

Was ist Wolfram-Kupfer-Legierung

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 Einführung

- 1.1 Überblick über Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 1.1.1 Definition der Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 1.1.2 Legierungs Zusammensetzung
- 1.2 Historischer Ursprung und Entwicklungsprozess der Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 1.2.1 Frühe Erkundung
 - 1.2.2 Knotenpunkte für entscheidende Technologie
 - 1.2.3 Moderne Entwicklungstrend

Kapitel 2 Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Legierung

- 2.1 Analyse der Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 2.1.1 Bildungsmechanismus und Vorteile hoher Härte
 - 2.1.1.1 Mikrostrukturmechanismus
 - 2.1.1.2 Vorteile in verschleißfesten Anwendungen
 - 2.1.1.3 Härtevergleich und Vorteile gegenüber anderen Legierungen
 - 2.1.2 Prinzip und Leistung der Lichtbogenbeständigkeit
 - 2.1.2.1 Lichtbogenabtragungsmechanismus
 - 2.1.2.2 Eigener Grundsatz der Lichtbogenbeständigkeit
 - 2.1.2.3 Leistungsunterschiede in unterschiedlichen Nutzungsumgebungen
 - 2.1.2.4 Wege zur Leistungsverbesserung
 - 2.1.3 Analyse der Anti-Haft- und Anti-Schweiß-Fähigkeiten
 - 2.1.3.1 Ursachen von Haftung und Schweißung
 - 2.1.3.2 Anti-Haft-Leistung
 - 2.1.3.3 Faktoren, die die Anti-Haft- und Anti-Schweiß-Fähigkeiten beeinflussen
 - 2.1.4 Prinzip und Anwendung ausgezeichneter Leitfähigkeit
 - 2.1.4.1 Physische Natur und Leitungsmechanismus der Leitfähigkeit
 - 2.1.4.2 Änderungen der Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Komponentenverhältnissen
 - 2.1.4.3 Vorteile leitender Anwendungen in elektrischen Geräten
 - 2.1.5 Gute Wärmeleitfähigkeit
 - 2.1.5.1 Grundprinzipien der Wärmeleitfähigkeit und Wärmeleitmechanismus
 - 2.1.5.2 Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeableitungseffekt
 - 2.1.5.3 Anwendungs Wert der Wärmeleitfähigkeit in Hochtemperaturarbeitsumgebungen
 - 2.1.6 Korrosionsbeständigkeit und Mechanismus
 - 2.1.6.1 Einfluss unterschiedlicher Korrosionsumgebungen
 - 2.1.6.2 Interner Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit
 - 2.1.6.3 Technische Mittel zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit
- 2.2 Wirkung des Komponentenverhältnisses auf die Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 2.2.1 Wirkung auf mechanische Eigenschaften
 - 2.2.1.1 Wirkung auf Härte
 - 2.2.1.2 Auswirkung auf Festigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.2.1.3 Auswirkung auf Zähigkeit
- 2.2.2 Auswirkung auf physikalische Eigenschaften
 - 2.2.2.1 Auswirkung auf Dichte
 - 2.2.2.2 Wirkung auf Schmelzpunkt
 - 2.2.2.3 Einfluss auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten
 - 2.2.2.4 Wirkung auf Leitfähigkeit
 - 2.2.2.5 Wirkung auf Wärmeleitfähigkeit
- 2.2.3 Auswirkung auf chemische Eigenschaften
 - 2.2.3.1 Wirkung auf Korrosionsbeständigkeit
 - 2.2.3.2 Wirkung auf die Hochtemperatur-Oxidationsbeständigkeit
- 2.3 CTIA GROUP LTD MSDS der Wolfram-Kupfer-Legierung

Kapitel 3 Korrelation zwischen Mikrostruktur und Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Legierung

- 3.1 Einblicke in die mikrostrukturellen Merkmale der Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 3.1.1 Kornmorphologie und -größe
 - 3.1.2 Phasenverteilung und -grenze
 - 3.1.3 Porosität und Defektmanifestation
 - 3.1.4 Strukturunterschiede unter unterschiedlichen Präparationsprozessen
- 3.2 Das innere Verhältnis zwischen der Mikrostruktur und der Leistung der Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 3.2.1 Mechanismus der Wirkung der Kornstruktur auf die Festigkeit
 - 3.2.2 Mechanismus der Wirkung der Kornstruktur auf die Zähigkeit
 - 3.2.3 Korrelation zwischen Phasenverteilung und Leitfähigkeit
 - 3.2.4 Korrelation zwischen Phasenverteilung und Wärmeleitfähigkeit
 - 3.2.5 Wirkung von Poren und Defekten auf die Härte
 - 3.2.6 Wirkung von Poren und Defekten auf die Korrosionsbeständigkeit
- 3.3 Evolution der Mikrostruktur der Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 3.3.1 Evolution durch Änderungen im Zusammensetzungsverhältnis
 - 3.3.2 Strukturtransformation während der Wärmebehandlung
 - 3.3.3 Rückkopplung der Nutzungsumgebung auf die Struktur
 - 3.3.4 Rückkopplung der Nutzungsumgebung auf die Leistung
- 3.4 Kontrollstrategie der Mikrostruktur der Wolfram-Kupfer-Legierung
 - 3.4.1 Kontrollmethoden basierend auf dem Präparationsprozess
 - 3.4.2 Optimierungsmethoden der Zugabe von Legierungselementen
 - 3.4.3 Beziehung zwischen Strukturregulierung und Leistung

Kapitel 4 Präparationstechnologie der Wolfram-Kupfer-Legierung

- 4.1 Präparation von Wolfram-Kupfer-Legierung durch Vakuum-Infiltration
 - 4.1.1 Prinzip der Schmelzeinfiltration und Anforderungen an die Ausrüstung
 - 4.1.2 Verfahrensschritte und Parameteroptimierung
 - 4.1.3 Vorteile und Einschränkungen des Verfahrens

Kapitel 5 Leistungstest- und Charakterisierungsmethoden der Wolfram-Kupfer-Legierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 Physikalische Eigenschaftsprüfung der Wolfram-Kupfer-Legierung

5.1.1 Dichteproofverfahren

5.1.2 Härteprüfstandards und -operationen

5.1.3 Leitfähigkeitsprüfverfahren

5.1.4 Wärmeleitfähigkeitsprüfverfahren

5.2 Chemische Eigenschaftsbewertung der Wolfram-Kupfer-Legierung

5.2.1 Korrosionsbeständigkeitsprüfumgebung und -methoden

5.2.2 Antioxidationsleistungsprüfverfahren

5.3 Charakterisierungstechnologie der Mikrostruktur der Wolfram-Kupfer-Legierung

5.3.1 Beobachtungsverfahren mit metallografischen Mikroskopen

5.3.2 Anwendung der Rasterelektronenmikroskopie-Analyse

5.3.3 Röntgendiffraktions-Strukturanalyse

Kapitel 6 Mehrere Anwendungsbereiche der Wolfram-Kupfer-Legierung

6.1 Anwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung im elektrischen Bereich

6.1.1 Anwendung in Niederspannung-Leistungsschaltern

6.1.1.1 Leistung Anforderungen an Materialien der Kernkomponenten von Niederspannung-Leistungsschaltern

6.1.1.2 Anwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung in Kontaktkomponenten

6.1.1.3 Wirkung der Anwendung auf die Servicelebensdauer von Niederspannung-Leistungsschaltern

6.1.2 Anwendung in Hochspannungsschaltern

6.1.2.1 Arbeitsumgebung von Hochspannungsschaltern und Materialtoleranzstandards der Kernkomponenten

6.1.2.2 Die Wolfram-Kupfer-Legierung erfüllt die Leistung Anforderungen von Hochspannungsschaltern

6.1.2.3 Anwendungsunterschiede der Wolfram-Kupfer-Legierung in Hochspannungsschaltern unterschiedlicher Spannungsstufen

6.1.3 Anwendung in Relais und Luftschaltern

6.1.3.1 Anforderungen an die Verschleißbeständigkeit von Materialien für Relais und Eignung der Wolfram-Kupfer-Legierung

6.1.3.2 Installation 位置 und Funktionserfüllung der Wolfram-Kupfer-Legierung in Relais

6.1.3.3 Anforderungen an die Materialeistung für das Lichtbogenlöschsystem von Luftschaltern

6.1.3.4 Anwendungsprinzip der Wolfram-Kupfer-Legierung in der Lichtbogenlöschkammer von Luftschaltern

6.1.3.5 Auswahlkriterien für Wolfram-Kupfer-Legierungen in Relais und Luftschaltern

6.1.4 Anwendung in Trennschaltern und Erdschaltern

6.1.4.1 Anforderungen an die Wetterbeständigkeit von Materialien für Trennschalter in Langzeit-Expositionsumgebungen

6.1.4.2 Anwendungsdesign der Wolfram-Kupfer-Legierung im leitenden Kontaktteil des Trennschalters

6.1.4.3 Anforderungen an Materialfestigkeit und Leitfähigkeit für Erdschalter bei Kurzschlussströmen

6.1.4.4 Mechanismus, durch den die Wolfram-Kupfer-Legierung den sicheren Betrieb von Erdschaltern gewährleistet

6.1.4.5 Auswahlkriterien für Wolfram-Kupfer-Legierungen in Trennschaltern und Erdschaltern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Anwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung im elektronischen Bereich

