinweg stabil bleiben und den Materialabbau verlangsamen. Während des thermischen Ermüdungsprozesses können jedoch wiederholte thermische und mechanische Belastungen die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen verursachen, insbesondere bei MoSi_2 mit ausgeprägter Tieftemperatursprödigkeit. Diese kann zu Bauteilbrüchen oder einer elektrischen Leistungsdrift führen. Im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C können thermische Ermüdungszyklen zudem die Oxidationspulverisierung verstärken und Materialversagen beschleunigen. Die thermische Ermüdung beeinflusst direkt die Lebensdauer von MoSi_2 -Heizelementen in Anwendungen wie dem Keramikintern und der Metallwärmebehandlung, die häufige thermische Zyklen erfordern. Faktoren, die die thermische Ermüdung beeinflussen, sind unter anderem Materialreinheit, Mikrostruktur, Dotierungsmodifikation und Arbeitsumgebung.

Hochreines MoSi_2 kann die durch Verunreinigungen verursachte Schwächung der Korngrenzen verringern und das Risiko von thermischen Ermüdungsrissen reduzieren. Dichte Mikrostrukturen (wie heißgepresste Sinterproben) können zyklische thermische Spannungen wirksam zerstreuen und die thermische Ermüdungslebensdauer verbessern, während Proben mit höherer Porosität aufgrund von Spannungskonzentrationen zum Versagen neigen. Dotierungsmodifikationen haben einen wichtigen Einfluss auf das thermische Ermüdungsverhalten. Beispielsweise kann die Zugabe von Seltenerdoxid (wie Y_2O_3) oder Aluminiumoxid die Korngrenzenfestigkeit verbessern und die Rissausbreitung hemmen, während einige Metalldotierungen das thermische Ermüdungsverhalten aufgrund einer fehlenden Wärmeausdehnung verringern können. Amplitude, Frequenz und Atmosphärenart der thermischen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zyklen in der Arbeitsumgebung haben einen signifikanten Einfluss auf das thermische Ermüdungsverhalten. Beispielsweise führt in einer reduzierenden Umgebung oder im Vakuum das Versagen des SiO_2 -Schutzfilms zur Verflüchtigung von Si und beschleunigt die thermische Ermüdungsdegradation. In der Praxis kann die Optimierung der thermischen Zyklusparameter (z. B. Reduzierung der Heiz- und Abkühlrate), die Verbesserung des Komponentendesigns (z. B. Erhöhung der Heißendfestigkeit) und der Einsatz von Oberflächenbeschichtungen (z. B. SiC- oder ZrO_2 - Beschichtung) die thermische Ermüdungsbeständigkeit deutlich verbessern. Regelmäßige Inspektionen und Wartungen können die thermische Lebensdauer von MoSi_2 -Heizelementen zudem effektiv verlängern.

2.9 Oberflächenzustand des MoSi_2 -Heizelements

Heizelemente aus Molybdändisilizid (MoSi_2) haben großen Einfluss auf deren Leistung bei hohen Temperaturen, Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Die Oberflächeneigenschaften von MoSi_2 zeigen sich hauptsächlich in seinem natürlich gebildeten SiO_2 -Oxidfilm, der Oberflächenmikrostruktur und der Leistung der aufgetragenen Schutzbeschichtung. In einer oxidierenden Hochtemperaturatmosphäre über 800°C bildet sich auf der Oberfläche von MoSi_2 ein dichter SiO_2 - Schutzfilm. Dieser Film ist der Schlüssel zu seiner hervorragenden Oxidationsbeständigkeit, da er wirksam das Eindringen von Sauerstoff verhindern und das Substrat vor oxidativer Korrosion schützen kann. Der Oberflächenzustand wird jedoch nicht nur durch den Oxidfilm beeinflusst, sondern steht auch in engem Zusammenhang mit Oberflächendefekten (wie Mikrorissen, Poren), der Beschichtungsqualität und der Oberflächenentwicklung im Langzeitgebrauch. Der Oberflächenzustand von MoSi_2 bestimmt direkt seine Stabilität bei Hochtemperaturzyklen, Thermoschock und Wärmeermüdung, besonders bei anspruchsvollen Anwendungen wie Keramikintern, Glasschmelzen und Wärmebehandlung von Halbleitern.

Die Qualität des Oberflächenzustands wird von vielen Faktoren beeinflusst, darunter Materialreinheit, Herstellungsprozess und Arbeitsumgebung. Hochreines MoSi_2 kann die Schwächung der Korngrenzen durch Oberflächenverunreinigungen (wie Fe, Al) reduzieren und eine gleichmäßigere und dichtere Oberfläche erzeugen. SiO_2 - Film. Herstellungsverfahren wie Heißpressintern oder Reaktionssintern haben einen erheblichen Einfluss auf Oberflächenrauheit und -porosität. Die Oberfläche von durch Heißpressintern hergestelltem MoSi_2 ist glatter und weist weniger Defekte auf, was die Bildung eines stabilen Oxidfilms begünstigt, während reaktionsgesinterte Proben aufgrund der größeren Oberflächenporen eine geringere Schutzwirkung aufweisen können. Auch Atmosphäre, Luftfeuchtigkeit und Temperaturwechselfrequenz in der Arbeitsumgebung beeinflussen den Oberflächenzustand. Beispielsweise kann eine Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit dazu führen, dass der SiO_2 -Film hydratisiert und seine Schutzwirkung verringert, während häufige Temperaturwechsel zu Oberflächenrissen oder Abblättern der Beschichtung führen können. Um den Oberflächenzustand zu optimieren, verbessern moderne MoSi_2 -Heizelemente häufig die Oxidationsbeständigkeit und Haltbarkeit durch Oberflächenmodifizierung (z. B. Beschichtungstechnologie) oder Prozessoptimierung (z. B. Oberflächenpolieren). Die langfristige Stabilität der Oberflächenbeschaffenheit ist entscheidend für die Leistung von MoSi_2 -Heizelementen. Bei langfristigem Betrieb bei hohen Temperaturen kann die SiO_2 -Oberflächenschicht aufgrund von Si- oder MoO_3 - Verflüchtigung dünner werden, insbesondere in

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reduzierenden Umgebungen oder im Vakuum. Dadurch verringert sich die Oberflächenschutzfähigkeit erheblich. Darüber hinaus können thermische oder mechanische Belastungen, insbesondere bei Thermoschock oder thermischer Ermüdung, die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen an der Oberfläche begünstigen. In der Praxis sind regelmäßige Überprüfungen der Oberflächenbeschaffenheit, die Optimierung der Heiz- und Kühlraten sowie der Einsatz von Schutzbeschichtungen wirksame Maßnahmen zur Erhaltung der Oberflächenleistung von MoSi₂-Heizelementen. Mit der Weiterentwicklung der Oberflächentechnik wird die Optimierung der MoSi₂-Oberflächenbeschaffenheit zukünftig zu einem wichtigen Schritt zur Verbesserung der Gesamtleistung.

2.9.1 Häufig verwendete Schutzbeschichtungsarten

Um die Oxidationsbeständigkeit, Thermoschockstabilität und Wärmeermüdungsleistung von Heizelementen aus Molybdändisilizid weiter zu verbessern, wird bei MoSi₂-Elementen häufig die Oberflächenbeschichtungstechnologie eingesetzt. Zu den gängigen Schutzbeschichtungen gehören Oxidbeschichtungen, Carbidbeschichtungen und Verbundbeschichtungen, die jeweils auf bestimmte Leistungsanforderungen und Anwendungsumgebungen ausgerichtet sind. Oxidbeschichtungen sind die gängigste Wahl, wobei Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Zirkoniumoxid (ZrO₂) aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts, ihrer chemischen Stabilität und ihres niedrigen Sauerstoffdiffusionskoeffizienten bevorzugt werden. Al₂O₃-Beschichtungen werden durch Plasmaspritzen oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD) aufgetragen, um bei hohen Temperaturen eine dichte Schutzschicht zu bilden, die die Oxidationsbeständigkeit und Thermoschockbeständigkeit von MoSi₂ deutlich verbessert, insbesondere in oxidierenden Atmosphären von 1500–1800 °C.

ZrO₂-Beschichtungen werden aufgrund ihrer hervorragenden Wärmedämmeigenschaften häufig in Anwendungen eingesetzt, die eine hohe Thermoschockstabilität erfordern, wie beispielsweise Hochtemperatur-Luftfahrtkomponenten. Karbidbeschichtungen bestehen hauptsächlich aus Siliziumkarbid (SiC), da deren Wärmeausdehnungskoeffizienten gut mit denen des MoSi₂-Substrats übereinstimmen, wodurch die thermische Spannung zwischen der Beschichtung und dem Substrat verringert und das Risiko von Abplatzungen reduziert werden kann. SiC-Beschichtungen werden durch Plasmaspritzen oder Reaktionssintern aufgebracht. Sie verbessern nicht nur die Oxidationsbeständigkeit, sondern auch die Verschleißfestigkeit der Oberfläche, sodass sie sich für den Einsatz in Umgebungen mit hohem Verschleiß wie Keramikofen eignen. In den letzten Jahren standen Verbundbeschichtungen im Mittelpunkt der Entwicklung, wie beispielsweise Al₂O₃-SiC- oder ZrO₂-Y₂O₃-Verbundbeschichtungen, die die Vorteile mehrerer Materialien kombinieren, um einen umfassenderen Schutz zu bieten. Beispielsweise vereinen Al₂O₃-SiC-Verbundbeschichtungen die hohe Oxidationsbeständigkeit von Al₂O₃ mit der Thermoschockbeständigkeit von SiC und eignen sich daher für MoSi₂-Komponenten unter komplexen Arbeitsbedingungen.

Die Wahl des Beschichtungstyps muss entsprechend der spezifischen Anwendungsumgebung optimiert werden. Beispielsweise benötigen Wärmebehandlungsöfen für Halbleiter hochreine Beschichtungen, um Verunreinigungen zu vermeiden, während bei Glasschmelzöfen die Temperaturwechselbeständigkeit und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit der Beschichtung stärker im Vordergrund stehen. Auch der Herstellungsprozess der Beschichtung hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistung.

Plasmaspritzen ermöglicht dicke und dichte Beschichtungen, die für industrielle Anwendungen geeignet sind. Das CVD-Verfahren hingegen ermöglicht gleichmäßigere und dünnere Beschichtungen mit höherer Haftung, die für hohe Präzisionsanforderungen geeignet sind. Darüber hinaus müssen Dicke und Gleichmäßigkeit der Beschichtung präzise kontrolliert werden.

Eine zu dicke Beschichtung kann aufgrund von thermischen Spannungsunterschieden reißen, und eine zu dünne Beschichtung bietet möglicherweise keinen ausreichenden Schutz. In Zukunft dürfte die Entwicklung nanostrukturierter Beschichtungen und mehrschichtiger Verbundbeschichtungen die Oberflächenleistung von MoSi₂-Heizelementen weiter verbessern.

2.9.2 Untersuchung von Oberflächenrissen und Beschichtungshaftung

Oberflächenrisse und die Haftung der Beschichtung von MoSi₂-Heizelementen sind entscheidende Faktoren für deren Oberflächenzustand und langfristige Zuverlässigkeit. Oberflächenrisse werden üblicherweise durch thermische Spannung, mechanische Spannung oder Herstellungsfehler verursacht, insbesondere bei Thermoschock oder thermischer Ermüdung. Aufgrund der Kaltversprödung von MoSi₂ (Bruchzähigkeit ca. 2–3 MPa·m^{1/2}) können bei schnellen Temperaturschwankungen oder mechanischen Vibrationen leicht Mikrorisse entstehen. Diese Risse können sich entlang der Korngrenzen ausbreiten und letztendlich zum Bruch des Bauteils oder zum Versagen der SiO₂-Schutzschicht führen. Im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C können Oberflächenrisse Oxidation und Pulverbildung verschlimmern und so den Oberflächenzustand weiter verschlechtern. Die Haftung der Beschichtung bestimmt, ob die Schutzschicht über längere Zeit am MoSi₂-Substrat haften kann, um Abblättern oder Rissbildung zu verhindern. Beschichtungen mit unzureichender Haftung neigen dazu, bei Hochtemperaturzyklen abzufallen, wodurch das Substrat Oxidations- oder Korrosionsumgebungen ausgesetzt wird und die Lebensdauer der Komponente verkürzt wird. Die Entstehung von Oberflächenrissen wird von vielen Faktoren beeinflusst.

Die Materialreinheit ist ein wichtiger Faktor. Hochreines MoSi₂ kann Korngrenzenverunreinigungen reduzieren und die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung verringern. Die Mikrostruktur hat eine signifikante Wirkung auf die Rissausbreitung. Dichtes MoSi₂ (z. B. durch Heißpressen gesintert) hat weniger Poren und Defekte, wodurch die Rissausbreitung effektiv gehemmt werden kann, während Proben mit höherer Porosität aufgrund von Spannungskonzentration zur Rissbildung neigen. Dotierungsmodifikationen können die Rissbeständigkeit der Oberfläche verbessern. Beispielsweise kann die Zugabe von Seltenerdoxiden (wie Y₂O₃) die Korngrenzenbindungskraft erhöhen und die Rissausbreitung verringern, während die Dotierung bestimmter Metalle (wie W) das Risiko von Rissen aufgrund von Wärmeausdehnungsabweichungen erhöhen kann. Auch der Vorbereitungsprozess und die Oberflächenbehandlung sind entscheidend. Durch Oberflächenpolieren können anfängliche Defekte reduziert werden, während raue Oberflächen zu Rissbildungspunkten werden können.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Forschung zur Beschichtungshaftung konzentriert sich hauptsächlich auf Grenzflächeneigenschaften, Anpassung der Wärmeausdehnung und den Beschichtungsprozess. Der Unterschied im Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen MoSi₂ und Beschichtungen (wie Al₂O₃ und SiC) verursacht Wärmespannungen an der Grenzfläche und beeinträchtigt die Haftung. Beispielsweise sind SiC-Beschichtungen üblicherweise besser als Al₂O₃-Beschichtungen, da ihre Wärmeausdehnungskoeffizienten näher an denen von MoSi₂ liegen. Grenzflächenbehandlungstechnologien (wie das Design der Übergangsschicht) können die Haftung deutlich verbessern. Beispielsweise kann das Hinzufügen einer SiC-Übergangsschicht zwischen dem MoSi₂-Substrat und der Al₂O₃-Beschichtung die Wärmespannungsfehlanpassung verringern. Der Beschichtungsprozess hat ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die Haftung. Die durch Plasmaspritzen erzeugte Beschichtung weist eine starke Haftung auf, kann aber Mikroporen aufweisen, während die durch das CVD-Verfahren erzeugte Beschichtung gleichmäßiger ist und eine höhere Haftung aufweist. Temperaturzyklen und Umweltfaktoren (wie Feuchtigkeit und Atmosphäre) stellen die Haftung zusätzlich auf die Probe. Eine Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit kann chemische Reaktionen an der Beschichtungsgrenzfläche verursachen und die Haftung verringern. Studien haben gezeigt, dass durch die Optimierung der Beschichtungsdicke und des Schnittstellendesigns (z. B. durch Gradientenbeschichtung) die Haftung deutlich verbessert und das Risiko von Rissen und Abblättern verringert werden kann.

2.9.3 Bildung und Schutz des SiO₂-Oxidfilms auf der Oberfläche

Der SiO₂-Oxidfilm auf der Oberfläche des MoSi₂-Heizelements ist der Kern seiner Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, die seine Langzeitstabilität und Lebensdauer in oxidierender Atmosphäre bestimmt. Oberhalb von 800 °C reagiert die MoSi₂-Oberfläche ($2\text{MoSi}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3 + 4\text{SiO}_2$) und bildet einen dichten SiO₂-Film. Dieser Film hat einen niedrigen Sauerstoffdiffusionskoeffizienten und eine gute Selbstheilungsfähigkeit, wodurch das Eindringen von Sauerstoff in das Substrat wirksam verhindert und MoSi₂ vor weiterer Oxidationserosion geschützt wird. Im Bereich von 1200–1850 °C bleibt der SiO₂-Film stabil, sodass das MoSi₂-Heizelement in oxidierender Atmosphäre bei hohen Temperaturen lange arbeiten kann. Die maximale Betriebstemperatur kann 1850 °C erreichen und wird häufig beim Sintern von Keramik, beim Glasschmelzen und anderen Prozessen eingesetzt. Im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C oxidiert MoSi₂ jedoch zu einer nicht schützenden Mischung aus MoO₃ und SiO₂. Dies führt zu einer losen Filmschicht und Materialpulverisierung, was den Oberflächenschutz erheblich beeinträchtigt. Um „Pest“ zu vermeiden, wird dieser Temperaturbereich in der Praxis meist schnell überschritten.

SiO₂-Filme werden von vielen Faktoren beeinflusst. Die Reinheit des Materials ist entscheidend für die Qualität des Films. Hochreines MoSi₂ kann einen dichteren und gleichmäßigeren SiO₂-Film erzeugen, während Verunreinigungen (wie Fe und Al) Filmdefekte verursachen und die Schutzwirkung verringern können. Auch die Mikrostruktur spielt eine wichtige Rolle. Dichtes MoSi₂ (z. B. durch Heißpressen gesintert) hat weniger Oberflächenporen, was die Bildung eines zusammenhängenden SiO₂-Films begünstigt, während Proben mit hoher Porosität eine ungleichmäßige Filmschicht bilden und die Oxidationsbeständigkeit verringern können. Dotierungsmodifikationen haben einen doppelten Effekt auf

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Leistung von SiO_2 -Filmen. Seltenerdoxide (wie Y_2O_3) können die Haftung und Stabilität des Films verbessern, während bestimmte Metalldotierungen (wie W) die Qualität des Films aufgrund von Änderungen der Oxidationskinetik verringern können. Die Atmosphäre und Feuchtigkeit in der Arbeitsumgebung haben einen erheblichen Einfluss auf die Bildung und den Schutz von SiO_2 - Filmen. In einer Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit kann der SiO_2 -Film Hydratationsreaktionen durchlaufen und eine lockere Silikatstruktur bilden, was seine Schutzwirkung verringert. In einer reduzierenden Umgebung oder im Vakuum kann sich der SiO_2 -Film nicht bilden oder wird zerstört, was zur Verflüchtigung des Si und zur Verschlechterung des Substrats führt.

Der SiO_2 -Film ist der Schlüssel zur Leistung des MoSi_2 -Heizelements. Während des Langzeitbetriebs bei hohen Temperaturen kann der SiO_2 - Film durch die Verflüchtigung von Si oder MoO_3 dünner werden , insbesondere bei extremen Temperaturen um 1850°C kann die Filmschicht teilweise beschädigt werden. Häufige Wärmezyklen können außerdem dazu führen, dass die Filmschicht reißt oder sich ablöst, wodurch die Schutzwirkung verringert wird. Um die Stabilität des SiO_2 - Films zu verbessern, werden bei modernen MoSi_2 -Elementen häufig Oberflächenmodifizierungstechnologien eingesetzt, wie etwa eine Voroxidationsbehandlung zur Bildung einer anfänglichen dichten Filmschicht. Oder es werden Schutzbeschichtungen (wie Al_2O_3 oder SiC) hinzugefügt , um die Thermoschockbeständigkeit und Haltbarkeit des Films zu verbessern. In der Praxis sind die Aufrechterhaltung einer stabilen oxidierenden Atmosphäre, die Vermeidung von Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit und die Optimierung der Wärmezyklusparameter wirksame Maßnahmen, um die Schutzleistung des SiO_2 - Films aufrechtzuerhalten. Zukünftige Forschungsrichtungen könnten sich auf die Optimierung der Bildungskinetik des SiO_2 -Films und die Entwicklung zusammengesetzter Schutzschichten konzentrieren, um die Oberflächenleistung und Lebensdauer von MoSi_2 -Heizelementen weiter zu verbessern .

2.10 Oberflächenprobleme von MoSi_2 -Heizelementen und deren Lösungen

Heizelementen aus Molybdändisilizid (MoSi_2) sind Oberflächenrisse, Oxidationsschäden, Abbau des SiO_2 -Schutzfilms und Abblättern der Beschichtung wichtige Faktoren, die deren Leistung bei hohen Temperaturen und Lebensdauer beeinträchtigen. Diese Probleme treten insbesondere bei Hochtemperaturzyklen, Thermoschocks oder in speziellen Atmosphären auf und können zu einer Verschlechterung der Komponentenleistung oder sogar zum Ausfall führen. Oberflächenrisse werden normalerweise durch thermische oder mechanische Beanspruchung oder Herstellungsfehler verursacht. Aufgrund der Sprödigkeit von MoSi_2 bei niedrigen Temperaturen können bei schnellen Temperaturänderungen oder mechanischen Vibrationen leicht Mikrorisse entstehen, die sich dann zu Makrorissen ausweiten und so die Oxidationsbeständigkeit und mechanische Festigkeit schwächen. Im Temperaturbereich von 400 bis 700°C oxidiert die Oberfläche von MoSi_2 und es entsteht eine nicht schützende Mischung aus MoO_3 und SiO_2 , die zur Materialpulverisierung und schweren Schäden an der Oberfläche führt. Bei langfristigem Hochtemperaturbetrieb kann die SiO_2 -Schutzschicht aufgrund der Si- oder MoO_3 - Verflüchtigung dünner werden. Insbesondere bei extremen Temperaturen nahe 1850°C kann die Schicht teilweise beschädigt werden, was die Schutzwirkung verringert. Die aufgetragene

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schutzschicht kann sich aufgrund von Wärmeausdehnungsfehlern oder unzureichender Grenzflächenhaftung ablösen und das Substrat oxidativen oder korrosiven Einflüssen aussetzen.

Oberflächenrisse lassen sich durch optimierte Herstellungsverfahren und Materialmodifikationen lösen. Das Heißpresssinterverfahren kann die Dichte von MoSi_2 erhöhen, Oberflächenporen und -defekte reduzieren und so die Wahrscheinlichkeit von Rissbildung verringern. Dotierung mit Seltenerdoxiden (wie Y_2O_3) oder Aluminiumoxid kann die Korngrenzenfestigkeit erhöhen und die Rissausbreitung hemmen. Oberflächenpolitur kann anfängliche Defekte reduzieren und die Spannungskonzentration verringern. Um der Oxidation durch Plaque entgegenzuwirken, wird in der Praxis die Temperatur üblicherweise schnell auf 400–700 °C erhöht, um die Bildung nicht schützender Oxide zu verkürzen. Zusätzlich kann durch eine Voroxidation ein dichter SiO_2 -Film auf der Oberfläche erzeugt werden, der die Beständigkeit gegen Plaque erhöht. Um die Stabilität des SiO_2 -Films zu erhalten, kann die Haftung durch Zugabe von Seltenerdelementen verbessert oder eine Verbundbeschichtung verwendet werden, um die Thermoschockbeständigkeit und Haltbarkeit zu erhöhen. Um das Problem des Ablösens der Beschichtung zu lösen, können optimierte Beschichtungsverfahren (z. B. chemische Gasphasenabscheidung oder Plasmaspritzen) und die Gestaltung der Grenzfläche (z. B. das Hinzufügen einer SiC-Übergangsschicht) die Bindungsfestigkeit verbessern und die thermische Spannungsfehlانpassung verringern. In der Praxis sind die Kontrolle der Heiz- und Kühlraten, die Vermeidung hoher Luftfeuchtigkeit und die regelmäßige Überprüfung der Oberflächenbeschaffenheit wirksame Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von MoSi_2 -Heizelementen.

Zukünftig könnte sich die Lösung von Oberflächenproblemen auf die Entwicklung nanostrukturierter Beschichtungen und mehrschichtiger Verbundbeschichtungen konzentrieren, um die Stabilität von SiO_2 -Filmen und die Haftfestigkeit der Beschichtungen weiter zu verbessern. Darüber hinaus können mithilfe intelligenter Überwachungstechnologie Oberflächenzustände in Echtzeit erfasst, Betriebsparameter rechtzeitig angepasst und die Lebensdauer der Komponenten verlängert werden. Die umfassende Anwendung dieser Methoden kann die Oberflächenprobleme von MoSi_2 -Heizelementen wirksam lindern und deren Zuverlässigkeit in Hochtemperaturanwendungen wie Keramiksintern und Glasschmelzen verbessern.

2.11 Faktoren, die die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 -Heizelementen beeinflussen

Die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 -Heizelementen wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, spezifische Wärmekapazität und Temperaturleitfähigkeit wirken sich direkt auf ihre Heizleistung, Temperaturgleichmäßigkeit und Thermoschockbeständigkeit aus. Diese Eigenschaften werden von den intrinsischen Eigenschaften des Materials (wie Zusammensetzung und Mikrostruktur) und der externen Umgebung (wie Betriebstemperatur und Atmosphäre) beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeit von MoSi_2 beträgt bei Raumtemperatur etwa 45 W/(m·K) und sinkt bei hohen Temperaturen (1500°C) auf etwa 15 W/(m·K), was eine gute Wärmeübertragungskapazität gewährleistet, aber die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur beeinträchtigt die schnelle Heizleistung. Sein Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt etwa $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, was gut zum keramischen Matrixmaterial passt und thermische Spannungen verringert, aber seine Sprödigkeit bei

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

niedrigen Temperaturen führt dazu, dass es bei Thermoschock leicht reißt. Die spezifische Wärmekapazität beträgt etwa $0,45 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$, steigt bei hohen Temperaturen leicht an und beeinflusst die Temperaturleitfähigkeit. Diese thermodynamischen Eigenschaften bestimmen gemeinsam die Leistung von MoSi_2 in Hochtemperaturöfen.

Die Materialreinheit ist ein Schlüsselfaktor mit Auswirkungen auf die thermodynamischen Eigenschaften. Hochreines MoSi_2 kann die durch Verunreinigungen (wie Fe und C) verursachte Phononenstreuung verringern, die Wärmeleitfähigkeit verbessern, Korngrenzendefekte reduzieren und die Wärmespannungsverteilung verbessern. Die Mikrostruktur wirkt sich erheblich auf die thermodynamischen Eigenschaften aus. Dichtes MoSi_2 (z. B. durch Heißpressen und Sintern hergestellt) weist eine höhere Wärmeleitfähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit auf, während Proben mit hoher Porosität aufgrund von Wärmestreuung und Spannungskonzentration eine schlechte Leistung aufweisen. Durch Dotierung können die thermodynamischen Eigenschaften optimiert werden. Beispielsweise kann die Zugabe von W die Wärmeleitfähigkeit leicht erhöhen, aber die Wärmespannung aufgrund einer fehlenden Anpassung der Wärmeausdehnung erhöhen; die Dotierung mit Seltenerdoxid (wie Y_2O_3) kann die Korngrenzenfestigkeit erhöhen und die Temperaturwechselbeständigkeit verbessern. Herstellungsverfahren wie Heißpressen oder Reaktionssintern haben ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die thermodynamischen Eigenschaften. Proben mit hoher Dichte weisen normalerweise eine bessere Wärmeleitfähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit auf.

Der Einfluss der äußeren Umgebung auf die thermodynamischen Eigenschaften ist nicht zu vernachlässigen. Betriebstemperatur und -atmosphäre beeinflussen Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung und Thermoschockbeständigkeit direkt, indem sie den Oberflächenzustand und die innere Struktur des Materials verändern. In der Praxis können optimierte Komponentendesigns (z. B. durch Vergrößerung der Hot-End-Oberfläche) und die Steuerung der Betriebsbedingungen (z. B. Stabilisierung des Temperaturgradienten) die thermodynamische Leistung verbessern und die Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen wie Keramiksintern und Halbleiter-Wärmebehandlung erfüllen.

2.11.1 Einfluss der Betriebstemperatur

Die Arbeitstemperatur ist der Hauptfaktor, der die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 - Heizelementen beeinflusst und direkt die Leistung ihrer Wärmeleitfähigkeit, ihres Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihrer Thermoschockbeständigkeit bestimmt. Im Bereich von Raumtemperatur bis 1000°C sinkt die Wärmeleitfähigkeit von MoSi_2 von etwa $45 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ auf etwa $25 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, hauptsächlich aufgrund der verstärkten Phononenstreuung und des reduzierten Beitrags der elektronischen Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen. Im Hochtemperaturbereich von $1000\text{--}1850^\circ\text{C}$ sinkt die Wärmeleitfähigkeit weiter auf etwa $15 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, aber es kann immer noch die Wärmeübertragungsanforderungen von Anwendungen wie Keramiksintern und Glasschmelzen erfüllen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient steigt bei hohen Temperaturen leicht an, bleibt aber im Bereich von $8\text{--}9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, was gut zur Keramikmatrix passt und die Wärmespannung reduziert. Allerdings ist die Bruchzähigkeit von MoSi_2 bei hohen Temperaturen gering ($2\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) und bei schnellem Erhöhen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Senken der Temperatur entstehen aufgrund von Wärmespannungen leicht Mikrorisse, welche die Stabilität der thermodynamischen Eigenschaften beeinträchtigen. Der Betrieb bei hohen Temperaturen beeinträchtigt auch die Bildung und Stabilität des SiO_2 -Schutzfilms. Über $800\text{ }^\circ\text{C}$ schützt der dichte SiO_2 -Film das Substrat wirksam, aber bei extremen Temperaturen um $1850\text{ }^\circ\text{C}$ kann die Verflüchtigung von Si und MoO_3 dazu führen, dass die Filmschicht dünner wird und die Langzeitstabilität der thermodynamischen Eigenschaften verringert wird. Im „Pest“-Temperaturbereich von $400\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ führt die Entstehung nicht schützender Oxide dazu, dass das Material pulverisiert wird, was die Wärmeleitfähigkeit und die Thermoschockbeständigkeit weiter verschlechtert. Um die negativen Auswirkungen der Betriebstemperatur zu reduzieren, kann in der Praxis die Stabilität der thermodynamischen Eigenschaften durch Optimierung der Heiz- und Kühlraten, die Bildung einer SiO_2 -Voroxidation und das Aufbringen einer Schutzschicht (z. B. Al_2O_3 oder SiC) verbessert werden. Im Hinblick auf das Komponentendesign kann die Verwendung von U- oder W-Strukturen thermische Spannungen abbauen und die thermodynamische Leistung bei hohen Temperaturen verbessern.

2.11.2 Einfluss der Atmosphäre

Die Atmosphäre beeinflusst die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 -Heizelementen maßgeblich, vor allem durch Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit und der inneren Struktur des Materials. In oxidierender Atmosphäre kann der auf der MoSi_2 -Oberfläche gebildete SiO_2 -Schutzfilm die thermodynamischen Eigenschaften effektiv stabil halten. Der niedrige Sauerstoffdiffusionskoeffizient des SiO_2 -Films gewährleistet langfristig gleichbleibende Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizienten und schützt das Substrat vor oxidativer Korrosion. In einer oxidierenden Atmosphäre mit hoher Luftfeuchtigkeit kann der SiO_2 -Film jedoch hydratisieren und eine lockere Silikatstruktur bilden, die Wärmeleitfähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit verringert. In reduzierender Atmosphäre (wie H_2) oder im Vakuum kann sich der SiO_2 -Film nicht bilden oder wird zerstört. Dies führt zur Verflüchtigung des Si und zur Substratzersetzung, einer deutlichen Verringerung der Wärmeleitfähigkeit und erhöhten thermischen Spannungen, die zu Rissen führen und die thermodynamischen Eigenschaften stark beeinträchtigen können.

Inerte Atmosphären (wie Ar, N_2) wirken sich kaum auf die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 aus, bei Langzeitbetrieb kann sich jedoch aufgrund vorhandener Spuren von Sauerstoff langsam ein SiO_2 -Film bilden, wodurch die Wärmeleitfähigkeit leicht verändert wird. Verunreinigungen in der Atmosphäre (wie Sulfide und Chloride) können mit der Oberfläche von MoSi_2 reagieren und nicht schützende Verbindungen bilden, wodurch die Stabilität der thermodynamischen Eigenschaften verringert wird. Um dem Einfluss der Atmosphäre standzuhalten, sollte in praktischen Anwendungen eine stabile oxidierende Atmosphäre bevorzugt werden, um hohe Luftfeuchtigkeit oder reduzierende Umgebungen zu vermeiden. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) können die Korrosionsbeständigkeit verbessern und die thermodynamischen Eigenschaften erhalten. Zudem sind eine regelmäßige Überprüfung der Reinheit der Atmosphäre und des Oberflächenzustands der Komponente sowie eine Optimierung der Betriebsparameter (wie die Kontrolle der Luftfeuchtigkeit)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wirksame Maßnahmen, um die Stabilität der thermodynamischen Eigenschaften des MoSi₂ - Heizelements sicherzustellen.

2.11.3 Einfluss der Heiz-/Kühlfrequenz

hat einen erheblichen Einfluss auf die thermodynamischen Eigenschaften von Heizelementen aus Molybdändisilizid (MoSi₂), insbesondere bei Anwendungen, die häufige Temperaturwechselbeanspruchung erfordern, wie z. B. Keramiksinteröfen, Glasglühöfen und Geräte zur Wärmebehandlung von Metall. Die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi₂, einschließlich Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient und Temperaturleitfähigkeit, werden durch Wärmespannung während schneller Heiz-/Kühlzyklen auf die Probe gestellt. Häufige Temperaturwechselbeanspruchung führt dazu, dass wiederholt Wärmespannungen auf die Mikrostruktur von MoSi₂ einwirken, was die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen auslösen kann, insbesondere aufgrund seiner Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen (Bruchzähigkeit von etwa 2-3 MPa·m^{1/2}), wodurch die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturschockbeständigkeit verringert werden. Darüber hinaus kann im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C eine schnelle thermische Zyklisierung die Bildung nicht schützender Oxide (eine Mischung aus MoO₃ und SiO₂) verschlimmern, was zu einer Pulverisierung der Oberfläche und einer weiteren Verschlechterung der thermodynamischen Eigenschaften führt.

Die Wirkung der Heiz-/Kühlfrequenz hängt eng mit dem Temperaturbereich und der Zyklusrate zusammen. Bei groß angelegten Zyklen von hohen Temperaturen (1200–1850 °C) zu niedrigen Temperaturen (Raumtemperatur oder 400–700 °C) ist die thermische Spannung stärker, was zu Rissen oder Abblättern der SiO₂-Schutzschicht führen und so die Oxidationsbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit schwächen kann. Hochfrequente Zyklen (wie mehrmaliges Heizen und Abkühlen pro Stunde) beschleunigen die Ermüdungsschädigung der Mikrostruktur und verkürzen die Lebensdauer des Bauteils, während niederfrequente Zyklen (wie einmal pro Tag) relativ wenig Einfluss auf die thermodynamischen Eigenschaften haben. Materialreinheit und Mikrostruktur sind entscheidend für die Toleranz gegenüber thermischen Zyklen. Hochreines MoSi₂ kann die durch Verunreinigungen verursachte Schwächung der Korngrenzen verringern und das Risiko einer Rissausbreitung senken. Dichte Mikrostrukturen (wie sie durch Heißen und Sintern hergestellt werden) können thermische Spannungen wirksam ableiten und die Wärmeermüdungsbeständigkeit verbessern, während Proben mit höherer Porosität aufgrund von Spannungskonzentrationen zur Rissbildung neigen. Auch Dotierungsmodifikationen können die Temperaturwechselbeständigkeit verbessern. Beispielsweise kann die Zugabe von Seltenerdoxiden (wie Y₂O₃) die Korngrenzenfestigkeit erhöhen und die Rissausbreitung hemmen. Um die negativen Auswirkungen der Heiz-/Kühlfrequenz zu mildern, können in der Praxis verschiedene Optimierungsmaßnahmen ergriffen werden. Durch die Kontrolle der Heiz- und Kühlraten kann die Ansammlung thermischer Spannungen verringert und ein schnelles Durchlaufen des Temperaturbereichs von 400–700 °C vermieden werden, um eine „Pest“-Oxidation zu verhindern. Oberflächenbeschichtungen (wie Al₂O₃ oder SiC) können die Thermoschockbeständigkeit und die Stabilität von SiO₂-Filmen verbessern und so die thermische Lebensdauer verlängern. Durch die Optimierung des Komponentendesigns (z. B. durch die Verwendung von U- oder W-förmigen Strukturen)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

können thermische Spannungen ableiten und die Rissbildung verringern. Durch regelmäßiges Überprüfen des Oberflächenzustands und Anpassen der Thermozyklusparameter kann die Stabilität der thermodynamischen Eigenschaften des MoSi₂ -Heizelements außerdem wirksam verlängert werden, um den Anforderungen hochfrequenter Thermozyklusanwendungen gerecht zu werden .

2.11.4 Einfluss der Betriebsspannung

Die Betriebsspannung ist ein wichtiger externer Faktor, der die thermodynamische Leistung und Betriebsstabilität von MoSi₂ -Heizelementen beeinflusst und in direktem Zusammenhang mit der Heizleistung, der Temperaturverteilung und der Lebensdauer steht. Der spezifische Widerstand von MoSi₂ weist einen positiven Temperaturkoeffizienten auf, der bei Raumtemperatur etwa $2,0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ beträgt und bei 1000 °C $\Omega \cdot \text{cm}$ auf etwa $4,0 \times 10^{-5}$ und bei 1500 °C $\Omega \cdot \text{cm}$ auf etwa $4,5 \times 10^{-5}$ ansteigt. Diese Eigenschaft ermöglicht MoSi₂ eine adaptive Leistungsanpassung bei unterschiedlichen Spannungen, kann sich jedoch bei hoher Spannung oder instabiler Spannung negativ auf die thermodynamischen Eigenschaften auswirken. Hohe Spannung führt zu einer schnellen Erwärmung des Bauteils und erzeugt große thermische Spannungen, insbesondere bei MoSi₂ , das bei niedrigen Temperaturen stark spröde ist, was zu Mikrorissen führen und die Wärmeleitfähigkeit sowie die Temperaturwechselbeständigkeit verringern kann. Darüber hinaus kann hohe Spannung zu lokaler Überhitzung führen, die Verflüchtigung von Si oder MoO₃ des oberflächlichen SiO₂ -Schutzfilms beschleunigen , den Film dünner machen und die Oxidationsbeständigkeit schwächen.

Spannungsschwankungen sind ebenfalls ein wichtiger Faktor mit Auswirkungen auf die thermodynamischen Eigenschaften. Häufige Spannungsschwankungen können zu Strominstabilitäten führen, die eine ungleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb des Bauteils zur Folge haben, die thermische Spannungskonzentration erhöhen und in der Folge mikrostrukturelle Schäden oder Oberflächenrisse verursachen. Langfristiger Hochspannungsbetrieb kann die Alterung von MoSi₂ beschleunigen , beispielsweise durch Widerstandsdrift oder Kornwachstum, und die Temperaturleitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit verringern. Materialreinheit und Mikrostruktur spielen eine wichtige Rolle für die Toleranz gegenüber Spannungseffekten. Hochreines MoSi₂ kann lokale Widerstandsungleichmäßigkeiten durch Verunreinigungen reduzieren und das Überhitzungsrisiko verringern. Dichte Mikrostrukturen (wie jene, die durch Heißpressen und Sintern hergestellt werden) können die Fähigkeit zur Verteilung thermischer Spannungen verbessern und die Widerstandsfähigkeit gegen Spannungsschwankungen erhöhen. Dotierungsmodifikationen (wie Zugabe von W oder Nb) können den Widerstand optimieren und die elektrothermische Stabilität unter Spannung verbessern, die Oxidationsbeständigkeit muss jedoch ausgeglichen werden.

Um die negativen Auswirkungen der verwendeten Spannung zu minimieren, muss die Spannungsregelungsstrategie in praktischen Anwendungen optimiert werden. Ein stabiles Stromversorgungssystem und ein Spannungsregler können Schwankungen reduzieren und eine gleichmäßige Erwärmung gewährleisten. Ein widerstandsoptimiertes Design des kalten und heißen Endes (z. B. durch Dotierung des kalten Endes mit einem hochleitfähigen Material) kann das Risiko lokaler Überhitzung verringern und die Energieeffizienz verbessern. Das Aufbringen einer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schutzbeschichtung (z. B. SiC oder Al_2O_3) kann die Oxidationsbeständigkeit und Wärmespannungstoleranz der Oberfläche verbessern und die Lebensdauer des Bauteils verlängern. Darüber hinaus können eine regelmäßige Überwachung der Eingangsspannung und des Oberflächenzustands des Bauteils in Kombination mit einer geeigneten Heizkurvengestaltung (z. B. langsames Aufheizen) die thermodynamischen Eigenschaften des MoSi_2 -Heizelements effektiv aufrechterhalten und die Anforderungen hochpräziser Anwendungen wie Keramiksintern und Halbleiter-Wärmebehandlung erfüllen.