6.2.1 Leistung Anforderungen von EDM-Elektroden und Vorteile der Wolfram-Kupfer-Legierung

6.2.1.1 Leistung Index Anforderungen an Elektrodenmaterialien für den EDM-Prozess

6.2.1.2 Unterschiedliche Elektrodenleistungsanforderungen in unterschiedlichen Bearbeitungsszenarien

6.2.1.3 Analyse der Kompatibilität der Wolfram-Kupfer-Legierung in Bezug auf Leitfähigkeit und Verschleißbeständigkeit

6.2.1.4 Leistungsvorteile im Vergleich zu traditionellen Elektrodenmaterialien

6.2.1.5 Auswahlkriterien für Wolfram-Kupfer-Legierungselektroden in gängigen EDM-Geräten

6.2.2 Rolle in der Mikroelektronik

6.2.2.1 Anforderungen an Präzision und Stabilität von Materialien für Mikroelektronikgeräte

6.2.2.2 Anwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung in der Mikroelektronik-Packaging

6.2.2.3 Mechanismen zur Verbesserung der Wärmeableitungseffizienz und der Servicelebensdauer von Mikroelektronikgeräten

6.2.2.4 Design der Montagestruktur in Chip-Packaging-Modulen

6.2.2.5 Anforderungen an Reinheit und Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer-Legierungen im Bereich der Mikroelektronik

6.2.3 Anwendung im Bereich der Sensoren

6.2.3.1 Anforderungen an die Materialeistung für die Arbeitsumgebung von Sensoren

6.2.3.2 Potenzielle Anwendungen der Wolfram-Kupfer-Legierung in Sensor-Sensorelementen

6.2.3.3 Anwendungsdesign von Sensor-Wärmeableitungskomponenten basierend auf hoher Wärmeleitfähigkeit

6.3 Anwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung im Luft- und Raumfahrt-Bereich

6.3.1 Anwendung in der Brenndüsenmundstück-Brustung von Feststoffraketen

6.3.1.1 Arbeitsumgebung der Brenndüsenmundstück-Brustung von Feststoffraketen

6.3.1.2 Anforderungen an die Materialeigenschaften der Brenndüsenmundstück-Brustung

6.3.1.3 Leistung der Wolfram-Kupfer-Legierung, um die Anforderungen der Brenndüsenmundstück-Brustung zu erfüllen

6.3.1.4 Umformprozess und Strukturdesign der Wolfram-Kupfer-Legierung in der Brenndüsenmundstück-Brustung

6.3.1.5 Verbesserung der Servicelebensdauer der Brenndüsenmundstück-Brustung nach der Verwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung

6.3.2 Potenzielle Anwendungen in Flugzeugtriebwerks-Komponenten

6.3.2.1 Merkmale der Arbeitsumgebung von Schlüsselementen von Flugzeugtriebwerken

6.3.2.2 Anforderungen an die Materialeigenschaften von Flugzeugtriebwerks-Komponenten

6.3.2.3 Anwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung in den Heißendteilen von Flugzeugtriebwerken

6.3.2.4 Richtungen zur Leistungsoptimierung der Wolfram-Kupfer-Legierung für die Anwendung in Flugzeugtriebwerken

6.3.3 Anwendung in den elektrischen Systemen von Raumfahrzeugen

6.3.3.1 Arbeitsumgebung und Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektrischen Systeme von Raumfahrzeugen

6.3.3.2 Anforderungen an die Materialeigenschaften der Kernkomponenten der elektrischen Systeme von Raumfahrzeugen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.3.3 Anwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung in den Kontaktteilen von Raumfahrzeug-Kontaktoren

6.3.3.4 Anwendung der Wolfram-Kupfer-Legierung in den Lichtbogenlöschkomponenten von Raumfahrzeug-Schaltern

6.3.3.5 Die Wolfram-Kupfer-Legierung spielt eine wichtige Rolle bei der Sicherstellung der Stabilität und Lebensdauer der elektrischen Systeme von Raumfahrzeugen

6.3.3.6 Materialauswahlstandards und Qualitätskontrollanforderungen für Wolfram-Kupfer-Legierungen in der Anwendung für Raumfahrzeuge

6.4 Anwendung in anderen Bereichen

6.4.1 Anwendungsszenarien in der Metallurgie-Industrie

6.4.2 Anwendungsfälle in Sportgeräten

6.4.3 Erkundung im Bereich der medizinischen Geräte

6.4.4 Anwendungsperspektiven im Bereich der Kernenergie

Kapitel 7 Zukünftige Entwicklungstrend der Wolfram-Kupfer-Legierung

7.1 Erkundung der neuen Präparationstechnologie der Wolfram-Kupfer-Legierung

7.1.1 Potenzielle Anwendungen der Additivfertigungstechnologie

7.1.2 Aussicht auf andere Kipp-Präparationstechnologien

7.2 Forschungsrichtung der Leistungsoptimierung der Wolfram-Kupfer-Legierung

7.2.1 Forschungsrichtungen zur Verbesserung der Gesamtleistung

7.2.2 Leistungserhöhung in bestimmten Anwendungs Szenarien

Anhang

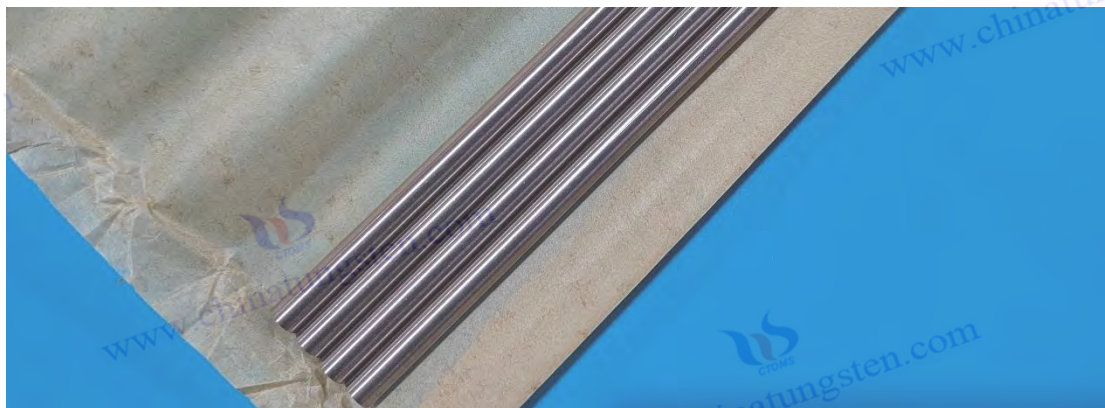
Anhang A Nationale Standard der Wolfram-Kupfer-Legierung in China

Anhang B Internationale Standard der Wolfram-Kupfer-Legierung

Anhang C Standard der Wolfram-Kupfer-Legierung in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern

Anhang D Detaillierte Erläuterung der Begriffe der Wolfram-Kupfer-Legierung

Literaturverzeichnis



CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung

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

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 1 Einleitung

1.1 Übersicht über Wolfram-Kupfer-Legierung

Als Verbundwerkstoff aus Wolfram und Kupfer vereint die Wolfram-Kupfer-Legierung die wesentlichen Vorteile beider Metalle und nimmt in der Industrie eine unersetzliche Stellung ein. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C), die hohe Festigkeit, Härte und hervorragende Verschleißfestigkeit ergänzen die hohe elektrische Leitfähigkeit, die hohe Wärmeleitfähigkeit und die gute Plastizität von Kupfer. Dadurch hält die Wolfram-Kupfer-Legierung hohen Temperaturen stand und behält ihre stabile elektrische und thermische Leitfähigkeit. Daher findet sie breite Anwendung in vielen Schlüsselbereichen wie Elektronik, Elektrizität, Luft- und Raumfahrt und Landesverteidigung.