2.11.5 Einfluss der Stromdichte

hat einen wichtigen Einfluss auf die thermodynamischen Eigenschaften und die Langzeitstabilität von MoSi_2 -Heizelementen und bestimmt direkt deren Heizleistung, Temperaturverteilung und Materialalterungsverhalten. Als Widerstandsheizmaterial ist die Leistungsabgabe von MoSi_2 proportional zum Quadrat der Stromdichte ($P = I^2 R$), daher erhöht eine hohe Stromdichte die Temperatur des Elements erheblich und beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung und Thermoschockbeständigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit von MoSi_2 ist bei hohen Temperaturen (etwa $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei 1500°C) niedriger als bei Zimmertemperatur ($45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). Eine hohe Stromdichte kann zu lokaler Überhitzung und großer Wärmespannung führen, insbesondere bei MoSi_2 mit erheblicher Niedertemperatursprödigkeit, die leicht Mikrorisse oder Risse im oberflächlichen SiO_2 -Schutzfilm verursachen und so die thermodynamischen Eigenschaften verschlechtern. Darüber hinaus kann eine hohe Stromdichte die Verflüchtigung von Si oder MoO_3 des SiO_2 -Films beschleunigen, wodurch der Film dünner wird und die Oxidationsbeständigkeit geschwächt wird, insbesondere bei extremen Temperaturen nahe 1850°C . Die Gleichmäßigkeit der Stromdichteverteilung ist für die thermodynamische Leistung entscheidend. Eine ungleichmäßige Stromdichte (z. B. eine lokal hohe Stromdichte aufgrund von Konstruktionsfehlern oder schlechtem Kontakt) führt zu erhöhten Temperaturgradienten, erhöhter thermischer Spannung, erhöhtem Rissrisiko und verringerter Temperaturleitfähigkeit. Langfristiger Betrieb mit hoher Stromdichte kann zu einer Drift des spezifischen Widerstands oder einer mikrostrukturellen Verschlechterung von MoSi_2 (z. B. Kornwachstum oder Schwächung der Korngrenzen) führen, was die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit weiter beeinträchtigt. Materialreinheit und Mikrostruktur wirken sich erheblich auf die Stromdichtetoleranz aus. Hochreines MoSi_2 kann durch Verunreinigungen verursachte lokale Widerstandsungleichmäßigkeiten reduzieren und das Überhitzungsrisiko verringern. Dichte Mikrostrukturen (z. B. durch Heißpressen und Sintern) können die Fähigkeit zur thermischen Spannungsverteilung verbessern und die Beständigkeit gegen Stromdichteschocks erhöhen. Dotierungsmodifikationen (z. B. Zugabe von Y_2O_3) können die Korngrenzenstruktur optimieren, den spezifischen Widerstand stabilisieren und die thermodynamischen Eigenschaften unter hoher Stromdichte verbessern.

Um die negativen Auswirkungen der verwendeten Stromdichte zu mildern, müssen das Komponentendesign und die Betriebsbedingungen in praktischen Anwendungen optimiert werden. U- oder W-förmige Komponenten mit gleichmäßigem Querschnitt können eine gleichmäßige Stromdichteverteilung gewährleisten und lokale Überhitzung reduzieren. Eine Widerstandsanpassung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zwischen kaltem und heißem Ende (z. B. durch Dotierung des kalten Endes mit hochleitfähigen Materialien) kann die Stromdichtekonzentration reduzieren und die Energieeffizienz verbessern. Das Aufbringen einer Schutzbeschichtung (z. B. Al_2O_3 oder SiC) kann die Oxidationsbeständigkeit und Wärmespannungsbeständigkeit der Oberfläche verbessern und die Lebensdauer der Komponente verlängern. Die Verwendung eines Stromreglers zur Stabilisierung des Eingangsstroms, die Vermeidung übermäßiger Stromdichten sowie die regelmäßige Überprüfung des Oberflächenzustands und der elektrischen Eigenschaften der Komponente sind wirksame Maßnahmen, um die Stabilität der thermodynamischen Eigenschaften des MoSi_2 -Heizelements zu gewährleisten. Diese Optimierungsstrategien können den Anforderungen von Hochleistungsanwendungen wie Glasschmelzen und Metallwärmebehandlung gerecht werden.

2.11.6 Einfluss der Installationsmethode

H hat einen wichtigen Einfluss auf die thermodynamische Leistung und Lebensdauer von Heizelementen aus Molybdändisilizid (MoSi_2). Dies steht in direktem Zusammenhang mit der Verteilung thermischer Spannungen, der Temperaturgleichmäßigkeit und der mechanischen Stabilität. Die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 , einschließlich Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient und Temperaturleitfähigkeit, können bei ungeeigneter Installation durch thermische oder mechanische Spannungen beeinträchtigt werden. Gängige Installationsmethoden sind vertikale Aufhängung, horizontale Lagerung und Klemmung, die jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf die thermodynamischen Eigenschaften haben. Die vertikale Aufhängung ist die gängigste Installationsmethode für MoSi_2 -Heizelemente. Sie eignet sich für U- oder W-förmige Elemente.

Dies kann mechanische Einschränkungen verringern und eine freie Wärmeausdehnung der Elemente bei hohen Temperaturen ermöglichen, wodurch die thermische Spannung verringert wird. Wenn der Aufhängungspunkt jedoch nicht richtig konstruiert ist (z. B. Spannungskonzentration am Kontaktpunkt), kann dies lokale Risse verursachen und die Wärmeleitfähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit verringern. Für gerade stabförmige Elemente wird üblicherweise eine horizontale Stützinstallation verwendet. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass das Stützmaterial (z. B. hochreines Aluminiumoxid) dem Wärmeausdehnungskoeffizienten von MoSi_2 entspricht, da es sonst durch eine falsche Wärmeausdehnung zu Spannungskonzentrationen kommen kann, die die Temperaturleitfähigkeit beeinträchtigen. Die Klemmfixierungsmethode ist bei kleinen Öfen üblicher, jedoch kann eine zu hohe Klemmkraft aufgrund von Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen zu Mikrorissen im MoSi_2 führen und so die thermodynamischen Eigenschaften schwächen.

Die Installationsmethode beeinflusst auch die Stabilität und Oxidationsbeständigkeit der SiO_2 -Schutzschicht auf der Oberfläche. Ungleichmäßige Installationsspannungen können zu Rissen in der Oberflächenschicht führen, insbesondere im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C. Risse können die Bildung nicht schützender Oxide fördern und die Wärmeleitfähigkeit sowie die Thermoschockbeständigkeit verringern. Darüber hinaus wirkt sich die Installationsmethode indirekt auf die Stromverteilung und die Temperaturgleichmäßigkeit aus. Beispielsweise kann ein schlechter Kontakt zu einer erhöhten lokalen Stromdichte führen, was zu Überhitzung und beschleunigter Degradation der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SiO₂ -Schicht führt. Um die Auswirkungen der Installationsmethode zu optimieren, sollte in der Praxis ein auf den Ofentyp abgestimmtes Installationsdesign gewählt werden, z. B. die Verwendung hochreiner Keramikträger zur Reduzierung der Wärmeausdehnungsabweichung und flexibler Klemmen zur Reduzierung mechanischer Spannungen. Ein guter Kontakt zwischen der Installationsstelle und dem kalten Ende des MoSi₂ -Kaltovens kann die Stromgleichmäßigkeit verbessern und lokale Überhitzung reduzieren. Durch regelmäßiges Überprüfen der Abnutzung und Lockerheit der Installationsstelle in Kombination mit einer angemessenen Heiz- und Kühlrate (z. B. 5–10 °C/min) können die thermodynamischen Eigenschaften des MoSi₂ -Heizelements wirksam aufrechterhalten und seine Lebensdauer bei Anwendungen wie dem Sintern von Keramik und dem Schmelzen von Glas verlängert werden.

2.11.7 Einfluss der Komponentenqualität und -reinheit

Bei MoSi₂ -Heizelementen sind die wichtigsten intrinsischen Faktoren, die ihre thermodynamischen Eigenschaften beeinflussen und ihre Wärmeleitfähigkeit, ihren Wärmeausdehnungskoeffizienten, ihre Thermoschockbeständigkeit und ihre Langzeitstabilität direkt bestimmen. Hochreines MoSi₂ (Reinheit üblicherweise $\geq 99,5\%$) kann die thermodynamischen Eigenschaften deutlich verbessern. Seine Wärmeleitfähigkeit beträgt bei Raumtemperatur etwa 45 W/(m·K) und bei 1500 °C etwa 15 W/(m·K). Sein Wärmediffusionskoeffizient beträgt bei Raumtemperatur etwa $1,6 \times 10^{-5}$ m²/s und bei 1500 °C etwa $0,8 \times 10^{-5}$ m²/s. Hochreine Materialien können die durch Verunreinigungen (wie Fe, Al und C) verursachte Phononenstreuung und Korngrenzenschwächung verringern und so die Wärmeleitfähigkeit und die Fähigkeit zur Wärmespannungsableitung verbessern. Das Vorhandensein von Verunreinigungen kann zu lokaler Widerstandsinhomogenität führen, die thermische Spannungskonzentration erhöhen, die Thermoschockbeständigkeit verringern und sogar Mikrorisse verursachen, insbesondere im spröden Zustand von MoSi₂ bei niedrigen Temperaturen. Darüber hinaus können Verunreinigungen mit Sauerstoff reagieren und nicht schützende Oxide bilden, wodurch die Dichte des oberflächlichen SiO₂-Schutzfilms geschwächt und die Stabilität der Oxidationsbeständigkeit sowie die thermodynamischen Eigenschaften verringert werden, insbesondere im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C, wo Verunreinigungen die Pulverisierung des Materials verschlimmern.

MoSi₂ weist eine hohe Dichte (nahezu über 98 % der theoretischen Dichte), geringe Porosität und eine bessere Wärmeleitfähigkeit und Thermoschockbeständigkeit auf als Proben, die durch Reaktionssintern oder selbstausbreitende Hochtemperatursynthese (SHS) hergestellt wurden. Komponenten mit hoher Porosität weisen aufgrund von Wärmestreuung und Spannungskonzentration in den Poren eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf und neigen bei thermischen Zyklen zur Rissbildung, was den Wärmediffusionskoeffizienten verringert.

Hochwertige MoSi₂ -Komponenten müssen zudem eine gleichmäßige Mikrostruktur und eine moderate Korngröße (üblicherweise 10–50 µm) aufweisen. Zu große Körner können die Korngrenzenfestigkeit verringern, während zu kleine Körner die Korngrenzenstreuung erhöhen und die Wärmeleitfähigkeit verringern können. Durch Dotierung können Qualität und Reinheit weiter optimiert werden. Beispielsweise kann die Zugabe von Seltenerdoxiden (wie Y₂O₃) die Korngrenzenbindung verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die Thermoschockbeständigkeit erhöhen, während hochreine Dotierstoffe die Einführung zusätzlicher Verunreinigungen vermeiden.

Um die Qualität und Reinheit von Komponenten zu verbessern, müssen hochreine Rohstoffe (wie hochreine Mo- und Si-Pulver) ausgewählt und der Herstellungsprozess in der Praxis streng kontrolliert werden. Heißpressintern oder Plasmaspritzen können die Dichte verbessern und Porosität sowie Defekte reduzieren. Qualitätskontrollmaßnahmen (wie Röntgenbeugung und Rasterelektronenmikroskopie) können die Reinheit der Komponenten und die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur sicherstellen. Das Aufbringen von Schutzbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) kann die mangelnde Oxidationsbeständigkeit von Materialien mit geringer Reinheit zusätzlich ausgleichen. Regelmäßige Überprüfungen des Oberflächenzustands und der Leistung der Komponenten sowie stabile Betriebsbedingungen (wie die Vermeidung hoher Luftfeuchtigkeit oder reduzierender Atmosphären) können die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 -Heizelementen maximieren, um den Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen wie der Halbleiter- und Metallwärmebehandlung gerecht zu werden.

2.11.8 Wirkung der Beschichtungsschutzbehandlung

Die Beschichtungsschutzbehandlung hat einen wichtigen Einfluss auf die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 -Heizelementen und kann deren Oxidationsbeständigkeit, Thermoschockbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeitsstabilität deutlich verbessern. Häufig verwendete Schutzbeschichtungen sind Oxidbeschichtungen (wie Al_2O_3 , ZrO_2), Carbiddeschichtungen (wie SiC) und Verbundbeschichtungen (wie Al_2O_3 -SiC), die unter extremen Bedingungen eine dichte Schutzschicht bilden, um den Mangel an SiO_2 -Film auf der Oberfläche von MoSi_2 auszugleichen. Eine Al_2O_3 -Beschichtung kann aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts (ca. 2050 °C) und niedrigen Sauerstoffdiffusionskoeffizienten (ca. $10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ bei 1500 °C) die Oxidationsbeständigkeit wirksam verbessern und die Stabilität der Wärmeleitfähigkeit (ca. 15 W/(mK) bei 1500 °C) aufrechterhalten, insbesondere in oxidierender Atmosphäre mit hohen Temperaturen (1200-1850 °C).

SiC-Beschichtungen weisen einen besseren Wärmeausdehnungskoeffizienten (ca. $4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) als MoSi_2 (ca. $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) auf. Dies reduziert die thermische Spannungsfehlانpassung und verbessert die Thermoschockbeständigkeit. Dadurch eignen sie sich für Umgebungen mit hohen Temperaturwechselzyklen wie Keramiksinteröfen. Verbundbeschichtungen vereinen die Vorteile mehrerer Materialien. Beispielsweise weisen Al_2O_3 -SiC-Beschichtungen sowohl eine hohe Oxidationsbeständigkeit als auch eine hohe Thermoschockbeständigkeit auf, was die Langzeitstabilität der thermodynamischen Eigenschaften deutlich verbessert.

Die Verbesserung der thermodynamischen Eigenschaften durch Beschichtungen hängt eng mit ihrer Haftung, Dicke und Gleichmäßigkeit zusammen. Hochwertige Beschichtungen (wie jene, die durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) hergestellt werden) weisen eine hohe Haftung und Gleichmäßigkeit auf, können Wärmespannungen wirksam ableiten und den Wärmediffusionskoeffizienten stabil halten (etwa $0,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ bei 1500°C). Zu dicke Beschichtungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(>100 μm) können aufgrund von Wärmeausdehnungsunterschieden Risse verursachen und die Wärmeleitfähigkeit verringern, während zu dünne Beschichtungen (<10 μm) möglicherweise keinen ausreichenden Schutz bieten. Der Beschichtungsprozess hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die thermodynamischen Eigenschaften. Durch Plasmaspritzen können dicke und dichte Beschichtungen erzeugt werden, die für Anwendungen im industriellen Maßstab geeignet sind, aber Mikroporen aufweisen und die Wärmeleitfähigkeit leicht verringern. Dünne, durch CVD-Prozesse erzeugte Beschichtungen sind gleichmäßiger, weisen eine geringe Wärmespannung auf und eignen sich für hochpräzise Anforderungen. Beschichtungen können auch die Auswirkungen der „Pest“-Oxidation (400–700 °C) reduzieren. Beispielsweise können SiC-Beschichtungen die Bildung von nicht schützendem MoO_3 hemmen und die thermodynamischen Eigenschaften schützen.

Die Langzeitstabilität der Beschichtung wird durch die Arbeitsumgebung beeinflusst. In Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit kann die Al_2O_3 -Beschichtung eine Hydratationsreaktion eingehen, die die Wärmeleitfähigkeit verringert. In reduzierenden Umgebungen oder im Vakuum kann die Beschichtung durch Si-Verflüchtigung beschädigt werden, was den Wärmediffusionskoeffizienten beeinträchtigt. Um die Wirkung der Beschichtungsschutzbehandlung zu optimieren, ist es notwendig, den geeigneten Beschichtungstyp und das geeignete Verfahren entsprechend den Anwendungsanforderungen in der Praxis auszuwählen. Beispielsweise werden hochreine CVD-Beschichtungen für Wärmebehandlungsöfen für Halbleiter bevorzugt, und dicke SiC-Beschichtungen können für Glasschmelzöfen verwendet werden. Die Gestaltung der Grenzflächen (z. B. das Hinzufügen einer SiC-Übergangsschicht) kann die Haftung verbessern und das Ablöserisiko verringern. Regelmäßige Überprüfungen der Beschichtungsintegrität und des Oberflächenzustands, kombiniert mit einer stabilen oxidierenden Atmosphäre und geeigneten Heiz- und Kühlraten (z. B. 5–10 °C/min), können die Schutzwirkung der Beschichtung auf die thermodynamischen Eigenschaften des MoSi_2 -Heizelements maximieren und dessen Lebensdauer in Hochtemperaturanwendungen verlängern.

2.12 CTIA GROUP LTD MoSi_2 Heizelement Sicherheitsdatenblatt

Bietet Informationen zur sicheren Verwendung, Lagerung und Handhabung von Molybdändisilizid - Heizelementen (MoSi_2) der CTIA GROUP LTD. MoSi_2 ist eine intermetallische Verbindung mit ausgezeichneter Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen und hoher elektrischer Leitfähigkeit. Es wird häufig in Hochtemperaturöfen in Industrie und Labor eingesetzt (z. B. zum Sintern von Keramik, zum Schmelzen von Glas und zur Wärmebehandlung von Metallen). Nachfolgend finden Sie eine detaillierte Beschreibung des Sicherheitsdatenblatts der MoSi_2 -Heizelemente der CTIA GROUP LTD, basierend auf den Eigenschaften von MoSi_2 -Materialien und Industriestandards, einschließlich der physikalischen und chemischen Eigenschaften, der Gefahrenidentifizierung, des sicheren Betriebs und der Notfallmaßnahmen.

Materialidentifikation und Zusammensetzung: Die MoSi_2 -Heizelemente der CTIA GROUP LTD bestehen hauptsächlich aus Molybdändisilizid (chemische Formel: MoSi_2 , CAS-Nummer: 12136-78-6) mit einer Reinheit von üblicherweise $\geq 99,5\%$ und können Spuren von Additiven (wie Seltenerdoxide oder Aluminiumoxid) zur Leistungssteigerung enthalten. MoSi_2 ist ein keramisches Material mit grau-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

metallischem Aussehen, einer tetragonalen α -Typ-Kristallstruktur (C11b-Typ), einer Dichte von etwa 6,24 g/cm³, einem Schmelzpunkt von etwa 2030 °C und elektrischer Leitfähigkeit. Das Heizelement hat üblicherweise eine U-Form, eine W-Form oder eine gerade Stange, und auf der Oberfläche bildet sich unter einer oxidierenden Hochtemperaturatmosphäre ein dichter SiO₂-Schutzfilm. Mögliche Verunreinigungen sind Fe, Al, C usw. und der Gehalt liegt üblicherweise unter 0,1 %, abhängig von der Produktionscharge und dem Dotierungsprozess.

Gefahrenidentifizierung : MoSi₂-Heizelemente sind bei normaler Verwendung bei hohen Temperaturen relativ sicher, unter bestimmten Bedingungen können jedoch die folgenden Gefahren bestehen. Was physikalische Gefahren angeht, ist MoSi₂ bei Raumtemperatur spröde und kann durch mechanische Einwirkung oder unsachgemäße Handhabung leicht brechen, wodurch scharfe Fragmente entstehen, die Schnitte verursachen können. Was chemische Gefahren angeht, wird MoSi₂ im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C einer Niedrigtemperaturoxidation unterzogen, wobei eine Mischung aus MoO₃ und SiO₂ entsteht, die Spuren von MoO₃-Dampf freisetzen kann (der die Atemwege und die Augen reizen kann). In einer reduzierenden Umgebung oder im Vakuum kann die Si-Verflüchtigung zu Materialabbau führen und Siliziumdampf freisetzen, dessen Einatmen vermieden werden sollte. Was Umweltgefahren angeht, hat MoSi₂ selbst nur geringe Auswirkungen auf die Umwelt, aber entsorgte Komponenten müssen als Sondermüll behandelt werden, um Verschmutzung zu vermeiden.

Sicherheitsbetrieb und Schutzmaßnahmen: Um die sichere Verwendung der MoSi₂-Heizelemente der CTIA GROUP LTD zu gewährleisten, enthält das Sicherheitsdatenblatt die folgenden Bedienungshinweise. Tragen Sie bei der Handhabung Schutzhandschuhe (z. B. hitzebeständige Handschuhe) und eine Schutzbrille. Vermeiden Sie den direkten Kontakt mit scharfen Kanten und vermeiden Sie Verletzungen durch mechanische Beschädigungen oder Fremdkörper. Verwenden Sie bei der Installation geeignete Befestigungsmethoden (z. B. vertikale Aufhängung oder flexible Klemmen), um übermäßige mechanische Belastungen und Brüche zu vermeiden. Achten Sie bei der Verwendung darauf, dass das Stromversorgungssystem proportional gesteuert und phasengesteuert ist und über eine Strombegrenzungsfunktion verfügt, um zu verhindern, dass nichtproportionales Schalten oder plötzliche Stromzufuhr die Komponenten beschädigen. Lagern Sie das Element in einer trockenen, nicht korrosiven Umgebung, um Oberflächenkorrosion durch Feuchtigkeit oder saure Atmosphäre zu vermeiden.

Lagerung und Transport: MoSi₂-Heizelemente müssen trocken und sauber gelagert werden. Die Temperatur sollte zwischen 5 und 35 °C liegen und die relative Luftfeuchtigkeit unter 70 % liegen. Vermeiden Sie den Kontakt mit säurehaltigen Substanzen oder hoher Luftfeuchtigkeit, um Oberflächenkorrosion oder eine Verschlechterung der SiO₂-Schicht zu vermeiden. Verwenden Sie für den Transport Schaumstoff- oder Holzkisten und fixieren Sie die Komponenten, um Beschädigungen durch Vibrationen oder Stöße zu vermeiden. Die Verpackung sollte mit den Hinweisen „zerbrechlich“ und „feuchtigkeitsbeständig“ gekennzeichnet sein und ein Sicherheitsdatenblatt (MSDS) als Referenz enthalten. Beim Transport müssen die Vorschriften für den Transport gefährlicher Güter (z. B. UN3077, umweltgefährdende Stoffe) beachtet werden, um eine sichere Ankunft zu gewährleisten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 3 Aufbau und Design von MoSi₂-Heizelementen

3.1 Gängige Strukturen von MoSi₂-Heizelementen

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) werden aufgrund ihrer hervorragenden Oxidationsbeständigkeit, elektrischen Leitfähigkeit und maximalen Betriebstemperatur häufig in Hochtemperatur-Industrieöfen und Laborgeräten eingesetzt. Die konstruktive Gestaltung beeinflusst Heizleistung, Temperaturgleichmäßigkeit, Thermoschockbeständigkeit und Lebensdauer direkt. Gängige Bauformen von MoSi₂-Heizelementen sind U-, W- und L-Typ, Stabform sowie Sonderformen. U- und W-Typ sind aufgrund ihrer effizienten Wärmeverteilung und flexiblen Montagemöglichkeiten am beliebtesten. Diese Bauformen bestehen üblicherweise aus einem heißen Ende (Wärme erzeugender Teil) und einem kalten Ende (Anschlusssteil). Das heiße Ende erzeugt Wärme bei hoher Temperatur, während das kalte Ende durch Dotierung mit hochleitfähigen Materialien (wie Aluminium oder Wolfram) den Widerstand reduziert, um die Stabilität der Verbindung mit der Stromversorgung zu gewährleisten. Die konstruktive Gestaltung von MoSi₂-Elementen muss Ofengröße, Heizleistung, thermische Zyklusfrequenz und Montagemethode umfassend berücksichtigen, um den Anforderungen verschiedener Anwendungen wie Keramiksintern, Glasschmelzen und Metallwärmebehandlung gerecht zu werden.

Die Optimierung des Strukturdesigns ist entscheidend für die Leistung von MoSi₂-Heizelementen. Länge, Querschnitt und Anschlussart der heißen und kalten Enden müssen exakt aufeinander abgestimmt sein, um eine gleichmäßige Stromverteilung zu gewährleisten und lokale Überhitzung zu vermeiden. Der Durchmesser des heißen Endes beträgt üblicherweise 6–12 mm, der des kalten Endes 1,5–2 Mal so groß wie der des heißen Endes, um die Temperatur des kalten Endes zu senken und die Lebensdauer zu verlängern. Die geometrische Form des Elements (z. B. der Biegeradius beim U- oder W-Typ) beeinflusst die Verteilung der thermischen Spannung. Eine sinnvolle Biegekonstruktion kann das Risiko von Thermoschockrisiken verringern. Die Materialreinheit (üblicherweise ≥99,5 %) und der Herstellungsprozess (z. B. Heißpressen und Sintern) haben einen erheblichen Einfluss auf die strukturelle Integrität. Hochreines und dichtes MoSi₂ kann Mikrodefekte reduzieren und die Wärmeermüdungsbeständigkeit verbessern. Oberflächenbehandlungen (z. B. Polieren oder Beschichten) können zudem die Oxidationsbeständigkeit und die thermodynamischen Eigenschaften verbessern. In der Praxis muss die Strukturauswahl an den Platz im Ofen, die Anforderungen an die Temperaturverteilung und die Installationsbeschränkungen angepasst werden. Beispielsweise eignet sich der U-Typ für kleine Öfen und der W-Typ für große Öfen, um eine gleichmäßigere Erwärmung zu gewährleisten.

3.1.1 U-förmiges MoSi₂-Heizelement

U-förmige MoSi₂-Heizelemente zählen zu den gängigsten Konstruktionen und werden aufgrund ihrer einfachen, kompakten Bauweise und effizienten Heizleistung häufig in kleinen bis mittelgroßen Hochtemperaturöfen wie Labor-Boxöfen und Keramiksinteröfen eingesetzt. Die Struktur des U-förmigen Elements besteht aus zwei parallelen, durch einen U-förmigen Bogen verbundenen Heißenden. Das Kaltende befindet sich oben am Heißende und ist mit der Stromversorgung verbunden. Der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hauptvorteil der U-förmigen Konstruktion besteht darin, dass das Heißende eine konzentrierte Hochtemperaturzone erzeugen kann. Dies eignet sich für Anwendungen, die eine lokal hohe Wärmedichte erfordern, wie z. B. das Sintern in oxidierender Atmosphäre mit einer Maximaltemperatur von bis zu 1800 °C. Die Heißendelänge des U-förmigen Elements beträgt üblicherweise 100–500 mm und wird je nach Ofengröße und Leistungsbedarf individuell angepasst. Der Heißendedurchmesser beträgt 6–9 mm, der Kaltendedurchmesser 12–18 mm, um einen geringen Widerstand und eine effiziente Stromübertragung zu gewährleisten.

Die thermodynamische Leistung des U-förmigen Elements profitiert von seiner kompakten Geometrie. Der Abstand zwischen den heißen Enden (normalerweise 20–50 mm) optimiert die Temperaturgleichmäßigkeit und reduziert die thermische Spannungskonzentration. Der Biegeradius der U-förmigen Struktur muss präzise ausgelegt sein. Ein zu kleiner Radius kann Spannungskonzentrationen verursachen und das Risiko von Thermoschockrisen erhöhen, während ein zu großer Radius die Heizleistung verringern kann. Der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von MoSi_2 (ca. $2,0 \times 10^{-5}$ bei Raumtemperatur $\Omega \cdot \text{cm}$, ca. $4,5 \times 10^{-5}$ bei 1500°C $\Omega \cdot \text{cm}$) ermöglicht dem U-förmigen Element die automatische Leistungsanpassung bei hohen Temperaturen und eignet sich daher für Anwendungen zur präzisen Temperaturregelung. Allerdings können U-förmige Elemente bei häufigen thermischen Zyklen aufgrund von Spannungsansammlungen an der Verbindung zwischen dem heißen und dem kalten Ende Mikrorisse bilden, insbesondere bei MoSi_2 , das eine erhebliche Niedertemperatursprödigkeit aufweist (die Bruchzähigkeit beträgt etwa $2\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Um die Thermoschockbeständigkeit und die Lebensdauer von U-förmigen Elementen zu verbessern, können Heißpress- und Sinterprozesse die Materialdichte erhöhen, und Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) können die Oxidationsbeständigkeit und die Wärmeermüdungsbeständigkeit verbessern.

Bei der Installation werden U-förmige Elemente üblicherweise vertikal aufgehängt und das kalte Ende mit einer Keramikklammer fixiert, um mechanische Spannungen zu reduzieren. Während der Installation muss sichergestellt werden, dass das kalte Ende guten Kontakt mit der Stromversorgung hat, um lokale Überhitzung zu vermeiden. In der Praxis dürfen U-förmige Elemente den „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C nicht zu schnell überschreiten, um die Bildung nicht schützender Oxide (eine Mischung aus MoO_3 und SiO_2) zu verhindern, die eine Oberflächenpulverisierung verursachen. Zur Wartung der U-förmigen Elemente gehört die regelmäßige Überprüfung der Unversehrtheit von Biegungen und Verbindungspunkten sowie die Überwachung des Zustands des SiO_2 -Schutzfilms, um seine langfristige Stabilität in einer oxidierenden Atmosphäre sicherzustellen.

3.1.2 W-Typ MoSi_2 Heizelement

W-Typ- MoSi_2 Heizelemente werden aufgrund ihrer komplexen Geometrie und größeren Heizfläche häufig in großen Hochtemperaturöfen oder Umgebungen eingesetzt, die gleichmäßige Temperaturfelder erfordern, wie z. B. Glasschmelzöfen, industriellen Keramiksinteröfen und Anlagen zur Metallwärmebehandlung. Die Struktur des W-Typ-Elements besteht aus mehreren parallelen heißen Enden, die durch durchgehende W-förmige Biegungen verbunden sind und üblicherweise drei oder mehr heiße Enden enthalten. Die kalten Enden befinden sich beidseitig oder oben und sind mit der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stromversorgung verbunden. Der Hauptvorteil besteht darin, dass es einen größeren Ofenbereich abdecken und eine gleichmäßigere Temperaturverteilung gewährleisten kann, was es für große Öfen oder Mehrzonen-Heizanforderungen geeignet macht. Die Länge des heißen Endes von W-Typ-Elementen beträgt üblicherweise 200–1000 mm, der Durchmesser 6–12 mm und der Durchmesser des kalten Endes 12–24 mm. Die genaue Größe wird je nach Leistungsbedarf und Ofendesign individuell angepasst. Die Heizleistungsdichte beträgt üblicherweise 15–20 W/cm² (bei 1700 °C), wodurch die Anforderungen an eine hohe Leistungsabgabe bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Temperaturgleichmäßigkeit erfüllt werden können.

Die thermodynamische Leistung des W-Typ-Elements profitiert von seinem Design mit mehreren heißen Enden. Der Abstand zwischen mehreren heißen Enden (normalerweise 30–60 mm) kann die Verteilung der Wärmestrahlung optimieren und lokale Überhitzung und thermische Spannungskonzentration reduzieren. Der Biegeradius der W-Typ-Struktur muss genau gesteuert werden. Ein zu kleiner Radius kann zu Spannungskonzentrationen führen und das Risiko von Thermoschockrisen erhöhen, während ein zu großer Radius die Heizleistung verringern kann. Der positive Temperaturkoeffizient (PTC)-Widerstand von MoSi₂ ermöglicht dem W-Typ-Element, die Leistung bei hohen Temperaturen adaptiv anzupassen, um eine präzise Temperaturregelung und -stabilität zu gewährleisten. Allerdings kann das W-Typ-Element während häufiger thermischer Zyklen aufgrund von Spannungsakkumulation an mehreren Biegungen und Verbindungspunkten zwischen heißen und kalten Enden Mikrorisse bilden, besonders wenn die Sprödigkeit von MoSi₂ bei niedrigen Temperaturen erheblich ist (die Bruchzähigkeit beträgt etwa 2–3 MPa·m^{1/2}). Durch das Heißen und Sintern kann die Dichte des Materials erhöht werden (auf fast über 98 % der theoretischen Dichte), Mikrodefekte reduziert und die Wärmeermüdungsbeständigkeit verbessert werden. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) können die Oxidations- und Thermoschockbeständigkeit weiter verbessern und so die Lebensdauer der Komponenten in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären (bis zu 1800–1850 °C) verlängern.

W-Typ-Komponenten werden üblicherweise vertikal aufgehängt oder horizontal gelagert. Das kalte Ende wird mit einer hochreinen Keramikklammer oder -halterung fixiert, um mechanische Spannungen zu reduzieren und Wärmeausdehnung zu ermöglichen. Bei der Installation muss sichergestellt werden, dass das kalte Ende guten Kontakt mit der Stromversorgung hat, um lokale Überhitzung durch Kontaktwiderstand zu vermeiden. Die komplexe Form der W-Typ-Komponente erfordert eine höhere Installationsgenauigkeit, beispielsweise muss sichergestellt werden, dass jedes heiße Ende symmetrisch angeordnet ist, um eine gleichmäßige Stromverteilung zu gewährleisten. In der Praxis muss ein schnelles Durchlaufen des „Pest“-Temperaturbereichs von 400–700 °C vermieden werden, um die Bildung von nicht schützenden Oxiden (einer Mischung aus MoO₃ und SiO₂) zu verhindern, die zu Oberflächenpulverisierung führen. Die Wartung von W-Typ-Komponenten erfordert eine regelmäßige Überprüfung der Integrität der Biegungen, Verbindungspunkte und des SiO₂-Schutzfilms auf der Oberfläche, um ihre langfristige Stabilität in oxidierender Atmosphäre zu gewährleisten. Zur Wartung von W-Typ-Komponenten gehört auch die Überwachung der Kaltendtemperatur (normalerweise unter 400 °C), um zu verhindern, dass eine Überhitzung zu einer Verschlechterung der Verbindungspunkte führt. Um die Leistung von W-Elementen zu optimieren, können die Anforderungen an die Temperaturverteilung eines bestimmten Ofentyps durch Erhöhung der Anzahl der Heizenden oder

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anpassung des Heizendeabstands während der Konstruktion erfüllt werden. Beispielsweise kann in einem großen Glasschmelzofen ein W-Element mit mehreren Heizenden eingesetzt werden, um eine gleichmäßige Erwärmung über einen großen Bereich zu erreichen. Oberflächenpolitur oder -beschichtung kann Oberflächendefekte reduzieren und die Thermoschock- und Oxidationsbeständigkeit verbessern. In der Praxis sollte bei der Installation von W-Elementen die Wärmeflussdynamik des Ofens berücksichtigt und die Elemente sinnvoll angeordnet werden, um Wärmekonzentrationen oder unzureichende Wärme zu vermeiden. Regelmäßige Reinigung des Ofeninneren, um eine Verunreinigung der Elementoberfläche durch Verunreinigungen zu verhindern, ist ebenfalls eine wichtige Maßnahme zur Verlängerung der Lebensdauer des W-Elements. Die komplexe Struktur des W-Elements bietet erhebliche Vorteile für den Einsatz in großen Industrieöfen, stellt aber auch höhere Anforderungen an Fertigungsgenauigkeit und Installationstechnik.

3.1.3 Spiralförmiges MoSi₂-Heizelement

Das spiralförmige MoSi₂-Heizelement hat eine spezielle Struktur und eignet sich für Anwendungen, die eine hohe Wärmedichte und eine kompakte Heizfläche erfordern, wie z. B. kleine Laborröhrenöfen, Geräte zur thermischen Analyse oder spezielle Industrieöfen. Die Struktur des Spiralelements besteht aus einem zu einem spiralförmigen heißen Ende gewickelten MoSi₂-Stab. An beiden Enden der Spirale befindet sich ein kaltes Ende zum Anschluss der Stromversorgung. Der Hauptvorteil besteht darin, dass es auf begrenztem Raum eine hohe Wärmeleistung bereitstellen kann. Die Spiralförmigkeit vergrößert die Oberfläche des heißen Endes und verbessert die Wärmestrahlungseffizienz, was sich für Anwendungen eignet, die eine schnelle Erwärmung und präzise Temperaturregelung erfordern. Der Durchmesser des heißen Endes des Spiralelements beträgt üblicherweise 4–9 mm. Anzahl und Steigung der Spiralwindungen (üblicherweise 5–20 mm) werden entsprechend der Ofengröße und dem Leistungsbedarf ausgelegt. Der Durchmesser des kalten Endes beträgt 8–18 mm, um einen geringen Widerstand und eine effiziente Stromübertragung zu gewährleisten. Die Heizleistungsdichte kann 20–25 W/cm² (bei 1700 °C) erreichen, was höher ist als beim U-Typ und W-Typ und für lokale Hochtemperatur-Heizszenarien geeignet ist.

Die thermodynamische Leistung von Spiralelementen beruht auf ihrer großen Oberfläche und kompakten Bauweise. Die Spiralstruktur kann eine gleichmäßige Wärmeabstrahlung gewährleisten und Temperaturgradienten reduzieren, was für zylindrische Heizanforderungen in Röhrenöfen geeignet ist. Die komplexe Geometrie der Spiralförmigkeit erschwert jedoch die Herstellung. Spiralkrümmung und -steigung müssen genau gesteuert werden. Eine zu enge Spirale kann zu thermischen Spannungskonzentrationen führen und das Rissrisiko erhöhen, insbesondere im bei niedrigen Temperaturen spröden Zustand von MoSi₂ (Bruchzähigkeit beträgt etwa 2–3 MPa·m^{2/2}). Der spezifische Widerstand mit positivem Temperaturkoeffizienten von MoSi₂ ermöglicht es Spiralelementen, ihre Leistung bei hohen Temperaturen adaptiv anzupassen, um eine präzise Temperaturregelung zu gewährleisten. Zur Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit und der Lebensdauer kann das Heißpressintervallverfahren die Dichte des Materials erhöhen (auf fast über 98 % der theoretischen Dichte) und Mikrodefekte reduzieren. Oberflächenbeschichtungen (wie etwa SiC oder Al₂O₃ mit Wärmeausdehnungskoeffizienten von etwa $4,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ bzw. $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) können die Oxidationsbeständigkeit und die Beständigkeit gegen thermische Ermüdung verbessern und so die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lebensdauer von Komponenten in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären (bis zu 1800° C) verlängern .

Spiralelemente werden üblicherweise horizontal oder vertikal montiert, wobei das kalte Ende durch einen hochreinen Keramikträger fixiert wird. Um eine thermische Ausdehnung zu ermöglichen, muss sichergestellt werden, dass der Spiralteil nicht mechanisch behindert wird. Besonderes Augenmerk muss bei der Montage auf die Gleichmäßigkeit der Spiralstruktur gelegt werden, um Verformungen oder Risse durch Montagespannungen zu vermeiden. In der Praxis muss der Temperaturbereich von 400–700 °C schnell durchschritten werden, um die Bildung von nicht schützenden Oxiden (einer Mischung aus MoO_3 und SiO_2) und damit verbundene Oberflächenpulverbildung zu verhindern. Die Wartung von Spiralelementen erfordert eine regelmäßige Überprüfung der Spiralsteigung, der Anschlusspunkte des kalten Endes und der Integrität des SiO_2 -Schutzfilms auf der Oberfläche, um deren Stabilität in oxidierender Atmosphäre zu gewährleisten. Aufgrund der hohen Herstellungskosten von Spiralelementen und der strengen Anforderungen an die Montagegenauigkeit konzentriert sich ihre Anwendung meist auf hochpräzise Laborgeräte oder spezielle Industrieöfen.

3.1.4 MoSi_2 -Heizelement vom Typ „Gerade Stange“

Das gerade stabförmige MoSi_2 -Heizelement hat eine einfache, lineare Struktur und ist für Ofentypen geeignet, die eine lineare Fernheizung erfordern, wie Tunnelöfen, Durchlauföfen oder einige große Industrieöfen. Das gerade stabförmige Element hat ein einzelnes gerades heißes Ende und ein kaltes Ende an beiden Enden oder an einem Ende, um es an die Stromversorgung anzuschließen. Seine Hauptvorteile sind seine einfache Struktur, niedrige Herstellungskosten, einfache Produktion und Installation im großen Maßstab sowie die Eignung zum Abdecken von Fernheizbereichen. Die Länge des heißen Endes des geraden stabförmigen Elements beträgt üblicherweise 300–2000 mm, der Durchmesser 6–12 mm und der Durchmesser des kalten Endes 12–24 mm. Die genaue Größe wird entsprechend der Ofenlänge und dem Leistungsbedarf individuell angepasst. Die Heizleistungsdichte beträgt üblicherweise 15–18 W/cm^2 (bei 1700 °C), was für gleichmäßige Heizanwendungen mit mittlerer und niedriger Leistungsdichte geeignet ist.

Die thermodynamische Leistung gerader Stabelemente wird durch ihre lineare Bauweise begrenzt. Die Temperaturverteilung entlang des Hotends ist möglicherweise nicht so gleichmäßig wie beim U- oder W-Typ. Insbesondere beim Erhitzen über eine lange Distanz kann es zu hohen Temperaturen in der Mitte und niedrigen Temperaturen an beiden Enden kommen. Um die Temperaturgleichmäßigkeit zu verbessern, kann die Widerstandsverteilung durch Anpassung des Hotend-Durchmessers oder segmentierte Dotierung optimiert werden. Der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von MoSi_2 (etwa $2,0 \times 10^{-5}$ bei Raumtemperatur) $\Omega \cdot \text{cm}$, etwa $4,5 \times 10^{-5}$ bei 1500°C $\Omega \cdot \text{cm}$) ermöglicht es geraden stabförmigen Komponenten, ihre Leistung bei hohen Temperaturen adaptiv anzupassen, aber ihre lineare Struktur kann bei häufigen thermischen Zyklen aufgrund von Spannungskonzentrationen an beiden Enden des heißen Endes Mikrorisse erzeugen, besonders wenn die Sprödigkeit von MoSi_2 bei niedrigen Temperaturen erheblich ist (die Bruchzähigkeit beträgt etwa 2-3 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Das Heißpress-Sinterverfahren kann die Materialdichte erhöhen, Mikrodefekte reduzieren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die Thermoschockbeständigkeit und Wärmeermüdungsbeständigkeit verbessern. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) können die Oxidationsbeständigkeit und Oberflächenstabilität weiter verbessern und so die Nutzungsdauer der Komponenten in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären (bis zu 1800°C) verlängern.

Gerade Stabelemente werden üblicherweise horizontal oder vertikal aufgehängt installiert, wobei das kalte Ende mit einer hochreinen Keramikklammer befestigt wird. Um ein Durchhängen oder Brechen des Elements zu vermeiden, ist auf eine gleichmäßige Verteilung der Stützpunkte zu achten. Bei der Installation ist besonders auf die Kontaktqualität zwischen dem kalten Ende und der Stromversorgung zu achten, um lokale Überhitzung durch Kontaktwiderstand zu vermeiden. In der Praxis muss der Temperaturbereich von $400\text{--}700^\circ\text{C}$ schnell überschritten werden, um die Bildung von nicht schützenden Oxiden und damit verbundene Oberflächenablagerungen zu verhindern. Zur Wartung gerader Stabelemente ist es notwendig, die Integrität der heißen Endoberfläche, der kalten Endverbindungspunkte und der SiO_2 -Schutzschicht regelmäßig zu überprüfen und die Kaltendtemperatur (üblicherweise unter 400°C) zu überwachen, um Überhitzung und Materialverschleiß zu vermeiden. Aufgrund der einfachen Struktur gerader Stabelemente sind ihre Herstellungs- und Wartungskosten gering, die Anforderungen an die Temperaturgleichmäßigkeit sind jedoch hoch und die Anordnung muss in Kombination mit der Ofenkonstruktion optimiert werden.