Aus Sicht der Materialeigenschaften ist die Leistungsfähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung nicht einfach eine Kombination aus Wolfram und Kupfer. Durch ein angemessenes Zusammensetzungsverhältnis und einen angemessenen Herstellungsprozess wird die Leistung optimiert und ausgeglichen. Beispielsweise kann die Skelettstruktur von Wolfram in Hochtemperaturumgebungen die Legierung stützen und Verformungen bei hohen Temperaturen widerstehen, während Kupfer durch seine eigene Wärmeleitfähigkeit Wärme schnell leitet und so lokale Überhitzung verhindert. In leitfähigen Umgebungen kommt der Leitfähigkeitsvorteil von Kupfer zum Tragen, und die Zugabe von Wolfram verbessert die Gesamtfestigkeit der Legierung und vermeidet das Problem, dass reines Kupfer leicht verschleißt und sich leicht verformt. Diese „starke Kombination“ macht die Wolfram-Kupfer-Legierung zu einem idealen Werkstoff für komplexe Arbeitsbedingungen.

Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Industrietechnologie steigen die Leistungsanforderungen an Materialien immer weiter an. Auch die Forschung und Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen wird immer intensiver. Vom anfänglichen Basismodell bis hin zu speziell für verschiedene Szenarien angepassten Legierungen erweitert sich der Anwendungsbereich stetig, und die Leistung wird den unterschiedlichen industriellen Anforderungen immer besser gerecht. Im Folgenden werden wir diese spezielle Legierung aus zwei Aspekten genauer betrachten: Definition und Zusammensetzung.

1.1.1 Definition der Wolfram-Kupfer-Legierung

Wolframkupferlegierungen sind Pseudolegierungen (zwei im festen Zustand nicht miteinander mischbare Metalle, die einen mechanisch verbundenen Verbundwerkstoff bilden). Sie werden aus Wolfram (W) und Kupfer (Cu) als Hauptbestandteilen durch Verfahren wie Pulvermetallurgie hergestellt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Einzelmetallen oder vollständig mischbaren Legierungen liegen Wolfram und Kupfer in Wolframkupferlegierungen als physikalische Mischung vor: Wolfram bildet eine durchgehende Skelettstruktur, und Kupfer füllt die Poren des Wolframskeletts. Beide verbinden sich über die Grenzfläche zu einem Ganzen. Daher behält Wolfram den hohen Schmelzpunkt, die hohe Festigkeit, die hohe Härte und die Verschleißfestigkeit von Wolfram bei und verfügt über die hohe elektrische Leitfähigkeit, die hohe Wärmeleitfähigkeit und die gute Plastizität von Kupfer. Dadurch werden die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaften „hohe Temperaturbeständigkeit sowie elektrische und thermische Leitfähigkeit“ und „Ausgewogenheit zwischen hoher Festigkeit und einfacher Verarbeitung“ erreicht. Der Schlüssel zur Wolframkupferlegierung liegt im Kern der Definition in den „Verbundvorteilen“ und der „Prozessabhängigkeit“. Ihre Leistungsfähigkeit wird einerseits durch die synergistische Wirkung von Wolfram und Kupfer bestimmt: Beispielsweise gewährleistet die hohe Leitfähigkeit der Wolframkupferlegierung bei der Funkenerosion eine effiziente Stromübertragung der Elektrode, während der hohe Schmelzpunkt von Wolfram ein Schmelzen der Elektrode bei Hochtemperaturfunkenentladungen verhindert. Bei wärmeableitenden Bauteilen sorgt die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer für eine schnelle Wärmeableitung, und die hohe Festigkeit von Wolfram verhindert, dass sich die Bauteile bei Montage und Gebrauch leicht verformen. Andererseits beinhaltet die Definition auch die Richtung des Herstellungsprozesses: Da Wolfram und Kupfer im festen Zustand nicht mischbar sind, können sie nicht durch Schmelzen hergestellt werden, sondern müssen pulvermetallurgische Verfahren (wie Pressen, Sintern, Infiltration usw.) angewendet werden. Dies ist auch eines der wichtigen Merkmale, die Wolframkupferlegierungen von anderen Legierungen unterscheiden.

Diese Definition verdeutlicht nicht nur die Zusammensetzung und Struktur der Wolfram-Kupfer-Legierung, sondern offenbart auch ihre maßgeschneiderten Eigenschaften: Durch Anpassung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses können Legierungen mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt werden (z. B. Legierungen mit hohem Wolframgehalt, die auf hohe Temperaturbeständigkeit und hohe Festigkeit ausgerichtet sind, und Legierungen mit hohem Kupfergehalt, die auf elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit ausgerichtet sind), um den individuellen Anforderungen verschiedener Bereiche wie Elektronikverpackungen, Hochspannungsschaltern und Luft- und Raumfahrtmotoren gerecht zu werden. Daher ist die Definition der Wolfram-Kupfer-Legierung nicht nur eine Beschreibung ihrer Materialzusammensetzung, sondern auch eine Zusammenfassung ihrer Kerneigenschaft: „Die Struktur bestimmt die Leistung, und die Leistung passt sich der Situation an.“

1.1.2 Legierungszusammensetzung

Wolframkupferlegierungen basieren auf Wolfram (W) und Kupfer (Cu). Der Wolframanteil liegt üblicherweise zwischen 50 % und 90 % (Massenanteil) und der Kupferanteil zwischen 10 % und 50 %. Das genaue Verhältnis muss entsprechend den Leistungsanforderungen des Anwendungsszenarios bestimmt werden. Zusätzlich zu den beiden Hauptbestandteilen Wolfram und Kupfer werden einigen Wolframkupferlegierungen für spezielle Zwecke Spuren anderer Elemente als Hilfskomponenten zugesetzt, um die Umformungseigenschaften oder bestimmte Funktionen des Materials zu optimieren. Der Gehalt dieser Hilfselemente überschreitet jedoch üblicherweise nicht 1 %, sodass die Kernkomponentenstruktur von „Wolfram-Kupfer“ nicht verändert wird.

Was die Rolle der Hauptkomponenten betrifft, ist Wolfram als Metall mit hohem Schmelzpunkt (Schmelzpunkt 3.422 °C) der Hauptlieferant von Legierungsfestigkeit, Härte, Hochtemperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit. Je höher der Wolframgehalt, desto höher der Schmelzpunkt der Legierung, desto größer sind Festigkeit und Härte und desto besser die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturbeständigkeit. Beispielsweise kann eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit einem Wolframgehalt von 90 % eine Druckfestigkeit von über 800 MPa aufweisen und ihre strukturelle Stabilität in einer Hochtemperaturumgebung über 1.000 °C beibehalten, was sie für Hochtemperaturkomponenten von Luft- und Raumfahrttriebwerken geeignet macht. Kupfer als Metall mit hoher Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit ist hauptsächlich dafür verantwortlich, der Legierung elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und eine gewisse Plastizität zu verleihen. Je höher der Kupfergehalt, desto besser sind die elektrische und thermische Leitfähigkeit der Legierung und desto besser die Verarbeitungseigenschaften. Beispielsweise weist eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit einem Kupferanteil von 50 % eine Leitfähigkeit von über 40×10^6 S/m auf, die sich als Wärmeableitungselektrode in elektronischen Gehäusen eignet. Die Zugabe von Hilfskomponenten dient der Verbesserung der Prozessleistung oder dem Ausgleich von Mängeln an den Hauptkomponenten. Beispielsweise kann die Zugabe von Spuren von Nickel (Ni) die Bindungskraft zwischen Wolframpartikeln und Kupferphasen erhöhen und so die Trennung von Wolframgerüst und Kupferphase bei Krafteinwirkung auf die Legierung vermeiden. Die Zugabe einer geringen Menge Eisen (Fe) oder Kobalt (Co) kann die Pressbarkeit von Wolframpulver verbessern und die Bildung einer dichten Struktur während des Formprozesses erleichtern. Die Zugabe von Hilfskomponenten muss jedoch streng dosiert werden, da sie sonst die Leistung der Hauptkomponenten beeinträchtigen kann. So verringert beispielsweise zu viel Nickel die elektrische und thermische Leitfähigkeit der Legierung, und zu viel Eisen kann deren Sprödigkeit erhöhen.