3.1.5 Vergleich von U-förmigen, W-förmigen und geraden Bauformen

U-förmige, W-förmige und gerade stabförmige MoSi_2 -Heizelemente sind die gängigsten Strukturen unter den MoSi_2 -Heizelementen. Jede hat ihre eigenen Eigenschaften und eignet sich für unterschiedliche Ofentypen und Anwendungsszenarien. U-förmige Elemente sind bekannt für ihr kompaktes Design und ihre zentralisierte Heizleistung. Die Länge des heißen Endes beträgt üblicherweise $100\text{--}500\text{ mm}$, der Durchmesser $6\text{--}9\text{ mm}$, und die Leistungsdichte kann 20 W/cm^2 (bei 1700°C) erreichen. Sie eignen sich für kleine bis mittelgroße Öfen (wie Labor-Boxöfen und Keramiksinteröfen), die eine lokal hohe Wärmedichte benötigen. Ihre Vorteile sind der einfache Aufbau, die einfache Installation und der hohe thermische Wirkungsgrad. Allerdings bedeckt das heiße Ende eine kleine Fläche, und die Temperaturgleichmäßigkeit wird durch den Abstand der heißen Enden (üblicherweise $20\text{--}50\text{ mm}$) begrenzt. Bei häufigen Wärmezyklen können an der Verbindung zwischen heißem und kaltem Ende Mikrorisse auftreten. W-förmige Elemente bieten mit ihrem Design mit mehreren heißen Enden eine größere Heizfläche. Die Länge des heißen Endes beträgt $200\text{--}1000\text{ mm}$, der Durchmesser $6\text{--}12\text{ mm}$ und die Leistungsdichte $15\text{--}20\text{ W/cm}^2$. Sie eignen sich für große Öfen (wie Glasschmelzöfen und industrielle Keramiksinteröfen), die ein gleichmäßiges Temperaturfeld erfordern. Ihre Vorteile sind eine gleichmäßigere Temperaturverteilung und eine hohe Beständigkeit gegen thermische Spannungen, aber ihre Herstellung ist komplex und teuer, und mehrfaches Biegen erhöht das Risiko von Thermoschockrisen. Gerade Stabelemente sind für ihre lineare Struktur bekannt, mit einer Länge des heißen Endes von $300\text{--}2000\text{ mm}$, einem Durchmesser von $6\text{--}12\text{ mm}$ und einer Leistungsdichte von $15\text{--}18\text{ W/cm}^2$, die sich für Tunnelöfen oder Durchlauföfen zur Wärmebehandlung mit linearer Fernheizung eignet. Ihre Vorteile sind niedrige Herstellungskosten und einfache Installation, aber eine schlechte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturgleichmäßigkeit und aufgrund von Spannungskonzentrationen können an beiden Enden des heißen Endes leicht Risse entstehen.

Aus thermodynamischer Sicht sind die Wärmeleitfähigkeit (ca. $45 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) bei Raumtemperatur und ca. $15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bei 1500°C) und der Wärmeausdehnungskoeffizient (ca. $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) der drei Strukturen ähnlich, die geometrische Form beeinflusst jedoch die Verteilung der Wärmespannung. Die Biegekonstruktion des U- und W-Typs kann die Wärmespannung verteilen, und die Thermoschockbeständigkeit ist besser als die des geraden Stabtyps, jedoch weist der gerade Stabtyp aufgrund des Fehlens von Biegespannungskonzentrationspunkten bei Fernerhitzung eine höhere mechanische Stabilität auf.

In Bezug auf die Oxidationsbeständigkeit sind alle drei Strukturen auf den oberflächlichen SiO_2 - Schutzfilm angewiesen (der Sauerstoffdiffusionskoeffizient beträgt bei 1500°C etwa $10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$), aber der W-Typ hat eine größere Oberfläche, und die Bildung und Aufrechterhaltung des SiO_2 -Films ist gleichmäßiger und die Oxidationsbeständigkeit ist etwas besser. Beim geraden Stabtyp kann es aufgrund ungleichmäßiger Temperaturen bei Erwärmung über große Entfernungen zu einer lokalen Verschlechterung des SiO_2 -Films kommen. In Bezug auf die Temperaturwechselbeständigkeit neigen U-Typ und W-Typ aufgrund ihrer komplexen Geometrie bei häufigen Temperaturzyklen zu Mikrorissen, während der gerade Stabtyp aufgrund seiner einfachen Struktur widerstandsfähiger gegen Wärmeermüdung ist, die Temperaturverteilung muss jedoch optimiert werden.

In Bezug auf Installation und Wartung eignen sich U-förmige Elemente zum vertikalen Aufhängen und die Installation ist einfach, aber man sollte auf den Kontakt des kalten Endes achten; W-förmige Elemente müssen präzise und symmetrisch installiert werden und die Wartung ist aufwendig, aber sie sind für große Öfen geeignet; gerade Stäbe sind flexibel zu installieren, müssen aber gleichmäßig gestützt werden, um ein Durchhängen zu verhindern. Der Herstellungsprozess hat ähnliche Auswirkungen auf die drei Strukturen. Heißpressen und Sintern können die Dichte verbessern (nahezu 98 %) und Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) können die Oxidationsbeständigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit verbessern. Bei der Auswahl eignet sich der U-Typ für kleine, hochpräzise Öfen, der W-Typ für große Öfen mit gleichmäßiger Erwärmung und der gerade Stabtyp für lineare Erwärmung über große Entfernungen. Dies muss entsprechend der Ofenkonstruktion, dem Leistungsbedarf und der Frequenz des thermischen Zyklus umfassend berücksichtigt werden.

3.2 Dimensionelle Auslegung von MoSi_2 -Heizelementen

aus Molybdändisilizid (MoSi_2) sind der Schlüssel zur Optimierung ihrer Leistung, die sich direkt auf Heizeffizienz, Temperaturverteilung, Thermoschockbeständigkeit und Lebensdauer auswirkt. Die Größe von MoSi_2 -Heizelementen wird üblicherweise durch Durchmesser und Länge des heißen und kalten Endes sowie das Verhältnis zwischen heißem und kaltem Ende bestimmt. Gängige Spezifikationen sind $\Phi 6/12$ (Durchmesser heißes Ende 6 mm, Durchmesser kaltes Ende 12 mm) und $\Phi 9/18$ (Durchmesser heißes Ende 9 mm, Durchmesser kaltes Ende 18 mm). Diese Größenkonstruktionen müssen umfassend basierend auf Ofengröße, Leistungsbedarf, Wärmezyklusfrequenz und Installationsmethode bestimmt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden, um eine effiziente Heizung und Langzeitstabilität in einer oxidierenden Hochtemperaturatmosphäre zu gewährleisten. Die Spezifikation $\Phi 6/12$ eignet sich für kleine und mittelgroße Öfen (wie Labor-Boxöfen und Keramiksoföfen). Ihr heißer Enddurchmesser ist klein und die Leistungsdichte hoch, was sie für Anwendungen geeignet macht, die schnelles Aufheizen und zentralisierte Heizung erfordern. Die Spezifikation $\Phi 9/18$ eignet sich für große Öfen (z. B. Glasschmelzöfen, industrielle Wärmebehandlungsöfen). Sie hat einen größeren Hot-End-Durchmesser und eine etwas geringere Leistungsdichte (üblicherweise $15\text{--}20\text{ W/cm}^2$), bietet aber eine gleichmäßigere Temperaturverteilung und höhere mechanische Festigkeit und eignet sich für großflächige oder hochbelastete Heizszenarien.

Das Hauptziel der Größenkonstruktion besteht darin, die elektrothermischen und mechanischen Eigenschaften des heißen und des kalten Endes auszugleichen. Der Durchmesser des heißen Endes bestimmt den Widerstand und die Heizleistung. Kleinere heiße Enden (z. B. 6 mm) haben einen höheren Widerstand und eignen sich für Anwendungen mit hoher Leistungsdichte, haben jedoch eine geringere Temperaturwechselbeständigkeit und mechanische Festigkeit. Größere heiße Enden (z. B. 9 mm) haben einen geringeren Widerstand und eine mittlere Leistungsdichte, aber eine bessere Temperaturwechselbeständigkeit und Lebensdauer. Der Durchmesser des kalten Endes beträgt üblicherweise das 1,5- bis 2-fache des heißen Endes (z. B. 6/12 oder 9/18), und der spezifische Widerstand wird durch Dotierung mit hochleitfähigen Materialien (wie Aluminium oder Wolfram) verringert (etwa $0,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ bei Raumtemperatur), um sicherzustellen, dass die Temperatur des kalten Endes unter 400°C bleibt, um Überhitzung und Leistungsverlust zu vermeiden. Die Länge des heißen Endes (üblicherweise $100\text{--}1000\text{ mm}$) muss entsprechend der Ofentiefe und Heizfläche angepasst werden. Zu kurz kann zu einer Wärmekonzentration führen, und zu lang kann zu ungleichmäßigen Temperaturen führen. Die Länge des kalten Endes (normalerweise $50\text{--}300\text{ mm}$) muss lang genug sein, um durch die Ofenwand zu passen, um eine stabile Verbindung mit der Stromversorgung zu gewährleisten und eine Wärmeleitung vom heißen zum kalten Ende zu vermeiden.

Bei der Größengestaltung müssen auch die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi_2 berücksichtigt werden. Seine Wärmeleitfähigkeit (ca. $45\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bei Raumtemperatur und ca. $15\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bei 1500°C) und sein Wärmeausdehnungskoeffizient (ca. $8,1 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, Raumtemperatur bis 1000°C) beeinflussen die Verteilung der Wärmespannung. Heiße Enden mit kleinerem Durchmesser (z. B. 6 mm) neigen bei schnellen Wärmezyklen zu Wärmespannungskonzentrationen, die zu Mikrorissen führen, insbesondere im spröden Stadium von MoSi_2 bei niedrigen Temperaturen (Bruchzähigkeit beträgt ca. $2\text{--}3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Heiße Enden mit größerem Durchmesser (z. B. 9 mm) können die Wärmespannung besser verteilen und die Thermoschockbeständigkeit verbessern. Der Vorbereitungsprozess ist für die Maßgenauigkeit entscheidend. Heißpressen und Sintern gewährleisten eine Bauteildichte (nahezu 98 %) und Maßhaltigkeit und reduzieren Mikrodefekte. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) können die Oxidationsbeständigkeit und die Wärmeermüdungsbeständigkeit verbessern und die Zuverlässigkeit der Maßkonstruktion erhöhen. In der Praxis muss die Größenauswahl in Abstimmung mit Ofentyp und Betriebsbedingungen optimiert werden. Beispielsweise eignet sich $\Phi 6/12$ für hochpräzise Laboröfen und $\Phi 9/18$ für große Industrieöfen. Um eine Oberflächenpulverisierung zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verhindern, muss ein schnelles Durchlaufen des „Pest“-Temperaturbereichs von 400–700 °C vermieden werden.

3.3 Optimale Gestaltung des Wärmefeldes und der Kaltendstruktur

Das optimierte Design des Wärmefeldes und der Kaltendstruktur von MoSi₂-Heizelementen ist der Schlüssel zum Erreichen effizienter Heizung, gleichmäßiger Temperaturverteilung und langer Lebensdauer. Das Wärmefelddesign soll sicherstellen, dass die Temperaturverteilung im Ofen den Prozessanforderungen entspricht (wie z. B. $\pm 5^{\circ}\text{C}$ Genauigkeit beim Sintern von Keramik), was durch Optimierung von Layout, Form und Leistungsdichte des Heißendes erreicht wird. Da MoSi₂ eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (ca. 15 W/(m·K) bei 1500°C) und einen sehr hohen spezifischen Widerstand mit positivem Temperaturkoeffizienten (ca. $4,5 \times 10^{-5}$ bei 1500°C) aufweist, muss das Wärmefelddesign genau auf Anzahl und Abstand der Heißenden abgestimmt sein. Beispielsweise eignet sich der Heißendabstand von U-förmigen Elementen (20–50 mm) für die zentrale Heizung kleiner Öfen, und der mehrfache Heißendabstand von W-förmigen Elementen (30–60 mm) eignet sich für die gleichmäßige Heizung großer Öfen. Bei der Optimierung des Wärmefeldes müssen auch Wärmestrahlung und Konvektion berücksichtigt werden. Die Oberfläche und Anordnung der Hotends (z. B. symmetrisches Layout) wirken sich direkt auf die Wärmeverteilung aus. Eine Erhöhung der Anzahl der Hotends oder der Einsatz von Spiralelementen kann die Gleichmäßigkeit des Wärmefeldes verbessern, erhöht jedoch den Fertigungsaufwand. Die Leistungsdichte muss moderat ausgelegt sein (15–25 W/cm² bei 1700 °C). Eine zu hohe Leistungsdichte kann zu lokaler Überhitzung führen und die Stabilität der SiO₂-Schutzschicht verringern.

Die Optimierung der Kaltendstruktur zielt darauf ab, die Kaltendtemperatur (normalerweise $\leq 400^{\circ}\text{C}$) zu senken und die Stabilität der elektrischen Verbindung sowie die Lebensdauer der Komponenten zu verbessern. Das Kaltende wird mit hochleitfähigen Materialien (wie Aluminium) dotiert, um den spezifischen Widerstand (ca. $0,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) zu senken und die Wärmeentwicklung zu verringern. Sein Durchmesser (12–24 mm) ist 1,5–2 mal so groß wie der des Heißendes, um die Wärmeableitung zu verbessern. Die Länge des Kaltendes (50–300 mm) muss lang genug sein, um durch die Ofenwand zu passen, in die Niedertemperaturzone zu gelangen und an die Stromversorgung angeschlossen zu werden. Eine zu große Länge kann jedoch die Materialkosten erhöhen. Die Verbindung zwischen Kalt- und Heißende stellt einen Spannungskonzentrationspunkt dar. Um einen sanften Übergang zu schaffen und thermische Spannungen und Mikrorisse zu reduzieren, ist eine graduelle Dotierung oder Schweißtechnik (wie Plasmaschweißen) erforderlich. Die Oberfläche des Kaltendes wird häufig mit einer leitfähigen Beschichtung (wie einer aluminisierten Schicht) überzogen, um die Kontaktleitfähigkeit zu verbessern und Oxidation zu verhindern. Bei der Optimierung des Kaltende-Designs muss auch die Wärmeableitungsumgebung berücksichtigt werden, beispielsweise durch die Reduzierung der Kaltendtemperatur durch eine keramische Isolierhülse oder Luftkonvektion, um eine Überhitzung und Verschlechterung des Verbindungspunkts zu vermeiden.

Die koordinierte Optimierung der Heißfeld- und Kaltendstruktur muss mit der Ofenkonstruktion und den Betriebsbedingungen kombiniert werden. Eine Wärmefeldsimulation (z. B. eine Finite-Elemente-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Analyse) kann die Temperaturverteilung vorhersagen und die Heißend-Auslegung und Leistungsverteilung steuern. Die Wärmeableitung des Kaltendes muss auf die Ofenwanddichtung und die Isoliermaterialien (z. B. Aluminiumoxidfasern) abgestimmt sein, um die Stabilität der Kaltendtemperatur zu gewährleisten. Die Niedertemperatur-Sprödigkeit von MoSi₂ (Bruchzähigkeit von ca. 2–3 MPa·m^{1/2}) erfordert eine optimierte Konstruktion, um schnelle Temperaturwechsel im „Pest“-Bereich von 400–700 °C zu vermeiden und so die Bildung nicht schützender Oxide zu verhindern. Oberflächenbeschichtungen (z. B. SiC, mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von ca. 4,5×10⁻⁶ K⁻¹) können die Oxidationsbeständigkeit des Heißendes und die Korrosionsbeständigkeit des Kaltendes verbessern. In praktischen Anwendungen können regelmäßige Überprüfungen der Gleichmäßigkeit des Wärmefelds und des Verbindungsstatus des kalten Endes sowie die Anpassung der Heiz- und Kühlrate (5–10 °C/min) die langfristige Stabilität der Struktur des heißen Felds und des kalten Endes sicherstellen und anspruchsvollen Anwendungen wie der Wärmebehandlung von Halbleitern und dem Glasschmelzen gerecht werden.

3.4 Elektrischer Anschluss und Tragsystemdesign

Die Gestaltung des elektrischen Anschlusses und des Trägersystems von MoSi₂-Heizelementen ist entscheidend für ihre Betriebsstabilität, Heizleistung und Lebensdauer. Das elektrische Anschlusssystem muss einen niederohmigen Kontakt zwischen dem kalten Ende und der Stromversorgung sicherstellen, um lokale Überhitzung und Leistungsverlust zu vermeiden. Gleichzeitig muss das Trägersystem mechanischen Halt bieten, Wärmeausdehnung zulassen sowie Wärmespannungen und Rissgefahr verringern. Der spezifische Widerstand des kalten Endes von MoSi₂ (ca. 0,5×10⁻⁵ Ω·cm, bei Raumtemperatur) ist viel niedriger als der des heißen Endes (2,0×10⁻⁵ Ω·cm), und die Leitfähigkeit wird durch Aluminisieren oder Dotieren mit hochleitfähigen Materialien (wie Wolfram) optimiert. Elektrische Anschlüsse verwenden üblicherweise eine hochleitfähige Klammer (z. B. aus Kupfer- oder Aluminiumlegierung), um das kalte Ende zu befestigen. Die Oberfläche der Klammer muss mit Nickel oder Silber beschichtet werden, um Oxidation zu verhindern. Auf die Verbindungsstelle muss eine angemessene Klemmkraft (üblicherweise 5–10 N/cm²) ausgeübt werden. Zu fest kann zu Sprödbbruch des MoSi₂ führen (Bruchzähigkeit ca. 2–3 MPa·m^{1/2}), zu locker kann es zu Lichtbogenbildung oder Überhitzung kommen.

Bei der Gestaltung des elektrischen Anschlusses müssen auch die Art der Stromversorgung und das Steuerungssystem berücksichtigt werden. MoSi₂-Komponenten eignen sich für proportional gesteuerte oder phasengesteuerte Stromversorgungen und müssen mit einer Strombegrenzungsfunktion (maximale Stromdichte ≤ 10 A/mm²) ausgestattet sein, um nichtproportionales Schalten oder „plötzliche“ Schäden an den Komponenten durch die Stromversorgung zu vermeiden. Spannungsregler und Transformatoren können den Eingang (normalerweise 20–100 V) stabilisieren und die Änderung des spezifischen Widerstands mit positivem Temperaturkoeffizienten von MoSi₂ (ca. 4,5 × 10⁻⁵ bei 1500 °C) ausgleichen. Ω·cm). Der Kaltanschluss muss mit einer Wärmeableitungsvorrichtung (z. B. Luftkühlung oder Wasserkühlungsmantel) ausgestattet sein, um die Kaltanschlussstemperatur bei ≤ 400 °C zu halten und so eine Verschlechterung des Anschlusspunkts zu verhindern. Die Kabelauswahl muss hochtemperaturbeständig sein (z. B. Kabel aus Nickellegierungen) und zur Größe des kalten Endes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

passen, um einen übermäßigen Kontaktwiderstand zu vermeiden. Zur Verbesserung der Verbindungszuverlässigkeit können Leitpaste oder Aluminiumfoliendichtungen verwendet werden, um die Kontaktleitfähigkeit zu verbessern.

Das Design des Trägersystems muss die mechanische Stabilität und Wärmeausdehnungsfreiheit von MoSi₂ -Elementen sicherstellen. Gängige Trägermaterialien sind hochreines Aluminiumoxid oder Zirkoniumoxid (ZrO₂), die dem Wärmeausdehnungskoeffizienten von MoSi₂ ($8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) entsprechen, um die Wärmespannung zu verringern. Zu den Trägerformen gehören Klemmen, Aufhängenhaken und Trägerbalken. Die vertikale Aufhängung eignet sich für U- und W-förmige Elemente, und die horizontale Aufhängung ist für gerade Stabelemente geeignet. Der Träger muss als flexible Struktur konzipiert sein, damit sich MoSi₂ bei hohen Temperaturen ausdehnen kann (etwa 0,8 % lineare Ausdehnung bei 1500 °C), um Spannungskonzentrationen zu vermeiden. Die Trägeroberfläche muss glatt sein, um eine Abnutzung des SiO₂ -Schutzfilms auf der Oberfläche des MoSi₂ zu verhindern. Das Trägersystem muss außerdem auf das Isoliermaterial des Ofens (z. B. Aluminiumoxidfaser) abgestimmt sein, um sicherzustellen, dass das heiße Ende der Heizzone ausgesetzt ist und sich das kalte Ende in der Niedertemperaturzone befindet.

Die abgestimmte Konstruktion des elektrischen Anschluss- und Halterungssystems muss die Betriebsumgebung und die Häufigkeit der thermischen Zyklen berücksichtigen. Ein schnelles Durchlaufen des Temperaturbereichs von 400–700 °C verhindert die Bildung nicht schützender Oxide und schützt die Anschlusspunkte und Halterungsoberflächen. Regelmäßige Überprüfung des Kontaktzustands der Klemme, des Halterungverschleißes und der Kaltendtemperatur, die Reinigung der Anschlusspunktoxide und die Anpassung der Klemmkraft können die Lebensdauer des Systems verlängern. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) können die Korrosionsbeständigkeit des Kaltendes und die Haltbarkeit der Halterung verbessern. In der Praxis muss das elektrische Anschluss- und Halterungssystem an den Ofentyp (z. B. Rohrofen, Kastenofen) und die Anwendung (z. B. Keramikintern, Metallwärmebehandlung) angepasst werden, um den stabilen Betrieb des MoSi₂ -Heizelements in einer oxidierenden Hochtemperaturatmosphäre zu gewährleisten.

3.5 Klemmenaufbau und Anschluss Technik

Die Anschlussstruktur und die Verbindungsmethode des Heizelements aus Molybdändisilizid (MoSi₂) haben einen entscheidenden Einfluss auf seine elektrische Leistung, mechanische Stabilität und Lebensdauer. Mit Anschluss ist normalerweise das kalte Ende gemeint, das für den Anschluss an das Stromnetz zuständig ist. Es muss einen niederohmigen Kontakt, eine hohe Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen gewährleisten und gleichzeitig der Wärmeausdehnung und mechanischen Belastung standhalten. Durch Dotierung mit hochleitfähigen Materialien ist der spezifische Widerstand des kalten Endes von MoSi₂ (ca. $0,5 \times 10^{-5}$ bei Raumtemperatur) $\Omega \cdot \text{cm}$) deutlich niedriger als der des heißen Endes (ca. $2,0 \times 10^{-5}$ bei Raumtemperatur). Sein Durchmesser beträgt normalerweise das 1,5- bis 2-fache des heißen Endes (z. B. Spezifikationen $\Phi 6/12$ oder $\Phi 9/18$), um die Wärmeentwicklung zu verringern. Die Endstruktur muss den Übergangsbereich zwischen kaltem und heißem Ende optimieren, um Spannungskonzentrationen zu reduzieren und die Bildung von Mikrorissen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zu verhindern, insbesondere im spröden Zustand von MoSi₂ bei niedrigen Temperaturen (Bruchzähigkeit ca. 2–3 MPa·m^{1/2}). Gängige Endstrukturen sind gerade, gebogene und konische Übergangstypen. Gerade kalte Enden eignen sich für U-förmige und gerade Stabelemente. Gebogene kalte Enden (z. B. 90°-Bögen) eignen sich für W-förmige oder platzbeschränkte Öfen. Der konische Übergangstyp glättet die Verbindung zwischen heißem und kaltem Ende durch eine allmähliche Durchmesseränderung und reduziert so die thermische Spannung.

Zu den Verbindungsmethoden gehören hauptsächlich Klemmverbindungen, Schweißverbindungen und Schraubverbindungen. Klemmverbindungen sind die gebräuchlichsten Methoden. Eine hochleitfähige Klemme (z. B. aus Kupfer- oder Aluminiumlegierung, mit Nickel- oder Silberbeschichtung) fixiert das kalte Ende. Der Kontaktwiderstand muss unter 0,01 Ω gehalten werden. Die Klemmkraft muss moderat sein (5–10 N/cm²). Zu fest kann zu Sprödbbruch des MoSi₂ führen, zu locker kann es zu Lichtbogenbildung oder lokaler Überhitzung kommen. Zur Verbesserung der Kontakteitfähigkeit kann die Oberfläche des kalten Endes mit einer aluminisierten Beschichtung oder Leitpaste versehen werden. Bei Schweißverbindungen wird das kalte Ende durch Plasma- oder Widerstandsschweißen mit einer leitfähigen Verbindung (z. B. einer Nickellegierung) verbunden. Diese Methode eignet sich für hochpräzise Anwendungen, allerdings muss die Temperatur während des Schweißvorgangs kontrolliert werden, um eine Beschädigung des heißen Endes zu vermeiden. Schraubverbindungen eignen sich für große Industrieöfen. Das kalte Ende wird mit hochtemperaturbeständigen Schrauben und Dichtungen fixiert. Die Installation ist einfach, allerdings ist der Kontaktwiderstand etwas höher. Es muss regelmäßig auf Lockerheit geprüft werden. Die Anschlussmethode muss zum Stromversorgungssystem passen. Für MoSi₂-Komponenten wird die Verwendung von proportional gesteuerten oder phasengesteuerten Stromversorgungen mit Strombegrenzungsfunktion (maximale Stromdichte ≤10 A/mm²) empfohlen, um zu verhindern, dass nichtproportionale Schalter die Komponenten beschädigen.

Bei der Optimierung der Anschlussstruktur und der Verbindungsmethode müssen Temperaturwechsel und Umweltfaktoren berücksichtigt werden. Häufige Temperaturwechsel können zu einer Ansammlung thermischer Spannungen an der Kaltanschlussstelle führen, die Mikrorisse oder einen erhöhten Kontaktwiderstand verursachen, insbesondere im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C, wo nicht schützende Oxide (Mischungen aus MoO₃ und SiO₂) die Anschlussstellen korrodieren können. Zur Verbesserung der Haltbarkeit kann die Kaltanschlussstelle mit einer Schutzschicht aus SiC oder Al₂O₃ (der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt ca. $4,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ bzw. $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) beschichtet werden, um die Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit zu verbessern.

Wärmeableitungsdesigns (z. B. Luftkühlung oder keramische Isolierhüllen) können die Kaltanschlussstelle niedrig halten und die Lebensdauer der Anschlussstelle verlängern. In der Praxis kann die langfristige Stabilität der Klemmverbindung durch regelmäßige Überprüfung der Integrität der Klemme oder Lötstelle, Reinigung des Oxids und Anpassung der Klemmkraft sichergestellt werden. Die Gestaltung der Endstruktur und der Verbindungsmethode muss zudem auf das Ofenisolationsmaterial (z. B. Aluminiumoxidfaser) und das Halterungssystem abgestimmt sein, um sicherzustellen, dass sich das kalte Ende im Niedertemperaturbereich befindet und die Zuverlässigkeitsanforderungen von Hochtemperaturanwendungen wie Keramiksintern und Glasschmelzen erfüllt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.6 Wichtige Punkte des Produktanpassungsdesigns

Die kundenspezifische Gestaltung von MoSi₂ -Heizelementen ist entscheidend für die Erfüllung spezifischer Ofentypen und Prozessanforderungen. Sie erfordert eine umfassende Optimierung von Struktur, Größe, Materialmodifikation und Betriebsbedingungen. Für die kundenspezifische Gestaltung müssen Form, Leistungsdichte, Temperaturbereich und Einbauart des Elements entsprechend dem Anwendungsszenario (z. B. Laborrohröfen, industrieller Keramiksinterofen, Glasschmelzöfen oder Halbleiter-Wärmebehandlungsofen) festgelegt werden, um eine effiziente Heizung, ein gleichmäßiges Temperaturfeld und eine lange Lebensdauer zu erreichen. Die thermodynamischen Eigenschaften von MoSi₂ und sein positiver Temperaturkoeffizient bieten Flexibilität für die kundenspezifische Gestaltung. Aufgrund seiner Kältesprödigkeit müssen jedoch thermische Spannungen und mechanische Stabilität bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Im Folgenden sind einige wichtige Punkte für die kundenspezifische Gestaltung aufgeführt.

Erstens müssen Struktur und Größe an die Ofengeometrie und den Heizbedarf angepasst werden. U-förmige Elemente (Heißende: Durchmesser 6–9 mm, Länge 100–500 mm) eignen sich für die zentrale Beheizung kleiner Öfen, W-förmige Elemente (Heißende: Länge 200–1000 mm) für die gleichmäßige Beheizung großer Öfen, Spiraltypen eignen sich für Rohröfen mit hohen Wärmedichteanforderungen und gerade Stabtypen für lineare Beheizung über große Entfernungen. Das Durchmesser-Verhältnis von Heißende zu Kaltende (z. B. $\Phi 6/12$ oder $\Phi 9/18$) muss entsprechend der Leistungsdichte optimiert werden. Länge und Abstand des Heißenden müssen durch ein thermisches Feld (z. B. Finite-Elemente-Analyse) simuliert werden, um eine gleichmäßige Temperatur ($\pm 5^\circ\text{C}$) zu gewährleisten. Die Länge des Kaltendes (50–300 mm) muss ausreichen, um die Ofenwand zu durchdringen und in die Niedertemperaturzone zu gelangen. Spezielle Ofentypen erfordern möglicherweise nicht standardmäßige Formen (wie L-förmige oder mehrfach gebogene Typen) und der Biegeradius muss genau kontrolliert werden (normalerweise $\geq 10\text{ mm}$), um die thermische Spannungskonzentration zu reduzieren.

Zweitens sind Materialmodifizierung und Oberflächenbehandlung wichtige Faktoren für kundenspezifische Designs. Die Reinheit von MoSi₂ ($\geq 99,5\%$) beeinflusst direkt die Oxidationsbeständigkeit und die Wärmeleitfähigkeit. Hochreine Rohstoffe können die durch Verunreinigungen (wie Fe und Al) verursachte Schwächung der Korngrenzen reduzieren. Dotierungsmodifizierungen (wie die Zugabe von Y₂O₃ oder Al₂O₃) können die Festigkeit der Korngrenzen erhöhen und die Thermoschockbeständigkeit verbessern, was für Anwendungen mit häufigen Temperaturwechseln geeignet ist. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) können die Lebensdauer von SiO₂-Schutzfilmen verlängern und die Widerstandsfähigkeit gegen „Pest“-Oxidation verbessern. Die Beschichtungsdicke (10–50 μm) muss entsprechend der Betriebstemperatur und -atmosphäre optimiert werden. Eine zu dicke Schicht kann zum Ablösen führen, eine zu dünne Schicht führt zu unzureichendem Schutz. Der Herstellungsprozess (wie Heißpressen und Sintern) muss eine Dichte (nahezu 98 %) sicherstellen, mikroskopische Defekte reduzieren und die mechanischen und thermodynamischen Eigenschaften verbessern. Drittens müssen bei der Anpassung der Betriebsbedingungen Temperatur, Atmosphäre und thermische Zyklusfrequenz berücksichtigt werden. Die maximale Betriebstemperatur von MoSi₂-Komponenten kann in einer oxidierenden Atmosphäre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1850 °C erreichen, muss aber in einer reduzierenden oder Vakuum-Umgebung auf unter 1500 °C gesenkt werden, um ein Versagen des SiO₂ -Films zu verhindern. Das kundenspezifische Design muss die Art der Atmosphäre (wie Feuchtigkeitsgehalt, Gehalt an Verunreinigungen) angeben. Eine Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit kann zur Hydratisierung des SiO₂ -Films führen und die Wärmeleitfähigkeit verringern. Anwendungen mit hohen thermischen Zyklusfrequenzen (wie die Wärmebehandlung von Halbleitern) müssen die Heiz- und Kühlraten (5–10 °C/min) optimieren, um ein schnelles Überschreiten von 400–700 °C zu vermeiden. Das Leistungssteuerungssystem muss zu den Widerstandseigenschaften von MoSi₂ passen, eine proportional gesteuerte Stromversorgung verwenden und mit einem Spannungsregler (20–100 V) und einer Strombegrenzungsfunktion ausgestattet sein, um eine Überlastung zu vermeiden.

Schließlich muss das kundenspezifische Design für Installation und Wartung auf die Ofenstruktur abgestimmt werden. Die vertikale Aufhängung eignet sich für U- und W-förmige Elemente, die horizontale Halterung eignet sich für gerade Stangen und das Halterungsmaterial (z. B. Aluminiumoxid mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von etwa $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) muss zu MoSi₂ passen, um die Wärmeausdehnung (ca. 0,8 %, 1500 °C) zu ermöglichen. Elektrische Anschlüsse müssen hochleitfähige Klemmen oder Schweißverbindungen verwenden, um sicherzustellen, dass der Kontaktwiderstand weniger als 0,01 Ω beträgt. Das kundenspezifische Design sollte Wartungsrichtlinien enthalten, darunter regelmäßige Kontrollen der Kaltendtemperatur, des Zustands des SiO₂ -Films und der Integrität der Verbindungspunkte sowie die Reinigung von Ofenverunreinigungen (z. B. Alkalimetalloxiden). Durch Wärmefeldsimulation, Materialoptimierung und Anpassung der Betriebsbedingungen können kundenspezifische Designs die Leistungsanforderungen bestimmter Anwendungen erfüllen und die Lebensdauer von MoSi₂ -Heizelementen in Hochtemperaturumgebungen verlängern.



CTIA GROUP LTD Silizium-Molybdän-Stab

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 4 Herstellungsprozess des MoSi₂-Heizelements

4.1 Rohstoffauswahl und Dosierungsgrundsätze

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) beginnt mit der Auswahl und den Anteilen der Rohstoffe, deren Qualität sich direkt auf die thermodynamischen Eigenschaften, die Oxidationsbeständigkeit und die Lebensdauer der Elemente auswirkt. MoSi₂ ist eine intermetallische Verbindung mit der chemischen Formel MoSi₂ . Es muss aus hochreinen Molybdän- (Mo) und Silizium- (Si) Rohstoffen synthetisiert werden, die üblicherweise in Pulverform durch Pulvermetallurgie hergestellt werden. Das Kernprinzip der Rohstoffauswahl besteht darin, eine hohe Reinheit (üblicherweise $\geq 99,5\%$) und einen geringen Gehalt an Verunreinigungen sicherzustellen, um das Risiko einer Korngrenzenschwächung und einer nicht schützenden Oxidation zu verringern. Molybdänpulver muss eine Reinheit von $\geq 99,9\%$ aufweisen und der Gehalt an größeren Verunreinigungen (wie Fe, Al, C) sollte weniger als 0,01 % betragen, da Fe und Al Korngrenzenkorrosion verursachen und die Thermoschockbeständigkeit verringern können; Kohlenstoffverunreinigungen können Carbide erzeugen und den spezifischen Widerstand beeinträchtigen. Siliziumpulver muss zudem eine hohe Reinheit ($\geq 99,9\%$) aufweisen, um nichtmetallische Verunreinigungen wie Sauerstoff und Stickstoff zu vermeiden, die Defekte im SiO₂ - Schutzfilm verursachen. Die Partikelgrößenverteilung ist ein weiterer wichtiger Faktor. Die Partikelgröße von Molybdänpulver und Siliziumpulver liegt üblicherweise bei 1–10 μm . Zu große Partikel können zu ungleichmäßigem Sintern führen, während zu kleine Partikel die Herstellungskosten erhöhen.

Das Dosierungsprinzip basiert auf dem stöchiometrischen Verhältnis von MoSi₂ (Mo:Si = 1:2 Molverhältnis), und das theoretische Massenverhältnis von Molybdän zu Silizium beträgt etwa 2,55:1. Um eine vollständige Reaktion zu gewährleisten, kann das tatsächliche Verhältnis leicht vom stöchiometrischen Verhältnis abweichen. Beispielsweise wird der Siliziumgehalt um 0,5–1 % erhöht, um den Verflüchtigungsverlust beim Hochtemperaturesintern auszugleichen. Dotierungsmodifikationen sind ein wichtiges Mittel zur Leistungsoptimierung. Häufig verwendete Dotierstoffe sind Seltenerdoxide (wie Y₂O₃). La₂O₃ wird in einer Menge von 0,1–1 Gew.-% zugesetzt, um die Korngrenzenfestigkeit und die Thermoschockbeständigkeit zu verbessern, oder Aluminiumoxid, um die Stabilität des SiO₂ - Films zu verbessern. Dotierstoffe müssen eine hohe Reinheit ($\geq 99,95\%$) aufweisen, um das Eindringen zusätzlicher Verunreinigungen zu vermeiden. Der Dosierungsprozess muss in einer inerten Atmosphäre (z. B. Argon) oder im Vakuum durchgeführt werden, um eine Oxidation der Rohstoffe zu verhindern. Die Gleichmäßigkeit der Mischung ist entscheidend für die endgültige Leistung. Zum Mischen werden üblicherweise Planetenkugelmøhlen oder V-Mischer verwendet, und die Mahldauer und -geschwindigkeit der Kugelmahlung werden kontrolliert, um Partikelbruch oder Verunreinigungen zu vermeiden.

Bei der Auswahl und Dosierung der Rohstoffe müssen auch der Herstellungsprozess und die Anwendungsanforderungen berücksichtigt werden. Beispielsweise erfordert das Heißpressintern feinere Partikel (1–5 μm), um die Dichte zu verbessern (nahezu 98 %), während bei der selbstausbreitenden Hochtemperatursynthese (SHS) etwas größere Partikel (5–10 μm) akzeptiert werden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

können, um die Kosten zu senken. Für hochpräzise Anwendungen (wie die Wärmebehandlung von Halbleitern) müssen Rohstoffe mit ultrahoher Reinheit ($\geq 99,99\%$) ausgewählt und die Dosierungsgenauigkeit ($\pm 0,1\%$) streng kontrolliert werden. Der Qualitätskontrollprozess umfasst die Analyse der chemischen Zusammensetzung (wie ICP-MS) und die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung (wie ein Laser-Partikelgrößenanalysator), um sicherzustellen, dass die Rohstoffe die Designanforderungen erfüllen. Eine vernünftige Auswahl und Dosierung der Rohstoffe legt den Grundstein für das anschließende Formen und Sintern und gewährleistet die Stabilität und Zuverlässigkeit von MoSi₂-Heizelementen in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären.

4.2 Pulvermetallurgie und isostatisches Pressverfahren

Die Pulvermetallurgie ist das wichtigste Verfahren zur Herstellung von MoSi₂-Heizelementen. In Kombination mit isostatischem Pressen können so hochdichte und leistungsstarke Elemente hergestellt werden, die für U-förmige, W-förmige, stabförmige und spiralförmige Strukturen geeignet sind. Der pulvermetallurgische Prozess umfasst vier Hauptschritte: Mischen der Rohstoffe, Formen, Sintern und Nachbearbeitung. Unter diesen ist das isostatische Pressen die wichtigste Formtechnologie, da sie die Maßgenauigkeit und die gleichmäßige Mikrostruktur der Elemente sicherstellen kann. Die Wärmeleitfähigkeit (ca. 15 W/(mK) bei 1500 °C), der Wärmeausdehnungskoeffizient (ca. $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und die Oxidationsbeständigkeit von MoSi₂ hängen von seiner hohen Dichte ($\geq 98\%$) und der geringen Defektrate ab. Die Kombination aus Pulvermetallurgie und isostatischem Pressen kann diese Anforderungen wirksam erfüllen.

Rohstoffmischung : Beim Mischen werden hochreines Molybdänpulver und Siliziumpulver im stöchiometrischen Verhältnis (Mo:Si = 1:2) oder in einem leicht siliziumreichen Verhältnis (Siliziumanteil um 0,5–1 %) gleichmäßig vermischt. Dies geschieht üblicherweise mit einer Planetenkugelmühle oder einem V-Mischer unter Schutzatmosphäre (z. B. Argon) oder im Vakuum. Als Kugelmahlmedium dient hochreines Aluminiumoxid oder Zirkonoxid. Das Kugel-Material-Verhältnis liegt zwischen 2:1 und 5:1. Die Mischzeit beträgt 4–8 Stunden, um eine gleichmäßige Partikelverteilung ohne Verunreinigungen zu gewährleisten. Dotierstoffe (z. B. Y₂O₃) werden in die Mischung eingearbeitet. Al₂O₃ wird in einer Menge von 0,1–2 Gew.-% während des Mischvorgangs zugegeben. Die Partikelgröße muss kontrolliert werden, um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten. Das gemischte Pulver wird gesiebt, um agglomerierte Partikel zu entfernen, und getrocknet, um Feuchtigkeit zu entfernen.

Isostatisches Pressen : Isostatisches Pressen (Kaltisostatisches Pressen, CIP) ist die gängige Technologie zur Herstellung von MoSi₂-Heizelementen. Das gemischte Pulver wird durch gleichmäßigen Druck in einem flüssigen Medium (wie Wasser oder Öl) in die gewünschte Form gepresst (z. B. U-förmig, W-förmig oder als gerader, stabförmiger Grünkörper). Die Vorteile des isostatischen Pressens sind der gleichmäßige Druck und die hohe Grünkörperdichte, wodurch eine ungleichmäßige Schrumpfung beim anschließenden Sintern reduziert werden kann. Die Form besteht üblicherweise aus flexiblem Gummi oder Polyurethan, das druckbeständig ist und keine chemische Reaktion mit dem MoSi₂-Pulver eingeht. Zu den Prozessparametern zählen Druck, Haltezeit und Gleichmäßigkeit der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pulverfüllung. Es muss sichergestellt werden, dass der Grünkörper frei von Rissen oder Delaminationen ist. Komplexe Formen (z. B. Spiralen) erfordern möglicherweise segmentierte Formen oder eine Kombination mit Vorformungsverfahren. Um die Festigkeit des Grünkörpers zu verbessern, kann eine kleine Menge organisches Bindemittel hinzugefügt werden, das beim anschließenden Vorsintern entfernt wird.

Sinterprozess : Das Sintern ist ein wichtiger Schritt in der Pulvermetallurgie, durch den der **MoSi₂** -Grünkörper eine hohe Dichte erreicht und eine stabile tetragonale α -Typ-Kristallstruktur bildet. Gängige Sintermethoden sind das Heißpresssintern (HP) und das drucklose Sintern. Das Heißpresssintern ist besser für leistungsstarke MoSi₂ -Heizelemente geeignet. Das Heißpresssintern wird in einem Vakuum oder einer inerten Atmosphäre (Argon) bei einer kontrollierten Temperatur von 1600–1800 °C, einem Druck von 20–40 MPa und einer Haltezeit von 1–3 Stunden durchgeführt. Während des Sinterprozesses reagiert Molybdän mit Silizium zu MoSi₂, während Dotierstoffe (wie Y₂O₃) die Korngrenzenbindung fördern und die Porosität verringern. Die Sintertemperatur muss genau kontrolliert werden. Zu hohe Temperaturen können zur Si-Verflüchtigung führen und die Qualität des SiO₂ - Films mindern; zu niedrige Temperaturen können zu unzureichender Dichte führen, was die Wärmeleitfähigkeit und die Thermoschockbeständigkeit beeinträchtigt. Druckloses Sintern eignet sich für kostensensitive Anwendungen bei Temperaturen zwischen 1700 und 1900 °C. Allerdings ist die Dichte gering, was das Risiko von Mikrorissen erhöhen kann.

Nachbearbeitung : Gesinterte MoSi₂ -Komponenten erfordern eine Nachbearbeitung, einschließlich Oberflächenpolitur, Maßbeschnitt und Auftragen von Schutzbeschichtungen. Das Oberflächenpolieren (mit einer Diamantscheibe) beseitigt Oberflächendefekte und reduziert das Risiko thermischer Spannungskonzentrationen. Der Maßbeschnitt stellt sicher, dass die Komponenten den Konstruktionsspezifikationen entsprechen. Schutzbeschichtungen werden mittels Plasmaspritzen oder chemischer Gasphasenabscheidung (CVD) aufgebracht, um die Oxidationsbeständigkeit und die Beständigkeit gegen „Pest“-Oxidation zu erhöhen. Zu den Qualitätsprüfungen gehören Dichtepprüfung (Archimedes-Methode), Mikrostrukturanalyse (REM) und Widerstandsmessung, um sicherzustellen, dass die Komponentenleistung den Anwendungsanforderungen von Keramiksintern, Glasschmelzen usw. entspricht. Die Optimierung von Pulvermetallurgie- und isostatischen Pressprozessen erfordert eine umfassende Betrachtung von Kosten und Leistung. Heißpressen in Kombination mit isostatischem Pressen ermöglicht die Herstellung hochdichter Bauteile, die sich für hochpräzise Anwendungen (wie die Halbleiter-Wärmebehandlung) eignen. Druckloses Sintern ist kostengünstig und für große Industrieöfen geeignet. Die Prozesskontrolle muss den „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C vermeiden, um die Bildung nicht schützender Oxide zu verhindern. Regelmäßige Prüfungen der Rohstoffreinheit, der Grünkörperqualität und der Sinterparameter gewährleisten die Stabilität und Zuverlässigkeit von MoSi₂ -Heizelementen in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären.

4.3 Hochtemperatur-Sinter- und Nachbearbeitungstechnologie

Das Hochtemperaturesintern ist der Kernprozess bei der Herstellung von Heizelementen aus Molybdändisilizid (MoSi₂). Ziel ist es, den geformten Grünkörper in ein Bauteil mit hoher Dichte ($\geq 98\%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

theoretische Dichte), hervorragenden mechanischen Eigenschaften und einer stabilen tetragonalen α -Typ-Kristallstruktur umzuwandeln. Dadurch wird sichergestellt, dass seine Wärmeleitfähigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Thermoschockbeständigkeit den Anforderungen von Hochtemperaturanwendungen entsprechen. Der Sinterprozess wird üblicherweise in einem Vakuum oder einer inerten Atmosphäre (wie Argon) durchgeführt, um Oxidation zu verhindern. Gängige Methoden sind Heißpressintern (HP), druckloses Sintern und selbstausbreitende Hochtemperatursynthese (SHS). Heißpressintern ist das gängige Verfahren für Hochleistungs- MoSi_2 -Bauteile. Die Temperatur wird auf 1600–1800 °C geregelt, der Druck liegt bei 20–40 MPa und die Haltezeit beträgt 1–3 Stunden. Die hohe Temperatur ermöglicht die vollständige Reaktion von Molybdän mit Silizium zu MoSi_2 , während das Dotiermittel die Korngrenzenbindung fördert und die Porosität reduziert. Die Sintertemperatur muss präzise kontrolliert werden. Ist sie zu hoch, kann Si verdampfen und die Qualität des SiO_2 -Oberflächenschutzfilms beeinträchtigen. Ist sie zu niedrig, ist die Dichte unzureichend (<95 %), was die Wärmeleitfähigkeit und die Thermoschockbeständigkeit verringert.

Nachbearbeitungstechnologien wie Oberflächenpolitur, Maßtrimmen und Leistungstests sind für die Leistungsoptimierung von MoSi_2 -Komponenten von entscheidender Bedeutung. Beim Oberflächenpolieren werden Diamantschleifscheiben oder Aluminiumoxid-Schleifmittel verwendet, um beim Sintern entstandene Oberflächendefekte (wie Mikroporen und Sinterknötchen) zu entfernen, die thermische Spannungskonzentration zu reduzieren und die Thermoschockbeständigkeit zu verbessern. Durch Maßtrimmen wird sichergestellt, dass die Komponenten durch Präzisionsbearbeitung (z. B. CNC-Schneiden) den Designspezifikationen entsprechen, um die Genauigkeitsanforderungen von Strukturen wie U-, W- oder Spiralförmigen zu erfüllen. Die Leistungstests umfassen Dichteprüfungen (Archimedes-Methode, Ziel $\geq 98\%$), Mikrostrukturanalysen und Widerstandsmessungen, um die Konsistenz der elektrischen und thermischen Leistung der Komponenten sicherzustellen. Durch eine Voroxidationsbehandlung kann ein dichter SiO_2 -Schutzfilm auf der Oberfläche erzeugt werden, um die Oxidationsbeständigkeit und die Fähigkeit zur Verhinderung von „Plagen“ zu verbessern. Die Nachbearbeitung muss ebenfalls in einer inerten Atmosphäre erfolgen und Temperaturen zwischen 400 und 700 °C vermeiden, um die Bildung nicht schützender Oxide (Mischung aus MoO_3 und SiO_2) zu verhindern. Eine hochwertige Nachbearbeitung kann die Stabilität und Lebensdauer von MoSi_2 -Komponenten in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären deutlich verbessern und so den Anforderungen hochpräziser Anwendungen wie der Halbleiter-Wärmebehandlung gerecht werden.

4.4 Oberflächenschutzschichttechnologie

Die Oberflächenschutzschichttechnologie ist ein wichtiger Bestandteil der Herstellung von MoSi_2 -Heizelementen. Durch das Aufbringen einer Schutzschicht werden die Oxidationsbeständigkeit, die Temperaturwechselbeständigkeit und die Korrosionsbeständigkeit verbessert und die Lebensdauer des Elements in einer oxidierenden Hochtemperaturatmosphäre verlängert. MoSi_2 bildet oberhalb von 800 °C natürlicherweise einen SiO_2 -Schutzfilm. Bei extremen Temperaturen oder häufigen Temperaturwechseln kann dieser jedoch aufgrund der Verflüchtigung von Si oder MoO_3 dünner werden, insbesondere im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C, der zur Pulverbildung neigt. Die Oberflächenschutzschicht gleicht die Mängel des SiO_2 -Films durch das Aufbringen einer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oxidbeschichtung (z. B. Al_2O_3) aus ZrO_2), eine Carbidbeschichtung (wie SiC) oder eine Verbundbeschichtung (wie Al_2O_3 - SiC). Die Al_2O_3 -Beschichtung (Schmelzpunkt ca. 2050 °C) wird durch Plasmaspritzen oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD) in einer Schichtdicke von 10–50 μm aufgebracht. Sie weist eine hohe Oxidationsbeständigkeit und einen niedrigen Sauerstoffdiffusionskoeffizienten auf und eignet sich für Keramiksinteröfen. Die SiC -Beschichtung wird durch Reaktionssintern oder CVD in einer Schichtdicke von 20–100 μm aufgebracht. Sie weist eine verbesserte Thermoschockbeständigkeit und Verschleißfestigkeit auf und eignet sich für Glasschmelzöfen. Verbundbeschichtungen vereinen die Vorteile mehrerer Materialien, wie z. B. Al_2O_3 – SiC Beschichtungen, die sowohl eine hohe Oxidationsbeständigkeit als auch eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit aufweisen und für komplexe Arbeitsbedingungen geeignet sind.

Der Beschichtungsprozess hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistung. Plasmaspritzen ermöglicht dicke und dichte Beschichtungen, die für die industrielle Produktion geeignet sind. Allerdings können Mikroporen entstehen, die die Wärmeleitfähigkeit leicht reduzieren. Das CVD-Verfahren erzeugt gleichmäßige, dünne Beschichtungen (10–30 μm) mit hoher Haftung und geringer thermischer Belastung, die sich für hochpräzise Anwendungen eignen. Die Kosten sind jedoch relativ hoch. Die Beschichtungsdicke muss präzise kontrolliert werden. Zu dicke Beschichtungen können aufgrund von Wärmeausdehnungsfehlern zum Ablösen führen, zu dünne Beschichtungen bieten möglicherweise unzureichenden Schutz. Die Gestaltung der Grenzfläche (z. B. das Hinzufügen einer SiC -Übergangsschicht) kann die Haftung zwischen Beschichtung und MoSi_2 -Substrat verbessern und die thermische Belastung reduzieren. Die Beschichtung muss zudem hoher Luftfeuchtigkeit oder korrosiven Umgebungen (z. B. schwefelhaltigen Gasen) standhalten. Al_2O_3 -Beschichtungen können in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit hydratisieren, daher müssen die Prozessparameter optimiert werden. Qualitätsprüfungen umfassen Schichtdickenmessung (Ultraschall oder REM), Haftungsprüfungen (Kratzmethode) und Oxidationsbeständigkeitsprüfungen, um die Leistungsfähigkeit der Beschichtung sicherzustellen. Die Optimierung der Oberflächenschutzschichttechnologie muss mit der Anwendungsumgebung abgestimmt werden. Halbleiter-Wärmebehandlungsöfen benötigen hochreine CVD-Beschichtungen zur Vermeidung von Verunreinigungen, und Glasschmelzöfen bevorzugen dicke SiC -Beschichtungen zur Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit. Regelmäßige Überprüfung der Beschichtungsintegrität und schnelles Durchlaufen des Temperaturbereichs von 400–700 °C können Oxidation und Beschichtungsabbau verhindern. Nanostrukturierte Beschichtungen und mehrschichtige Verbundbeschichtungen dürften zukünftig die Oberflächeneigenschaften von MoSi_2 -Komponenten weiter verbessern und so den anspruchsvolleren Anforderungen von Hochtemperaturanwendungen gerecht werden.

4.5 Schweiß- und Endenbearbeitungstechnik

Die Schweiß- und Endbearbeitungstechnologie ist der letzte Schritt bei der Herstellung von MoSi_2 -Heizelementen. Sie zielt darauf ab, die Stabilität und elektrothermische Leistung der Verbindung des kalten Endes mit der Stromversorgung sicherzustellen und gleichzeitig die Endstruktur zu optimieren, damit sie mechanischen und thermischen Belastungen standhält. Das kalte Ende des MoSi_2 -Heizelements wird mit hochleitfähigen Materialien (wie Aluminium oder Wolfram) dotiert, um den

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

spezifischen Widerstand zu senken. Der Durchmesser beträgt das 1,5- bis 2-fache des heißen Endes und muss gering gehalten werden, um eine Verschlechterung durch Überhitzung zu vermeiden. Durch Schweißen wird das kalte Ende mit der leitfähigen Verbindung (wie einer Nickelbasislegierung oder einer Kupferlegierung) verbunden, wodurch ein niedriger Kontaktwiderstand ($<0,01 \Omega$) und eine hohe mechanische Festigkeit gewährleistet werden. Gängige Schweißverfahren sind Plasmaschweißen und Widerstandsschweißen. Das Plasmaschweißen wird in einer inerten Atmosphäre (wie Argon) durchgeführt und die Temperatur wird auf 1200–1400 °C geregelt. Dadurch kann eine gleichmäßige und hochfeste Schweißnaht entstehen, die für hochpräzise Anwendungen (wie die Wärmebehandlung von Halbleitern) geeignet ist. Beim Widerstandsschweißen wird Hochstrom verwendet, um das kalte Ende und die Verbindung schnell zu erhitzen. Es ist kostengünstig, die Schweißnahtgleichmäßigkeit ist jedoch etwas schlechter und daher für Industrieöfen geeignet. Während des Schweißvorgangs müssen übermäßige Temperaturen vermieden werden, um eine Verschlechterung der MoSi₂-Kristallstruktur am heißen Ende oder eine Beschädigung des SiO₂-Films zu verhindern.

Die Endenbearbeitungstechnologie umfasst die Oberflächenbehandlung des kalten Endes, das Beschneiden der Abmessungen und das Aufbringen einer leitfähigen Beschichtung. Die Oberfläche des kalten Endes wird mechanisch poliert, um Oxidschichten und Defekte zu entfernen und so die Kontaktqualität mit der Klemme oder Schweißnaht zu verbessern. Das Beschneiden der Abmessungen erfolgt mittels CNC-Bearbeitung oder Diamantschneiden, um sicherzustellen, dass Durchmesser und Länge des kalten Endes die Konstruktionstoleranz einhalten und für U-förmige, W-förmige oder gerade Stabkomponenten geeignet sind. Leitfähige Beschichtungen (wie z. B. aluminisierte Schichten, 5–20 µm dick) werden durch Galvanisieren oder thermisches Spritzen aufgetragen, um die Leitfähigkeit des kalten Endes zu verbessern, den Kontaktwiderstand zu verringern und Oxidationskorrosion vorzubeugen. Die Endenbearbeitung muss auch die Übergangszone zwischen dem heißen und dem kalten Ende optimieren. Dazu werden konische Übergänge oder Gradientendotierung eingesetzt, um die thermische Spannungsverteilung zu glätten und das Risiko von Mikrorissen zu verringern (die Bruchzähigkeit von MoSi₂ beträgt etwa 2–3 MPa·m^{1/2}). Der Verarbeitungsprozess muss in einer inerten Atmosphäre durchgeführt werden, um den „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C zu vermeiden und die Bildung nicht schützender Oxide zu verhindern.

Bei der Optimierung von Schweißen und Endenbearbeitung müssen Betriebsbedingungen und Installationsmethoden berücksichtigt werden. Häufige thermische Zyklen können zu Spannungskonzentrationen in der Schweißnaht oder im Ende führen und die Schweißintegrität und die Kaltendtemperatur müssen regelmäßig überprüft werden. Zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und Thermoschockbeständigkeit können Schutzbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃, Dicke 10–50 µm) auf das Kaltende aufgetragen werden. Die Qualitätsprüfung umfasst Schweißfestigkeitsprüfungen (Zug- oder Scherversuch), Kontaktwiderstandsmessung und Mikrostrukturanalyse (SEM), um die Endleistung sicherzustellen. In der Praxis müssen Schweißen und Endenbearbeitung mit elektrischen Verbindungssystemen (wie Kupferklemmen) und Halterungsdesigns (Aluminiumoxidträger) koordiniert werden, um die Langzeitstabilität von MoSi₂-Heizelementen in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären zu gewährleisten und den Anwendungsanforderungen beim Keramiksintern, Glasschmelzen usw. gerecht zu werden.

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

Kapitel 5 Leistungstest des MoSi₂-Heizelements

5.1 Prüfung der Beziehung zwischen spezifischem Widerstand und Temperatur

Der spezifische Widerstand ist ein wichtiger elektrothermischer Leistungsparameter von Heizelementen aus Molybdändisilizid (MoSi₂), der sich direkt auf deren Heizleistung, Leistungsabgabe und Temperaturregelgenauigkeit auswirkt. MoSi₂ hat einen positiven Temperaturkoeffizienten (PTC) als spezifischen Widerstand, und der spezifische Widerstand steigt mit zunehmender Temperatur, wodurch eine adaptive Leistungsanpassung bei hohen Temperaturen möglich ist und MoSi₂ für Hochtemperaturanwendungen wie das Sintern von Keramik und das Schmelzen von Glas (bis zu 1800–1850 °C) geeignet ist. Der Test der Beziehung zwischen spezifischem Widerstand und Temperatur soll die Widerstandseigenschaften von MoSi₂ bei verschiedenen Temperaturen quantifizieren, seine elektrothermische Stabilität verifizieren und Daten für die Komponentenkonstruktion und Optimierung der Betriebsparameter liefern. Der Test wird üblicherweise in einem Labor oder Industrieofen durchgeführt, wobei ein hochpräziser Widerstandsprüfer (z. B. die Vier-Sonden-Methode) und ein temperaturgegener Ofen zum Einsatz kommen, um die Datenzuverlässigkeit zu gewährleisten.

Die Testmethode umfasst das Platzieren eines MoSi₂ -Heizelements (z. B. Typ U, Typ W, gängige Spezifikationen Φ6/12 oder Φ9/18) in einem Ofen mit kontrollierter Oxidationsatmosphäre, das schrittweise Erhöhen der Temperatur und das Messen des spezifischen Widerstands im Bereich von Raumtemperatur (25 °C) bis 1800 °C. Die Testausrüstung umfasst eine hochpräzise Gleichstromversorgung (Konstantstrom- oder Konstantspannungsmodus, Stromdichte $\leq 10 \text{ A/mm}^2$), ein digitales Multimeter (Genauigkeit $\pm 0,1 \%$) und ein Thermoelement (Typ K oder Typ S, Genauigkeit $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Während des Tests ist es notwendig, den „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C schnell zu durchlaufen, um die Bildung nicht schützender Oxide (eine Mischung aus MoO₃ und SiO₂) zu vermeiden, die den spezifischen Widerstand beeinflussen. Der spezifische Widerstand (ρ) wird mit der Formel $\rho = R \cdot A / L$ berechnet, wobei R der gemessene Widerstand, A die Querschnittsfläche des heißen Endes und L die Länge des heißen Endes ist. In der Testumgebung herrscht eine oxidierende Atmosphäre und die Luftfeuchtigkeit liegt unter 30 %, um die Stabilität des SiO₂ -Schutzfilms auf der Oberfläche zu gewährleisten.

MoSi₂ beträgt bei Raumtemperatur etwa $2,0 \times 10^{-5} \cdot \Omega \cdot \text{cm}$, was mit steigender Temperatur deutlich zunimmt und bei 1000°C $\Omega \cdot \text{cm}$ ungefähr $4,0 \times 10^{-5}$, bei 1500°C $\Omega \cdot \text{cm}$ etwa $4,5 \times 10^{-5}$ und bei 1800°C $\Omega \cdot \text{cm}$ bis zu $4,8 \times 10^{-5}$ beträgt. Dieser positive Temperaturkoeffizient sorgt dafür, dass das MoSi₂ -Element bei hohen Temperaturen eine stabile Leistungsabgabe hat, bedeutet aber auch, dass das kalte Ende (dotiert mit Aluminium oder Wolfram, mit einem spezifischen Widerstand von etwa $0,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) niedrig gehalten werden muss, um eine Überhitzung zu vermeiden. Testergebnisse zeigen, dass die Änderung des spezifischen Widerstands mit der Temperatur von der Reinheit und Mikrostruktur des Materials beeinflusst wird. Die Widerstandskurve von hochreinem MoSi₂ ist stabiler, und die Widerstandsschwankungen hochdichter Komponenten sind gering. Eine Dotierung kann den Widerstand weiter stabilisieren und die Korngrenzenstreuung reduzieren. Der Test muss auch den Einfluss

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermischer Zyklen auf den Widerstand erfassen. Nach mehreren thermischen Zyklen kann der Widerstand leicht ansteigen, und die Langzeitstabilität muss bewertet werden.

Zu den Testvorkehrungen gehören die Kalibrierung der Gerätegenauigkeit, die Gewährleistung stabiler Kaltendverbindungen (Kontaktwiderstand $< 0,01 \Omega$) und die Vermeidung reduzierender oder feuchter Atmosphären (Feuchtigkeit $> 70 \%$ kann zur Hydratisierung des SiO_2 -Films führen). Die Testdaten werden durch Anpassung von Widerstands-Temperatur-Kurven (z. B. quadratischen Polynomen) analysiert, um das Komponentendesign und die Leistungsregelungssysteme zu optimieren. In der Praxis bestimmen die Ergebnisse der Widerstandsprüfung die Betriebsparameter von MoSi_2 -Komponenten, um die elektrothermische Leistung und die Genauigkeit der Temperaturregelung in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären sicherzustellen.

5.2 Prüfung der Beziehung zwischen Hochtemperaturlebensdauer und Thermoschockverhalten

Die hohe Temperaturbeständigkeit und das Thermoschockverhalten sind wichtige Leistungsindikatoren von MoSi_2 -Heizelementen und bestimmen deren Zuverlässigkeit und Haltbarkeit in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären (bis $1800\text{--}1850^\circ\text{C}$). Die hohe Temperaturbeständigkeit beschreibt die Zeit, in der das Element bei der Zieltemperatur kontinuierlich betrieben werden kann, ohne dass es zu signifikanten Leistungseinbußen (wie z. B. Widerstandsdrift, Mikrorissausbreitung oder SiO_2 -Filmversagen) kommt. Das Thermoschockverhalten beschreibt die Widerstandsfähigkeit des Elements gegenüber Rissbildung bei schnellen Temperaturwechseln (wie z. B. Temperaturwechsel oder schnelles Abkühlen und Erhitzen). Die Niedertemperatursprödigkeit und die sogenannte „Plague“-Oxidation von MoSi_2 machen es anfällig für Schäden in Temperaturzyklen. Die Prüfung des Zusammenhangs zwischen hoher Temperaturbeständigkeit und Thermoschockverhalten dient der Bewertung der Haltbarkeit des Elements unter realen Betriebsbedingungen (z. B. Keramiksintern, Metallwärmebehandlung) und liefert die Grundlage für die Optimierung von Materialien und Designs. Zu den Prüfmethoden gehören Langzeit-Hochtemperatur-Betriebstests und Thermoschockzyklustests. Der Langzeit-Hochtemperaturbetriebstest wird in einem oxidierenden Ofen durchgeführt. Das MoSi_2 -Element (z. B. U-Typ oder W-Typ, $\Phi 6/12$ oder $\Phi 9/18$) wird auf die Zieltemperatur gebracht, die Leistungsdichte auf $15\text{--}20 \text{ W/cm}^2$ geregelt und $1000\text{--}5000$ Stunden lang kontinuierlich betrieben. Die Widerstandsänderung, der Zustand der SiO_2 -Oberflächenschicht und die Entwicklung der Mikrostruktur werden aufgezeichnet. Zur Prüfausrüstung gehören ein Hochtemperaturofen (Genauigkeit $\pm 5^\circ\text{C}$), ein Widerstandsprüfgerät (Vier-Sonden-Methode, Genauigkeit $\pm 0,1 \%$) und ein Mikroskop (SEM, Analyse von Rissen und Schichtdicken). Der Thermoschockzyklustest simuliert schnelles Erhitzen und Abkühlen. Typische Bedingungen sind Zyklen von $25\text{--}1500^\circ\text{C}$, Heiz- und Kühlraten von $10\text{--}20^\circ\text{C/min}$, Zyklen von $100\text{--}1000$ Mal und ein schneller Durchlauf durch $400\text{--}700^\circ\text{C}$, um eine „Pest“-Oxidation zu vermeiden. Nach der Prüfung wurden die Anzahl der Risse (optisches Mikroskop, Vergrößerung $50\text{--}200\times$), die Dicke des SiO_2 -Films und die Veränderungen der mechanischen Festigkeit (Dreipunkt-Biegeversuch, Bruchfestigkeit ca. $200\text{--}300 \text{ MPa}$) ausgewertet.

Testergebnisse zeigen, dass die Lebensdauer von MoSi_2 -Komponenten bei 1500°C über 5000 Stunden und bei 1800°C etwa $1000\text{--}2000$ Stunden erreichen kann. Die Lebensdauer wird durch die Stabilität des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SiO₂-Films beeinflusst. Bei hohen Temperaturen kann die Verflüchtigung von Si und MoO₃ zu einer Verdünnung der Filmschicht (<5 µm) führen, die Oxidationsbeständigkeit verringern und den spezifischen Widerstand um 10–20 % erhöhen, was zu Leistungseinbußen führen kann. Hochreines MoSi₂ (≥99,5 %) und heißgepresste Sinterkomponenten (Dichte ≥98 %) haben eine längere Lebensdauer, da Verunreinigungen (wie Fe, Al) und Poren die Schwächung der Korngrenzen und die Rissbildung verringern. Dotierungsmodifikationen (z. B. Y₂O₃, 0,1–1 Gew.-%) können die Korngrenzenfestigkeit erhöhen und die Lebensdauer um 10–20 % verlängern. Hinsichtlich der Thermoschockbeständigkeit treten Mikrorisse nach thermischen Zyklen hauptsächlich an der Heiß-Kalt-End-Verbindung auf. W-Typ-Komponenten weisen aufgrund ihrer Mehrfach-Heiß-End-Konstruktion eine bessere Thermoschockbeständigkeit als U-Typ-Komponenten auf, und gerade Stabkomponenten weisen aufgrund ihrer linearen Struktur eine höhere Rissbeständigkeit auf. Eine Oberflächenbeschichtung kann die Thermoschockbeständigkeit deutlich verbessern, die Rissausbreitung (Reduzierung der Rissdichte um 30–50 %) und das Ablösen des SiO₂-Films reduzieren. Zu den Testvorkehrungen gehören die Aufrechterhaltung einer oxidierenden Atmosphäre, die Vermeidung hoher Luftfeuchtigkeit (Luftfeuchtigkeit > 70 %) und reduzierender Umgebungen (die zu SiO₂-Filmversagen führen) sowie die regelmäßige Kalibrierung von Thermoelementen und Widerstandsprüfgeräten. Testdaten dienen der Materialoptimierung (z. B. Dotierung) und der strukturellen Auslegung (z. B. Optimierung des Biegeradius) von MoSi₂-Komponenten durch Lebensdauervorhersagemodelle (z. B. das Arrhenius-Modell) und statistische Rissanalysen. In der Praxis werden die Testergebnisse zur Erstellung von Wartungsplänen (z. B. regelmäßige Inspektionen von Rissen und Filmschichten) und Betriebsparametern genutzt, um die langfristige Zuverlässigkeit und Thermoschockstabilität von MoSi₂-Heizelementen in Hochtemperaturöfen sicherzustellen.

5.3 Stabilitätstest in oxidativer Umgebung

Stabilitätstests in einer oxidierenden Umgebung sind der Schlüssel zur Bewertung der Langzeitleistung von Heizelementen aus Molybdändisilizid (MoSi₂) in einer oxidierenden Hochtemperaturatmosphäre (bis zu 1800–1850 °C). Dabei stehen die Bildung und Beibehaltung des SiO₂-Schutzfilms auf der Oberfläche, seine antioxidativen Eigenschaften und die Stabilität seiner Mikrostruktur im Mittelpunkt. MoSi₂ erreicht in einer oxidierenden Atmosphäre eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit durch die Bildung eines dichten SiO₂-Schutzfilms auf seiner Oberfläche. Die Verflüchtigung von Si oder MoO₃ bei hohen Temperaturen kann jedoch zu einer Ausdünnung der Filmschicht führen, insbesondere im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C, wo es leicht zu nicht schützender Oxidation kommt, bei der ein Gemisch aus MoO₃ und SiO₂ entsteht und das Material pulverisiert wird. Der Stabilitätstest dient dazu, die Lebensdauer, die Widerstandsänderung und den Oberflächenzustand von MoSi₂-Elementen in einer oxidierenden Umgebung zu quantifizieren und zuverlässige Daten für Hochtemperaturanwendungen wie das Sintern von Keramik und das Schmelzen von Glas zu liefern.

Die Prüfmethode umfasst einen Langzeit-Oxidationstest und einen zyklischen Oxidationstest. Beim Langzeit-Oxidationstest wird das MoSi₂-Element (z. B. U-Typ, W-Typ, Φ6/12 oder Φ9/18) in einen Hochtemperatur-Oxidationsofen gelegt. Die Temperatur wird auf 1500–1800 °C geregelt, die Leistungsdichte beträgt 15–20 W/cm², und der Ofen läuft 1000–5000 Stunden im Dauerbetrieb. Zur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prüfausrüstung gehören ein Hochtemperaturofen, ein Widerstandsprüfgerät (Vier-Sonden-Methode, Genauigkeit $\pm 0,1\%$), ein Rasterelektronenmikroskop (REM) und ein Röntgendiffraktometer (XRD) zur Analyse der SiO_2 -Filmdicke (Ziel 10–20 μm), der Oberflächenmorphologie und der Phasenzusammensetzung. Der zyklische Oxidationstest simuliert den thermischen Zyklus unter realen Betriebsbedingungen. Die Temperaturen liegen zwischen 25 und 1500 $^{\circ}\text{C}$ bzw. 25 und 1800 $^{\circ}\text{C}$, die Heiz- und Kühlrate zwischen 5 und 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, die Anzahl der Zyklen zwischen 100 und 1000 und die Temperatur zwischen 400 und 700 $^{\circ}\text{C}$, um eine Oxidation zu vermeiden. Nach dem Test wurden Widerstandsänderungen, die Integrität des SiO_2 -Films, die Anzahl der Risse und der Massenverlust ausgewertet.

Testergebnisse zeigen, dass MoSi_2 -Komponenten in einer oxidierenden Atmosphäre bei 1500 $^{\circ}\text{C}$ eine hohe Stabilität aufweisen und eine Lebensdauer von über 5000 Stunden haben, der SiO_2 -Film dicht bleibt (Dicke 10–15 μm) und der Anstieg des spezifischen Widerstands weniger als 10 % beträgt. Hochreines MoSi_2 und heißgepresste Sinterkomponenten (Dichte $\geq 98\%$) haben eine bessere Stabilität, weniger Filmdefekte und einen Massenverlust von weniger als 0,5 $\text{mg}/\text{cm}^2/1000\text{ h}$. Dotierungsmodifikationen (wie Y_2O_3 , 0,1–1 Gew.-%) können die Haftung des SiO_2 -Films verbessern und das Ablösen verringern. Zyklische Oxidationstests zeigen, dass Thermoschockrisse hauptsächlich an der Heiß-Kalt-End-Verbindung auftreten und die W-Typ-Komponente aufgrund ihres Multi-Heiß-End-Designs etwas besser ist als die U-Typ-Komponente. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3 , Dicke 10–50 μm) können die Stabilität deutlich verbessern und den Masseverlust um 30–50 % reduzieren. Beim Test sollte hohe Luftfeuchtigkeit (Luftfeuchtigkeit $> 70\%$) oder schwefelhaltige Atmosphäre vermieden werden, um eine Hydratisierung oder Korrosion des SiO_2 -Films zu verhindern.

5.4 Härteprüfung des Heizelements

Die Härteprüfung ist ein wichtiges Mittel zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften von MoSi_2 -Heizelementen, da sie deren Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß, mechanische Beanspruchung und Risswachstum bei Thermoschock direkt widerspiegelt. Als intermetallische Verbindung weist MoSi_2 eine hohe Härte auf, kann jedoch aufgrund seiner Kältesprödigkeit bei mechanischen Stößen oder Temperaturwechselbeanspruchung leicht Mikrorisse bilden. Die Härteprüfung dient der Quantifizierung der Oberflächenhärte und der mikrostrukturellen Festigkeit von MoSi_2 -Komponenten und bildet die Grundlage für die Optimierung von Herstellungsprozessen (wie Heißpressintern) und Dotierungsmodifikationen sowie für die Erfüllung der Anforderungen an die mechanische Stabilität von Anwendungen wie Keramiksintern und Metallwärmebehandlung.

Die Prüfmethode basiert auf der Vickers-Härteprüfung. Mit einem Vickers-Härteprüfer werden Eindrücke in die Oberfläche des MoSi_2 -Elements (heißes und kaltes Ende) eingebracht und die diagonale Länge der Eindrücke gemessen (Genauigkeit $\pm 0,1\mu\text{m}$), um den Härtewert zu berechnen. Die Prüfung wird bei Zimmertemperatur durchgeführt und die Probenoberfläche muss sauber sein, um den Einfluss einer Oxidschicht oder Verunreinigungen zu vermeiden. Die Hochtemperatur-Härteprüfung verwendet einen Hochtemperatur-Härteprüfer, um die tatsächlichen Betriebsbedingungen zu simulieren. Sie muss in einer inerten Atmosphäre (z. B. Argon) durchgeführt werden, um Oxidation zu vermeiden. Zur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bewertung der Härtegleichmäßigkeit decken die Prüfpunkte das heiße Ende, das kalte Ende und die Übergangszone zwischen heißem und kaltem Ende ab, mit mindestens 5 Punkten in jedem Bereich, und der Durchschnittswert wird genommen (Abweichung <5 %). Zusätzliche Prüfungen umfassen Mikrostrukturanalysen und die Bewertung der Rissausbreitung.

Testergebnisse zeigen, dass die Vickershärte von MoSi₂-Komponenten bei Raumtemperatur 8–10 GPa beträgt, bei 1500 °C jedoch aufgrund von Korngrenzengleit- und Erweichungseffekten bei hohen Temperaturen auf etwa 4–6 GPa sinkt. Hochreines MoSi₂ und heißgepresste Sinterkomponenten (Dichte ≥ 98 %) weisen aufgrund geringer Porosität (< 2 %) und weniger Korngrenzendefekte eine höhere Härte (knapp 10 GPa) auf. Dotierungsmodifikationen (wie etwa Y₂O₃ oder Al₂O₃, 0,1–2 Gew.-%) können die Härte um 5–10 % steigern, weil Seltenerdoxide die Bindungskraft der Korngrenzen verbessern. Die Härte des kalten Endes ist geringfügig niedriger als die des heißen Endes (etwa 7–9 GPa), weil eine Dotierung mit Aluminium oder Wolfram die Festigkeit des Kristalls verringert. Die Härte kann nach thermischen Zyklen aufgrund der Bildung von Mikrorissen um 5–15 % sinken. Oberflächenbeschichtungen können die Verschleißfestigkeit deutlich verbessern, jedoch kann das Ablösen der Beschichtung das Substrat freilegen. Der Test erfordert eine kontrollierte Eindringtiefe (<10 % der Probendicke), um Matrixeffekte zu vermeiden. Die Ergebnisse dienen zur Bewertung der mechanischen Haltbarkeit von Komponenten bei Installation, Betrieb und Wartung.

5.5 Prüfung des Zusammenhangs zwischen Oxidationsbeständigkeit und Temperatur

Der Test der Oxidationsbeständigkeit und der Temperaturbeziehung ist der Kern des Leistungstests von MoSi₂-Heizelementen. Ziel ist es, das Oxidationsverhalten bei verschiedenen Temperaturen, die Bildung und Stabilität des SiO₂-Schutzfilms sowie den Materialmassenverlust und die Änderung des spezifischen Widerstands zu bewerten, um zuverlässige Daten für Hochtemperaturanwendungen (wie Glasschmelzen und Wärmebehandlung von Halbleitern) zu erhalten. Die Oxidationsbeständigkeit von MoSi₂ hängt von dem oberflächlichen SiO₂-Schutzfilm ab, der über 800 °C eine dichte Filmschicht bildet, aber im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C dazu neigt, nicht schützende Oxide zu bilden, was zur Pulverisierung führt; bei fast 1850 °C kann die Verflüchtigung von Si dazu führen, dass die Filmschicht dünner wird. Der Test soll die Änderung der Oxidationsbeständigkeit mit der Temperatur quantifizieren und die Betriebstemperatur und Wartungsstrategie optimieren.

Die Prüfmethoden umfassen einen Oxidationstest bei konstanter Temperatur und einen Oxidationstest bei variabler Temperatur. Beim Oxidationstest bei konstanter Temperatur wird das MoSi₂-Element (z. B. U-Typ, W-Typ, Φ6/12 oder Φ9/18) in einen Ofen mit oxidierender Atmosphäre mit einem Temperaturbereich von 400–1800 °C, einer Laufzeit von 100–1000 Stunden und einer Leistungsdichte von 15–20 W/cm² gelegt. Die Prüfausrüstung umfasst einen Hochtemperaturofen (Genauigkeit ±5 °C), eine Präzisionswaage (Genauigkeit ±0,1 mg), SEM und XRD zur Messung der Massenverlustrate (mg/cm²/h), der SiO₂-Filmdicke und der Phasenzusammensetzung. Der Oxidationstest mit variabler Temperatur simuliert thermische Zyklen bei Temperaturen von 25–1500 °C oder 25–1800 °C, einer Heiz- und Kühlrate von 5–10 °C/min, 50–500 Zyklen und einem schnellen Durchlauf von 400–700 °C. Nach

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dem Test wurden die Widerstandsänderung (Vier-Sonden-Methode, Genauigkeit $\pm 0,1$ %), die Filmintegrität (REM) und die Rissdichte (optisches Mikroskop, Vergrößerung 50–200 $\times$) ausgewertet.

Testergebnisse zeigen, dass MoSi₂ bei 800–1500 °C die beste Oxidationsbeständigkeit aufweist. Die Dicke des SiO₂-Films ist stabil, der Massenverlust liegt unter 0,2 mg/cm²/1000 h und der Anstieg des spezifischen Widerstands unter 10 %. Bei 400–700 °C führt die nicht-schützende Oxidation zu einem Massenverlust von bis zu 1–2 mg/cm²/100 h und einem Anstieg des spezifischen Widerstands um 20–30 %, wobei dieser Bereich schnell überschritten werden muss. Bei 1800 °C verstärkt sich die Si-Verflüchtigung, der SiO₂-Film wird dünner, der Massenverlust steigt auf 0,5–1 mg/cm²/1000 h und die Lebensdauer verkürzt sich auf 1000–2000 Stunden. Hochreines MoSi₂ und heißgepresste Sinterkomponenten (Dichte ≥ 98 %) weisen eine höhere Oxidationsbeständigkeit und weniger Filmdefekte auf. Dotierungsmodifikationen verbessern die Filmhaftung und reduzieren den Massenverlust um 20–30 %. Die Oberflächenbeschichtung verbessert die Oxidationsbeständigkeit deutlich, insbesondere bei 1800 °C, wo der Massenverlust um 40–60 % reduziert wird. Um die Datenzuverlässigkeit zu gewährleisten, sollte während des Tests hohe Luftfeuchtigkeit oder reduzierende Atmosphäre vermieden werden. Die Ergebnisse dienen der Optimierung der Betriebstemperatur (empfohlen 1500–1700 °C) und des Wartungsplans (z. B. regelmäßige Inspektion der Membranschicht) durch oxidationskinetische Analysen (z. B. Parabolmodell).