Die Zusammensetzung einer Wolfram-Kupfer-Legierung ist ein typisches Beispiel für die Grundidee: „Die Hauptkomponente bestimmt die Kernleistung, während die Nebenkomponekte den Prozess und die Details optimiert.“ Durch die Anpassung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses lassen sich Festigkeit, elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie Hochtemperaturbeständigkeit der Legierung präzise steuern. Dadurch eignet sie sich für eine Vielzahl von Anwendungsbereichen, von der Elektronikverpackung bis hin zur nationalen Verteidigung und Militärindustrie. Die Zugabe von Spurenelementen verbessert die Praktikabilität und Stabilität der Legierung zusätzlich, sodass dieser Verbundwerkstoff den komplexen Anforderungen der Industrie besser gerecht wird.

1.2 Historischer Ursprung und Entwicklungsprozess der Wolfram-Kupfer-Legierung

1.2.1 Frühe Exploration

Wolfram-Kupfer-Legierungen reichen bis ins späte 19. und frühe 20. Jahrhundert zurück. Die Forschung in dieser Phase konzentrierte sich nicht auf Wolfram-Kupfer-Legierungen, sondern basierte auf der getrennten Untersuchung der Eigenschaften von Wolfram und Kupfer sowie ersten Versuchen mit Verbundwerkstoffen. Die industrielle Revolution förderte damals die Nachfrage nach hochfesten und hochleitfähigen Werkstoffen. Wolfram genoss aufgrund seines hohen Schmelzpunkts und seiner hohen Festigkeit (insbesondere bei Glühlampen) große Beachtung, während Kupfer aufgrund seiner hervorragenden elektrischen und thermischen Leitfähigkeit zum Kernwerkstoff der Elektroindustrie wurde. Allerdings traten allmählich die Mängel beider Metalle zutage: Reines Wolfram war spröde und schwer zu verarbeiten, während reines Kupfer eine geringe Festigkeit und geringe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturbeständigkeit aufwies. Man begann darüber nachzudenken, ob sich die Vorteile beider Metalle durch eine Verbindung vereinen ließen.

Frühe Forschungen beschränkten sich hauptsächlich auf kleine Laborversuche, und die technischen Mittel waren vergleichsweise primitiv. Um 1900 vermischten deutsche und amerikanische Materialforscher erstmals Wolframpulver und Kupferpulver mechanisch und stellten durch einfaches Pressen und Sintern den ersten Wolfram-Kupfer-Verbundblock her. Obwohl sich kein stabiler Prozess etablierte, war die Machbarkeit des Wolfram-Kupfer-Verbundes nachgewiesen. Die Produktleistung war jedoch zu diesem Zeitpunkt äußerst unzureichend: Die Wolfram-Kupfer-Verbindung war locker, die mechanische Festigkeit unzureichend und die elektrische und thermische Leitfähigkeit entsprachen nicht den Erwartungen. Aufgrund der fehlenden präzisen Kontrolle der Pulverpartikelgröße und der Sintertemperatur war die Ausbeute zudem extrem niedrig, sodass das Produkt lediglich theoretisch verifiziert und nicht in die Praxis umgesetzt werden konnte.

Der eigentliche Impuls für die frühen Forschungen hin zur Anwendungsorientierung waren die Bedürfnisse der Militär- und Elektroindustrie. In den 1920er Jahren, mit der Entwicklung der Funktechnik und des Artilleriebaus, wurde ein Material benötigt, das hohen Temperaturen standhalten und gleichzeitig Strom leiten konnte (wie etwa die Elektroden von elektrischen Artilleriezündgeräten). Reines Kupfer schmilzt leicht bei hohen Temperaturen, und reines Wolfram ist nicht ausreichend leitfähig. Die Forscher richteten ihre Aufmerksamkeit erneut auf Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe. Um 1925 stellte die General Electric Company der Vereinigten Staaten die ersten Wolfram-Kupfer-Produkte her, die durch Verbesserung des Pulvermischprozesses (wie etwa durch Verlängerung der Kugelmahlzeit zur Verfeinerung des Pulvers) für einfache Elektroden verwendet werden konnten. Obwohl die Leistung noch instabil war, war dies das erste Mal, dass „reines Wolfram oder reines Kupfer in bestimmten Szenarien ersetzt wurde“, und wurde zum Ausgangspunkt für den Übergang von Wolfram-Kupfer-Legierungen vom Labor in die Praxis. Obwohl die Erkundung in dieser Phase kein systematisches technisches System bildete, legte sie zwei Grundlagen für die nachfolgende Forschung: Erstens verdeutlichte sie die Kernrichtung „Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe können Festigkeit sowie elektrische und thermische Leitfähigkeit in Einklang bringen“; zweitens sammelte sie erste Erfahrungen beim Mischen, Pressen und Sintern von Pulvern.

1.2.2 Wichtige technologische Durchbruchknoten

Die Wolfram-Kupfer-Legierung ist untrennbar mit einer Reihe wichtiger technologischer Durchbrüche verbunden, die ihre Entwicklung von „Laborproben“ zu „Industriematerialien“ vorangetrieben haben.

Der erste Schlüsselknoten erschien in den 1940er Jahren. Die Ausgereiftheit des Infiltrationsprozesses löste das Kernproblem der „losen Verbindung von Wolfram und Kupfer“. Der vorherige Sinterprozess erschwerte die vollständige Verbindung von Wolfram und Kupfer, während der Infiltrationsprozess (Vorsintern des Wolframskeletts und anschließendes Infiltrieren der Poren mit geschmolzenem Kupfer) die Materialdichte deutlich verbesserte. Um das Problem der hohen Temperaturbeständigkeit der Zündelektroden von Flugzeugmaschinenengewehren zu lösen, optimierte das US-Militär 1943 gemeinsam

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mit wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen den Infiltrationsprozess: Durch die Kontrolle der Porosität des Wolframskeletts (eingestellt auf 20–30 %) und der Schmelztemperatur von Kupfer (genau 1100–1200 °C) wurde die Dichte der Wolfram-Kupfer-Legierung auf über 95 % erhöht, während Festigkeit und Leitfähigkeit im Vergleich zu zuvor um 40 % gesteigert wurden. Die Legierung wurde erfolgreich im Zündsystem von Flugzeugmaschinengewehren eingesetzt. Dies war das erste Mal, dass eine Wolfram-Kupfer-Legierung in großem Maßstab in der Praxis eingesetzt wurde.

Der zweite wichtige Knotenpunkt war die Weiterentwicklung der Pulvermetallurgie in den 1960er Jahren. Mit dem Aufkommen von Elektronenmikroskopen und präzisen Temperaturregelgeräten konnten Forscher die Partikelgröße von Wolfram- und Kupferpulver (von anfänglich 100 Mesh auf über 500 Mesh) und die Sinteratmosphäre (durch Schutzgase zur Vermeidung von Oxidation) präzise steuern. 1962 entwickelte das japanische Unternehmen Sumitomo Metal das Verfahren „Ultrafeines Pulver + Vakuumsintern“, das die Wolframpartikel in der Wolfram-Kupfer-Legierung gleichmäßiger verteilte und die Kupferphase vollständiger füllte. Nicht nur die mechanischen Eigenschaften (Druckfestigkeit über 600 MPa) und die elektrische Leitfähigkeit (die Leitfähigkeit erreichte über 60 % von reinem Kupfer) blieben stabil, sondern auch die Verarbeitung komplex geformter Produkte (wie dünner Bleche und speziell geformter Elektroden) wurde ermöglicht, was die Ausweitung des Verfahrens vom Militärbereich auf die Elektronikindustrie (wie Kühlkörper früher Transistoren) förderte.