5.6 Zusammenhang zwischen Staboberflächenrauheit und spezifischem Widerstand

Die Oberflächenrauheit ist ein wichtiger Faktor, der die elektrothermische Leistung von Heizelementen aus Molybdändisilizid (MoSi₂) beeinflusst, und steht in direktem Zusammenhang mit der Gleichmäßigkeit ihres spezifischen Widerstands und der Stromverteilung. Die Oberflächenrauheit von MoSi₂-Komponenten wird hauptsächlich durch den Herstellungsprozess (wie Heißpressen und isostatisches Pressen) und die nachfolgende Verarbeitung (wie Polieren und Sandstrahlen) bestimmt. Oberflächen mit hoher Rauheit können zu lokaler Stromkonzentration, ungleichmäßiger thermischer Spannung und ungleichmäßiger Bildung eines SiO₂-Schutzfilms führen und dadurch die Stabilität des spezifischen Widerstands beeinträchtigen. Die Prüfung der Beziehung zwischen Oberflächenrauheit und spezifischem Widerstand zielt darauf ab, den Einfluss der Oberflächenmorphologie auf die elektrothermische Leistung zu quantifizieren, eine Grundlage für die Optimierung von Herstellungsprozessen und Komponentendesign zu schaffen und eignet sich besonders für Szenarien mit hochpräziser Temperaturregelung, wie z. B. Keramiksintern und Glasschmelzen. Bei der Testmethode wird ein Oberflächenrauheitsmessgerät (beispielsweise ein Profilometer oder ein Rasterkraftmikroskop mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ μm) verwendet, um die Oberflächenrauheitsparameter (wie Ra, Rz) des MoSi₂-Stabs zu messen. Der Testbereich umfasst das heiße und das kalte Ende und die Probenoberfläche muss sauber sein, um Störungen durch Verunreinigungen zu vermeiden. Der Widerstandstest erfolgt mit einer Vier-Sonden-Methode (Genauigkeit $\pm 0,1$ %), gemessen im Bereich von Raumtemperatur bis 1800 °C, kombiniert mit Proben unterschiedlicher Rauheit. Die Testumgebung ist eine oxidierende Atmosphäre und der „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C wird schnell durchlaufen, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden. Der spezifische Widerstand (ρ) wird mit der Formel $\rho = R \cdot A / L$ berechnet, wobei R der gemessene Widerstand, A die Querschnittsfläche und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L die Testlänge ist. Der Test muss die Auswirkung der Oberflächenrauheit auf die Bildung des SiO_2 - Films (SEM-Beobachtung, Vergrößerung 50-200 $\times$) und die Gleichmäßigkeit der Stromverteilung (Infrarotthermometer, Genauigkeit $\pm 1^\circ\text{C}$) aufzeichnen.

der spezifische Widerstand von MoSi_2 -Stäben mit geringerer Oberflächenrauheit ist stabiler und weist eine geringere Schwankungsbreite auf, da die glatte Oberfläche die lokale Stromkonzentration und die Ansammlung thermischer Spannungen verringert. Oberflächen mit hoher Rauheit können zu lokal erhöhtem spezifischen Widerstand führen, da Oberflächendefekte die Korngrenzenstreuung und ungleichmäßige Strompfade erhöhen. Das polierte MoSi_2 -Element weist bei hohen Temperaturen einen gleichmäßigeren SiO_2 -Film (Dicke 10 – 15 μm) mit geringeren Widerstandsschwankungen auf, was für hochpräzise Anwendungen geeignet ist. Sandgestrahlte oder raue Oberflächen neigen während thermischer Zyklen zu Mikrorissen, wodurch die Widerstandsschwankungen zunehmen und die Langzeitstabilität beeinträchtigt wird. Der Test erfordert eine Kalibrierung der Gerätegenauigkeit, eine Kontrolle der Kaltendverbindungen und der Atmosphärenbedingungen sowie die Vermeidung hoher Luftfeuchtigkeit (Luftfeuchtigkeit $> 70\%$), die eine Hydratisierung des SiO_2 - Films verursacht. Die Daten werden durch Anpassung der Rauheits-Widerstands-Kurve analysiert und zur Optimierung des Oberflächenbehandlungsprozesses (wie etwa chemisches Polieren oder Plasmaspritzen) verwendet, um die elektrothermische Leistung und die Genauigkeit der Temperaturregelung von MoSi_2 - Elementen zu verbessern.

5.7 Einfluss der Gleichmäßigkeit der Stabbeschichtung auf die Lebensdauer

Die Oberflächenbeschichtung von MoSi_2 -Heizelementen (z. B. SiC , Al_2O_3 , Dicke 10–50 μm) ist der Schlüssel zur Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Die Gleichmäßigkeit der Beschichtung wirkt sich direkt auf die Stabilität des SiO_2 -Schutzfilms, die Oxidationsrate und die Lebensdauer des Elements aus. Eine ungleichmäßige Beschichtung kann zu unzureichender lokaler Oxidationsbeständigkeit, thermischer Spannungskonzentration oder Abblättern führen und die Betriebszeit des Elements in einer Hochtemperatur-Oxidationsumgebung (z. B. beim Sintern von Keramik oder in der Halbleiterherstellung) verkürzen. Durch die Prüfung der Auswirkungen der Beschichtungsgleichmäßigkeit auf die Lebensdauer soll der Einfluss der Beschichtungsqualität auf die Haltbarkeit von Komponenten bewertet und Daten zur Optimierung von Beschichtungsprozessen (z. B. chemische Gasphasenabscheidung und Plasmaspritzen) bereitgestellt werden.

Die Testmethoden umfassen die Erkennung der Gleichmäßigkeit der Beschichtung und einen Hochtemperatur-Lebensdauertest. Die Gleichmäßigkeit der Beschichtung wird durch Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Genauigkeit $\pm 0,1\ \mu\text{m}$) und Röntgenspektrometer (EDS) analysiert, wobei die Verteilung der Beschichtungsstärke und die Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung (Si/C -Verhältnis in SiC oder Al/O -Verhältnis in Al_2O_3) gemessen werden. Die Proben umfassen MoSi_2 -Stäbe mit verschiedenen Beschichtungsverfahren (wie CVD-Beschichtung, Sprühbeschichtung), und der Testbereich umfasst die Übergangszone zwischen heißem und kaltem Ende. Der Hochtemperatur-Lebensdauertest wird in einem Ofen mit oxidierender Atmosphäre und einem Temperaturbereich von 1500–1800 $^\circ\text{C}$, einer Leistungsdichte von 15–20 W/cm^2 , einer Laufzeit von 1000–5000 Stunden und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einem Schnelldurchgang von 400–700 °C durchgeführt, um eine „Blight“-Oxidation zu vermeiden. Der Test erfasst die Massenverlustrate (Präzisionswaage, Genauigkeit $\pm 0,1$ mg), den Zustand des SiO₂-Films (SEM- Beobachtung) und die Änderung des spezifischen Widerstands (Vier-Sonden-Methode, Genauigkeit $\pm 0,1$ %). Weitere Tests umfassen die Beschichtungshaftung und die Thermoschockbeständigkeit.

MoSi₂-Komponenten mit hoher Beschichtungsgleichmäßigkeit (Dickenabweichung < 5 %) wird deutlich verlängert, da die gleichmäßige Beschichtung die stabile Bildung des SiO₂-Films fördert und lokale Oxidation und Abblättern verringert. CVD-Beschichtungen haben aufgrund ihrer hohen Dichte und Haftung eine längere Lebensdauer bei 1800 °C und sind daher für anspruchsvolle Anwendungen geeignet. Wenn die Sprühbeschichtung eine ungleichmäßige Dicke aufweist (Abweichung > 10 %), kann sie sich im Übergangsbereich zwischen heißem und kaltem Ende ablösen, wodurch der SiO₂-Film dünner wird, der oxidative Abbau beschleunigt wird und seine Lebensdauer verkürzt wird. Gleichmäßige Beschichtungen verringern außerdem die Dichte von Mikrorissen in thermischen Zyklen und verbessern die Thermoschockbeständigkeit. Der Test erfordert eine Kontrolle der Atmosphäre und der Heiz- und Abkühlraten, um hohe Luftfeuchtigkeit oder reduzierende Umgebungen (die zum Versagen des SiO₂-Films führen) zu vermeiden. Die Daten dienen als Grundlage für die Optimierung des Beschichtungsprozesses und für Wartungsstrategien (wie etwa die regelmäßige Überprüfung der Beschichtungsintegrität) durch die Analyse der Beziehung zwischen Beschichtungsstärke und Lebensdauer, um die langfristige Zuverlässigkeit von MoSi₂-Komponenten in oxidierenden Umgebungen mit hohen Temperaturen sicherzustellen.

5.8 Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Spannungskopplung

MoSi₂-Heizelemente sind der Wechselwirkung von thermischer, mechanischer und umweltbedingter Spannung ausgesetzt, insbesondere in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären und bei häufigen thermischen Zyklen. Thermische Spannung entsteht durch den Temperaturgradienten, der durch schnelles Aufheizen und Abkühlen verursacht wird, mechanische Spannung durch Vibrationen bei Installation oder Betrieb und umweltbedingte Spannungen durch oxidierende oder korrosive Atmosphären. Spannungskopplung kann zur Ausbreitung von Mikrorissen, zum Ablösen des SiO₂-Films oder zu einer Drift des spezifischen Widerstands führen und so die Lebensdauer des Elements verkürzen. Die Prüfung der Beziehung zwischen Lebensdauer und Spannungskopplung zielt darauf ab, die Auswirkungen von Spannung auf die Haltbarkeit von MoSi₂-Elementen zu quantifizieren und eine Grundlage für die Optimierung von Design (wie Form, Halterung) und Betriebsparametern (wie Heiz- und Abkühlrate) zu schaffen. Zudem eignet sich das Testverfahren für Hochtemperaturanwendungen wie das Sintern von Keramik und die Glasverarbeitung.

Die Prüfmethoden umfassen Spannungssimulation und Lebensdauerprüfung. Die Spannungssimulation nutzt die Finite-Elemente-Analyse (FEA), um die thermische Spannungsverteilung in der Heiß-Kalt-Übergangszone (basierend auf dem Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeit von MoSi₂) zu bewerten, kombiniert mit mechanischen Spannungsprüfungen (Dreipunkt-Biegeversuch, Genauigkeit $\pm 0,1$ MPa). Die Lebensdauerprüfung wird in einem Ofen mit oxidierender Atmosphäre bei

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einer Temperatur von 1500–1800 °C, einer Leistungsdichte von 15–20 W/cm², einer Betriebsdauer von 1000–5000 Stunden und thermischen Zyklusbedingungen von 25–1500 °C durchgeführt. Die Prüflinge umfassen U- und W-förmige MoSi₂-Elemente (Φ6/12 oder Φ9/18), und es werden einige Oberflächenbeschichtungen (z. B. SiC) aufgebracht. Der Test erfasst die Massenverlustrate (Präzisionswaage, Genauigkeit ±0,1 mg), die Rissdichte (SEM, Vergrößerung 50-200×), den Zustand des SiO₂-Films und die Änderung des spezifischen Widerstands (Vier-Sonden-Methode). Umweltbelastungen werden durch die Einführung von Spuren korrosiver Gase (wie SO₂) simuliert, um die Auswirkungen auf die Lebensdauer zu bewerten.

Die Testergebnisse zeigen, dass thermische Spannung der Hauptfaktor ist, der die Lebensdauer von MoSi₂-Komponenten beeinflusst. Schneller Temperaturanstieg und -abfall führt zu Spannungskonzentrationen im Übergangsbereich zwischen heißem und kaltem Ende, erhöht die Mikrorissdichte und verkürzt die Lebensdauer. Komponenten vom W-Typ weisen aufgrund der Konstruktion mit mehreren heißen Enden eine gleichmäßigere Spannungsverteilung auf und haben eine höhere Lebensdauer als Komponenten vom U-Typ. Mechanische Spannungen (wie Vibrationen oder unsachgemäße Installation) verschlimmern die Rissausbreitung, verringern die Bruchzähigkeit und verkürzen die Lebensdauer. Eine Oberflächenbeschichtung mildert den Spannungskopplungseffekt erheblich, und eine gleichmäßige Beschichtung verringert das durch thermische Spannung verursachte Abplatzen und verlängert die Lebensdauer. Dotierungsmodifikationen (wie Y₂O₃) verbessern die Korngrenzenfestigkeit und verringern die Spannungsempfindlichkeit. Umweltbelastungen (wie eine korrosive Atmosphäre) beschleunigen die Zersetzung des SiO₂-Films, und die Atmosphäre muss streng kontrolliert werden. Der Test erfordert kalibrierte Thermoelemente (Genauigkeit ±1 °C) und Klemmen. Die Daten dienen als Grundlage für die Optimierung des Designs (wie etwa die Vergrößerung des Biegeradius) und der Betriebsparameter durch Spannungs-Lebensdauer-Modelle (wie etwa die Weibull-Analyse), um die langfristige Zuverlässigkeit von MoSi₂-Komponenten in Umgebungen mit hohen Temperaturen und komplexen Spannungen sicherzustellen.

5.9 Rissbildungs-, Biege- und Endenablationsmechanismen

Bei langfristigem Hochtemperaturbetrieb versagen Heizelemente aus Molybdändisilizid häufig aufgrund von Rissen, Verbiegungen und Endablation. Diese Probleme beeinträchtigen nicht nur die Leistungsstabilität, sondern wirken sich auch direkt auf den sicheren Betrieb und die Lebensdauer des gesamten Heizsystems aus.

Die meisten Rissbildungen sind auf thermische Spannungen zurückzuführen. Wenn sich das Heizelement in einer Umgebung mit hohen Temperaturen schnell erwärmt oder abkühlt, ist der Temperaturgradient zwischen der inneren und äußeren Schicht des Materials groß. Dies kann leicht zu einer ungleichmäßigen Wärmeausdehnung im Material und damit zu einer Konzentration thermischer Spannungen führen. Bei ungünstiger Konstruktion, asymmetrischen geometrischen Abmessungen oder mikroskopischen Defekten in den Komponenten (wie Poren und Einschlüssen) führt thermische Spannung zur Ausdehnung von Mikrorissen und schließlich zur Bildung makroskopischer Risse. Auch eine ungleichmäßige Dicke der während des Oxidationsprozesses gebildeten Siliziumoxidschicht kann

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aufgrund von Spannungsunterschieden zu Rissen führen, insbesondere bei plötzlicher Abkühlung auf hohe Temperaturen oder bei Stillstandskühlung.

Verbiegungen treten häufig auf, wenn die Aufhängung oder die Trägerstruktur während des Gebrauchs instabil ist oder wenn sich das Material bei hohen Temperaturen aufgrund der Schwerkraft oder äußerer mechanischer Kräfte plastisch verformt. Obwohl MoSi₂ eine spröde Keramik mit geringer Plastizität ist, unterliegt seine Struktur bei hohen Temperaturen (über 1500 °C) einem gewissen Grad an viskosem Fließen. Dies gilt insbesondere für dünne und lange freitragende Strukturen, die bei hohen Temperaturen durch ihr Eigengewicht zum Verbiegen neigen. Sobald die Biegung ausgebildet ist, steigt auch das Risiko der Rissausbreitung beim Wiedererhitzen.

Endablation ist ein häufiges lokales Fehlerphänomen bei MoSi₂ -Heizelementen und konzentriert sich vor allem im Elektrodenanschlussbereich oder bei hoher Stromdichte. Dieser Bereich ist häufig von starker Oxidation oder Verdampfung aufgrund von zu hohem Kontaktwiderstand, Lichtbogendurchschlag, Wärmestau oder unzureichender lokaler Luftzirkulation betroffen. Bei hohen Temperaturen und hohen Strömen können sich lokale Hotspots auf der MoSi₂- Oberfläche bilden, die zu erhöhter Siliziumverflüchtigung und Zerstörung der Schutzschichtstruktur führen und so Ablationsgruben oder Schmelzhohlräume bilden. Auch eine unsachgemäße Endbearbeitung, z. B. durch unzureichende Entfernung der Oxidschicht, schlechte Schweißqualität oder unzureichende Kontaktfläche, beschleunigt den Ablationsprozess.

Um die oben genannten Ausfälle zu verzögern oder zu vermeiden, müssen die strukturelle Gestaltung, der Installationsprozess, die elektrische Steuerung und die Nutzungsumgebung usw. optimiert werden. Beispielsweise kann die Lebensdauer der Komponente effektiv verlängert werden, indem man eine angemessene Unterstützungsmethode anwendet, um die thermische Spannungskonzentration zu reduzieren, die Heizrate kontrolliert, um das Risiko eines Thermoschocks zu verringern, die Struktur der leitfähigen Endkontakte verbessert, um den Kontaktwiderstand zu verringern, und die Integrität des Oxidfilms sicherstellt.

5.10 Mikrostrukturanalyse und Untersuchung der Ausfallart

Die Mikrostrukturanalyse ist das wichtigste Mittel zum Verständnis des Ausfallmechanismus von MoSi₂ -Heizelementen. Sie kann die wesentlichen Ursachen für die physikalischen, chemischen und mechanischen Veränderungen in Hochtemperaturumgebungen auf der Materialkörperebene aufdecken. Durch mikroskopische Betrachtung des Querschnitts, der Oberfläche und der inneren Struktur des Elements vor und nach der Bearbeitung können Kornstruktur, Phasengrenzänderungen, Oxidschichtwachstumsverhalten und potenzielle Mikrorissverteilung identifiziert werden.

In einer oxidativen Umgebung mit hohen Temperaturen bildet sich auf der Oberfläche von MoSi₂ ein dichter SiO₂ - Schutzfilm, der eine klare Grenzfläche zum Substrat bildet. Bei längerem Gebrauch können Hochtemperaturschwankungen oder chemische Korrosion zum Ablösen der Grenzfläche oder zur Bildung einer porösen Oxidschicht führen, was die Schutzwirkung beeinträchtigt. Mikroskopische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Analysen zeigen zudem häufig geringe Mengen von Zweitphasenpartikeln in MoSi_2 , wie z. B. Mo_5Si_3 , die ebenfalls die strukturelle Stabilität bei unterschiedlichen Oxidationsgraden beeinflussen.

Die Erforschung von Versagensarten konzentriert sich hauptsächlich auf Rissausbreitungspfade, Oxidschichtbruchmechanismen, Elementdiffusionstrends und Phasenwechselerhalten. Mikroskopische Analysen werden häufig in Verbindung mit Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Spektroskopie (EDS) durchgeführt. Diese zeigen deutlich, dass Risse meist in schwach gebundenen Bereichen an Korngrenzen entstehen oder makroskopische Schäden durch Oxidationsspannung induzierte Porenverbindungen entstehen. Darüber hinaus kann durch die Analyse der Unterschiede in der Oxidschichtdicke bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen und -zeiten die Oxidationskinetik abgeleitet und so ein Modell der Materialabbaurate erstellt werden.

Untersuchungen zeigen, dass die meisten Ausfälle hauptsächlich durch die kombinierten Effekte von „Oxidation + thermischer Spannung + Strukturdefekten“ verursacht werden. Das heißt, das Material bildet bei Hochtemperaturoxidation einen Schutzfilm. Der Spannungsunterschied während des thermischen Zyklus führt jedoch zum Reißen des Films, wodurch die freiliegende Oberfläche weiter oxidiert, was zu Spannungskonzentrationen und Mikrorissausbreitung führt und letztendlich zur Zerstörung der Gesamtstruktur des Materials führt. Dieses zyklische und allmähliche Akkumulationsmuster ist ein typisches Ermüdungsverhalten bei thermischer Korrosion.

Um die Ausfallsicherheit zu verbessern, können künftige Forschungen Spurenelemente (wie Al, Zr usw.) in die MoSi_2 -Matrix einbringen, um die Stabilität der Oxidschicht zu verbessern, oder ein Zweiphasen- oder Gradientenstrukturdesign zum Abbau thermischer Spannungen verwenden. Darüber hinaus kann durch die Kontrolle der Korngröße, die Optimierung des Sinterprozesses und die Erhöhung der Dichte die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur effektiv verbessert, die Defektrate reduziert und die allgemeine Ausfallsicherheit verbessert werden.



CTIA GROUP LTD Silizium-Molybdän-Stab

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 6 Installation von MoSi₂-Heizelementen

6.1 Vorbereitungen vor der Installation

Bei der Installation des MoSi₂-Heizelements ist eine systematische Vorbereitung erforderlich, um einen reibungslosen Betrieb der nachfolgenden Vorgänge zu gewährleisten und Schäden am Element oder Leistungseinbußen durch unsachgemäßen Betrieb zu vermeiden. Zunächst sollten die Spezifikationen, Spannungspegel, Leistungsparameter und Abmessungen des Heizelements anhand der Konstruktionszeichnungen und der Bedienungsanleitung des Heizgeräts auf Übereinstimmung mit dem Gerät überprüft werden. Gegebenenfalls sollte ein physikalischer Vergleich durchgeführt werden, um zu verhindern, dass der Systembetrieb durch Modellfehler beeinträchtigt wird.

Überprüfen Sie anschließend, ob die Hohlraumstruktur des Heizofens, die Trägervorrichtung, die Elektrodenhalterung und das Isoliermaterial intakt sind. Stellen Sie insbesondere sicher, dass der Installationsort sauber, frei von Verunreinigungen und mit guter Isolierleistung ist. Der Ofen muss trocken gehalten werden, um zu verhindern, dass Feuchtigkeit den Hochtemperatur-Oxidfilm beeinträchtigt oder einen Kurzschluss verursacht.

Die für die Installation verwendeten Werkzeuge und Hilfsmittel sollten ebenfalls im Voraus vorbereitet werden, darunter Keramikhalterungen, Edelstahlklemmen, Drehmomentwerkzeuge, Isolierdichtungen und hochtemperaturbeständige leitfähige Materialien. Bediener müssen saubere Isolierhandschuhe tragen und dürfen die Heizteile von MoSi₂-Komponenten nicht mit bloßen Händen berühren, um eine Ölverschmutzung zu vermeiden, die die Bildung einer Oxidschicht beeinträchtigt.

Darüber hinaus sollten die Monteure eine grundlegende Sicherheitsschulung erhalten, um die Betriebsabläufe, Vorsichtsmaßnahmen und Schutzmaßnahmen zu erläutern, die beim Transport und der Handhabung der Komponenten zu beachten sind. Bei neuen Geräten, die zum ersten Mal in Betrieb genommen werden, sollte zudem ein Leerofen-Temperaturanstiegstest durchgeführt werden, um zu überprüfen, ob die elektrische Steuerung und das Wärmeausdehnungsverhalten des Ofenkörpers den Erwartungen entsprechen.

6.2 Detaillierte Installationsschritte

Die Installation von MoSi₂-Heizelementen sollte streng nach den Standardschritten erfolgen, um einen guten elektrischen Kontakt, eine gute thermische Unterstützung und einen guten Oxidationsschutz im tatsächlichen Betrieb zu gewährleisten. Im Folgenden sind die wichtigsten Schritte des standardisierten Installationsprozesses aufgeführt:

Der erste Schritt besteht darin, die Positionierung zu bestätigen: Bestätigen Sie die Einbauposition jedes Heizelements anhand der Gerätezeichnungen und der Komponentenkennzeichnung. Achten Sie besonders auf die Symmetrie und Balance der Elektroden, wenn mehrere Elemente parallel geschaltet werden, um lokale Überhitzung durch ungleichmäßige Belastung zu vermeiden. Der zweite Schritt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

besteht darin, die Halterung zu befestigen: Platzieren Sie das MoSi₂-Heizelement auf einer Keramikhalterung oder einer Trägerstruktur und passen Sie seine Position entsprechend an, um sicherzustellen, dass das Heizelement zentriert und frei im Ofenraum positioniert ist. Die Trägerstruktur sollte ein gewisses Maß an Flexibilität aufweisen, um sich der Verformung des Elements bei Wärmeausdehnung anzupassen und Risse durch mechanische Belastung zu vermeiden. Der dritte Schritt ist der Elektrodenanschluss: Verwenden Sie eine spezielle Elektrodenhalterung, um das leitende Ende fest mit dem Stromkabel zu verbinden. Die Halterung muss angedrückt werden, jedoch nicht zu fest, um einen Bruch des Bauteils zu vermeiden. Die Anschlussfläche sollte sauber gehalten werden. Bei Bedarf kann der Kontaktwiderstand durch Verwendung von Hochtemperaturleitpaste verbessert werden. Bei der Installation sollten Elektrode und Kabel mit geeigneten Isoliermaterialien isoliert werden, um Lichtbogenentladungen zu vermeiden. Der vierte Schritt ist die Inspektion und Feinabstimmung: Nachdem alle Komponenten angeschlossen sind, überprüfen Sie deren Einbauhöhe, Ebenheit und Parallelität, um sicherzustellen, dass jedes Bauteil gleichmäßig belastet und sinnvoll angeordnet ist. Achten Sie insbesondere darauf, dass die Halterung symmetrisch und gleichmäßig ist, um eine ungleichmäßige Stromverteilung zu vermeiden.

Schritt 5, Systemtest: Prüfen Sie vor dem Einschalten mit einem Multimeter oder Isolationsprüfer, ob der Widerstandswert im Normbereich liegt. Führen Sie nach dem Einschalten zunächst einen kurzen Vorheiztest mit niedriger Spannung durch, um festzustellen, ob ungewöhnliche Erwärmung, Funkenbildung, ungewöhnliche Geräusche usw. auftreten. Sobald alles in Ordnung ist, erhöhen Sie die Temperatur schrittweise. Schritt 6, Thermische Betriebsstabilität: Vor der offiziellen Produktion wird empfohlen, einen vollständigen Heiz-Isolier-Kühl-Zyklus durchzuführen, um die Stabilität des Betriebszustands der Komponenten und die Gleichmäßigkeit der Wärmeverteilung des Geräts zu überprüfen. Bei Auffälligkeiten sollte die Maschine sofort zur Überprüfung angehalten werden, um irreversible Schäden an den Komponenten zu vermeiden.

Durch standardisierte Installationsschritte kann die Ausfallrate von Heizelementen aus Molybdändisilizid im Frühbetrieb effektiv reduziert werden, wodurch ihr langfristig stabiler Betrieb sichergestellt, ihre Lebensdauer verlängert und eine gute Grundlage für den sicheren und effizienten Betrieb von Hochtemperaturgeräten geschaffen wird.

6.3 Installationshinweise

Bei der Installation von MoSi₂-Heizelementen ist besonderes Augenmerk auf einige wichtige Details zu legen, um Schäden am Element, Ofenstörungen oder einen instabilen Systembetrieb aufgrund von Bedienungsfehlern zu vermeiden. Das Heizelement ist ein sprödes Keramikmaterial und sollte bei Transport und Installation mit Vorsicht behandelt werden. Stöße, Verbiegungen oder Schwerkrafteinwirkungen sind strengstens verboten. Insbesondere beim Anziehen der Elektrodenklemme sollte kein übermäßiges Drehmoment angewendet werden, um lokale Spannungskonzentrationen und damit verbundene Risse im Element zu vermeiden. Zweitens muss die Oberfläche des Bauteils, insbesondere der Heizteil, sauber gehalten werden. Der Kontakt mit Fett, Feuchtigkeit oder Verunreinigungen ist strengstens verboten, um das Oxidationsverhalten bei hohen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturen nicht zu beeinträchtigen. Bediener müssen saubere Isolierhandschuhe tragen, um sicherzustellen, dass die Oberfläche des Bauteils während des gesamten Installationsprozesses nicht künstlich verunreinigt wird.

Darüber hinaus sollte die Verbindung zwischen Elektrode und Draht einen guten Kontakt und eine gleichmäßige Klemmung gewährleisten, um eine Endablation oder anormale Temperaturen aufgrund eines übermäßigen Kontaktwiderstands zu vermeiden. Gleichzeitig sollte der Abstand zwischen den Komponenten konstant gehalten werden, um eine Überlastung und Verbrennung einiger Komponenten aufgrund eines ungleichmäßigen Wärmefelds oder einer Stromabweichung zu vermeiden. Darüber hinaus sollte besonderes Augenmerk auf Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Sauberkeit der Installationsumgebung gelegt werden. Das Innere des Ofens sollte staub- und wasserfrei sein. In feuchter Umgebung muss der Ofen vollständig getrocknet werden, um Schäden durch Wasserdampf im Hochtemperaturbetrieb zu vermeiden.

6.4 Sicherheitstechnische Angaben

Um den sicheren und stabilen Betrieb des MoSi₂-Heizelementsystems zu gewährleisten, müssen die Betreiber die folgenden Sicherheitsvorschriften strikt einhalten: Vor dem Einschalten müssen Sie sicherstellen, dass die gesamte Verkabelung korrekt ist, die Isolierung in gutem Zustand ist und das Steuerungssystem normal funktioniert. Tragen Sie beim Bedienen des Geräts isolierende Handschuhe, Schutzbrille und Schutzkleidung. Es ist strengstens verboten, heiße Teile oder stromführende Strukturen mit bloßen Händen zu berühren. Das Bauteil sollte langsam aufgeheizt werden, um einen Thermoschock durch plötzliches Einschalten zu vermeiden. Insbesondere bei der ersten Inbetriebnahme oder nach längerer Nichtbenutzung sollte eine schrittweise Aufheizmethode angewendet werden, damit sich das Bauteil allmählich an die thermische Umgebung anpassen kann. Es ist strengstens verboten, die Ofentür während des Betriebs unbefugt zu öffnen oder die Oberfläche der Komponenten zu berühren.

Die Inspektion oder Beobachtung sollte nach dem Ausschalten und ausreichender Abkühlung erfolgen. Bei Auffälligkeiten (z. B. Funken, Lichtbögen, ungewöhnliche Geräusche, lokale Rötungen usw.) schalten Sie den Ofen aus und überprüfen Sie ihn sofort. Zwangsbetrieb ist strengstens untersagt. Beim Austausch von Komponenten oder Elektrodevorrichtungen sollte zunächst die Hauptstromversorgung unterbrochen und die Freigabe der Restspannung bestätigt werden, um sicherzustellen, dass sich die Betriebsumgebung in einem absolut sicheren Zustand befindet. Eine wichtige Maßnahme zur Gewährleistung eines langfristig sicheren Betriebs ist die regelmäßige Überprüfung, ob die elektrische Verkabelung locker ist, ob die Klemmen altern und ob sich Kohlenstoff- oder Staubablagerungen im Ofen befinden.

6.5 Häufige Fehler und Wartungshandbuch

Während des Gebrauchs können die folgenden typischen Fehler im Heizelement aus Molybdändisilizid auftreten. Das Wartungspersonal sollte über grundlegende Urteils- und Verarbeitungsfähigkeiten verfügen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Enddurchbrennen : Äußert sich meist durch lokales Schmelzen oder Schwärzen der Elektrodenverbindung. Mögliche Ursachen sind zu hoher Kontaktwiderstand, Lichtbogenentladung oder lose Kabel. Prüfen Sie, ob die Klemme fest angepresst ist und die Kontaktfläche sauber ist, und ersetzen Sie die verbrannten Teile entsprechend .

Oberflächenrisse : Meistens entstehen sie durch Thermoschock oder mechanische Belastung. Wartungsempfehlungen umfassen die Anpassung der Heizrate, die Optimierung der Trägerstruktur und die regelmäßige Überprüfung der Komponenten auf Mikrorisse.

Ungleichmäßige Erwärmung : Kann durch ungleichmäßige Bauteilabstände, ungleichmäßige Leistungsverteilung oder Leistungseinbußen einzelner Komponenten verursacht werden. Die Heizzone sollte neu angeordnet und der Widerstandswert jeder Komponentengruppe geprüft werden.

Komponentenbruch : Häufige Ursache sind unsachgemäße Handhabung, ungleichmäßige Montagekraft oder langfristige Überlastung. Die Betriebsaufzeichnungen sollten auf äußere Krafteinwirkungen überprüft und neue Komponenten ausgetauscht werden .

Startfehler : Wenn das System nicht normal aufheizen kann, kann dies an einem Stromkreisfehler, einem anormalen Leistungssteuermodul oder einer Komponentenbeschädigung liegen. Überprüfen Sie nacheinander die Stromaufnahme, den Elektrodenkontakt und die Steuerleistung .

Um die Lebensdauer der Komponenten zu verlängern, empfiehlt es sich, einmal wöchentlich eine Routineprüfung durchzuführen. Dabei wird geprüft, ob die Elektrodenverbindung fest ist, der Ofen sauber ist und der Temperaturanstieg normal ist. Bei Geräten mit hoher Frequenz sollte vierteljährlich eine umfassende Wartung durchgeführt und die Betriebsparameter für eine langfristige Trendanalyse aufgezeichnet werden.

6.5.1 Ursachen und Lösungen bei Heizelementbruch

aus Molybdändisilizid (MoSi_2) sind im Hochtemperaturbetrieb eine häufige Ausfallursache und beeinträchtigen die Betriebsstabilität und Produktionseffizienz der Anlage direkt. Brüche werden hauptsächlich durch Faktoren wie thermische und mechanische Belastung, Materialfehler und unsachgemäße Betriebsbedingungen verursacht. Als intermetallische Verbindung weist MoSi_2 eine hohe Härte, aber eine geringe Bruchzähigkeit (ca. $2\text{--}3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) auf. Es bilden sich leicht Mikrorisse und dehnen sich unter komplexer Belastung aus, was zu Brüchen führt. Die Analyse der Bruchursache und die Ergreifung gezielter Lösungen können die Lebensdauer der Komponente deutlich verlängern. MoSi_2 eignet sich daher für Hochtemperaturprozesse wie Keramiksintern und Glasschmelzen.

Bruchursachen: Thermische Spannungskonzentration: Schneller Temperaturanstieg und -abfall verursacht übermäßige Temperaturgradienten in der Übergangszone zwischen dem heißen und dem kalten Ende. Der Unterschied im Wärmeausdehnungskoeffizienten (ca. $8,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) verursacht hohe thermische Spannungen und verursacht Risse. Häufige Temperaturzyklen verschlimmern die Ausbreitung von Mikrorissen. Mechanische Spannung: Unsachgemäße Installation oder Vibrationen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

während des Betriebs verursachen mechanische Spannungskonzentrationen, insbesondere an den Biegungen von U- oder W-förmigen Bauteilen. Materialfehler: Porosität (Dichte $< 98\%$), Korngrenzenverunreinigungen (wie Fe, Al) oder ungleichmäßige Korngröße während des Herstellungsprozesses verringern die Bruchzähigkeit und Risse breiten sich leicht entlang von Fehlern aus. Unsachgemäße Betriebsbedingungen: Eine zu hohe Leistungsdichte führt zu lokaler Überhitzung, und ein zu langer Aufenthalt im „Pest“-Temperaturbereich von 400–700 °C führt zur Bildung nicht schützender Oxide (wie beispielsweise MoO_3), die die Festigkeit des Materials schwächen.

Lösung: Optimieren Sie die Heiz- und Kühlrate: Regeln Sie die Heiz- und Kühlrate auf 5–10 °C/min, überschreiten Sie schnell 400–700 °C und reduzieren Sie die Wärmespannung. Verwenden Sie eine proportional gesteuerte Stromversorgung (Spannung 20–100 V), um eine gleichmäßige Temperaturkurve zu erzielen und die Spannungskonzentration im Übergangsbereich zwischen dem heißen und dem kalten Ende zu reduzieren. Verbessern Sie das Installationsdesign: Verwenden Sie Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid, die den Eigenschaften von MoSi_2 entsprechen, um die mechanische Spannung zu verringern. Die Klemmen sind mäßig fest, um ein zu festes Anziehen oder Vibrationen zu vermeiden. W-Typ-Komponenten werden für große Öfen bevorzugt, da sie aufgrund des Designs mit mehreren heißen Enden eine gleichmäßigere Spannungsverteilung aufweisen. Verbessern Sie die Materialqualität: Verwenden Sie Heißpresssintern (Dichte $\geq 98\%$) und Dotierungsmodifikation (wie Y_2O_3 , 0,1–1 Gew.-%), um die Korngrenzenfestigkeit zu optimieren, die Korngröße zu kontrollieren und Poren und Verunreinigungen zu reduzieren. Standardisieren Sie die Betriebsbedingungen: Halten Sie eine Leistungsdichte von 15–20 W/cm² ein, kontrollieren Sie die oxidierende Atmosphäre und vermeiden Sie reduzierende oder feuchte Umgebungen, die den SiO_2 -Film schädigen. Kalibrieren Sie regelmäßig das Thermoelement (Genauigkeit ± 1 °C) und das Stromversorgungssystem, um lokale Überhitzung zu vermeiden. Oberflächenbeschichtung: Tragen Sie eine SiC - oder Al_2O_3 -Beschichtung auf, um die Thermoschockbeständigkeit und Festigkeit zu verbessern und die Rissausbreitung zu reduzieren. Die CVD-Beschichtung ist aufgrund ihrer hohen Haftung (kritische Belastung im Kratztest > 3 kg) effektiver.

Umsetzungsvorschläge: Die Bruchanalyse muss mit einer Rasterelektronenmikroskopie (50- bis 200-fache Vergrößerung) kombiniert werden, um die Rissmorphologie zu beobachten, und die Phasenzusammensetzung mittels Röntgenbeugung (XRD) analysieren, um die Bruchursache zu ermitteln. Die Anzahl der thermischen Zyklen und Leistungsänderungen während des Betriebs wird erfasst, um ein Modell zur Lebensdauervorhersage zu erstellen. Durch die Optimierung von Konstruktion und Betriebsparametern kann das Bruchrisiko um 30 bis 50 % reduziert und die Lebensdauer von MoSi_2 -Komponenten auf über 5.000 Stunden verlängert werden.

6.5.2 Ursachen der Oxidschichtablösung und Regenerationsbehandlung

Die SiO_2 -Schutzschicht von MoSi_2 -Heizelementen ist der Schlüssel zu deren Oxidationsschutz in oxidierenden Umgebungen. Ablösen führt zur Freilegung des Substrats, beschleunigt den Oxidationsabbau und verkürzt die Lebensdauer erheblich. Das Ablösen der Oxidschicht wird hauptsächlich durch thermische Belastung, Beschichtungsfehler, Betriebsumgebung und langfristige Alterung verursacht. Durch Testen und Reparieren des Problems des Ablösens der Oxidschicht kann die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bauteilleistung effektiv wiederhergestellt werden und eignet sich für oxidierende Umgebungen mit hohen Temperaturen, wie z. B. in der Halbleiterherstellung und beim Keramiksintern.

Ursachen für das Abblättern: Thermische Belastung: Schneller Temperaturanstieg und -abfall oder häufige Wärmezyklen führen durch den Unterschied im Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen dem SiO₂-Film und dem MoSi₂-Substrat zu hoher Scherspannung, wodurch die Filmschicht reißt oder sich ablöst. Beschichtungsdefekte: Ungleichmäßige Schichtdicke oder ungenügende Haftung (kritische Belastung beim Kratztest < 2 kg) führen zu lokalem Abblättern und zerstören die Integrität des SiO₂-Films. Herstellungsdefekte (wie Poren oder Risse) erhöhen das Risiko des Abblätterns. Einfluss der Betriebsumgebung: Hohe Luftfeuchtigkeit (Luftfeuchtigkeit > 70 %) oder korrosive Atmosphäre verursacht Hydratisierung oder chemische Korrosion des SiO₂-Films und verringert die Haftung. 400–700 °C „Pest“-Oxidation erzeugt nicht schützendes MoO₃ und zerstört die Filmstruktur. Langzeitalterung: Bei 1800 °C, nahe der Nutzungsgrenze von MoSi₂, verflüchtigt sich Si und führt dazu, dass der SiO₂-Film dünner wird und die Filmschicht nach Langzeitbetrieb reißt oder sich ablöst.

Regenerationsbehandlungsmethode: Oberfläche reinigen: Nach dem Abschalten des Ofens lose Oxide im Abblätterungsbereich mit einer weichen Bürste oder Druckluft entfernen. Bei Bedarf leicht mit einer verdünnten Säurelösung (pH 4–5) abwaschen und gründlich trocknen, um Rückstände korrosiver Substanzen zu vermeiden. Hochtemperaturregeneration: 2–4 Stunden bei 1500–1600 °C in oxidierender Atmosphäre laufen lassen, um die Regeneration des SiO₂-Films zu fördern. Schnell auf 400–700 °C erhöhen, um eine „Pest“-Oxidation zu vermeiden. Neubeschichten: SiC oder Al₂O₃ in stark abgelösten Bereichen mittels Plasmaspritzen oder CVD-Technologie neu beschichten, um eine gleichmäßige Schichtdicke zu gewährleisten. CVD-Beschichtung eignet sich aufgrund ihrer hohen Dichte besser für anspruchsvolle Szenarien. Betriebsparameter optimieren: Heiz- und Kühlrate auf 5–10 °C/min reduzieren, Leistungsdichte auf 15–20 W/cm² regeln und lokale Überhitzung vermeiden. Verwenden Sie eine proportionale Regelstromversorgung und präzise Thermoelemente (Genauigkeit ±1 °C), um ein stabiles Wärmefeld aufrechtzuerhalten. Verbessern Sie die Umweltkontrolle: Sorgen Sie für eine oxidierende Atmosphäre im Ofen und kontrollieren Sie Luftfeuchtigkeit und Schadgasgehalt streng. Überprüfen Sie die Ofendichtung regelmäßig, um das Eindringen von Feuchtigkeit oder Verunreinigungen zu verhindern.

Durchführungsvorschläge : Für die Ablöseanalyse sollte die Filmmorphologie mittels SEM beobachtet und die chemische Zusammensetzung mittels EDS analysiert werden, um den Ablösemechanismus zu bestimmen. Nach der Regeneration sollten der spezifische Widerstand und die Massenverlustrate (Präzisionswaage, Genauigkeit ±0,1 mg) geprüft werden, um den Wiederherstellungseffekt des SiO₂-Films zu überprüfen.

6.5.3 Tägliche Wartungsmethoden für Heizelemente

MoSi₂-Heizelemente sind der Schlüssel zu einer längeren Lebensdauer, einem stabilen Betrieb und reduzierten Wartungskosten. Die Wartung konzentriert sich auf die Erhaltung der Integrität des SiO₂-Films, die Vermeidung von Spannungsschäden und die Aufrechterhaltung einer sauberen Ofenumgebung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die für Hochtemperaturanwendungen wie Keramik, Glas und Halbleiter geeignet ist. Standardisierte Wartungsmethoden können das Risiko von Ausfällen wie Brüchen, Ablösen der Oxidschicht und Widerstandsdrift reduzieren.

Wartungsmethode: Regelmäßige Überprüfung des Oberflächenzustands: Stoppen Sie den Ofen nach jeweils 500–1.000 Betriebsstunden, um die Oberfläche des MoSi₂-Elements (heißes und kaltes Ende) zu überprüfen. Verwenden Sie ein optisches Mikroskop, um die Integrität des SiO₂-Films, Risse oder Abblätterungserscheinungen zu untersuchen. Bürsten Sie vorsichtig, um losen Staub zu entfernen, und notieren Sie abnormale Bereiche, um die Lebensdauer zu bewerten. Reinigung des Ofens: Reinigen Sie den Ofen jeden Monat oder alle 100 Wärmezyklen mit Druckluft oder einer weichen Bürste, um Oxide, Metallverunreinigungen (wie Fe₂O₃) oder flüchtige Ablagerungen (wie Alkalimetallverbindungen) zu entfernen und so eine Verunreinigung des SiO₂-Films oder Korrosion zu verhindern. Betriebsbedingungen kontrollieren: Halten Sie eine oxidierende Atmosphäre aufrecht und erhitzen Sie sie schnell auf 400–700 °C, um eine „Pest“-Oxidation zu vermeiden.

Überwachen Sie die Leistungsdichte und die Temperatur des kalten Endes, um eine Überhitzung oder Widerstandsdrift zu vermeiden. Elektrische Anschlüsse prüfen: Prüfen Sie alle 1000 Stunden die Klemme und den Stromanschluss, entfernen Sie Oxid- oder Karbidablagerungen und stellen Sie guten Kontakt sicher. Kalibrieren Sie die proportionale Steuerungsstromversorgung und das Thermoelement (Genauigkeit ± 1 °C), um Spannungsschwankungen oder Abweichungen der Temperaturregelung zu vermeiden. Halterung und Installation warten: Prüfen Sie die Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid auf Risse oder Verformungen und achten Sie darauf, dass sie der Wärmeausdehnung von MoSi₂ entspricht. Passen Sie die Festigkeit der Klemme an, um mechanische Spannungskonzentrationen zu vermeiden und schmieren Sie die Anschlüsse regelmäßig (verwenden Sie ein Hochtemperaturschmiermittel). Betriebsdaten aufzeichnen: Erstellen Sie ein Betriebsprotokoll, um die Anzahl der Wärmezyklen, Temperaturkurven, Leistungsdichte und Änderungen des spezifischen Widerstands (gemessen mit der Vier-Sonden-Methode) aufzuzeichnen.

Berechnen Sie die Lebensdauer durch Datenanalyse (z. B. Weibull-Modell) und ersetzen Sie alternde Komponenten rechtzeitig. Schutz der Oberflächenbeschichtung: Wenn eine SiC- oder Al₂O₃-Beschichtung verwendet wird, prüfen Sie regelmäßig die Integrität der Beschichtung. Vermeiden Sie mechanische Kratzer oder chemische Korrosion (z. B. durch säurehaltige Reiniger), da dies die Beschichtung beschädigen könnte.

Umsetzungsvorschläge : Erstellen Sie einen Wartungsplan und schulen Sie die Bediener in dessen standardisierter Umsetzung. Nutzen Sie SEM und EDS, um fehlerhafte Proben zu analysieren und Wartungsstrategien zu optimieren. Kontrollieren Sie die Atmosphäre und Sauberkeit im Ofen streng und optimieren Sie die Komponentenanzahl in Kombination mit der Wärmefeldsimulation, um die Wartungskosten um 20–30 % zu senken und sicherzustellen, dass MoSi₂-Komponenten bei 1.500 °C über 5.000 Stunden stabil arbeiten. Achten Sie bei der Wartung auf die Sicherheit. Warten Sie nach dem Abschalten des Ofens, bis die Temperatur auf Raumtemperatur gesunken ist, und trennen Sie die Stromversorgung, um Stromschläge oder Verbrennungen zu vermeiden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5.4 Heizelementwechsel- und Recyclingtechnik

Der Austausch von Heizelementen ist ein wichtiger Faktor für den stabilen Betrieb des MoSi₂ - Heizsystems. Mit zunehmender Nutzungsdauer verschleißten die Elemente oder brechen sogar aufgrund von Faktoren wie thermischer Ermüdung, Oxidationsschäden oder mechanischen Beschädigungen. Sie müssen rechtzeitig ausgetauscht werden, um Geräteausfälle und Produktionsunterbrechungen zu vermeiden. Während des Austauschvorgangs sollten die Betriebsanweisungen strikt befolgt werden, um Sicherheit und Installationsqualität zu gewährleisten.

Trennen Sie vor dem Austausch zunächst die Ofenstromversorgung und warten Sie, bis die Komponenten auf eine sichere Temperatur abgekühlt sind, um Verbrennungen und Folgeschäden durch thermische Belastung zu vermeiden. Vermeiden Sie starkes Ziehen und Stöße während der Demontage und trennen Sie die Komponenten und Elektrodenhalterungen vorsichtig voneinander, um Schäden an der umgebenden Struktur zu vermeiden. Die demontierten Altkomponenten sollten klassifiziert und für das spätere Recycling und die Wiederverwendung gelagert werden.

Recycling- und Wiederverwendungstechnologie ist bei der Anwendung von Molybdändisilizid-Heizelementen von großer Bedeutung. Molybdändisilizid-Materialien selbst sind von hohem Wert. Recycling spart nicht nur Kosten, sondern entspricht auch dem Konzept des grünen Umweltschutzes. Gängige Recyclingverfahren umfassen das Einsammeln alter Komponenten, mechanisches Zerkleinern, chemische Behandlung und Materialreinigung. Durch das Entfernen der Oxidschicht und von Verunreinigungen werden hochreine Molybdän- und Siliziumelemente für die Herstellung neuer Heizelemente oder anderer Materialien auf Molybdänbasis extrahiert.

Darüber hinaus können einige leicht oxidierte und unbeschädigte Komponenten nach Oberflächenreinigung und Regeneration der Oxidschicht weiterverwendet werden, was ihre Lebensdauer verlängert. Fortschrittliche Recyclingtechnologien umfassen auch Vakuumreduktion, heißisostatisches Pressen und andere Verfahren zur maximalen Wiederherstellung der Materialeigenschaften. Unternehmen sollten ein umfassendes Recyclingsystem mit Spezialausrüstung und Technikern einrichten, um einen sicheren und effizienten Recyclingprozess zu gewährleisten.

6.6 Typische Einbauarten in Industrieöfen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, MoSi₂-Heizelemente in Industrieöfen zu installieren. Sie werden üblicherweise entsprechend der Ofenstruktur, den Prozessanforderungen und den Elementspezifikationen ausgelegt, um eine gleichmäßige Erwärmung, hohe Effizienz und einfache Wartung zu gewährleisten. Im Folgenden sind einige typische Installationsmethoden aufgeführt:

Hängemontage : Diese Montageart ist bei Schutzgas- und Vakuumöfen üblich. Das Heizelement wird oben oder an beiden Seiten des Ofens aufgehängt und mit Isolierhalterungen befestigt, um eine freie Ausdehnung des Elements zu gewährleisten und Kontakt mit der Ofenwand oder anderen Elementen zu vermeiden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vermeiden . Diese Methode erleichtert den Elementwechsel und die Wartung und eignet sich für Arbeitsbedingungen, die einen schnellen Elementwechsel erfordern.

Eingebettete Installation : Das Heizelement wird direkt in das feuerfeste Material des Ofens oder in die Keramikhalterung eingebettet, um eine stabile Trägerstruktur zu bilden. Diese Methode ist stabil und weniger anfällig für mechanische Einflüsse und eignet sich für Industrieöfen, die kontinuierlich bei hohen Temperaturen betrieben werden. Der Nachteil ist, dass der Austausch aufwändiger ist und die Demontage eines Teils des feuerfesten Materials erfordert.

Feste Montage mit Halterung : Verwenden Sie spezielle Metall- oder Keramikhalterungen, um die Heizelemente an verschiedenen Positionen im Ofen zu befestigen, z. B. am Boden, an der Seitenwand oder oben. Bei der Konstruktion der Halterung müssen Wärmeausdehnung und Isolationsleistung berücksichtigt werden, um eine gleichmäßige Belastung der Elemente zu gewährleisten. Diese Methode eignet sich für größere Industrieöfen und ermöglicht eine präzise Anordnung und optimierte Wärmefeldverteilung.

Flachliegende Installation : Legen Sie die Komponenten flach auf die Heizfläche, z. B. eine Heizplatte oder Plattform, wie sie üblicherweise in Flach- und Glühöfen verwendet wird. Die flache Installation ermöglicht eine gleichmäßige Wärmeverteilung, erfordert jedoch eine gute Planlage und Unterstützung der Komponenten, um Verbiegungen und Verformungen zu vermeiden.

Spuleninstallation : Die Heizelemente sind spiralförmig oder gewickelt angeordnet und eignen sich für zylindrische oder vertikale Öfen. Diese Methode spart Platz, vergrößert die Heizfläche und erleichtert die Anpassung der Leistungsdichte .

In der Praxis werden häufig mehrere Installationsmethoden kombiniert, um den Anforderungen komplexer Prozesse gerecht zu werden. Bei der Konstruktion müssen die Wärmeausdehnungseigenschaften der Komponenten, die Anforderungen an die elektrische Isolierung, die einfache Installation und Demontage sowie Umgebungsfaktoren wie Atmosphärentyp und Temperaturgradient berücksichtigt werden. Stellen Sie außerdem während der Installation sicher, dass das Heizelement fest mit der Stromversorgung verbunden und gut isoliert ist, um Leckagen und lokale Überhitzung zu vermeiden. Überprüfen Sie regelmäßig den Installationsstatus und passen Sie die Halterungen und Klemmen rechtzeitig an, um ein gleichmäßiges und stabiles Wärmefeld im Ofen zu gewährleisten und so die Heizleistung und die Lebensdauer des Elements zu verbessern.



CTIA GROUP LTD Molybdänsilikatstab

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

Kapitel 7 Prüfnormen und Zertifizierung von MoSi₂-Heizelementen

7.1 Prüfverfahren für die Heizelementleistung

MoSi₂-Heizelementen ist ein wichtiger Bestandteil der Qualitäts- und Zuverlässigkeitssicherung. Sie umfasst die Bestimmung mehrerer Schlüsselindikatoren, darunter elektrische, mechanische und thermische Eigenschaften sowie Haltbarkeit. Die elektrische Leistungsprüfung umfasst zunächst die Bestimmung des Widerstandswerts und des Temperaturkoeffizienten des Elements. Mit Präzisions-Widerstandsmessgeräten wird die Widerstandsänderung des Elements unter verschiedenen Temperaturbedingungen geprüft, um die Stabilität und Konsistenz seiner elektrischen Leistung zu bewerten. Die Gleichmäßigkeit und lineare Widerstandsänderung sind entscheidend für die Konstruktion und den Einsatz von Heizelementen.

Zu den Prüfungen mechanischer Eigenschaften zählen hauptsächlich Härte- und Biegeprüfungen. Bei Härteprüfungen werden üblicherweise Vickers- oder Rockwell-Härteprüfgeräte verwendet, um die Härteänderungen von Bauteilen unter Heiz- und Kühlbedingungen zu messen und so die mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit des Materials zu bestimmen. Beim Biegeversuch wird eine bestimmte mechanische Spannung angelegt, um das elastische Verformungsvermögen und die Bruchgrenze des Bauteils zu beobachten und dessen Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beschädigungen zu bewerten. Die Prüfung der thermischen Leistung umfasst die Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten und die Prüfung der thermischen Stabilität. Bei der Prüfung des Wärmeausdehnungskoeffizienten wird die Längenänderung des Bauteils während des Erwärmungsprozesses mit einem Wärmeausdehnungsmessgerät gemessen, um sicherzustellen, dass bei der Konstruktion ausreichend Wärmeausdehnungsraum eingeplant wird, um Schäden durch thermische Spannungen zu vermeiden. Bei der Prüfung der thermischen Stabilität wird ein Hochtemperatur-Dauererhitzungsexperiment durchgeführt, um den Widerstand, die Morphologie und die Strukturveränderungen des Bauteils zu beobachten und dessen Langzeitstabilität in einer Hochtemperaturumgebung zu bewerten.

Darüber hinaus ist die Prüfung der Oxidationsbeständigkeit ein wichtiger Indikator zur Bewertung der Lebensdauer von MoSi₂-Heizelementen. Durch Langzeit-Heizversuche in einer simulierten Oxidationsumgebung werden Bildung, Dicke und Ablösung der Oxidschicht erfasst, um die Oxidationsbeständigkeit des Elements zu bestimmen. Die Fehlermodusanalyse kombiniert Bruchanalyse und Mikrostrukturprüfung, um potenzielle Schwachstellen und Ausfallmechanismen von Heizelementen zu identifizieren. Diese Testmethoden ergänzen sich gegenseitig und spiegeln umfassend das Leistungsniveau von Heizelementen aus Molybdändisilizid wider. Sie bieten eine wissenschaftliche Grundlage und technische Garantie für Produktion und Anwendung.

7.2 Analyse von ISO-, ASTM- und anderen Normen

Die Internationale Organisation für Normung (ISO) und die American Society for Testing and Materials (ASTM) haben eine Reihe von Normen für Heizelemente und verwandte Materialien entwickelt, die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aspekte wie Produktqualität, Testmethoden und Sicherheitsvorschriften abdecken, die eine Schlüsselrolle bei der Gewährleistung der Qualität und Leistung von MoSi₂-Heizelementen spielen.

Die wichtigsten ISO-Normen für MoSi₂-Heizelemente umfassen die Analyse der Materialzusammensetzung, die Maßtoleranz, die Prüfung mechanischer Eigenschaften und die Prüfung der Umweltverträglichkeit. Beispielsweise gewährleistet die ISO 9001-Norm für Qualitätsmanagementsysteme die systematische und kontinuierliche Verbesserung der Qualitätskontrolle im Produktionsprozess. Die ISO-22007-Reihe umfasst Prüfverfahren zur Wärmeausdehnung von Materialien und dient als Referenz für Design und Anwendung. ISO-Normen für elektronische Keramik und hochtemperaturbeständige Materialien decken die Bewertung elektrischer und thermischer Eigenschaften ab.

ASTM-Normen haben eine lange Tradition und werden in der Materialprüfung häufig verwendet. Die Norm ASTM E1131 spezifiziert ein allgemeines Verfahren zur thermischen Analyse von Materialien, das sich zur Bestimmung der thermischen Stabilität und des Phasenwechselverhaltens von MoSi₂-Komponenten eignet. Die Norm ASTM E384 umfasst Mikrohärteprüfverfahren und wird häufig zur Härtebestimmung eingesetzt. ASTM E1820 bietet Richtlinien für Bruchzähigkeitsprüfungen, um das Bruchverhalten von Komponenten zu analysieren. Darüber hinaus gibt es Normen wie ASTM B193 für die Messung des spezifischen Widerstands metallischer Werkstoffe, um die Genauigkeit elektrischer Leistungsprüfungen zu gewährleisten. Darüber hinaus verfügen ISO und ASTM über entsprechende Richtlinien für Sicherheitsspezifikationen und Leistungsanforderungen an Heizelemente für Industrieöfen, beispielsweise die elektrische Sicherheitsnorm IEC 60519, die die Konstruktion und Betriebssicherheit von Hochtemperatur-Elektroheizgeräten regelt. Diese Normen sind für Hersteller von entscheidender Bedeutung, um MoSi₂-Heizelemente zu entwickeln, die den Anforderungen des internationalen Marktes entsprechen.

In der Praxis kombinieren Unternehmen häufig ISO- und ASTM-Normen, um interne Prüfverfahren zu entwickeln und sicherzustellen, dass ihre Produkte sowohl internationalen Standards als auch kundenspezifischen Anforderungen entsprechen. Auch die Kalibrierung der Prüfgeräte und die Qualifikationszertifizierung der Bediener erfolgen in der Regel gemäß den einschlägigen Normen, um die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der Prüfergebnisse zu verbessern.

7.3 Umweltanpassungstest

Die Prüfung der Umweltverträglichkeit ist ein wichtiger Schritt zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Molybdändisilizid - Heizelementen in verschiedenen Arbeitsumgebungen. Diese Prüfung simuliert hauptsächlich die Leistung von Heizelementen unter verschiedenen Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Atmosphärenzusammensetzung und mechanischer Vibration. Der Hochtemperatur-Zyklustest erfasst zunächst den Einfluss thermischer Spannungen durch thermische Ausdehnung und Kontraktion des Elements auf die Materialstruktur und die Leistung durch wiederholtes Erhitzen und Abkühlen und überprüft die thermische Ermüdungsbeständigkeit. Der Feuchtwärmetest simuliert den Einsatz unter hoher Luftfeuchtigkeit. Er untersucht die Stabilität der Oxidschicht auf der Oberfläche des Elements und prüft, ob die elektrischen Eigenschaften beeinträchtigt werden. So wird sichergestellt, dass

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

das Heizelement in feuchter Umgebung weder seine Isolierung versagt noch korrodiert. Darüber hinaus simuliert der Atmosphären-Anpassungstest das Verhalten des Heizelements in oxidierender, reduzierender oder inerte Atmosphäre. Durch die Kontrolle der Atmosphärenzusammensetzung im Ofen werden die Oxidationsrate und die Antioxidationsleistung des Heizelements in verschiedenen Atmosphären untersucht, um eine lange Lebensdauer unter komplexen Arbeitsbedingungen sicherzustellen. Der mechanische Vibrations- und Stoßtest überprüft, ob das Element und seine Montagestruktur mechanischen Schäden durch Vibrationen während des Transports und Betriebs standhalten können.

Tests zur Anpassung an die Umwelt können die Zuverlässigkeit von Heizelementen in tatsächlichen Anwendungen vollständig widerspiegeln, eine wissenschaftliche Grundlage für die Materialauswahl, das Design und die Wartung bieten und das durch Umweltfaktoren verursachte Ausfallrisiko verringern.

7.4 Ausfallarten und Methoden zur Lebensdauervorhersage

Die Fehlermodusanalyse bildet die Grundlage für das Verständnis des Schadensmechanismus von MoSi₂-Heizelementen und die Verlängerung ihrer Lebensdauer. Zu den häufigsten Fehlermodi zählen thermische Ermüdungsrisse, Ablösen der Oxidschicht, durch mechanische Beanspruchung verursachte Brüche und lokale Ablation. Durch makroskopische Beobachtung und mikrostrukturelle Analyse defekter Komponenten können die Ausgangsposition und der Ausbreitungsverlauf von Rissen aufgedeckt und Materialveränderungen vor dem Versagen, wie z. B. grobe Körnung, vergrößerte Poren und abnormale Oxidschichtdicke, beurteilt werden.

Zur Lebensdauervorhersage werden üblicherweise beschleunigte Lebensdauertests in Kombination mit theoretischen Modellen verwendet. Beschleunigte Tests bilden den Schadensprozess, dem Komponenten im Langzeiteinsatz durch Erhöhung der Betriebstemperatur, Erhöhung der Anzahl thermischer Zyklen oder Erhöhung der mechanischen Belastung ausgesetzt sein können, schnell nach und erfassen Ausfalldaten. Anhand dieser Daten, kombiniert mit relevanten Theorien der Bruchmechanik, Thermodynamik und Materialwissenschaft, wird ein mathematisches Modell zur Vorhersage der Lebensdauer von Heizelementen unter normalen Betriebsbedingungen erstellt. Gängige Modelle sind das Arrhenius-Wärmeaktivierungsmodell und das Coffin-Manson-Ermüdungsmodell. Zusätzlich helfen statistische Analysen auf Basis von Ausfalldaten, wie beispielsweise der Weibull-Verteilung, die Zuverlässigkeit und Lebensdauerverteilung des Produkts zu bewerten. Durch die Lebensdauervorhersage können Hersteller Komponentendesign und Materialauswahl optimieren und Anwendern gleichzeitig sinnvolle Empfehlungen zu Wartungs- und Austauschzyklen geben, um Ausfallraten und Betriebskosten zu senken.

7.5 Sicherheits- und Elektrovorschriften

Sicherheits- und elektrische Spezifikationen bilden die Grundlage für den sicheren und stabilen Betrieb von MoSi₂-Heizelementen und deren Systemen. Die Betriebstemperatur des Heizelements ist extrem hoch und erfordert hohe Schaltströme. Die geltenden elektrischen Sicherheitsnormen müssen strikt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eingehalten werden, um Unfälle wie Stromschlag, Kurzschluss und Brand zu vermeiden. Der Isolationswiderstand des Heizelements muss in der Regel den angegebenen Wert erreichen. Der Isolationszustand wird während des Betriebs regelmäßig geprüft, um Leckagen durch Isolationsalterung zu vermeiden.

Für die elektrischen Anschlüsse sollten Klemmen, Isoliermaterialien und Verbindungsverfahren verwendet werden, die nationalen oder internationalen Normen entsprechen, um einen guten Kontakt sowie ausreichende mechanische Festigkeit und Hitzebeständigkeit zu gewährleisten. Das Erdungssystem sollte sinnvoll ausgelegt sein, um das Risiko eines Stromschlags wirksam zu reduzieren. Das Stromversorgungssystem sollte mit Überlastschutz, Leckageschutz und Kurzschlusschutz ausgestattet sein, um die Stromversorgung unter ungewöhnlichen Umständen rechtzeitig zu unterbrechen und so die Sicherheit von Personal und Geräten zu gewährleisten. Darüber hinaus muss das Installations- und Wartungspersonal die Sicherheitsvorschriften einhalten und mit der erforderlichen Schutzausrüstung ausgestattet sein. In Arbeitsbereichen mit hohen Temperaturen sollten Warnschilder und Isolationsvorrichtungen angebracht werden, um versehentliches Berühren und Verbrennungen zu verhindern. Sicherheitszertifizierungen der zugehörigen Geräte und Komponenten, wie CE- und UL-Zertifizierungen, unterstützen ebenfalls den Marktzugang und die Gewährleistung der Sicherheit.



CTIA GROUP LTD Molybdänsilikatstab

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

Kapitel 8 Anwendung von MoSi₂-Heizelementen

8.1 Anwendung von MoSi₂-Heizelementen in der metallurgischen Industrie

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) werden in der metallurgischen Industrie häufig beim Metallschmelzen, bei der Wärmebehandlung und bei Hochtemperatursinterprozessen eingesetzt, da sie eine ausgezeichnete Hochtemperaturleistung, gute Oxidationsbeständigkeit und stabile elektrothermische Eigenschaften aufweisen. Die Wärmeleitfähigkeit, der Wärmeausdehnungskoeffizient und der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von MoSi₂ ermöglichen eine effiziente und gleichmäßige Heizung und erfüllen so die Anforderungen der metallurgischen Industrie an hohe Temperaturen, präzise Temperaturregelung und lange Lebensdauer. MoSi₂ -Elemente erreichen eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit durch den in oxidierender Atmosphäre auf der Oberfläche gebildeten SiO₂ -Schutzfilm , der sie für den Langzeitbetrieb metallurgischer Öfen geeignet macht. Gängige Strukturen von MoSi₂ -Elementen (wie U-Typ, W-Typ, Φ6/12 oder Φ9/18) können je nach Ofentyp und Prozessanforderungen individuell angepasst werden und werden häufig in Metallschmelzöfen, Wärmebehandlungsöfen und Sinteröfen eingesetzt. Bei der Anwendungsoptimierung von MoSi₂ -Komponenten muss der „Plage“-Temperaturbereich von 400–700 °C vermieden werden. Die Temperatur muss schnell erhöht und gesenkt werden, um die Bildung nicht schützender Oxide (eine Mischung aus MoO₃ und SiO₂) zu verringern. Außerdem müssen Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) kombiniert werden , um die Thermoschockbeständigkeit und die Lebensdauer zu verbessern.

In der metallurgischen Industrie zeichnen sich MoSi₂ -Heizelemente durch hohe Leistungsdichte, stabile Temperaturregelung und lange Lebensdauer aus. Die flexible Konstruktion ermöglicht den Einsatz in verschiedenen Ofentypen wie Kastenöfen, Tunnelöfen und Vakuumöfen, um den Verarbeitungsanforderungen verschiedener Metalle gerecht zu werden. Für die Installation werden hochreine Aluminiumoxidhalterungen benötigt, um die Wärmeausdehnungseigenschaften von MoSi₂ zu berücksichtigen und mechanische Belastungen zu reduzieren. Elektrische Anschlüsse erfordern niederohmige Klemmen und proportional geregelte Netzteile, um die Betriebsstabilität zu gewährleisten. Der Einsatz von MoSi₂ -Elementen erfordert zudem eine Atmosphärenkontrolle, um Reduktion oder hohe Luftfeuchtigkeit zu vermeiden, die zu einem Versagen der SiO₂ -Schicht führen können.

8.1.1 Metallschmelzen und Wärmebehandlung

MoSi₂ -Heizelemente kommen bei der Metallverhüttung und Wärmebehandlung hauptsächlich in Hochtemperatur-Schmelzöfen, Glühöfen und Abschrecköfen zum Einsatz und werden zur Verarbeitung von Metallen wie Aluminium, Kupfer, Stahl und Titanlegierungen verwendet. Bei der Metallverhüttung muss die Ofentemperatur präzise auf 1000–1600 °C geregelt werden. Der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von MoSi₂ -Elementen ermöglicht eine adaptive Leistungsanpassung und sorgt für eine stabile Hochtemperaturumgebung. U- und W-Typ- MoSi₂ -Elemente werden häufig in kleinen und mittelgroßen Schmelzöfen verwendet. Sie haben eine Heißendlänge von 100–500 mm und eine Leistungsdichte von 15–20 W/cm². Sie erreichen schnell den Schmelzpunkt (z. B. 660 °C für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aluminium und 1085 °C für Kupfer) und halten ein gleichmäßiges Temperaturfeld aufrecht. Bei Wärmebehandlungsprozessen wie Glühen und Abschrecken sorgen MoSi₂ -Elemente für eine stabile Erwärmung bei 1200–1500 °C und gewährleisten so die Verfeinerung der Metallkörner und die Leistungsoptimierung. Beispielsweise erfordert das Glühen von Stahl eine Haltetemperatur von 1200–1300 °C. Die Wärmeleitfähigkeit und Thermoschockbeständigkeit von MoSi₂ -Komponenten unterstützen schnelles Erhitzen und thermische Zyklen.

MoSi₂ -Elemente zeichnen sich durch hohe Oxidationsbeständigkeit und lange Lebensdauer aus, die in der Metallschmelze und Wärmebehandlung eingesetzt werden. In oxidierender Atmosphäre verhindert die SiO₂ -Schutzschicht effektiv Materialabbau, und der Massenverlust bei 1500 °C liegt unter 0,2 mg/cm²/1000 h. Eine Oberflächenbeschichtung kann die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit zusätzlich verbessern und eignet sich für metallurgische Atmosphären mit Spuren von Schwefel oder Kohlenstoff. U-förmige Elemente werden vertikal montiert, W-förmige Elemente eignen sich für die gleichmäßige Beheizung großer Öfen, und das kalte Ende ist mit einer aluminisierten Beschichtung versehen. Während des Betriebs ist ein schnelles Durchlaufen von 400–700 °C zu vermeiden, um eine Oxidationsstörung zu verhindern. Die Heiz- und Kühlrate wird auf 5–10 °C/min geregelt. Die Wartung umfasst die regelmäßige Überprüfung der Integrität der SiO₂ -Schicht und des Anschlusszustands des kalten Endes sowie die Reinigung des Ofens von Verunreinigungen (z. B. Eisenoxid), um Kontaminationen zu vermeiden. Die Einschränkung von MoSi₂ -Elementen besteht darin, dass die Betriebstemperatur in einer reduzierenden oder Vakuumumgebung gesenkt werden muss, um ein Versagen des SiO₂ -Films zu verhindern. In der Praxis kann die Optimierung des Komponentenlayouts in Kombination mit einer Wärmefeldsimulation die Effizienz und Qualität der Metallschmelze und Wärmebehandlung deutlich verbessern.

8.1.2 Hochtemperatur-Sinterprozess

MoSi₂ -Heizelemente werden in Hochtemperatur-Sinterprozessen hauptsächlich zum Sintern von Metallpulvermetallurgie, Keramikverbundwerkstoffen und Speziallegierungen verwendet und kommen häufig bei der Herstellung von Hochleistungsstählen, Titanlegierungen und Hartmetallen zum Einsatz. Der Sinterprozess erfordert eine präzise Temperaturregelung bei 1300–1800 °C, um die Materialverdichtung und das Kornwachstum zu fördern. Aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und stabilen Temperaturregelung sind MoSi₂ -Elemente die ideale Wahl. W-förmige und gerade MoSi₂ -Stabelemente werden häufig in großen Sinteröfen eingesetzt, um ein gleichmäßiges Wärmefeld zu erzeugen und eignen sich für große Werkstücke. Spiralelemente (Heißendedurchmesser 4–9 mm) eignen sich für kleine Rohröfen und erfüllen die Anforderungen an hochpräzises Sintern. Die Wärmeleitfähigkeit und der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von MoSi₂ gewährleisten eine gleichmäßige Wärmeverteilung während des Sinterns und reduzieren Verformungen und Risse im Werkstück.

Beim Hochtemperatursintern ist die Oxidationsbeständigkeit von MoSi₂ -Elementen ein entscheidender Vorteil. Der SiO₂ -Schutzfilm bleibt bei 1500 bis 1800 °C stabil (Dicke 10 bis 15 µm) und weist einen Massenverlust von <0,5 mg/cm²/1000 h auf, was einen Langzeitbetrieb ermöglicht. Eine Dotierung (wie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

etwa Y_2O_3 , 0,1 bis 1 Gew.-%) verbessert die Korngrenzenfestigkeit und eine Oberflächenbeschichtung (wie etwa Al_2O_3 , Dicke 10 bis 50 μm) verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit, was für Sinteratmosphären geeignet ist, die Spuren flüchtiger Verunreinigungen enthalten. Beim Einbau werden W-Typ-Elemente horizontal gestützt oder vertikal aufgehängt, und Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid reduzieren die thermische Spannung. Für elektrische Verbindungen werden Kupferklemmen verwendet, und zur Gewährleistung der Stabilität werden proportionale Steuernetzteile eingesetzt. Während des Betriebs muss die Temperatur schnell 400–700 °C überschreiten, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden, und die Heiz- und Abkühlrate muss 5–10 °C/min betragen, um die thermische Spannung zu verringern (die Bruchzähigkeit von MoSi_2 beträgt etwa 2–3 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

MoSi_2 -Komponenten im Hochtemperatursinterverfahren weisen eine hohe Atmosphärenempfindlichkeit und Wartungsanforderungen auf. Schwefel- oder kohlenstoffhaltige Sinteratmosphären können die SiO_2 - Schicht korrodieren, daher müssen Sauerstoffpartialdruck und Luftfeuchtigkeit streng kontrolliert werden. Regelmäßige Inspektionen der Bauteiloberfläche (REM-Beobachtung der Schicht) und der Kaltendtemperatur sowie die Reinigung von Ofenverunreinigungen (z. B. Metalloxiden) können die Lebensdauer verlängern. Thermische Feldoptimierung (z. B. Finite-Elemente-Simulation) gewährleistet Temperaturgleichmäßigkeit und reduziert Defekte in gesinterten Werkstücken. Aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit werden MoSi_2 -Komponenten häufig bei der Herstellung von Luft- und Raumfahrtkomponenten, Schneidwerkzeugen und verschleißfesten Werkstoffen in Hochtemperatursinterprozessen eingesetzt, um die Produktqualität und Produktionseffizienz zu verbessern.

8.1.3 Wärmebehandlungsanlagen

MoSi_2 - Heizelemente werden häufig in Wärmebehandlungsanlagen in der metallurgischen Industrie eingesetzt, darunter Glühöfen, Abschrecköfen, Normalisierungsöfen und Anlassöfen, um die mechanischen Eigenschaften, die Korrosionsbeständigkeit und die Verarbeitungseigenschaften von Metallmaterialien zu verbessern. Wärmebehandlungsanlagen erfordern eine präzise Temperaturkontrolle und ein gleichmäßiges Wärmefeld, um eine optimale Metallkornstruktur und Spannungsfreisetzung zu gewährleisten. Der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von MoSi_2 -Elementen ermöglicht eine stabile Heizung im Bereich von 1200–1500 °C und eignet sich für die Verarbeitung von Materialien wie Stahl, Aluminiumlegierungen, Kupferlegierungen und Titanlegierungen. U-förmige MoSi_2 -Elemente eignen sich für kleine Wärmebehandlungsöfen mit einer Heißendlänge von 100–500 mm, bieten eine zentrale Heizung und sind für die Kleinserienproduktion geeignet. W-förmige und gerade stabförmige Elemente eignen sich für große Durchlauf-Wärmebehandlungsöfen mit einer Heißendlänge von 200–1000 mm, da sie eine große Heizfläche abdecken und eine gleichmäßige Temperatur gewährleisten können.

MoSi_2 -Elemente in Wärmebehandlungsanlagen zeichnen sich durch ihre hohe Oxidationsbeständigkeit und die Fähigkeit aus, häufige thermische Zyklen zu überstehen. In oxidierender Atmosphäre gewährleistet die SiO_2 -Schutzschicht die Langzeitstabilität des Elements, was es für die langfristige

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmespeicherung und den schnellen Temperaturanstieg und -abfall im Wärmebehandlungsprozess geeignet macht. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) erhöhen die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit und eignen sich für komplexe metallurgische Atmosphären. Bei der Installation wird das Element mit einer Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert. Eine vertikale Aufhängung oder horizontale Lagerung reduziert die mechanische Belastung. Der elektrische Anschluss erfolgt über eine niederohmige Klemme, und die proportional geregelte Stromversorgung sorgt für eine präzise Temperaturregelung. Im Betrieb ist ein schnelles Überschreiten von 400–700 °C erforderlich, um eine Oxidation zu vermeiden. Die Temperaturanstiegs- und -abfallrate wird auf 5–10 °C/min geregelt. Die Wartung umfasst regelmäßige Inspektionen der SiO_2 -Schicht, des Kaltanschlusses und der Ofenreinigung, um Verunreinigungen vorzubeugen. Die Einschränkung von MoSi_2 -Elementen besteht darin, dass die Einsatztemperatur in einer reduzierenden Atmosphäre gesenkt und die Atmosphäre im Ofen streng kontrolliert werden muss. Thermische Feldoptimierung und regelmäßige Wartung gewährleisten die hohe Effizienz und Produktqualität von Wärmebehandlungsanlagen, die in der Automobil-, Luft- und Raumfahrt- und Maschinenbaubranche weit verbreitet sind.

8.2 Anwendung von MoSi_2 -Heizelementen in der Keramikindustrie

MoSi_2 -Heizelemente werden in der Keramikindustrie häufig zum Brennen von Keramik, zur Glasurbehandlung und zur Herstellung spezieller Keramikmaterialien verwendet. Ihre hohe Betriebstemperatur, Oxidationsbeständigkeit und elektrothermische Stabilität erfüllen die Anforderungen keramischer Prozesse an hohe Temperaturen und präzise Temperaturregelung. MoSi_2 -Elemente bleiben in oxidierender Atmosphäre durch einen oberflächlichen SiO_2 -Schutzfilm stabil und eignen sich für Keramikbrennöfen, Glasurbrennöfen und spezielle Keramiksinteröfen. U-förmige, W-förmige und spiralförmige MoSi_2 -Elemente werden je nach Ofentyp individuell angepasst. Die U-Form eignet sich für kleine Kastenöfen, die W-Form für große Tunnelöfen und die Spiralförmigkeit für hochpräzises Sintern in Röhrenöfen. Zur Montage werden Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid verwendet, für die elektrischen Verbindungen werden niederohmige Klemmen verwendet und eine proportionale Steuerstromversorgung sorgt für eine präzise Temperaturregelung. Um eine Oxidation zu vermeiden, muss der Prozess schnell von 400–700 °C durchlaufen werden. Die Heiz- und Kühlrate beträgt 5–10 °C/min, und die Oberflächenbeschichtung verbessert die Thermoschockbeständigkeit und Lebensdauer. Der Einsatz von MoSi_2 -Elementen in der Keramikindustrie verbessert die Brennqualität und Produktionseffizienz deutlich und erfüllt die Anforderungen an traditionelle und moderne Keramik.

8.2.1 Keramikbrand und Glasur

MoSi_2 -Heizelemente werden in Kammeröfen, Herdwagenöfen und Tunnelöfen beim Brennen und Glasieren von Keramik eingesetzt und dienen der Herstellung von Gebrauchskeramik, Architekturkeramik und Kunstkeramik. Der Keramikbrand erfordert das Sintern des Grünkörpers und das Schmelzen der Glasur bei 1000–1400 °C. Der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von MoSi_2 -Elementen sorgt für eine stabile Hochtemperaturumgebung, die die Verdichtung der Keramikgrünkörper und den Glanz der Glasuren gewährleistet. U-förmige MoSi_2 -Elemente eignen sich für kleine Öfen, W-förmige Elemente für große Durchlauföfen. Sie erzeugen ein gleichmäßiges

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmefeld, um Rissbildung und Verformung der Keramik zu reduzieren. Die Glasurbehandlung erfordert eine präzise Temperaturregelung, um das Schmelzen und die Kristallisation der Glasur zu kontrollieren. Die Wärmeleitfähigkeit von MoSi_2 -Elementen unterstützt schnelles Aufheizen und Isolierung. Der SiO_2 -Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil, und die Oberflächenbeschichtung erhöht die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit, was für Brenn Atmosphären mit flüchtigen Glasuren geeignet ist. Installation und Betrieb erfordern die Kontrolle der Atmosphäre sowie der Heiz- und Kühlraten, und die Wartung umfasst die regelmäßige Inspektion der Komponentenoberfläche und die Reinigung des Ofens. MoSi_2 -Komponenten verbessern die Effizienz und Produktqualität von Keramikbrenn- und Glasurprozessen und werden in der Keramikproduktion häufig verwendet.

8.2.2 Herstellung spezieller Keramikmaterialien

MoSi_2 -Heizelemente werden in Sinteröfen und Heißpressöfen zur Herstellung spezieller Keramikmaterialien verwendet. Sie dienen zur Herstellung von Hochleistungskeramiken wie Aluminiumoxid, Zirkonoxid, Siliziumnitrid und Siliziumkarbid und finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Elektronik und der Medizin. Das Sintern spezieller Keramiken muss bei 1400–1800 °C durchgeführt werden, um eine hohe Dichte und hervorragende Leistung zu erzielen. Die hohe Leistungsdichte und die präzise Temperaturregelung von MoSi_2 -Elementen erfüllen diese Anforderungen. W-Typ- und Spiral- MoSi_2 -Elemente eignen sich für große und kleine Sinteröfen, da sie ein gleichmäßiges Wärmefeld erzeugen und Materialfehler reduzieren. Ein SiO_2 -Schutzfilm und eine Oberflächenbeschichtung gewährleisten die Stabilität der Elemente in oxidierenden Hochtemperaturatmosphären. Eine Dotierungsmodifizierung verbessert die Thermoschockbeständigkeit und eignet sich für häufige Wärmezyklen. Für die Installation werden hochreine Aluminiumhalterungen verwendet. Elektrische Anschlüsse gewährleisten einen niederohmigen Kontakt. Die Atmosphäre sowie die Heiz- und Kühlraten werden kontrolliert, um eine Oxidation zu vermeiden. Die Wartung umfasst regelmäßige Überprüfungen der Komponenten und des Ofenzustands, um die langfristige Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

8.3 Anwendung von MoSi_2 -Heizelementen in der Photovoltaikindustrie

aus Molybdändisilizid (MoSi_2) werden in der Photovoltaikindustrie häufig zur Herstellung von Siliziumwafern und in Anlagen zur Solarzellenproduktion eingesetzt, da sie über hohe Temperaturen, Oxidationsbeständigkeit und elektrothermische Stabilität verfügen. MoSi_2 -Elemente ermöglichen eine präzise Temperaturregelung und ein gleichmäßiges Wärmefeld und erfüllen so die Anforderungen an hohe Temperaturen und saubere Umgebungen in Photovoltaikprozessen. Die Oxidationsbeständigkeit wird durch den in oxidierender Atmosphäre auf der Oberfläche gebildeten SiO_2 -Schutzfilm erreicht, der für einen Langzeitbetrieb geeignet ist. U-förmige, W-förmige und gerade MoSi_2 -Stabelemente werden je nach Ofentyp individuell angepasst. Die U-Form eignet sich für kleine Öfen, und die W-Form und der gerade Stabtyp eignen sich für große Durchlaufanlagen. Zur Anpassung an die Wärmeausdehnungseigenschaften werden bei der Installation Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid verwendet, für elektrische Verbindungen werden niederohmige Klemmen verwendet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und zur Gewährleistung der Stabilität werden proportional gesteuerte Netzteile eingesetzt. Der Betrieb muss den „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden, und Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) verbessern die Thermoschockbeständigkeit und Lebensdauer.

8.3.1 Hochtemperaturprozess zur Herstellung von Siliziumwafern

MoSi₂-Heizelemente werden im Hochtemperaturprozess der Siliziumwaferherstellung zum Ziehen von Einkristall-Silizium, zum Gießen von multikristallinen Silizium-Ingots und zum Glühen von Siliziumwafern eingesetzt. Diese Prozesse erfordern eine Hochtemperaturumgebung, um Siliziumrohstoffe zu schmelzen, das Kristallwachstum zu kontrollieren und Kristalldefekte zu beseitigen. Der positive Temperaturkoeffizient der MoSi₂-Elemente sorgt für stabile Heizleistung. Gerade Stab- und W-förmige MoSi₂-Elemente eignen sich für große Einkristall- und Ingotöfen und decken einen großen Heizbereich ab, um ein gleichmäßiges Wärmefeld zu gewährleisten. U-förmige Elemente eignen sich für kleine Glühöfen, um den lokalen Hochtemperaturanforderungen gerecht zu werden. Der SiO₂-Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil, und die Oberflächenbeschichtung erhöht die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit, was für die saubere Umgebung der Siliziumwaferherstellung geeignet ist. Während der Installation wird das Element durch eine Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert, und die elektrische Verbindung gewährleistet einen niederohmigen Kontakt. Der Betrieb erfordert die Kontrolle der Atmosphäre sowie der Heiz- und Kühlraten, um Oxidationsschäden zu vermeiden. Die Wartung umfasst regelmäßige Kontrollen der Elementoberfläche und der Ofensauberkeit. MoSi₂-Elemente verbessern die Kristallqualität und Produktionseffizienz bei der Herstellung von Silizium-Wafern und finden breite Anwendung im Upstream-Bereich der Photovoltaik-Industriekette.