Der dritte Schlüsselpunkt war die Einführung des Konzepts der „funktionalen Anpassung“ in den 1980er Jahren. Zuvor basierten Wolfram-Kupfer-Legierungen hauptsächlich auf einem einzigen Verhältnis, und die Anforderungen der verschiedenen Branchen waren sehr unterschiedlich – die Luft- und Raumfahrt benötigte eine hochtemperaturbeständige Legierung mit einem hohen Wolframanteil (über 80 %), die Elektronik hingegen eine hochleitfähige Legierung mit einem hohen Kupferanteil (über 50 %). 1985 entwickelte das Beijing Research Institute of Nonferrous Metals in China ein „Wolfram-Kupfer-Verhältnis-Leistungs-Korrespondenzmodell“, um eine bedarfsgerechte Zusammensetzung zu erreichen: Durch die Anpassung des Wolframanteils von 50 % bis 90 % und die entsprechenden Prozessparameter konnten Festigkeit, Leitfähigkeit und Hitzebeständigkeit der Legierung präzise gesteuert werden. Dieser Durchbruch verwandelte Wolfram-Kupfer-Legierungen von „Allzweckwerkstoffen“ in „szenarioadaptive Werkstoffe“, und ihr Anwendungsspektrum erweiterte sich rasant.

1.2.3 Moderne Entwicklungstrends

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts hat die Entwicklung von Wolfram-Kupfer-Legierungen drei große Trends gezeigt: „extreme Leistung, vielfältige Anwendungen und intelligente Prozesse“, wodurch sie zu einem der Schlüsselmaterialien im Bereich der High-End-Fertigung wurden. Extreme Leistung ist die Kernrichtung der modernen Entwicklung. Da sich die Anforderungen an Materialien in den Bereichen Chips, Luft- und Raumfahrt und neue Energien von der „Erfüllung von Grundbedürfnissen“ hin zum „Überschreiten von Leistungsgrenzen“ verschoben haben, wurden die Leistungsindikatoren von Wolfram-Kupfer-Legierungen kontinuierlich aktualisiert: Durch Nanopulver-Herstellungstechnologie (wie Plasma-Kugelmahlen) kann die Partikelgröße von Wolframpulver auf 100 Nanometer genau gesteuert werden, und die Schnittstelle zu Kupfer ist enger. Die Leitfähigkeit des neuesten Produkts hat

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mehr als 85 % von reinem Kupfer erreicht, und die Druckfestigkeit hat 1000 MPa überschritten und liegt damit weit über dem Niveau des 20. Jahrhunderts. Was die Hochtemperaturbeständigkeit betrifft, können Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframgehalt (90 %) ihre strukturelle Stabilität bei 1200 °C aufrechterhalten. Durch das Hinzufügen von Verstärkungsphasen wie Graphen wird die Verschleißfestigkeit um mehr als 30 % erhöht, wodurch die Anforderungen extremer Szenarien wie der Mobilfunkbasisstation der fünften Generation und der Brennkammer von Luft- und Raumfahrttriebwerken erfüllt werden.

Die Diversifizierung der Anwendungen spiegelt sich in der Ausweitung von traditionellen Bereichen auf aufstrebende High-End-Bereiche wider. Wolfram-Kupfer-Legierungen werden traditionell hauptsächlich für elektrische Kontakte, Elektroden usw. verwendet. Mittlerweile finden sie auch Anwendung in Chip-Gehäusen (als Wärmeableitungssubstrat für Hochleistungschips mit hoher Wärmeleitfähigkeit zur schnellen Wärmeableitung), Fahrzeugen mit alternativer Energie (leitende Kontakte von integrierten Hochspannungsrelais, die hohen Strömen und Lichtbogenerosion standhalten) und experimentellen Geräten für die Kernfusion (als Divertormaterial gegen Hochtemperatur-Plasmaerosion). Branchendaten zufolge liegt die jährliche Wachstumsrate der weltweiten Nachfrage nach Wolfram-Kupfer-Legierungen im Halbleiterbereich seit 2020 bei über 25 % und hat sich damit zu einem neuen Wachstumspol entwickelt.

Intelligente Technologie bildet die technische Grundlage für moderne Entwicklungen. Die traditionelle Herstellung von Wolframkupferlegierungen basiert auf manueller Erfahrung. Heute ist der gesamte Prozess durch „digitale Zwillinge“ und automatisierte Produktionslinien steuerbar: Von der Online-Partikelgrößenüberwachung beim Pulvermischen über die Echtzeit-Temperatur-Druck-Regelung im Sinterprozess bis hin zur zerstörungsfreien Prüfung der Leistung des fertigen Produkts – all dies kann durch intelligente Systeme erfolgen. Die Einführung der 3D-Drucktechnologie hat die Grenzen der Formgebung überwunden – im Jahr 2022 nutzte das Fraunhofer-Institut in Deutschland die Metall-3D-Drucktechnologie, um Wolframkupfer-Wärmeableitungskomponenten mit komplexen internen Strömungskanälen direkt zu drucken. Strukturen, die mit herkömmlichen Verfahren nicht erreicht werden können, können in Massenproduktion hergestellt werden, was neue Lösungen für speziell geformte und integrierte Komponenten bietet.

Gleichzeitig steht die moderne Entwicklung auch vor Herausforderungen: Wolfram ist als strategische Ressource starken Preisschwankungen unterworfen, was die Entwicklung der Technologie zum Recycling und zur Wiederverwendung von Wolframkupferlegierungen fördert (die aktuelle Recyclingquote liegt bei über 80 %). Die Konkurrenz durch alternative Materialien (wie Siliziumkarbidkeramik und Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffe) zwingt Wolframkupferlegierungen zudem dazu, ihre Vorteile durch Leistungssteigerungen zu erhalten. Generell wandeln sich Wolframkupferlegierungen, getrieben durch die Nachfrage nach High-End-Fertigung, von „Hilfsmaterialien“ zu „Kernmaterialien“. Ihre Entwicklung ist eng mit Innovationen in Spitzenwissenschaft und -technologie verbunden, und es besteht auch in Zukunft viel Raum für Durchbrüche.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 2 Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Legierung

2.1 Analyse der Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Legierung

Wolframkupferlegierungen haben ihren Ursprung in ihrer einzigartigen Verbundstruktur und Zusammensetzung. Sie übernehmen nicht einfach die einzelnen Eigenschaften von Wolfram und Kupfer, sondern bilden durch die Synergie beider Eigenschaften eine Reihe ausgewogener und praktischer Eigenschaften. Makroskopisch betrachtet, verfügt Wolframkupfer über eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit, ähnlich wie Metalle, und eine mechanische Festigkeit, die für komplexe Arbeitsbedingungen ausreicht. Aus Anwendungssicht liegt der Kern seiner Eigenschaften in der „Balance“ – dem Finden des kritischen Punkts zwischen Härte und Zähigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit sowie elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, um sich an industrielle Anforderungen anzupassen. Dadurch kann Wolframkupferlegierungen in einer Vielzahl von Szenarien mit anspruchsvollen Materialeigenschaften eingesetzt werden. Ob in mechanischen Teilen mit häufiger Reibung oder in elektrischen Geräten, die gleichzeitig hohen Temperaturen und Stromstößen ausgesetzt sind – die Eigenschaften von Wolframkupferlegierungen kommen gezielt zum Tragen.

2.1.1 Mechanismus und Vorteile der Bildung hoher Härte

Wolframkupferlegierungen zeichnen sich durch ein besonderes Merkmal aus, das sie von reinem Kupfer und den meisten Kupferlegierungen unterscheidet. Die Entstehung dieser Eigenschaft hängt eng mit dem synergetischen Effekt der inneren Struktur zusammen und bildet die Grundlage für ihre Anwendung in verschleißfesten Szenarien. Im Gegensatz zu den weichen Eigenschaften von reinem Kupfer resultiert die Härte der Wolframkupferlegierung nicht aus der Verstärkung einer einzelnen Komponente, sondern aus der Leistungsoptimierung durch strukturelles Design. Dadurch behält sie eine gewisse Plastizität bei und widersteht gleichzeitig Verformungen durch äußere Reibung und Extrusion. Das macht sie zu einem praktischen und langlebigen Material.

2.1.1.1 Mikrostrukturelle Mechanismen

Wolfram -Kupfer-Legierungen entstehen durch ihre skelettgefüllende Mikrostruktur. Wolfram liegt in der Legierung als durchgehendes Skelett vor, das eine hohe Eigenhärte aufweist. Diese Wolframpartikel sind miteinander verbunden und bilden ein starres Trägernetzwerk im gesamten Material, ähnlich dem Stahlskelett eines Gebäudes, das der Legierung die grundlegende Härte verleiht. Kupfer als Füllphase ist gleichmäßig in den Poren des Wolframskeletts verteilt. Obwohl Kupfer selbst eine geringe Härte aufweist, schwächt seine Anwesenheit nicht die Integrität des Wolframskeletts. Im Gegenteil, Kupfer kann die Lücken zwischen den Wolframpartikeln füllen, die Schwachstellen in der Skelettstruktur reduzieren und die Übertragung von äußerem Druck auf das Wolframskelett durch die Kupferphase ermöglichen, wodurch Strukturschäden durch lokale Spannungskonzentration vermieden werden.

Darüber hinaus hat die Grenzflächenbindung zwischen Wolfram und Kupfer einen wichtigen Einfluss auf die Härte. Während des Herstellungsprozesses bildet sich nach entsprechender Behandlung eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

stabile Grenzflächenbindung zwischen den Wolframpartikeln und der Kupferphase. Diese Bindung verhindert ein Verrutschen der Wolframpartikel unter Krafteinwirkung und erhöht so die Steifigkeit der Gesamtstruktur. Die hohe Härte der Wolfram-Kupfer-Legierung ist daher nicht das Ergebnis einer einzelnen Komponente, sondern das Ergebnis des Zusammenspiels des starren Wolframskeletts, der Kupferfüllung und der Grenzflächenbindung. Diese Mikrostruktur ermöglicht die Erhaltung der strukturellen Integrität auch bei äußerer Reibung oder Extrusion.

2.1.1.2 Vorteile verschleißfester Anwendungen

Wolframkupferlegierungen bieten deutliche Vorteile bei verschleißfesten Anwendungen. Sie widerstehen dem Oberflächenverlust durch langfristige Reibung und verlängern so die Lebensdauer von Bauteilen. Bei häufigem Kontakt oder relativer Bewegung neigt die Materialoberfläche durch Reibung zu allmählichem Verschleiß, was schließlich zu Größenveränderungen oder Funktionsstörungen führt. Die hohe Härte der Wolframkupferlegierung kann diesen Verschleiß reduzieren – bei Kontakt mit anderen Objekten verkratzt oder verbeult die Oberfläche nicht so leicht und behält ihre ursprüngliche Form und Dimensionsstabilität lange Zeit.

Gleichzeitig zeigt sich der Vorteil der Verschleißfestigkeit auch in der Anpassungsfähigkeit an schwankende Reibungsbedingungen. In der Praxis ist die Reibungsumgebung oft nicht konstant, und es kann zu Lastwechseln, Temperaturschwankungen usw. kommen. Die Härte der Wolfram-Kupfer-Legierung nimmt bei leichten Temperaturerhöhungen oder Lastwechseln nicht signifikant ab und bleibt auch unter komplexen Bedingungen verschleißfest. Beispielsweise bleiben die Oberflächen mancher mechanischer Getriebeteile auch bei längerer Einwirkung unterschiedlich starker Reibung plan, und die Übertragungsgenauigkeit wird nicht durch übermäßigen Verschleiß beeinträchtigt. Dies verlängert den Wartungszyklus der zugehörigen Geräte und reduziert die Kosten und Ausfallzeiten durch Komponentenaustausch.

2.1.1.3 Härtevergleich und Vorteile gegenüber anderen Legierungen

Im Vergleich zu reinem Kupfer und herkömmlichen Kupferlegierungen ist der Härtevorteil der Wolframkupferlegierung deutlich spürbar. Reines Kupfer hat eine weiche Textur und neigt bei leichter äußerer Reibung zu Oberflächenverformungen. Obwohl die Härte der meisten Kupferlegierungen durch Zugabe anderer Elemente erhöht wird, liegt die Gesamthärte immer noch im mittleren bis niedrigen Bereich und ist bei hoher Reibungsintensität nur schwer zu bewältigen. Wolframkupferlegierungen weisen aufgrund ihres Wolframskeletts eine deutlich höhere Härte als diese Materialien auf, und ihr Oberflächenverschleiß ist unter gleichen Reibungsbedingungen deutlich geringer.

Im Vergleich zu reinem Wolfram ist die Härte der Wolfram-Kupfer-Legierung etwas geringer, bietet aber in der Praxis mehr Vorteile. Obwohl reines Wolfram eine extrem hohe Härte aufweist, ist es spröde. Bei leichter Reibung bricht oder löst es sich leicht ab, was die Verschleißfestigkeit beeinträchtigt. Die Kupferphase in der Wolfram-Kupfer-Legierung spielt eine gewisse Pufferfunktion. Bei gleichbleibend hoher Härte kann sie einen Teil der Aufprallenergie absorbieren und das Risiko eines Sprödbruchs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verringern. Sie eignet sich besser für die unter realen Arbeitsbedingungen auftretende Kombination aus Reibung und Aufprall.

Im Vergleich zu einigen Eisenlegierungen ist die Härte von Wolframkupferlegierungen nicht unbedingt ein absoluter Vorteil, sie sind aber in anderen Bereichen konkurrenzfähiger. Eisenlegierungen neigen zu einer schlechten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit, während Wolframkupferlegierungen eine hohe Härte bei gleichzeitig guter elektrischer und thermischer Leitfähigkeit aufweisen. Dies macht sie zu einer unverzichtbaren Wahl in Szenarien, in denen sowohl Verschleißfestigkeit als auch elektrische Leitfähigkeit (oder Wärmeleitfähigkeit) erforderlich sind. Beispielsweise können Eisenlegierungen bei einigen elektrischen Komponenten, die Kontaktreibung widerstehen und Strom leiten müssen, die Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit nicht erfüllen, während Wolframkupferlegierungen beides können.

2.1.2 Prinzip und Leistung der Lichtbogenabbrandfestigkeit

Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit ist eine der Kerneigenschaften von Wolframkupferlegierungen, die in der Elektrotechnik weit verbreitet sind. In Hochspannungsschaltern, Relais und anderen Geräten entstehen beim Ein- und Ausschalten des Stroms zwangsläufig Lichtbögen. Die hohe Temperatur und Energie des Lichtbogens korrodiert das Kontaktmaterial und führt zu Bauteilausfällen. Wolframkupferlegierungen können dieser Erosion dank ihrer einzigartigen Zusammensetzung und Struktur effektiv widerstehen und den langfristigen stabilen Betrieb der Komponenten gewährleisten. Ihre Lichtbogenerosionsbeständigkeit ist nicht das Ergebnis eines einzelnen Faktors, sondern Ausdruck des kombinierten Einflusses von Materialzusammensetzung, Mikrostruktur und Lichtbogenwirkungsmechanismus. Je nach Einsatzumgebung ergeben sich unterschiedliche Leistungseigenschaften, und es gibt eine klare Richtung zur Leistungsoptimierung.

2.1.2.1 Lichtbogenerosionsmechanismus

Lichtbogenerosion bezeichnet den Prozess der Oberflächenbeschädigung und des Materialverlusts durch die Einwirkung eines Lichtbogens. Die Hauptantriebskraft liegt in der hohen Temperatur und der vom Lichtbogen freigesetzten Energie. Bei einem Lichtbogen steigt die lokale Temperatur stark an, sodass die Materialoberfläche schmilzt oder sogar verdampft. Gleichzeitig drückt die vom Lichtbogen erzeugte elektrische Kraft die geschmolzenen Materialpartikel von der Oberfläche weg, was zu Spritzverlusten führt. Darüber hinaus kann das Material in einer Hochtemperaturumgebung auch chemisch mit dem umgebenden Medium (z. B. Luftsauerstoff) reagieren und spröde Substanzen wie Oxide bilden, die sich bei nachfolgender Lichtbogen- oder mechanischer Einwirkung leicht ablösen und die Erosion weiter verstärken.