8.3.2 Anlagen zur Solarzellenproduktion

MoSi₂-Heizelemente werden in Diffusions-, Sinter- und Glühöfen von Solarzellenproduktionsanlagen zur Herstellung von kristallinem Silizium und Dünnschicht-Solarzellen eingesetzt. Der Diffusionsprozess erfordert hohe Temperaturen, um Phosphor oder Bor zu dotieren und so einen pn-Übergang zu bilden. Der Sinterprozess verbindet Metallelektroden mit Siliziumwafern, und der Glühprozess optimiert die Zelleistung. MoSi₂-Elemente bieten präzise Temperaturregelung und gleichmäßige Wärmefelder, um die Anforderungen dieser Prozesse zu erfüllen. U-förmige und spiralförmige MoSi₂-Elemente eignen sich für kleine Diffusions- und Glühöfen, W-förmige Elemente für große Sinteröfen, um die Stabilität großflächiger Heizungen zu gewährleisten. Der SiO₂-Schutzfilm und die Oberflächenbeschichtung unterstützen den Langzeitbetrieb des Elements in oxidierender Atmosphäre, und die Thermoschockbeständigkeit passt sich häufigen Temperaturzyklen an. Die Installation erfolgt über eine Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid. Der elektrische Anschluss erfolgt über ein proportional geregeltes Netzteil für eine präzise Temperaturregelung. Der Vorgang muss den „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen, und die Wartung umfasst die Überprüfung des SiO₂-Films und die Reinigung des Ofens, um Verunreinigungen zu vermeiden. MoSi₂-Elemente verbessern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Effizienz der Solarzellenproduktion und die Zelleistung und werden häufig im Bereich der Photovoltaik-Stromerzeugung eingesetzt.

8.4 Anwendung von MoSi₂-Heizelementen in der Halbleiterindustrie

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) werden aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und elektrothermischen Stabilität häufig in Hochtemperaturprozessen wie Wafer-Glühen, Diffusionsprozessen und epitaktischem Wachstum in der Halbleiterindustrie eingesetzt. MoSi₂-Elemente ermöglichen eine präzise Temperaturregelung und ein gleichmäßiges Wärmefeld und erfüllen damit die Anforderungen der Halbleiterfertigung an eine saubere Umgebung und hochpräzise Temperaturregelung. Die in oxidierender Atmosphäre auf der Oberfläche gebildete SiO₂-Schutzschicht bietet eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit und ist für den Langzeitbetrieb geeignet. U-förmige, W-förmige und spiralförmige MoSi₂-Elemente werden je nach Ofentyp individuell angepasst. U-förmige und spiralförmige Ausführungen eignen sich für kleine, hochpräzise Öfen, W-förmige Ausführungen für große Durchlaufanlagen. Zur Montage werden Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid verwendet, um die Wärmeausdehnungseigenschaften von MoSi₂ zu berücksichtigen und mechanische Spannungen zu reduzieren. Für den elektrischen Anschluss werden niederohmige Klemmen verwendet, und proportional geregelte Netzteile gewährleisten die Stabilität. Der Betrieb muss den „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) verbessern die Thermoschockbeständigkeit und die Lebensdauer zusätzlich. Überprüfen Sie regelmäßig die Integrität des SiO₂-Films und den Zustand der Kaltendverbindung, reinigen Sie den Ofen, um eine Kontamination durch Verunreinigungen zu vermeiden und stellen Sie die Zuverlässigkeit und Effizienz von Komponenten in der Halbleiterindustrie sicher.

8.4.1 Wafer-Annealing und Diffusionsprozess

MoSi₂-Heizelemente werden in RTA-Öfen (Rapid Thermal Annealing), Diffusionsöfen und Oxidationsöfen in Wafer-Annealing- und Diffusionsprozessen zur Bearbeitung von Silizium-Wafern und anderen Halbleitermaterialien eingesetzt. Das Wafer-Annealing erfordert hohe Temperaturen, um Gitterfehler zu reparieren, Dotierstoffe zu aktivieren oder Materialeigenschaften zu verbessern. Der Diffusionsprozess bildet durch Hochtemperaturdotierung (z. B. mit Phosphor und Bor) einen pn-Übergang. Der positive Temperaturkoeffizient der MoSi₂-Elemente sorgt für stabile Heizleistung und präzise Temperaturregelung. U-förmige und spiralförmige MoSi₂-Elemente eignen sich für kleine Glüh- und Diffusionsöfen und sind für die hochpräzise Kleinserienfertigung geeignet. W-förmige Elemente eignen sich für große Diffusionsöfen, um ein gleichmäßiges Wärmefeld für die Bearbeitung mehrerer Wafer zu erzeugen. Der SiO₂-Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil, und die Oberflächenbeschichtung verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit, was für eine saubere Halbleiterprozessumgebung geeignet ist. Während der Installation wird das Element durch eine Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert, und die elektrische Verbindung gewährleistet einen niederohmigen Kontakt. Der Betrieb erfordert eine kontrollierte Atmosphäre sowie kontrollierte Heiz- und Kühlraten, um Oxidationsschäden zu vermeiden. Die Wartung umfasst die regelmäßige Überprüfung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Elementoberfläche und der Sauberkeit des Ofens, um eine Verunreinigung des Wafers durch Verunreinigungen (wie Metallionen) zu verhindern. MoSi₂ -Komponenten verbessern die Effizienz und Qualität von Wafer-Glüh- und Diffusionsprozessen und finden breite Anwendung in der Herstellung integrierter Schaltkreise und Leistungsbaulemente.

8.4.2 Epitaktisches Wachstum von Halbleitern

MoSi₂- Heizelemente werden in CVD-Öfen (Chemical Vapor Deposition) und Molekularstrahlepitaxie-Anlagen (MBE) zur epitaktischen Halbleiterherstellung eingesetzt, um hochwertige Einkristallschichten wie Silizium, Germanium und Verbindungshalbleiter (wie GaAs, SiC) zu erzeugen. Epitaktisches Wachstum erfordert eine präzise Steuerung des thermischen Feldes bei hohen Temperaturen, um die Kristallqualität und Homogenität der Schicht zu gewährleisten. Die hohe Leistungsdichte und die stabile Temperaturregelung von MoSi₂ -Elementen erfüllen diese Anforderungen. Spiralförmige MoSi₂ -Elemente eignen sich für kleine CVD-Öfen und ermöglichen eine zentrale Beheizung für hochpräzises Wachstum. W-förmige und gerade Stabelemente eignen sich für große Epitaxieöfen, um die Homogenität des thermischen Feldes für großflächige Wafer zu gewährleisten. SiO₂ -Schutzfilme und Oberflächenbeschichtungen unterstützen die Elemente für den Langzeitbetrieb in oxidierenden Atmosphären oder Umgebungen mit Spuren von Sauerstoff. Ihre Thermoschockbeständigkeit passt sich häufigen Temperaturzyklen an. Für die Montage werden hochreine Aluminiumoxidhalterungen verwendet, und für die elektrischen Anschlüsse werden proportional geregelte Netzteile verwendet, um eine präzise Temperaturregelung zu gewährleisten. Der Betrieb erfordert ein schnelles Durchlaufen des „Pest“-Temperaturbereichs, und die Wartung umfasst die Überprüfung des SiO₂ -Films und die Reinigung des Ofens, um Verunreinigungen zu vermeiden. MoSi₂ -Komponenten verbessern die Qualität und Produktionseffizienz epitaktisch gewachsener Filme und werden häufig bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen verwendet.

8.4.3 Hochtemperatur-Ätzgeräte

MoSi₂- Heizelemente werden in Plasmaätzöfen und thermischen Ätzöfen in Hochtemperatur-Ätzanlagen zum Strukturieren von Halbleiterwafern verwendet. Hochtemperatur-Ätzprozesse erfordern eine präzise Temperaturkontrolle, um Ätzrate und Selektivität zu optimieren und die Genauigkeit von Mikro- und Nanostrukturen sicherzustellen. Der positive Temperaturkoeffizient und das gleichmäßige Wärmefeld von MoSi₂ -Elementen erfüllen diese Anforderungen. U-förmige und spiralförmige MoSi₂ -Elemente eignen sich für kleine Ätzöfen, da sie eine zentrale Heizung zur Unterstützung hochpräziser Prozesse ermöglichen, und W-förmige Elemente eignen sich für große Geräte, um die Temperaturkonstanz mehrerer Wafer sicherzustellen. SiO₂ -Schutzfilme bleiben in oxidierenden Atmosphären stabil, und Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) verbessern die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit, um sich an korrosive Gase (wie Chlor oder Fluorid) anzupassen, die beim Ätzen vorhanden sein können. Bei der Installation werden die Elemente mit hochreinen Aluminiumoxidhalterungen fixiert. Für die elektrischen Verbindungen werden niederohmige Klemmen verwendet, um die Stabilität zu gewährleisten. Der Betrieb erfordert die Kontrolle der Atmosphäre sowie der Heiz- und Kühlraten, um Oxidationsschäden zu vermeiden. Die Wartung umfasst die regelmäßige

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Überprüfung der Elementoberfläche und der Sauberkeit des Ofens, um eine Verunreinigung der Wafer durch Verunreinigungen zu verhindern. MoSi₂ -Komponenten verbessern die Verarbeitungsgenauigkeit und -effizienz von Hochtemperatur-Ätzanlagen und werden häufig in der Mikrostrukturverarbeitung in der Halbleiterfertigung eingesetzt.

8.4.4 Vakuumbeschichtungsanlagen

MoSi₂- Heizelemente werden in Vakuumbeschichtungsanlagen in PVD- und CVD-Systemen (Physical Vapor Deposition) eingesetzt, um Metall-, Oxid- oder Nitridschichten wie TiN und Al₂O₃ für Elektroden oder Isolierschichten von Halbleiterbauelementen abzuscheiden. Die Vakuumbeschichtung erfordert hohe Temperaturen , um Vorläufermaterialien zu verdampfen oder zu zersetzen.

Die hohe Leistungsdichte und die präzise Temperaturregelung von MoSi₂ -Elementen gewährleisten die Gleichmäßigkeit und Qualität des Films. U-förmige und spiralförmige MoSi₂ -Elemente eignen sich für kleine Vakuumbeschichtungsöfen, um lokal hohe Temperaturen für eine hochpräzise Abscheidung zu erzeugen. W-förmige und gerade Stabelemente eignen sich für große Anlagen, um die Gleichmäßigkeit des thermischen Feldes großflächiger Substrate zu gewährleisten. In oxidierender Atmosphäre oder Umgebungen mit Spuren von Sauerstoff unterstützen der SiO₂ -Schutzfilm und die Oberflächenbeschichtung den Langzeitbetrieb des Elements, und die Thermoschockbeständigkeit passt sich schnellem Temperaturanstieg und -abfall an.

Die Anlage verwendet eine Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid. Der elektrische Anschluss erfolgt über eine proportional geregelte Stromversorgung, um eine stabile Temperaturregelung zu gewährleisten. Der Betrieb muss den Temperaturbereich „Pest“ schnell durchlaufen, um Oxidationsschäden zu vermeiden. Die Wartung umfasst die Überprüfung des SiO₂ -Films und die Reinigung des Ofens, um Verunreinigungen zu vermeiden. MoSi₂ -Komponenten verbessern die Filmqualität und Produktionseffizienz von Vakuumbeschichtungsanlagen und werden häufig bei der Filmherstellung von Halbleiterbauelementen eingesetzt.

8.5 Anwendung von MoSi₂ -Heizelementen in der Glasherstellungsindustrie

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) werden aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperaturbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und elektrothermischen Stabilität häufig in der Glasschmelze und -verarbeitung eingesetzt. MoSi₂ -Elemente ermöglichen eine präzise Temperaturregelung und ein gleichmäßiges Wärmefeld und erfüllen damit die Anforderungen der Glasherstellung an hohe Temperaturen, Langzeitbetrieb und saubere Umgebungen. Ihre hervorragende Oxidationsbeständigkeit wird durch den in oxidierender Atmosphäre auf der Oberfläche gebildeten SiO₂ -Schutzfilm erreicht , der den rauen Arbeitsbedingungen in Glasöfen gerecht wird. MoSi₂ -Elemente in W-, U- und Stabform werden je nach Ofentyp individuell angepasst. Der W-Typ eignet sich für große Schmelzöfen zur gleichmäßigen Beheizung, während der U-Typ und der Stabtyp für kleine und mittelgroße Verarbeitungsöfen geeignet sind. Zur Montage werden Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid verwendet, um die Wärmeausdehnungseigenschaften von MoSi₂ zu berücksichtigen und mechanische Spannungen zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reduzieren. Für den elektrischen Anschluss werden niederohmige Klemmen verwendet, und proportional geregelte Netzteile gewährleisten die Stabilität. Der Betrieb muss den „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al_2O_3) verbessern die Thermoschockbeständigkeit und die Lebensdauer zusätzlich. Überprüfen Sie regelmäßig die Integrität des SiO_2 -Films und den Zustand der Kaltendverbindung, reinigen Sie den Ofen, um eine Kontamination durch Verunreinigungen zu vermeiden, und stellen Sie die Zuverlässigkeit und Effizienz der Komponenten bei der Glasherstellung sicher.

8.5.1 Glasschmelzen

MoSi_2 -Heizelemente werden in großen Schmelzöfen und kleinen Versuchsofen im Glasschmelzprozess zur Herstellung von Flachglas, optischem Glas und Spezialglas eingesetzt. Das Glasschmelzen erfordert hohe Temperaturen, um Rohstoffe (wie Quarzsand, Soda) zu gleichmäßigem Flüssigglass zu verschmelzen. Der positive Temperaturkoeffizient der MoSi_2 -Elemente sorgt für eine stabile Hochtemperaturumgebung und gewährleistet so Schmelzqualität und -konsistenz.

W-Typ- MoSi_2 -Elemente eignen sich für große Durchlaufschmelzöfen, decken einen weiten Heizbereich ab und erzeugen ein gleichmäßiges Wärmefeld, um Blasen und Streifen im Glas zu reduzieren. U-Typ-Elemente eignen sich für kleine Schmelzöfen und die Kleinserienproduktion von Spezialglas. Der SiO_2 -Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil, und die Oberflächenbeschichtung erhöht die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit, um flüchtigen Bestandteilen (wie Boraten) in der Glasschmelze entgegenzuwirken. Bei der Installation wird das Element mit einer Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert, und die elektrische Verbindung gewährleistet einen niederohmigen Kontakt. Der Betrieb erfordert eine kontrollierte Atmosphäre sowie kontrollierte Heiz- und Kühlraten, um Oxidationsschäden zu vermeiden.

Zur Wartung gehört die regelmäßige Überprüfung der Elementoberfläche und der Sauberkeit des Ofens, um eine Verunreinigung der Glasschmelze durch Verunreinigungen (wie Alkalimetalloxide) zu verhindern. MoSi_2 -Komponenten verbessern die Effizienz des Glasschmelzens und die Produktqualität und finden breite Anwendung in der Architektur-, Automobil- und optischen Glasherstellung.

8.5.2 Glasbearbeitung

MoSi_2 -Heizelemente werden in Glühöfen, Formöfen und Warmbiegeöfen in der Glasverarbeitungstechnik zum Formen, Glühen und zur Oberflächenbehandlung von Glasprodukten eingesetzt. Die Glasverarbeitung erfordert eine präzise Temperaturregelung, um innere Spannungen zu eliminieren, die Form zu erhalten und die Glaseigenschaften zu verbessern. Die hohe Leistungsdichte und die stabile Temperaturregelung von MoSi_2 -Elementen erfüllen diese Anforderungen. U-förmige und gerade MoSi_2 -Elemente eignen sich für kleine und mittelgroße Glüh- und Warmbiegeöfen und ermöglichen eine zentrale Beheizung zur Unterstützung der Verarbeitung von komplex geformtem Glas. W-förmige Elemente eignen sich für große Formöfen, um die Temperaturgleichmäßigkeit großflächiger Glasplatten zu gewährleisten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SiO₂ -Schutzfilm und Oberflächenbeschichtung unterstützen den Langzeitbetrieb der Elemente in oxidierender Atmosphäre. Die Thermoschockbeständigkeit passt sich häufigen Temperaturzyklen an. Für die Montage werden hochreine Aluminiumoxidhalterungen verwendet. Für die elektrischen Anschlüsse wird eine proportionale Steuerspannung verwendet, um eine präzise Temperaturregelung zu gewährleisten. Der Betrieb muss den „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen. Die Wartung umfasst die Überprüfung des SiO₂ -Films und die Reinigung des Ofens, um Verunreinigungen zu vermeiden. MoSi₂ -Elemente verbessern die Genauigkeit und Effizienz der Glasverarbeitung und finden breite Anwendung in der Herstellung von Glasbehältern, Displayglas und Architekturglas.

8.6 Anwendung von MoSi₂-Heizelementen bei der Herstellung neuer Energiematerialien

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) spielen aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperaturleistung, Oxidationsbeständigkeit und elektrothermischen Stabilität eine wichtige Rolle bei der Herstellung neuer Energiematerialien. Sie werden häufig in anspruchsvollen Szenarien eingesetzt, beispielsweise beim Sintern von Lithiumbatteriematerial sowie bei Wasserstoffenergie- und Brennstoffzellenprozessen. Durch den in oxidierender Atmosphäre auf der Oberfläche gebildeten SiO₂ -Schutzfilm können MoSi₂ -Elemente eine hervorragende Oxidationsbeständigkeit erreichen , die für den langfristigen Hochtemperaturbetrieb geeignet ist. Gleichzeitig gewährleistet ihr positiver Temperaturkoeffizient mit spezifischem Widerstand eine präzise Temperaturregelung und eine gleichmäßige Verteilung des Wärmefelds. Dank dieser Eigenschaften können die Elemente die Anforderungen hinsichtlich sauberer Umgebung, hochpräziser Temperaturregelung und Temperaturwechselbeständigkeit bei der Herstellung neuer Energiematerialien erfüllen.

MoSi₂ -Elemente haben verschiedene Strukturen, beispielsweise U-Typ, W-Typ, Spiraltyp und gerader Stabtyp, die je nach unterschiedlichen Geräteanforderungen individuell angepasst werden können. U-Typ und Spiraltyp eignen sich für kleine, hochpräzise Sinteröfen, W-Typ und gerader Stabtyp für große Anlagen zur kontinuierlichen Produktion. Bei der Installation werden hochreine Aluminiumoxidhalterungen verwendet, um die Wärmeausdehnungseigenschaften von MoSi₂ zu berücksichtigen und mechanische Spannungen sowie thermische Spannungskonzentrationen zu reduzieren. Für die elektrischen Anschlüsse werden niederohmige Klemmen verwendet, und ein stabiler Betrieb wird durch eine proportional geregelte Stromversorgung gewährleistet. Während des Betriebs ist ein schnelles Durchlaufen des „Krankheits“-Temperaturbereichs erforderlich, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) verbessern die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit zusätzlich und verlängern die Lebensdauer der Komponenten.

Regelmäßige Wartungen umfassen die Überprüfung der Integrität des SiO₂ - Films, des Kaltanschlusszustands und der Sauberkeit des Ofens, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen vorhanden sind und die strengen Anforderungen für die Herstellung neuer Energiematerialien erfüllt werden. MoSi₂ -Elemente unterstützen zuverlässig die Leistungssteigerung und Produktionseffizienz neuer Energiematerialien durch Optimierung des Wärmefelddesigns und der Betriebsparameter.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.6.1 Sintern von Lithiumbatteriematerialien

MoSi₂- Heizelemente finden breite Anwendung bei der Herstellung von positiven und negativen Elektroden sowie von Festelektrolytmaterialien im Sinterprozess von Lithiumbatteriematerialien und werden zur Herstellung wichtiger Materialien wie Lithiumkobaltoxid, ternären Nickel-Kobalt-Mangan-Materialien, Lithiumeisenphosphat, Graphit-Negativelektroden und Festoxidelektrolyten verwendet. Das Sintern von Lithiumbatteriematerialien muss bei hohen Temperaturen erfolgen, um das Kristallwachstum zu fördern und die Materialdichte sowie die elektrochemischen Eigenschaften zu verbessern. Die hohe Leistungsdichte und die präzise Temperaturregelung von MoSi₂ -Elementen können diese hohen Anforderungen erfüllen. U-förmige und spiralförmige MoSi₂ -Elemente eignen sich für kleine Sinteröfen im Labor, sind für die Entwicklung neuer Batteriematerialien oder die Kleinserienproduktion geeignet und ermöglichen eine zentrale Beheizung, um eine hohe Prozesspräzision zu gewährleisten. W-förmige und gerade Stabelemente eignen sich für große industrielle Sinteröfen, da sie eine große Heizfläche abdecken und ein gleichmäßiges Wärmefeld bereitstellen können, um die Massenproduktion zu unterstützen. Der SiO₂ - Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil und gewährleistet so die Oxidationsbeständigkeit der Komponenten während des Sinterprozesses. Die Oberflächenbeschichtung (wie SiC oder Al₂O₃) verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit und passt sich den flüchtigen Gasen oder Spuren korrosiver Atmosphären (wie flüchtigen Stoffen mit Lithiumverbindungen) an, die während des Sinterprozesses auftreten können. Während der Installation werden die Komponenten mit Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert und vertikal aufgehängt oder horizontal gestützt, um mechanische Spannungen zu reduzieren. Der elektrische Anschluss erfolgt über eine Klemme mit geringem Widerstand, und eine proportionale Steuerung der Stromversorgung sorgt für eine präzise Temperaturregelung. Der Vorgang erfordert eine strenge Kontrolle der Atmosphäre im Ofen, um ein Versagen des SiO₂ -Films aufgrund einer reduzierenden oder feuchten Umgebung zu vermeiden, und ein schnelles Durchlaufen des „Pest“-Temperaturbereichs, um die Bildung nicht schützender Oxide zu verhindern. Die Wartung umfasst die regelmäßige Überprüfung des Oberflächenzustands der Komponenten, der Kaltendverbindungen und der Ofensauberkeit sowie die Entfernung von Verunreinigungen, die die Reinheit der Materialien beeinträchtigen können (wie z. B. Alkalimetalloxide). MoSi₂ -Komponenten optimieren das thermische Felddesign und die Betriebsparameter, um sicherzustellen, dass Lithiumbatteriematerialien während des Sinterprozesses eine hervorragende Kristallstruktur und elektrochemische Eigenschaften erhalten. Dies verbessert die Kapazität, Lebensdauer und Sicherheit der Batterie deutlich. Sie finden breite Anwendung in Elektrofahrzeugen, Energiespeichersystemen und der Unterhaltungselektronik.

8.6.2 Wasserstoffenergie und Brennstoffzellen

MoSi₂ -Heizelemente werden hauptsächlich beim Sintern von Materialien für Festoxidbrennstoffzellen (SOFC), bei der Herstellung von Reaktoren zur Wasserstoffproduktion und von Hochtemperaturkomponenten von Elektrolyseuren verwendet und dienen der Produktion von Elektrolyten, Anoden, Kathodenmaterialien und Hochtemperaturkatalysatorträgern. Die Herstellung von Materialien für Wasserstoffenergie und Brennstoffzellen erfordert Sintern oder Wärmebehandlung bei hohen Temperaturen, um die Mikrostruktur und Leistung der Materialien zu optimieren. Die stabile

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturleistung und gleichmäßige Wärmefeldverteilung von MoSi_2 -Elementen können diese Prozessanforderungen erfüllen. Spiral- und U-förmige MoSi_2 -Elemente eignen sich für kleine Versuchsofen, die für die Entwicklung neuer Brennstoffzellenmaterialien oder Katalysatoren geeignet sind, und liefern lokal hohe Temperaturen zur Unterstützung hochpräziser Sinter- oder Wärmebehandlungsprozesse. W-förmige und gerade Stabelemente eignen sich für große Industrieöfen zur Massenproduktion von SOFC-Komponenten oder Komponenten von Anlagen zur Wasserstoffproduktion, um eine gleichmäßige Wärmefeldverteilung zur Reduzierung von Materialfehlern zu gewährleisten.

Der SiO_2 -Schutzfilm bietet zuverlässigen Oxidationsschutz in oxidierender Atmosphäre. Die Oberflächenbeschichtung (z. B. Al_2O_3 oder SiC) verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit und passt sich der komplexen Atmosphäre (z. B. Wasserdampf oder Spuren reduzierender Gase) an, die beim Sintern von Brennstoffzellenmaterialien auftreten kann. Bei der Herstellung von Wasserstoffproduktionsreaktoren oder Elektrolyseurkomponenten unterstützen MoSi_2 -Elemente das Sintern oder die Wärmebehandlung von Hochtemperatur-Katalysatorträgern, um eine hohe Aktivität und Stabilität des Katalysators zu gewährleisten. Während der Installation werden die Elemente mit Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert, und für die elektrischen Verbindungen werden niederohmige Klemmen verwendet. Die proportional geregelte Stromversorgung ermöglicht eine präzise Temperaturregelung, um die Anforderungen von SOFC-Materialien an strenge Temperaturkurven zu erfüllen. Der Betrieb erfordert die Kontrolle der Ofenatmosphäre, um zu verhindern, dass die stark reduzierende Umgebung die SiO_2 -Membran beschädigt, und ein schnelles Durchlaufen des „Pest“-Temperaturbereichs, um Oxidationsschäden zu vermeiden. Zur Wartung gehört die regelmäßige Überprüfung der SiO_2 -Membran, des Kaltanschlusses und der Ofensauberkeit, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen die Materialleistung beeinträchtigen. MoSi_2 -Komponenten verbessern die elektrochemische Leistung von Brennstoffzellenmaterialien und die Effizienz von Wasserstoffproduktionsanlagen durch Optimierung von Wärmefeldern und Prozessparametern. Sie finden breite Anwendung in der sauberen Energieerzeugung, der industriellen Wasserstoffproduktion und der Energieumwandlung und leisten einen wichtigen Beitrag zur kommerziellen Entwicklung der Wasserstoffenergietechnologie.

8.7 Anwendung von MoSi_2 -Heizelementen im Umweltschutz und in der Katalyse

aus Molybdändisilizid (MoSi_2) werden aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperaturbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und elektrothermischen Stabilität häufig in der Abgasbehandlung, Katalysatorregeneration und Feststoffrückgewinnung im Bereich Umweltschutz und Katalyse eingesetzt. Durch den in oxidierender Atmosphäre auf der Oberfläche gebildeten SiO_2 -Schutzfilm erreichen MoSi_2 -Elemente eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit und sind für den Langzeitbetrieb bei hohen Temperaturen geeignet. Ihr positiver Temperaturkoeffizient gewährleistet eine präzise Temperaturregelung und eine gleichmäßige Wärmefeldverteilung und erfüllt so die Anforderungen des Umweltschutzes und katalytischer Prozesse hinsichtlich hoher Temperaturen, sauberer Umgebung und Korrosionsbeständigkeit. U-förmige, W-förmige, spiralförmige und gerade Stab- MoSi_2 -Elemente werden entsprechend den Geräteanforderungen individuell angepasst. U-förmige und spiralförmige

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ausführungen eignen sich für kleine, hochpräzise Reaktoren, W-förmige und gerade Stabausführungen für große Anlagen zur kontinuierlichen Verarbeitung. Zur Montage werden Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid verwendet, um die Wärmeausdehnungseigenschaften von MoSi_2 zu berücksichtigen und mechanische und thermische Spannungen zu reduzieren. Für elektrische Verbindungen werden Klemmen mit niedrigem Widerstand verwendet, und ein stabiler Betrieb wird mit proportional geregelten Stromversorgungen erreicht.

Der Betrieb muss den „Krankheits“-Temperaturbereich schnell durchlaufen, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden. Die Oberflächenbeschichtung (wie SiC oder Al_2O_3) verbessert die Thermoschockbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit zusätzlich und verlängert die Lebensdauer der Komponenten. Zur regelmäßigen Wartung gehört die Überprüfung der Integrität des SiO_2 -Films, des Zustands der Kaltendverbindungen und der Sauberkeit des Ofens, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen vorhanden sind, und um die hohen Standards im Bereich Umweltschutz und Katalyse zu erfüllen. MoSi_2 -Elemente leisten wichtigen Beitrag zur Effizienz und Zuverlässigkeit der Abgasbehandlung, der Katalysatorregeneration und der Nutzung von Feststoffabfällen, indem sie das Design des Wärmefelds und die Betriebsparameter optimieren.

8.7.1 Abgasbehandlung

MoSi_2 -Heizelemente werden in Hochtemperatur-Verbrennungsanlagen, katalytischen Oxidationsöfen und Pyrolyseöfen in der Abgasbehandlung eingesetzt, um Industrieabgase, flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und Schadgase (wie NO_x , SO_x) zu behandeln. Die Abgasbehandlung erfordert hohe Temperaturen, um Schadstoffe zu zersetzen oder katalytische Reaktionen zu fördern. Die hohe Leistungsdichte und die präzise Temperaturregelung der MoSi_2 -Elemente gewährleisten, dass der Reaktor die erforderliche Temperatur erreicht und ein gleichmäßiges Wärmefeld aufrechterhält, was eine effiziente Zersetzung und Umwandlung des Abgases fördert. W-förmige und gerade MoSi_2 -Elemente eignen sich für große Abgasbehandlungsöfen, decken einen großen Heizbereich ab und ermöglichen eine kontinuierliche Abgasbehandlung. U-förmige und Spiralelemente eignen sich für kleine Öfen oder Laboröfen und sind für hochpräzise Experimente oder die Behandlung im kleinen Maßstab geeignet.

Der SiO_2 -Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil, und die Oberflächenbeschichtung verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit und ist beständig gegen korrosive Gase (wie Chloride oder Sulfide), die im Abgas vorhanden sein können. Bei der Installation wird das Element mit einer Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert. Der elektrische Anschluss erfolgt über eine niederohmige Klemme, die mit einem proportionalen Regelnetzteil gekoppelt ist, um eine präzise Temperaturregelung zu gewährleisten. Die Ofenatmosphäre muss kontrolliert werden, um zu verhindern, dass die stark reduzierende Umgebung den SiO_2 -Film beschädigt. Um Oxidationsschäden zu vermeiden, muss der Temperaturbereich, in dem die „Krankheit“ auftritt, schnell durchlaufen werden. Zur Wartung gehört die regelmäßige Überprüfung der Oberflächenbeschaffenheit der Komponenten und der Sauberkeit des Ofens sowie die Entfernung von Verunreinigungen, die den Behandlungseffekt beeinträchtigen könnten. MoSi_2 -Komponenten verbessern die Zersetzungseffizienz und die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Emissionskonformität der Abgasbehandlung und finden breite Anwendung in der Chemie-, Energie- und Umweltschutzindustrie.

8.7.2 Katalysatorregeneration

MoSi₂- Heizelemente werden in Hochtemperatur-Regenerationsöfen und Wärmebehandlungsöfen im Katalysatorregenerationsprozess verwendet, um die Aktivität von Katalysatoren wiederherzustellen, beispielsweise von katalytischen Crackkatalysatoren in der Petrochemie, von Katalysatoren für die selektive katalytische Reduktion (SCR) im Umweltschutzbereich und von Industriekatalysatoren (wie Edelmetallkatalysatoren).

Nach längerem Gebrauch wird der Katalysator durch Ablagerung von kohlenstoffhaltigen Materialien, Sulfiden oder anderen giftigen Substanzen auf der Oberfläche deaktiviert. Der Regenerationsprozess muss diese Ablagerungen bei hohen Temperaturen abbrennen und gleichzeitig die Mikrostruktur und die aktiven Zentren des Katalysators schützen, um seine katalytische Leistung wiederherzustellen. Die hohe Leistungsdichte und die präzise Temperaturregelung von MoSi₂ -Elementen ermöglichen eine stabile Hochtemperaturumgebung, um die Effizienz des Regenerationsprozesses und die Wiederherstellung der Katalysatorleistung zu gewährleisten.

U-förmige und spiralförmige MoSi₂ -Elemente eignen sich für kleine Regenerationsöfen, die für Labor- oder Kleinregenerationsprozesse geeignet sind. Sie ermöglichen eine zentrale Heizung zur Unterstützung einer hochpräzisen Temperaturregelung und erfüllen die Anforderungen spezifischer Katalysatoren an strenge Temperaturkurven. W-förmige und gerade MoSi₂ -Stabelemente eignen sich für große industrielle Regenerationsöfen, da sie einen weiten Heizbereich abdecken, ein gleichmäßiges Wärmefeld für die Batch-Katalysatorverarbeitung bereitstellen und die Konsistenz der Regenerationseffekte gewährleisten. Der SiO₂ -Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil, und die Oberflächenbeschichtung (z. B. SiC oder Al₂O₃) verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit und passt sich korrosiven Gasen (z. B. schwefel- oder chlorhaltigen Atmosphären) oder häufigen Temperaturzyklen an, die während des Regenerationsprozesses auftreten können.

Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid befestigt und zur Reduzierung mechanischer Spannungen vertikal aufgehängt oder horizontal gestützt. Der elektrische Anschluss erfolgt über eine niederohmige Klemme. Für eine präzise Temperaturregelung wird eine proportionale Steuerstromversorgung verwendet. Der Betrieb erfordert eine strenge Kontrolle der Ofenatmosphäre, um zu verhindern, dass die stark reduzierende Umgebung den SiO₂ -Film zerstört. Außerdem muss der „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen werden, um die Bildung nicht schützender Oxide zu verhindern. Zur Wartung gehören die regelmäßige Überprüfung der Oberflächenbeschaffenheit des Elements, der Kaltanschlussverbindungen und der Ofensauberkeit sowie die Entfernung von Verunreinigungen (wie Metalloxiden), die die Reinheit des Katalysators beeinträchtigen können. MoSi₂ -Elemente optimieren das Wärmefeld und die Prozessparameter, um eine hohe Effizienz und Aktivitätswiederherstellung bei

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Katalysatorregeneration sicherzustellen und die Lebensdauer des Katalysators zu verlängern. Sie finden breite Anwendung in den Bereichen Petrochemie, Umweltschutz und industrielle Katalyse.

8.7.3 Nutzung fester Abfallressourcen

MoSi₂- Heizelemente werden in Hochtemperatur-Pyrolyseöfen, Verbrennungsanlagen und Sinteröfen bei der Wiederverwertung von festen Abfällen eingesetzt, um industrielle feste Abfälle, Hausmüll und gefährliche Abfälle zu behandeln und wertvolle Materialien (wie Metalle, Keramik oder Glas) zurückzugewinnen. Die Wiederverwertung von festen Abfällen erfordert hohe Temperaturen, um organische Stoffe zu zersetzen, Schadstoffe zu verflüchtigen oder feste Abfallbestandteile zu sintern und so wiederverwendbare Materialien zu bilden. Die stabile Hochtemperaturleistung und die gleichmäßige Wärmefeldverteilung von MoSi₂ -Elementen können diese Prozessanforderungen erfüllen. W-Typ- und gerade Stab- MoSi₂ -Elemente eignen sich für große Pyrolyse- oder Verbrennungsöfen, da sie einen weiten Heizbereich decken, eine kontinuierliche Behandlung von festen Abfällen unterstützen und die Effizienz und Konsistenz des Pyrolyse- oder Sinterprozesses sicherstellen. U-Typ- und Spiral- MoSi₂ -Elemente eignen sich für kleine Versuchsofen oder die Ressourcenbehandlung bestimmter fester Abfälle, sind für hochpräzise Prozesse oder F&E-Zwecke geeignet und bieten eine zentralisierte Heizung zur Optimierung der Reaktionsbedingungen. Der SiO₂ -Schutzfilm bietet zuverlässigen Oxidationsschutz in oxidierender Atmosphäre, und die Oberflächenbeschichtung verbessert die Temperaturwechselbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit und passt sich der komplexen Atmosphäre an, die bei der Behandlung von Feststoffen herrschen kann (wie etwa Chlor, Schwefel oder flüchtige Schwermetalle). Während der Installation werden die Komponenten mit Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert, und für die elektrischen Verbindungen werden Klemmen mit geringem Widerstand verwendet. Die proportionale Steuerung der Stromversorgung ermöglicht eine präzise Temperaturregelung, um die Steuerungsanforderungen der Ressourcennutzung von Feststoffen für bestimmte Temperaturkurven zu erfüllen. Der Betrieb erfordert die Kontrolle der Atmosphäre im Ofen, um zu verhindern, dass die stark reduzierende Umgebung den SiO₂ - Film beschädigt, und ein schnelles Durchlaufen des „Pest“-Temperaturbereichs, um Oxidationsschäden zu vermeiden. Die Wartung umfasst die regelmäßige Überprüfung des SiO₂ - Films, der Kaltendverbindungen und der Ofensauberkeit sowie das Entfernen von Verunreinigungen, die die Qualität der rohstoffbasierten Produkte beeinträchtigen können. MoSi₂ -Komponenten unterstützen die effiziente Zersetzung, Materialrückgewinnung und Ressourcennutzung von festem Abfall, indem sie eine zuverlässige Hochtemperaturumgebung bereitstellen, und werden in den Bereichen Umweltschutz, Kreislaufwirtschaft und Ressourcenrecycling häufig eingesetzt.

8.8 Anwendung von MoSi₂-Heizelementen in anderen Bereichen

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) haben aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperaturleistung, Oxidationsbeständigkeit und elektrothermischen Stabilität einen einzigartigen Anwendungswert in Hightech-Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt sowie der Nuklearindustrie bewiesen. MoSi₂ -Elemente können durch den in einer oxidierenden Atmosphäre auf der Oberfläche gebildeten SiO₂ - Schutzfilm eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit erreichen , die für den langfristigen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturbetrieb geeignet ist. Seine Widerstandseigenschaften mit positivem Temperaturkoeffizienten gewährleisten eine präzise Temperaturregelung und eine gleichmäßige Wärmefeldverteilung und erfüllen so die Anforderungen komplexer Arbeitsbedingungen hinsichtlich hoher Temperaturen, sauberer Umgebung und thermischer Zyklenbeständigkeit. U-förmige, W-förmige, spiralförmige und gerade Stab -MoSi₂- Elemente werden entsprechend den Geräteanforderungen individuell angepasst. U-förmige und spiralförmige Typen eignen sich für kleine Hochpräzisionsöfen und W-förmige und gerade Stabtypen eignen sich für große Tests oder Zusatzgeräte.

Für die Installation werden Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid verwendet, um die Wärmeausdehnungseigenschaften von MoSi₂ zu berücksichtigen und mechanische und thermische Belastungen zu reduzieren. Für die elektrischen Verbindungen werden niederohmige Klemmen verwendet, und ein stabiler Betrieb wird durch eine proportional gesteuerte Stromversorgung erreicht. Der Betrieb muss den „Krankheits“-Temperaturbereich schnell durchlaufen, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden. Die Oberflächenbeschichtung (wie SiC oder Al₂O₃) verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit weiter und verlängert die Lebensdauer der Komponente. Zur regelmäßigen Wartung gehören die Überprüfung der Integrität des SiO₂-Films, des Zustands der Kaltendverbindung und der Sauberkeit des Ofens, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen vorhanden sind und die strengen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt- sowie der Nuklearindustrie erfüllt werden. MoSi₂-Elemente bieten zuverlässige Unterstützung für Materialprüfungen und den Gerätebetrieb im Hochtechnologiebereich, indem sie das Wärmefelddesign und die Betriebsparameter optimieren.

8.8.1 Werkstoffprüfung in der Luft- und Raumfahrt

MoSi₂-Heizelemente werden in Hochtemperaturprüföfen, Thermozyklusprüföfen und Umweltsimulationsanlagen in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit wichtiger Materialien wie Hochtemperaturlegierungen, Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe und Kohlefaserverbundwerkstoffe zu prüfen. Materialien für die Luft- und Raumfahrt müssen mechanischen, thermischen und chemischen Leistungstests unter extrem hohen Temperaturen unterzogen werden, um ihre Zuverlässigkeit in Triebwerken, Turbinenschaufeln oder Wärmeschutzsystemen von Raumfahrzeugen zu überprüfen.

Die hohe Leistungsdichte und die präzise Temperaturregelung von MoSi₂-Elementen ermöglichen die Simulation dieser rauen Umgebungen. U-förmige und spiralförmige MoSi₂-Elemente eignen sich für kleine Prüföfen und ermöglichen eine zentrale Beheizung für hochpräzise Prüfungen. Sie eignen sich für thermische Belastungen oder thermische Zyklusexperimente an kleinen Proben. W-förmige und gerade Stabelemente eignen sich für große Prüföfen, da sie einen großen Heizbereich abdecken und ein gleichmäßiges Wärmefeld für die Prüfung großer Bauteile erzeugen. Der SiO₂-Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil, und die Oberflächenbeschichtung erhöht die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit und passt sich an oxidierende oder spurenkorrosive Atmosphären an, die im Test auftreten können. Während der Installation wird das Element mit einer Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid fixiert. Der elektrische Anschluss erfolgt über eine niederohmige Klemme, die mit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einem proportionalen Regelnetzteil gekoppelt ist, um eine präzise Temperaturkurvenregelung zu gewährleisten. Der Betrieb erfordert eine strenge Kontrolle der Ofenatmosphäre, um zu verhindern, dass die Reduktionsumgebung den SiO_2 - Film beschädigt. Um Oxidationsschäden zu vermeiden, muss der „Krankheits“-Temperaturbereich schnell durchlaufen werden. Die Wartung umfasst regelmäßige Kontrollen des Oberflächenzustands der Komponenten, der Kaltanschlussverbindungen und der Ofensauberkeit, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen die Prüfergebnisse beeinflussen. MoSi_2 -Komponenten unterstützen die hochpräzise Prüfung von Luft- und Raumfahrtmaterialien, indem sie eine stabile Hochtemperaturumgebung und zuverlässige thermische Zyklusleistung bieten und wichtige Daten für die Materialentwicklung und -zertifizierung liefern.