Aus prozesstechnischer Sicht ist Lichtbogenerosion ein kombinierter Effekt aus thermischer Schädigung, mechanischer Ablösung und chemischer Zersetzung: Hohe Temperaturen zerstören zunächst die Integrität der Materialoberfläche und machen das Oberflächenmaterial instabil. Elektrische Kräfte und Luftströme lösen diese instabilen Substanzen ab. Die chemische Reaktion schwächt die Bindungskraft

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Materialoberfläche, wodurch die Erosion wahrscheinlicher wird. Dieser Mechanismus führt zur allmählichen Bildung von Löchern, Rissen oder Deformationen auf der Materialoberfläche, was letztendlich die Leitfähigkeit und die strukturelle Stabilität des Bauteils beeinträchtigt.

2.1.2.2 Prinzip der Abbrandfestigkeit

Die Wolfram-Kupfer-Legierung zur Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion entsteht durch die synergistische Wirkung von Wolfram und Kupfer. Ihr inneres Prinzip lässt sich auf den dreifachen Mechanismus „hochtemperaturbeständiges Skelett + effiziente Wärmeableitung + selbstreparierender Puffer“ zurückführen.

Wolfram bildet als hochschmelzende Komponente das starre Gerüst der Legierung. Es schmilzt bei der hohen Temperatur des Lichtbogens nicht so leicht. Es kann die Strukturintegrität unter Lichtbogeneinwirkung aufrechterhalten und großflächige Oberflächenschäden verhindern. Gleichzeitig verringert die Anwesenheit von Wolfram die Gesamtverdampfungsrate des Materials und verringert den durch hohe Temperaturen verursachten Materialverlust.

Kupfer leitet mit seiner hervorragenden Wärmeleitfähigkeit die vom Lichtbogen erzeugte Wärme schnell vom Wirkungsbereich ab und vermeidet so einen übermäßigen lokalen Temperaturanstieg. Dadurch wird der Schmelz- und Verdampfungsgrad verringert. Noch wichtiger ist: Bei extrem hohen Lichtbogentemperaturen schmilzt Kupfer vor Wolfram. Das geschmolzene Kupfer füllt die winzigen Vertiefungen auf der Oberfläche und bildet eine temporäre „Pufferschicht“, die einen Teil der Lichtbogenenergie absorbieren und die dem Lichtbogen direkt ausgesetzte Fläche des Wolframskeletts reduzieren kann. Dadurch übernimmt sie eine Schutzfunktion.

Darüber hinaus ist die Grenzflächenbindungsfestigkeit zwischen Wolfram und Kupfer relativ hoch, was dem durch die elektrische Kraft des Lichtbogens verursachten Reißeffekt standhält und den Spritzverlust von Materialpartikeln reduziert. Dieser interne Mechanismus der „Wolfram-Schmelzbeständigkeit, Kupfer-Wärmeableitung und synergistischen Anti-Peeling“-Wirkung ermöglicht es der Wolfram-Kupfer-Legierung, auch bei wiederholter Lichtbogeneinwirkung eine gute Oberflächenintegrität aufrechtzuerhalten.

2.1.2.3 Leistungsunterschiede in unterschiedlichen Nutzungsumgebungen

Wolfram -Kupfer-Legierungen sind nicht statisch und variieren je nach Einsatzumgebung erheblich. Sie werden hauptsächlich von Faktoren wie Umgebungstemperatur, Atmosphärenzusammensetzung, Lichtbogenenergiedichte und mechanischer Belastung beeinflusst.

In einer Hochtemperaturumgebung weist die umgebende Umgebung bereits eine relativ hohe Basistemperatur auf, was die Wärmeableitungseffizienz von Kupfer schwächt und es der Wärme im Lichtbogenwirkungsbereich erschwert, schnell zu diffundieren, was das Schmelzen und Verdampfen des Materials verstärken und die Erosionsrate beschleunigen kann. In Umgebungen mit hohem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sauerstoffgehalt oder korrosiven Gasen (wie Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff) führt die hohe Temperatur des Lichtbogens zu einer heftigeren chemischen Reaktion zwischen Material und Gas. Dadurch entstehen sprödere Oxide oder Sulfide, die sich leicht ablösen und so die Erosion beschleunigen. In einer durch Inertgas geschützten Umgebung werden chemische Reaktionen unterdrückt, Erosion ist hauptsächlich ein physikalischer Verlust (Schmelzen, Spritzen) und die Leistung ist stabiler.

Bei hoher Lichtbogenenergiedichte (z. B. bei Hochstromschaltungen) kann selbst der hohe Schmelzpunkt von Wolfram der augenblicklichen hohen Temperatur nicht vollständig standhalten, was zu einem teilweisen Schmelzen des Wolframskeletts führen kann. In diesem Fall wird die Pufferwirkung von Kupfer verstärkt, der Gesamterosionsgrad ist jedoch immer noch höher als bei Lichtbogenen mit niedriger Energie. Bei gleichzeitiger mechanischer Vibration oder Druck lösen sich die Erosionsprodukte auf der Materialoberfläche durch äußere Kräfte leichter ab, wodurch der Schadensbereich weiter vergrößert und die Lichtbogenerosionsbeständigkeit verringert wird.

2.1.2.4 Möglichkeiten zur Leistungsverbesserung

Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Legierungen lässt sich anhand von drei Aspekten bewerten: Materialdesign, Prozessoptimierung und Funktionsverbesserung. Zielgerichtete Verbesserungen erhöhen die Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenschäden. Im Materialdesign lässt sich die Leistungsbilanz durch Anpassung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses optimieren: Eine entsprechende Erhöhung des Wolframgehalts erhöht die Stabilität des hochtemperaturbeständigen Gerüsts und reduziert das Schmelzen bei hohen Temperaturen. Ein angemessener Kupfergehalt gewährleistet eine effiziente Wärmeableitung und verhindert lokale Überhitzung. Für spezielle Hochenergielichtbogenzenarien kann zusätzlich die Zugabe einer geringen Menge hochschmelzender, oxidationshemmender Elemente in das Wolframgerüst versucht werden, dessen Schmelz- und Oxidationsbeständigkeit zu verbessern, ohne die Wärmeleitfähigkeit des Kupfers signifikant zu verringern.

Prozessoptimierung ist ein wichtiger Faktor zur Leistungssteigerung. Durch die Verfeinerung der Partikelgröße von Wolfram- und Kupferpulver können beide Pulver gleichmäßiger in der Mikrostruktur verteilt werden, wodurch Schwachstellen durch lokale Komponententrennung reduziert werden. Vakuumsintern oder Sinterverfahren unter Schutzatmosphäre können die Porosität im Material verringern, die Bindungsfestigkeit der Wolfram-Kupfer-Grenzfläche verbessern und Partikelspritzer unter Lichtbogeneinwirkung reduzieren. Darüber hinaus kann eine Oberflächenverstärkung des fertigen Produkts (z. B. Plasmaspritzen einer verschleißfesten Beschichtung) eine zusätzliche Schutzbarriere auf der Oberfläche bilden, um die Erosion des Substrats durch den Lichtbogen zu verzögern.

Zur Funktionsverbesserung können wir durch Simulation realer Lichtbogenbedingungen eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit Gradientenstruktur entwickeln. Der Wolframanteil an der Oberfläche erhöht die Schmelzbeständigkeit, der Kupferanteil im Inneren sorgt für eine höhere Wärmeableitung. So kann das Material in verschiedenen Tiefen gezielt wirken. Gleichzeitig entwickeln wir Recycling- und Wiederverwendungstechnologien für Legierungen, um die Lebensdauer von Komponenten durch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reparatur erodierter Oberflächen zu verlängern und so indirekt die Lichtbogenerosionsbeständigkeit des Materials über den gesamten Lebenszyklus zu verbessern.