8.8.2 Hilfsausrüstung der Nuklearindustrie

MoSi_2 - Heizelemente werden in Hochtemperatur-Sinteröfen, Wärmebehandlungsöfen und Versuchsreaktoren in Zusatzgeräten der Nuklearindustrie zur Herstellung von Brennelementen, Reaktormaterialien und zur Prüfung und Verarbeitung entsprechender Hochtemperaturkeramiken oder -legierungen verwendet.

Die Nuklearindustrie stellt extrem hohe Anforderungen an die Temperaturregelung, Sauberkeit und Langzeitstabilität der Geräte. Die stabile Hochtemperaturleistung und gleichmäßige Wärmefeldverteilung von MoSi_2 -Elementen können diese Anforderungen erfüllen. U-förmige und spiralförmige MoSi_2 -Elemente eignen sich für kleine Versuchsofen, zum Sintern und zur Wärmebehandlung von Kernbrennstoffpartikeln oder kleinen Reaktormaterialien und bieten eine hochpräzise Temperaturregelung zur Sicherstellung der Materialleistung. W-förmige und gerade Stabelemente eignen sich für große Zusatzgeräte wie Brennstab-Sinteröfen oder Öfen zur Wärmebehandlung von Reaktorkomponenten, da sie eine großflächige gleichmäßige Erwärmung zur Unterstützung der Massenproduktion ermöglichen.

Der SiO_2 -Schutzfilm und die Oberflächenbeschichtung gewährleisten, dass die Komponenten lange Zeit in oxidierender oder leicht korrosiver Atmosphäre betrieben werden können und die Thermoschockbeständigkeit häufigen Temperaturzyklen standhält. Für die Installation werden Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid verwendet, und für die elektrischen Anschlüsse wird eine proportionale Steuerleistung eingesetzt, um eine präzise Temperaturregelung zu erreichen und die Anforderungen der Nuklearindustrie an strenge Prozessparameter zu erfüllen.

Der Betrieb erfordert die Kontrolle der Ofenatmosphäre, um zu verhindern, dass die stark reduzierende Umgebung den SiO_2 - Film beschädigt, und ein schnelles Durchlaufen des „Pest“-Temperaturbereichs, um Oxidationsschäden zu vermeiden. Die Wartung umfasst regelmäßige Kontrollen des SiO_2 - Films, der Kaltendverbindungen und der Ofensauberkeit, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen vorhanden sind, die die Qualität der Nuklearmaterialien beeinträchtigen. MoSi_2 -Elemente unterstützen die Herstellung und Leistungsüberprüfung wichtiger Materialien in der Nuklearindustrie, indem sie eine zuverlässige Hochtemperaturumgebung bereitstellen und so wichtige Garantien für die Sicherheit und Effizienz der Kernenergietechnologie liefern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.8.3 Hochtemperatur-Synthesechemie

MoSi₂- Heizelemente werden in Reaktoren und Versuchsöfen in der Hochtemperatur-Synthesechemie zur Synthese von Hochtemperaturkeramiken, intermetallischen Verbindungen, Funktionsmaterialien und Hochleistungskemikalien verwendet. In der Hochtemperatur-Synthesechemie müssen Reaktionen unter streng kontrollierten Temperaturbedingungen durchgeführt werden, um die Reinheit, Kristallstruktur und chemischen Eigenschaften der Produkte sicherzustellen. Die hohe Leistungsdichte und die präzise Temperaturregelung von MoSi₂ -Elementen können eine stabile Reaktionsumgebung schaffen. U-förmige und spiralförmige MoSi₂ -Elemente eignen sich für kleine Versuchsöfen, die für die chemische Synthese im Labormaßstab oder die Forschung und Entwicklung neuer Materialien geeignet sind, und bieten eine zentrale Heizung für eine hochpräzise Temperaturregelung. W-förmige und gerade Stabelemente eignen sich für große Reaktoren, unterstützen die Chemikalien- oder Materialproduktion im industriellen Maßstab und gewährleisten eine Gleichmäßigkeit des Wärmefelds, um ungleichmäßige Reaktionen zu reduzieren.

Der SiO₂ -Schutzfilm bleibt in oxidierender Atmosphäre stabil. Die Oberflächenbeschichtung (z. B. SiC oder Al₂O₃) verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit und ist beständig gegen korrosive Gase oder flüchtige Produkte, die während des Syntheseprozesses entstehen können. Bei der Installation werden die Komponenten mit hochreinen Aluminiumoxidhalierungen fixiert. Die elektrischen Anschlüsse werden mit niederohmigen Klemmen hergestellt. Ein proportional geregeltes Netzteil sorgt für eine präzise Temperaturregelung. Der Betrieb erfordert eine kontrollierte Ofenatmosphäre, um zu verhindern, dass die stark reduzierende Umgebung den SiO₂ - Film zerstört. Um Oxidationsschäden zu vermeiden, muss der „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen werden. Die Wartung umfasst regelmäßige Kontrollen des Oberflächenzustands der Komponenten, der Kaltanschlussverbindungen und der Ofensauberkeit, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen die Qualität des synthetisierten Produkts beeinträchtigen. MoSi₂ -Komponenten unterstützen effiziente Reaktionen und Produktqualität in der Hochtemperatur-Synthesechemie durch die Bereitstellung einer zuverlässigen Hochtemperaturumgebung und finden breite Anwendung in der modernen Werkstoff- und Chemieindustrie.

8.8.4 MoSi₂ -Stabtransformator

MoSi₂ -Heizelemente werden als Hochtemperatur-Heizquellen in Transformatoranwendungen zur Materialprüfung, Wärmebehandlung von Isoliermaterialien und in Hochtemperaturprozessen während der Fertigung eingesetzt. Die Transformatorherstellung umfasst die Hochtemperaturbehandlung von Siliziumstahlblechen, Isolierkeramiken oder anderen hochtemperaturbeständigen Materialien. Die stabile Hochtemperaturbeständigkeit und die gleichmäßige Wärmefeldverteilung von MoSi₂ -Elementen erfüllen diese Prozessanforderungen. U-förmige und spiralförmige MoSi₂ -Elemente eignen sich für kleine Wärmebehandlungsöfen, zur lokalen Erwärmung von Transformator Komponenten oder für Labortests und ermöglichen eine hochpräzise Temperaturregelung zur Optimierung der Materialeigenschaften. W-förmige und gerade Stabelemente eignen sich für große Industrieöfen zum Glühen von Siliziumstahlblechen oder Sintern von Isoliermaterialien. Sie unterstützen die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Massenproduktion und gewährleisten ein gleichmäßiges Wärmefeld. Der SiO_2 -Schutzfilm bietet zuverlässigen Oxidationsschutz in oxidierender Atmosphäre. Die Oberflächenbeschichtung verbessert die Thermoschock- und Korrosionsbeständigkeit und ist an die spurenkorrosive Atmosphäre angepasst, die bei der Transformatorherstellung auftreten kann. Die Anlage verwendet eine Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid. Der elektrische Anschluss erfolgt über eine proportional geregelte Stromversorgung, um eine präzise Temperaturregelung zu gewährleisten und die Stabilität der Prozessparameter sicherzustellen. Der Prozess muss den kritischen Temperaturbereich schnell durchlaufen, um Oxidationsschäden zu vermeiden. Die Wartung umfasst regelmäßige Kontrollen der SiO_2 - Schicht, der Kaltanschlussverbindungen und der Ofensauberkeit, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen die Materialqualität beeinträchtigen. MoSi_2 -Komponenten bieten eine zuverlässige Hochtemperaturumgebung, unterstützen die Wärmebehandlung und Leistungsoptimierung wichtiger Materialien im Transformatorbau, verbessern die Effizienz und Zuverlässigkeit von Transformatoren und finden breite Anwendung im Bereich der Energieanlagenherstellung.



CTIA GROUP LTD Molybdänsilikatstab

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
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

Kapitel 9 Vergleich von MoSi₂-Heizelementen mit anderen Heizmaterialien

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) werden aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperaturleistung, Oxidationsbeständigkeit und elektrothermischen Stabilität häufig in der Hochtemperaturheizung eingesetzt. Verglichen mit anderen gängigen Heizmaterialien wie Wolfram und Siliziumkarbid (SiC) haben MoSi₂ -Elemente einzigartige Vorteile hinsichtlich Oxidationsbeständigkeit, Betriebstemperaturbereich und Prozessanpassungsfähigkeit, unterliegen jedoch auch gewissen Einschränkungen. In diesem Kapitel wird die Leistung von MoSi₂- mit Wolfram-Heizelementen und Siliziumkarbid-Elementen verglichen, ihre Unterschiede hinsichtlich Kosten, Effizienz und Anwendungsanpassungsfähigkeit analysiert und eine Anleitung zur Auswahl geeigneter Heizmaterialien unter verschiedenen Arbeitsbedingungen bereitgestellt. MoSi₂ -Elemente sollten mit Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid installiert werden, um sie an die Wärmeausdehnungseigenschaften anzupassen. Für elektrische Verbindungen sollten niederohmige Klemmen verwendet werden, mit einer proportional gesteuerten Stromversorgung zur Gewährleistung der Stabilität. Der Betrieb muss den „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen, um die Bildung nicht schützender Oxide zu vermeiden. Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) können die Thermoschockbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit verbessern. Zur regelmäßigen Wartung gehört die Überprüfung der Integrität des SiO₂ -Films und des Zustands der Kaltendverbindung, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen vorhanden sind.

9.1 Vergleich mit Wolfram-Heizelementen

MoSi₂ -Heizelemente und Wolfram-Heizelemente bieten jeweils eigene Vorteile bei Hochtemperaturanwendungen, unterscheiden sich jedoch erheblich in Anwendungsszenarien und Leistungsmerkmalen. MoSi₂ -Elemente erreichen durch den in oxidierender Atmosphäre auf der Oberfläche gebildeten SiO₂- Schutzfilm eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit und sind für den Langzeitbetrieb geeignet. Die maximale Betriebstemperatur kann 1850 °C erreichen, und MoSi₂ wird häufig in Prozessen in oxidierenden Umgebungen eingesetzt, beispielsweise beim Sintern von Keramik, beim Glasschmelzen und in der Halbleiterherstellung. Der positive Temperaturkoeffizient von MoSi₂ ermöglicht eine adaptive Leistungsanpassung und eine stabile Temperaturregelung, die sich für Anwendungen eignet, die eine hochpräzise Temperaturregelung erfordern. Es hat einen moderaten Wärmeausdehnungskoeffizienten, eine gute Thermoschockbeständigkeit, hält häufigen Temperaturzyklen stand und eignet sich für U-, W- oder Spiralkonstruktionen. Die Herstellungsverfahren von MoSi₂ -Elementen (wie Pulvermetallurgie und isostatisches Pressen) ermöglichen eine flexible Anpassung der Formen an komplexe Ofenanforderungen. Allerdings neigt MoSi₂ dazu, im "Pest"-Temperaturbereich von 400-700 °C nicht schützende Oxide zu erzeugen. Um eine Materialzersetzung zu vermeiden, sind schnelle Temperaturanstiege und -abfälle erforderlich. Zudem muss die Betriebstemperatur in einer reduzierenden Umgebung oder im Vakuum gesenkt werden, um den SiO₂ -Film zu schützen.

Im Gegensatz dazu zeichnen sich Wolfram-Heizelemente durch ihren extrem hohen Schmelzpunkt und ihre hervorragende mechanische Festigkeit aus, wodurch sie sich für Ultrahochtemperaturanwendungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(wie die Wärmebehandlung von Metallen im Vakuum oder in einer inerten Atmosphäre) eignen. Wolfram-Elemente sind in oxidierender Atmosphäre sehr oxidationsanfällig und müssen unter Vakuum oder Schutzgas betrieben werden, was ihren Einsatz in oxidierenden Umgebungen einschränkt. Wolfram hat einen niedrigen spezifischen Widerstand und ändert sich weniger stark mit der Temperatur, wodurch es sich für Szenarien eignet, die eine hohe Leistungsabgabe erfordern. Allerdings ist die Temperaturregelgenauigkeit geringer als die von MoSi_2 , was ein komplexeres Leistungsregelsystem erfordert. Wolfram-Elemente haben einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und eine schlechte Thermoschockbeständigkeit. Häufige thermische Zyklen können zu Sprödbrüchen führen, was ihre Anwendung unter dynamischen thermischen Belastungen einschränkt. Wolfram-Elemente sind mit hohen Herstellungs- und Verarbeitungskosten verbunden und lassen sich nur schwer in ihrer Form anpassen. Sie bestehen meist aus Draht- oder Stabstrukturen, was die Designflexibilität komplexer Ofentypen einschränkt. Zudem hat Wolfram eine hohe Dichte, was zu einem höheren Elementgewicht und einer komplexeren Installation und Konstruktion der Trägerstruktur führt.

Der Vergleich zwischen MoSi_2 und Wolfram zeigt, dass MoSi_2 eine bessere Oxidationsbeständigkeit und Temperaturregelgenauigkeit in oxidierender Atmosphäre aufweist und sich für Branchen wie Keramik, Glas und Halbleiter eignet. Wolfram hingegen eignet sich besser für Ultrahochtemperaturanwendungen (wie das Schmelzen von Hochtemperaturlegierungen) im Vakuum oder in einer inerten Atmosphäre. Die Auswahl sollte sich nach der Prozessumgebung, den Temperaturanforderungen und der thermischen Zyklusfrequenz richten. Die Langzeitstabilität und Flexibilität von MoSi_2 in oxidierender Umgebung machen es für die meisten Hochtemperaturöfen vorteilhafter.

9.2 Vergleich mit Siliziumkarbid-Bauteilen

MoSi_2 und Siliziumkarbid (SiC) sind im Bereich der Hochtemperaturheizung gängige Optionen, unterscheiden sich jedoch deutlich in Leistung und Anwendungsszenarien. MoSi_2 -Elemente weisen durch die SiO_2 -Schutzschicht auf der Oberfläche eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit in oxidierender Atmosphäre auf und können eine maximale Betriebstemperatur von 1850°C erreichen, was sie für hochpräzise Hochtemperaturprozesse wie Keramiksintern, Glasschmelzen und epitaktisches Wachstum von Halbleitern geeignet macht. Der positive Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands unterstützt eine adaptive Leistungsregelung, ermöglicht eine präzise Temperaturkontrolle und eignet sich für Anwendungen, die ein stabiles Wärmefeld erfordern. MoSi_2 hat einen moderaten Wärmeausdehnungskoeffizienten, eine gute Thermoschockbeständigkeit und hält häufigen Temperaturzyklen stand. U-, W- und Spiralstrukturen eignen sich für zahlreiche Ofendesigns. Der Herstellungsprozess von MoSi_2 -Elementen ist flexibel und durch Pulvermetallurgie und isostatisches Pressen können komplexe Formen nach individuellen Anforderungen hergestellt werden. Allerdings neigt MoSi_2 im "Pest"-Temperaturbereich zu nicht schützender Oxidation, was einen schnellen Temperaturanstieg und -abfall erfordert, und die Betriebstemperatur muss in einer reduzierenden Umgebung oder im Vakuum gesenkt werden, um den SiO_2 -Film zu schützen.

SiC -Heizelemente sind für ihre hohe Härte, Verschleißfestigkeit und chemische Stabilität bekannt und werden häufig in Industrieöfen sowie bei Mittel- und Hochtemperaturprozessen eingesetzt. SiC -

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elemente können in oxidierender Atmosphäre auch einen SiO_2 -Schutzfilm bilden und verfügen über eine gute Oxidationsbeständigkeit, ihre maximale Betriebstemperatur ist jedoch üblicherweise niedriger als die von MoSi_2 und sie eignen sich für Prozesse von 1300–1600 °C. Der spezifische Widerstand von SiC schwankt komplexer mit der Temperatur und weist einen negativen Temperaturkoeffizienten auf (der Widerstand nimmt bei hohen Temperaturen ab), was zu einer instabilen Leistungsabgabe führen kann. Zur Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Temperatur ist ein präzises Steuerungssystem erforderlich. SiC-Elemente haben einen niedrigeren Wärmeausdehnungskoeffizienten und sind etwas weniger beständig gegen Thermoschocks als MoSi_2 . Häufige Wärmezyklen können Mikrorisse verursachen, insbesondere in großen Elementen. Der Herstellungsprozess von SiC-Elementen (wie Reaktionssintern oder Rekristallisation) begrenzt die Komplexität der Form, die normalerweise stab- oder röhrenförmig ist, und die Flexibilität bei der Anpassung ist geringer als bei MoSi_2 . Darüber hinaus können SiC-Elemente in korrosiven, schwefel- oder halogenhaltigen Atmosphären lokal korrodieren, was zusätzliche Oberflächenschutzmaßnahmen erforderlich macht.

Der Vergleich zwischen MoSi_2 und SiC zeigt, dass MoSi_2 Vorteile in höheren Temperaturbereichen und bei präziser Temperaturregelung bietet und sich für Hightech-Industrien wie die Halbleiter- und Spezialkeramikfertigung eignet. SiC hingegen eignet sich besser für kostensensitive Industrieanwendungen im mittleren und hohen Temperaturbereich, wie z. B. die Metallwärmebehandlung und das konventionelle Keramiksintern. Bei der Auswahl müssen Prozess Temperatur, Atmosphärenbedingungen und Anforderungen an den Wärmezyklus berücksichtigt werden.

9.3 Analyse der Heizelementkosten, Effizienz und Anwendungseignung

Die Unterschiede in Kosten, Wirkungsgrad und Anwendungseignung von MoSi_2 -, Wolfram- und SiC-Heizelementen wirken sich direkt auf ihre Auswahl in verschiedenen Branchen aus. Die Herstellungskosten von MoSi_2 -Elementen sind moderat, und die Pulvermetallurgie- und isostatischen Pressverfahren sind ausgereift, sodass komplexe Formen (wie U-, W- und Spiralförmigen) hergestellt werden können, um den Anforderungen unterschiedlicher Ofentypen gerecht zu werden. MoSi_2 hat einen hohen Betriebswirkungsgrad, und sein positiver Temperaturkoeffizient unterstützt die adaptive Leistungsregelung, reduziert Energieverschwendung und eignet sich für Szenarien, die eine präzise Temperaturregelung und einen Langzeitbetrieb erfordern, wie z. B. das Sintern von Keramik, die Glasverarbeitung und die Halbleiterherstellung. MoSi_2 hat eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit in oxidierender Atmosphäre und geringe Wartungskosten, muss aber den „Pest“-Temperaturbereich schnell durchlaufen, um Oxidationsschäden zu vermeiden, und Oberflächenbeschichtungen können seine Lebensdauer zusätzlich verlängern. MoSi_2 -Elemente verfügen über ein breites Anwendungsspektrum und eignen sich für Hochtemperaturprozesse in einer oxidierenden Atmosphäre. Allerdings muss die Temperatur in einer reduzierenden Umgebung oder in einem Vakuum gesenkt werden, was ihre Verwendung bei einigen Metallbehandlungen mit ultrahohen Temperaturen einschränkt.

Die Herstellungskosten von Wolframheizelementen sind aufgrund der schwierigen Verarbeitung aufgrund des hohen Schmelzpunkts des Materials relativ hoch. Die meisten Heizelemente bestehen aus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Drähten oder Stäben, sodass die Herstellung komplexer Formen kostspielig ist. Wolfram weist im Vakuum oder inerte Atmosphäre eine höhere Betriebseffizienz auf und eignet sich daher für Anwendungen mit ultrahohen Temperaturen (z. B. das Schmelzen von Legierungen bei hohen Temperaturen). In oxidierender Atmosphäre oxidiert Wolfram jedoch sehr leicht, was ein zusätzliches Atmosphärenkontrollsystem erfordert, was die Betriebs- und Wartungskosten erhöht. Wolframelemente weisen eine geringe Thermoschockbeständigkeit auf, und häufige Temperaturwechsel können zu Brüchen führen. Die Wartungskosten sind hoch. Wolframelemente eignen sich für Bereiche mit extrem hohen Anforderungen an Hochtemperatur- und Vakuumumgebungen, wie z. B. die Materialprüfung in der Luft- und Raumfahrt, der Anwendungsbereich ist jedoch aufgrund der Atmosphärenbeschränkungen eingeschränkt.

SiC -Heizelemente zeichnen sich durch relativ niedrige Herstellungskosten und einen relativ einfachen Reaktionssinterprozess aus, wodurch sie sich für die Großserienproduktion von Stab- oder Rohrelementen eignen. Der Wirkungsgrad von SiC ist im mittleren und hohen Temperaturbereich hoch, der negative Temperaturkoeffizient (Widerstand) kann jedoch zu Leistungsinstabilitäten führen. Dies erfordert ein komplexes Steuerungssystem zur Aufrechterhaltung der Temperaturgleichmäßigkeit und erhöht die Betriebskosten. SiC- Elemente weisen in oxidierender Atmosphäre eine gute Oxidationsbeständigkeit auf, können jedoch in korrosiver Atmosphäre lokal abbauen und verursachen moderate Wartungskosten.



CTIA GROUP LTD Silizium-Molybdän-Stab

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 10 Relevante Normen und Spezifikationen für MoSi₂-Heizelemente

aus Molybdändisilizid (MoSi₂) müssen strengen Normen und Spezifikationen entsprechen, um Produktqualität, Leistungsstabilität und Prozesssicherheit zu gewährleisten. Weltweit bieten chinesische nationale Normen, internationale Normen sowie relevante Normen aus Europa, Amerika, Japan und Südkorea technische Richtlinien für die Herstellung und Verwendung von MoSi₂-Heizelementen. Diese Normen regeln die chemische Zusammensetzung, die physikalischen Eigenschaften, den Herstellungsprozess, die Prüfmethoden und die Anwendungsspezifikationen des Materials. In diesem Kapitel werden die chinesischen nationalen Normen, internationalen Normen sowie relevanten Normen aus Europa, Amerika, Japan und Südkorea für MoSi₂-Heizelemente detailliert vorgestellt, um Herstellern, Ingenieuren und Anwendern als Referenz zu dienen. Die Standardisierung von MoSi₂-Elementen trägt dazu bei, die Produktqualität zu vereinheitlichen, die Austauschbarkeit zu verbessern und den globalen Handel und die technische Zusammenarbeit zu fördern.

10.1 Chinesischer Nationalstandard für MoSi₂-Heizelemente

Chinas nationaler Standard (GB/T) hat eine Reihe von Spezifikationen für die Produktion, Leistungsprüfung und Anwendung von MoSi₂-Heizelementen formuliert, die hauptsächlich vom Nationalen Technischen Komitee für die Normung von Nichteisenmetallen (TC243) und anderen Institutionen verwaltet werden. Diese Standards gewährleisten die Leistungsstabilität und Sicherheit von MoSi₂-Elementen in oxidierenden Hochtemperaturumgebungen und eignen sich für Branchen wie Keramiksintern, Glasschmelzen und Halbleiterherstellung. Zu den relevanten Standards gehören chemische Materialanalysen, Prüfungen physikalischer Eigenschaften und technische Anforderungen für industrielle elektrische Heizgeräte. Beispielsweise spezifiziert der Standard für die chemische Zusammensetzung von MoSi₂-Elementen die Gehaltsanforderungen und die Verunreinigungskontrolle wichtiger Elemente wie Molybdän und Silizium, um Oxidationsbeständigkeit und elektrothermische Stabilität sicherzustellen.

Die physikalischen Leistungsstandards umfassen Testmethoden für spezifischen Widerstand, Wärmeausdehnungskoeffizienten, Thermoschockbeständigkeit und mechanische Festigkeit, um die Zuverlässigkeit der Elemente bei hohen Temperaturen und häufigen thermischen Zyklen sicherzustellen. Darüber hinaus stellen die Normen für industrielle elektrische Heizgeräte Anforderungen an die Installation, den Betrieb und die Wartung von MoSi₂-Elementen.

Dazu gehören beispielsweise die Verwendung von hochreinen Aluminiumoxid-Klammern zur Anpassung an die Wärmeausdehnungseigenschaften, das schnelle Durchlaufen des „Pest“-Temperaturbereichs zur Vermeidung der Bildung nicht schützender Oxide und die regelmäßige Überprüfung der Integrität der SiO₂-Schutzschicht. Diese Normen werden von der Staatlichen Marktregulierungsbehörde und der Nationalen Normungsbehörde herausgegeben. Einige von ihnen verweisen auf nicht-äquivalente internationale Normen (wie ISO-bezogene Spezifikationen) oder übernehmen diese, um sich an die industriellen Bedürfnisse Chinas anzupassen und mit internationalen Standards Schritt zu halten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2 Internationale Normen für MoSi₂-Heizelemente

Die Internationale Organisation für Normung (ISO) und die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) haben internationale Normen für MoSi₂-Heizelemente entwickelt, die sich hauptsächlich auf Hochtemperaturmaterialien, industrielle elektrische Heizgeräte und Leistungsprüfverfahren konzentrieren. Diese Normen bieten einen einheitlichen technischen Rahmen für die weltweite Produktion und Anwendung von MoSi₂-Elementen und decken Materialeigenschaften, Herstellungsverfahren und Prüfspezifikationen ab. ISO-Normen können beispielsweise Leistungsprüfverfahren für Hochtemperaturkeramiken oder intermetallische Verbindungen umfassen, darunter Prüfungen der Oxidationsbeständigkeit, der Wärmeleitfähigkeit und des spezifischen Widerstands, um die Langzeitstabilität von MoSi₂-Elementen in oxidierenden Atmosphären sicherzustellen. IEC-Normen konzentrieren sich auf die technischen Anforderungen an industrielle elektrische Heizgeräte und spezifizieren den elektrischen Anschluss, die Genauigkeit der Temperaturregelung und die Sicherheitsanforderungen von MoSi₂-Elementen, wie die Verwendung niederohmiger Klemmen und die Konfiguration proportional geregelter Stromversorgungen. Internationale Normen umfassen auch Prüfverfahren für die Thermoschockbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Komponenten in Hochtemperaturumgebungen. Sie geben Herstellern die Möglichkeit, Oberflächenbeschichtungen (wie SiC oder Al₂O₃) zu optimieren, um die Lebensdauer zu verlängern. Darüber hinaus betonen ISO- und IEC-Normen die Betriebsspezifikationen von Komponenten in bestimmten Atmosphären (wie oxidierenden oder sauerstoffhaltigen Umgebungen). Diese erfordern ein schnelles Durchlaufen niedriger Temperaturbereiche, um eine Oxidation zu vermeiden. Diese Normen fördern die Austauschbarkeit und technische Zusammenarbeit von MoSi₂-Komponenten auf dem Weltmarkt und finden breite Anwendung in den Bereichen Keramik, Halbleiter und Herstellung neuer Energiematerialien.

10.3 MoSi₂-Heizelementnormen in Europa, Amerika, Japan, Korea und anderen Ländern

MoSi₂-Heizelemente in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern werden von den jeweiligen Normungsorganisationen erarbeitet. Dabei werden lokale Industrieanforderungen mit internationalen Normen kombiniert und Materialeigenschaften, Herstellungsverfahren und Anwendungsspezifikationen berücksichtigt. In Europa haben das Europäische Komitee für Normung (CEN) und andere Institutionen (wie das Deutsche Institut für Normung DIN und das British Standards Institute BSI) Normen für Hochtemperatur-Heizelemente erarbeitet. Diese umfassen Prüfverfahren für die chemische Zusammensetzung, den spezifischen Widerstand, den Wärmeausdehnungskoeffizienten und die Oxidationsbeständigkeit von MoSi₂-Elementen.

Diese Normen betonen die Langzeitstabilität der Komponenten in oxidierender Atmosphäre, legen die Bildungsbedingungen und Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit des SiO₂-Oberflächenschutzfilms fest und sind in Branchen wie der Keramiksinterung und der Glasverarbeitung anwendbar. Die DIN-Norm kann die Installationsspezifikationen von MoSi₂-Elementen weiter verfeinern, beispielsweise die Verwendung von Halterungen aus hochreinem Aluminiumoxid und die niederohmige Ausführung elektrischer Verbindungen. Die vom American National Standards Institute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(ANSI) formulierten Normen konzentrieren sich auf die Leistung und Sicherheit industrieller elektrischer Heizgeräte. Sie umfassen Tests der Temperaturregelungsgenauigkeit und der thermischen Zyklusleistung von MoSi₂ -Elementen, um ihre Zuverlässigkeit bei Materialtests in der Halbleiter- und Luft- und Raumfahrtindustrie sicherzustellen.

Japan und Südkorea haben über die japanischen Industrienormen (JIS) und die koreanische Agentur für Technologie und Normung (KATS) entsprechende Spezifikationen für MoSi₂ -Komponenten entwickelt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf Anwendungen in der Hochtemperaturkeramik und Halbleiterfertigung und spezifiziert die Betriebsbedingungen der Komponenten in oxidierenden und leicht korrosiven Atmosphären, wie z. B. schnellen Temperaturanstieg und -abfall, um eine „Pest“-Oxidation zu vermeiden. Diese Normen beziehen sich üblicherweise auf den ISO- und IEC-Rahmen, werden jedoch an lokale industrielle Besonderheiten (wie z. B. Japans Anforderungen an die Präzisionsfertigung) angepasst, wobei der Schwerpunkt auf einer hochpräzisen Temperaturregelung und einer langlebigen Konstruktion der Komponenten liegt. Europäische, amerikanische, japanische und koreanische Normen fördern die Anwendung und den Handel von MoSi₂ -Komponenten auf dem Weltmarkt durch einheitliche Testmethoden und Qualitätsanforderungen.



CTIA GROUP LTD Silizium-Molybdän-Stab

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang: Glossar der Begriffe für MoSi₂-Heizelemente

Gebräuchliche Fachbegriffe und deren Definitionen im Bereich der Molybdändisilizid - Heizelemente (MoSi₂) dienen Herstellern, Ingenieuren und Anwendern als klare technische Referenz. Diese Begriffe decken Aspekte wie Materialeigenschaften, Herstellungsverfahren, Leistungsprüfungen und Anwendungsszenarien ab und helfen so, die Eigenschaften und Einsatzspezifikationen von MoSi₂ - Heizelementen zu verstehen.

der Begriff	Definition
Molybdändisilizid (MoSi₂)	Eine intermetallische Verbindung aus Molybdän und Silizium mit hohem Schmelzpunkt, hoher Oxidationsbeständigkeit und hervorragenden elektrothermischen Eigenschaften, die häufig in Hochtemperatur-Heizelementen verwendet wird.
SiO₂ -Schutzfilm	von MoSi ₂ in einer oxidierenden Atmosphäre, um eine weitere Oxidation des Materials zu verhindern und die Hochtemperaturstabilität zu verbessern.
Pestoxidation	MoSi ₂ bildet im Temperaturbereich von 400-700° C nicht schützende Oxide (wie etwa eine Mischung aus MoO ₃ und SiO ₂), die zur Pulverisierung und Zersetzung des Materials führen.
Widerstand mit positivem Temperaturkoeffizienten (PTC)	von MoSi ₂ unterstützt die adaptive Leistungsregelung und eignet sich für Anwendungen zur präzisen Temperaturregelung.
Heißes Ende	Das MoSi ₂ -Heizelement ist in der Regel dünner und für die Hauptwärmeerzeugung verantwortlich. Gängige Spezifikationen sind Φ6mm oder Φ9mm.
Kalte Verbindung	Das MoSi ₂ -Heizelement ist normalerweise dicker (z. B. Φ12 mm oder Φ18 mm) und mit leitfähigen Materialien dotiert, um den spezifischen Widerstand zu verringern.
U-förmiges Element	Eine Struktur aus MoSi ₂ -Heizelementen in U-Form, geeignet für kleine Öfen oder Zentralheizungen, einfach zu installieren und auszutauschen.
W-Typ-Komponenten	MoSi ₂ -Heizelement, W-förmig, geeignet für große Öfen, bietet ein gleichmäßiges Wärmefeld und gute Thermoschockbeständigkeit.
Spiralelement	Das MoSi ₂ -Heizelement eignet sich für Rohröfen oder hochpräzise Heizungen, mit konzentriertem Wärmefeld und präziser Temperaturregelung.
Gerades Stabelement	aus MoSi ₂ -Heizelementen eignet sich zur gleichmäßigen Erwärmung großer Flächen und wird häufig in Durchlauföfen in der Industrie eingesetzt.
Wärmeausdehnungskoeffizient	Die Temperatur des MoSi ₂ -Materials beträgt etwa $8,1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, was sich auf die passende Konstruktion von Komponenten und Halterungen auswirkt.

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

Thermoschockbeständigkeit	Dass MoSi ₂ -Komponenten schnellen Temperaturänderungen ohne Rissbildung standhalten, hängt von ihrer Bruchzähigkeit und ihren Wärmeausdehnungseigenschaften ab.
Bruchzähigkeit	von MoSi ₂ -Materialien gegen Rissausbreitung ist im Allgemeinen gering und der Prozess muss optimiert werden, um das Risiko von Mikrorissen zu verringern.
Wärmeleitfähigkeit	MoSi ₂ -Material beeinflusst die Gleichmäßigkeit des Wärmefelds und die Heizleistung.
Leistungsdichte	Die Heizleistung pro Flächeneinheit spiegelt die Heizkapazität des MoSi ₂ -Elements wider und muss je nach Ofentyp und Prozess angepasst werden.
Heißpressen (HP)	Ein Herstellungsverfahren für MoSi ₂ -Komponenten, bei dem Hochtemperatur- und Druckformen zum Einsatz kommen, um die Dichte und die mechanischen Eigenschaften zu verbessern.
Druckloses Sintern	Ein kostengünstigerer Herstellungsprozess für MoSi ₂ -Komponenten mit etwas geringerer Dichte, geeignet für weniger anspruchsvolle Anwendungen.
Selbstausbreitende Hochtemperatursynthese (SHS)	von MoSi ₂ durch Zünden eines Mo-Si-Mischpulvers zur Auslösung einer exothermen Reaktion ist kostengünstig, weist jedoch eine schlechte Gleichmäßigkeit auf.
Isostatisches Pressen	von MoSi ₂ -Rohlingen mittels gleichmäßigem Druck eignet sich zur Herstellung von Bauteilen mit komplexen Formen.
Oberflächenbeschichtung	MoSi ₂ -Oberfläche aufgetragene Schutzschicht (beispielsweise SiC, Al ₂ O ₃) dient der Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit.
Plasmaspritzen	Eine Technik zum Aufbringen von Oberflächenbeschichtungen durch Hochtemperatur-Plasmaspritzen, um eine dichte Beschichtung zu bilden, die für industrielle Anwendungen geeignet ist.
Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)	Eine Technologie zur Herstellung dünner, gleichmäßiger und hafter Beschichtungen für hochpräzise MoSi ₂ - Bauteile.
Widerstandsprüfung	Zur Messung des spezifischen Widerstands von MoSi ₂ -Komponenten wird üblicherweise die Vier-Sonden-Methode verwendet, um die elektrothermische Leistung zu bewerten.
Antioxidantien-Test	um die Stabilität von MoSi ₂ -Komponenten in oxidierenden Atmosphären mit hohen Temperaturen zu bewerten, indem die Dicke und der Massenverlust des SiO ₂ -Films gemessen werden.
Thermoschock-Leistungstest	Das Experiment simuliert einen schnellen Temperaturanstieg und -abfall, um die Rissbeständigkeit von MoSi ₂ -Komponenten zu testen und die Veränderungen bei Mikrorissen und mechanischer Festigkeit zu bewerten.
Vickers-Härteprüfung	von MoSi ₂ mit einem Vickers-Härteprüfgerät spiegelt die Verschleißfestigkeit und die mechanischen Eigenschaften wider.

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

Oxidierende Atmosphäre	Sauerstoffhaltige Betriebsumgebung (Sauerstoffpartialdruck $\geq 0,2$ atm), die Hauptanwendungsbedingung von MoSi ₂ -Bauteilen.
Reduzierende Atmosphäre	In einer Umgebung mit reduzierenden Gasen wie Wasserstoff oder Kohlenmonoxid muss die Betriebstemperatur von MoSi ₂ gesenkt werden, um ein Versagen des SiO ₂ - Films zu vermeiden.
Proportionale Steuerstromversorgung	Ein Stromversorgungssystem, das die Leistung von MoSi ₂ - Komponenten präzise regelt und mit seinen positiven Temperaturkoeffizienteneigenschaften eine stabile Temperaturregelung erreicht.
Greifer mit geringem Widerstand	zum Anschluss der MoSi ₂ -Kaltstelle an die Stromversorgung, mit geringem Kontaktwiderstand und Gewährleistung der elektrischen Stabilität.
Halterung aus hochreinem Aluminiumoxid	Wird zur Unterstützung von MoSi ₂ - Komponenten verwendet und passt den Wärmeausdehnungskoeffizienten an, um die thermische Spannung zu verringern.
Gleichmäßigkeit des thermischen Feldes	Die Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung im Ofen wird durch die Anordnung und Wärmeleitfähigkeit der MoSi ₂ -Komponenten beeinflusst und erfordert ein optimiertes Design.
Dopingmodifikation	durch die Zugabe kleiner Mengen von Elementen (wie etwa Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃) zu MoSi ₂ , um die Korngrenzenfestigkeit oder Oxidationsbeständigkeit zu verbessern.
Pulvermetallurgie	MoSi ₂ -Bauteile durch Pulverpressen und Sintern, geeignet zur Herstellung komplexer Formen.
Qualitätsverlustrate	Die Antioxydationsleistung von MoSi ₂ -Komponenten spiegelt sich unter Hochtemperaturoxidation wider.
Körnung	Die Kristallkorngröße in der MoSi ₂ -Mikrostruktur beeinflusst die mechanische Festigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit .

Abbildung:

Dieses Glossar basiert auf den Herstellungs-, Prüf- und Anwendungspraktiken von MoSi₂ - Heizelementen und verweist auf relevante Literatur und technische Daten. Die Begriffsdefinitionen sind präzise und treffend und gelten für die Bereiche Keramik, Glas, Halbleiter, neue Energien und Umweltschutz. Anwender können die Terminologie entsprechend den spezifischen Prozessanforderungen ergänzen oder anpassen.

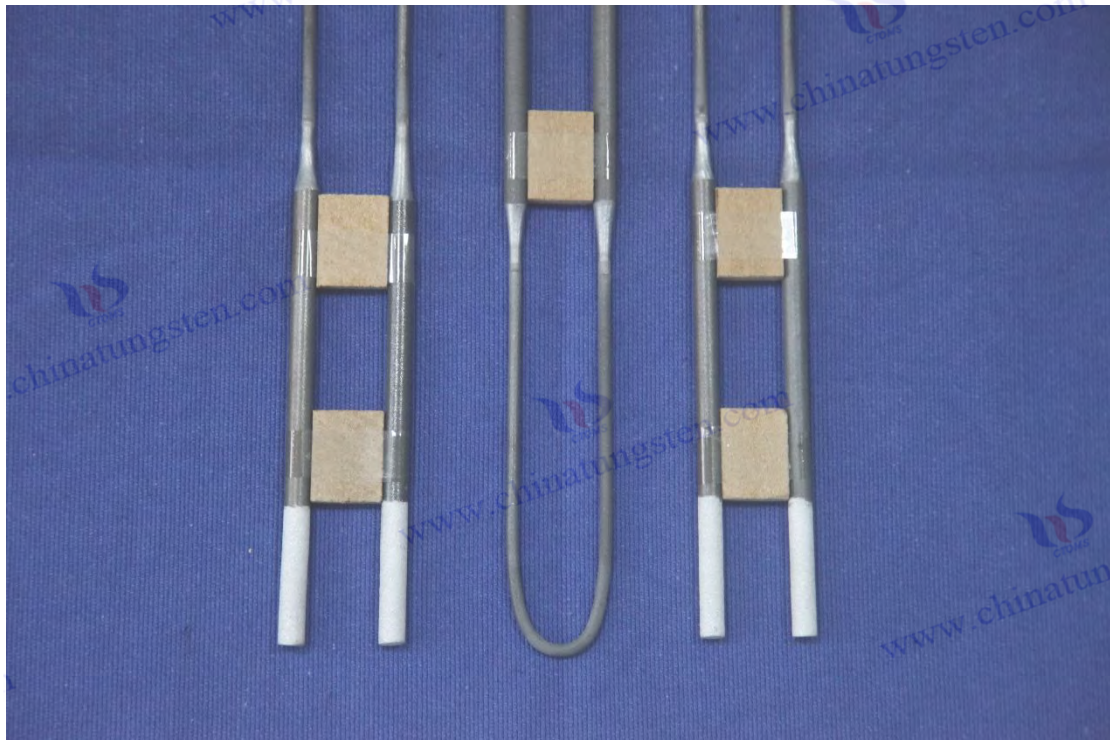
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Englische Literatur

- [1] Fortschritte bei MoSi_2 -basierten Materialien für Hochtemperaturanwendungen. Materialwissenschaft und -technik: A, 2010.
- [2] Elektrische und thermische Eigenschaften von MoSi_2 -Heizelementen. Ceramics International, 2005.
- [3] Molybdändisilizid . American Elements .
- [4] Heizelemente aus Molybdändisilizid. Stanford Advanced Materials .
- [5] Benutzerhandbuch für Heizelemente aus Molybdändisilizid .
- [6] MoSi_2 -basierte Materialien und ihre Eigenschaften. Journal of Materials Science, 1999.
- [7] MoSi_2 -Heizelemente. Kanthal® .
- [8] Oxidationsverhalten von MoSi_2 -basierten Materialien. Journal of the American Ceramic Society, 2001.
- [9] Oberflächenbeschichtungen für MoSi_2 -Heizelemente. Oberflächen- und Beschichtungstechnologie, 2008.
- [10] Thermoschock- und Ermüdungsverhalten von Heizelementen auf MoSi_2 -Basis. Journal of Materials Research, 2003.



CTIA GROUP LTD Silizium-Molybdän-Stab

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