2.1.3 Analyse der Antihaft- und Antischweiß Eigenschaften

Die Antihaft- und Antischweiß Eigenschaften sind entscheidende Eigenschaften von Wolframkupferlegierungen bei mechanischen Kontakten und elektrischen Verbindungen. Adhäsion beschreibt das Phänomen, dass zwei Kontaktflächen teilweise miteinander verbunden sind und sich unter Druck oder Temperatur nur schwer trennen lassen. Schweißen hingegen ist eine stärkere Haftung, bei der die Kontaktfläche bei hohen Temperaturen geschmolzen und anschließend abgekühlt und verfestigt wird, um eine dauerhafte Verbindung zu bilden. Beides führt dazu, dass Komponenten stecken bleiben und versagen. Wolframkupferlegierungen bieten aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften klare Vorteile bei der Vermeidung solcher Probleme. Der Kern ihrer Fähigkeit liegt in der Reduzierung der Grenzflächenbindungstendenz der Kontaktfläche. Dadurch wird nicht nur mechanisches Anhaften durch Druck vermieden, sondern auch Schmelzschweißen durch hohe Temperaturen verhindert.

2.1.3.1 Ursachen für Adhäsion und Verschweißung

Die Ursache der Adhäsion liegt hauptsächlich im Oberflächenkontaktzustand und der mechanischen Einwirkung. Wenn die Oberflächen zweier Teile eng aneinanderliegen und unter Druck stehen, verwachsen die mikroskopischen Vorsprünge der Kontaktfläche miteinander. Bei stark plastisch wirkendem Material können sich die Vorsprünge lokal verformen und ineinander verwachsen. Werden gleichzeitig die oberflächliche Oxidschicht oder Verunreinigungen zusammengedrückt und zerstört, kommt es zu einem direkten Kontakt mit der frischen Metalloberfläche. Durch die Diffusion zwischen den Atomen entstehen Adsorptionskräfte, die schließlich zu lokaler Adhäsion der Kontaktfläche führen. Diese Situation tritt häufiger bei lang anhaltendem Druck oder langsamer Relativbewegung auf.

Schweißen ist das Ergebnis der kombinierten Effekte von „Hochtemperaturschmelzen“ und „Abkühlen und Erstarren“. Bei Wärmequellen wie Lichtbögen und hohen Reibungstemperaturen auf der Kontaktfläche kann die Materialoberfläche bis zum Schmelzen erhitzt werden, und die geschmolzenen Metalle auf den beiden Kontaktflächen vermischen sich. Bei sinkender Temperatur erstarren die gemischten geschmolzenen Metalle und bilden eine schweißähnliche Verbindung auf der Kontaktfläche. Befinden sich zudem Verunreinigungen auf der Kontaktfläche (z. B. Rückstände von brennendem Öl), können sich bei hohen Temperaturen niedrigschmelzende Eutektika bilden, die die Bindung des geschmolzenen Metalls weiter fördern und das Schweißphänomen verstärken.

2.1.3.2 Antihaftwirkung

Wolfram -Kupfer-Legierungen zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie im Kontaktzustand keine stabile Verbindung mit anderen Teilen eingehen. Selbst ein kurzer Kontakt kann Oberflächenschäden beim Trennen reduzieren. Bei mechanischem Kontakt verbessert das starre Wolframskelett die Verformungsbeständigkeit der Materialoberfläche, und mikroskopische Vorsprünge auf der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kontakttoberfläche können nicht so leicht zerdrückt oder eingedrückt werden, wodurch die Haftungsgrundlage durch mechanische Einwirkung verringert wird. Gleichzeitig ermöglicht das Kupfer der Oberfläche eine gewisse Gleitfähigkeit (im Vergleich zu reinem Wolfram), reduziert den Reibungskoeffizienten beim Kontakt und verhindert eine verstärkte Oberflächenadsorption durch Reibungswärme. Daher bilden sich bei Komponenten mit langfristigem Druckkontakt auf der Oberfläche der Wolfram-Kupfer-Legierung nicht so leicht Haftspuren mit dem Gegenmaterial, und die zum Trennen erforderliche Kraft ist geringer, wodurch die Integrität der Kontakttoberfläche erhalten bleibt.

Bei elektrischen Kontakten neigt Wolfram-Kupfer-Legierungen selbst bei einem leichten Lichtbogen, der einen lokalen Temperaturanstieg verursacht, nicht zur Haftung durch Oberflächenschmelzen. Dies liegt daran, dass die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer die Wärme schnell ableitet und so ein weiteres Schmelzen der Oberfläche verhindert. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram verhindert hingegen ein großflächiges Schmelzen, wodurch die Bildung einer stabilen Verbindungsschicht auf der Kontakttoberfläche erschwert wird und beim Trennen keine Risse entstehen.

2.1.3.3 Faktoren, die die Antihaft- und Antischweißigenschaften beeinflussen

Wolfram -Kupfer-Legierungen sind nicht fest und werden durch den Zustand des Materials selbst, die Kontaktbedingungen und Umweltfaktoren beeinflusst.

Der Oberflächenzustand des Materials selbst ist ein entscheidender Faktor. Befinden sich Verunreinigungen wie Oxidschichten und Ölflecken auf der Oberfläche, verschlechtert sich die Oberflächengüte. Verunreinigungen können zu „Verbindungspunkten“ für die Haftung unter Druck oder hohen Temperaturen werden und die Antihafteffekte schwächen. Im Gegensatz dazu weist eine glatte, polierte Oberfläche weniger mikroskopische Vorsprünge, eine kleinere Kontaktfläche und eine bessere Antihafteffekte auf. Auch die Dichte der Wolfram-Kupfer-Legierung hat einen Einfluss – Materialien mit vielen inneren Poren neigen zur Bildung kleiner Vertiefungen auf der Oberfläche, Verunreinigungen lagern sich leicht ab und lokale Haftung ist wahrscheinlicher.

Der Einfluss der Kontaktbedingungen spiegelt sich hauptsächlich in Druck, Temperatur und Relativbewegung wider. Übermäßiger Druck erhöht den mikroskopischen Biss der Kontakttoberfläche und fördert die Haftung. Übermäßige Temperatur (auch wenn sie den Schmelzpunkt nicht erreicht) erhöht die atomare Diffusionsrate und verbessert die Oberflächenadsorption. Und schnelle Relativbewegungen ohne Schmierung können Oberflächenschäden durch Reibungswärmeentwicklung verschlimmern und indirekt das Haftungsrisiko erhöhen.

Unter den Umweltfaktoren sind Feuchtigkeit und Medienzusammensetzung wichtiger. Eine Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit beschleunigt die Oberflächenoxidation und bildet eine lose Oxidschicht, die bei Kontakt leicht abfällt und zu einem Haftmedium wird. Wenn sich in der Umgebung korrosive Gase befinden, können sich auf der Oberfläche spröde Verbindungen bilden, die beim Abfallen das Oberflächenmetall abtragen und die Haftung verringern können, aber die Oberflächenintegrität zerstören und indirekt die Schweißbeständigkeit beeinträchtigen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.1.4 Prinzip und Anwendung der hervorragenden Leitfähigkeit

Die hervorragende elektrische Leitfähigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung ist einer ihrer Hauptvorteile, der sie von reinem Wolfram und den meisten hochtemperaturbeständigen Legierungen unterscheidet. Diese Leistung ergibt sich aus den Eigenschaften der Komponenten selbst und profitiert zudem vom synergetischen Effekt der Verbundstruktur. Sie strebt nicht nur eine „extreme Leitfähigkeit“ an, sondern erreicht eine „ausreichende und stabile“ elektrische Leitfähigkeit auf der Grundlage einer gewissen mechanischen Festigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit. Dadurch eignet sie sich für Szenarien, in denen Stromleitung und komplexe Arbeitsbedingungen gleichzeitig erforderlich sind. Die Leitfähigkeit ist im Prinzip das Ergebnis der Elektronenbewegung im Metall; diese Eigenschaft macht sie in der Anwendung zu einem Schlüsselmaterial, das „elektrische Funktion“ und „strukturelle Unterstützung“ verbindet.

2.1.4.1 Physikalische Natur und Leitungsmechanismus der Leitfähigkeit

Das physikalische Wesen der Leitfähigkeit liegt in der Fähigkeit freier Elektronen in einem Material, sich unter Einwirkung eines elektrischen Feldes gerichtet zu bewegen. Bei Vorhandensein eines externen elektrischen Feldes lösen sich die freien Elektronen im Material von den Zwängen der Atomkerne und bewegen sich entlang der Richtung des elektrischen Feldes, wodurch ein elektrischer Strom entsteht. Je weniger Hindernisse für die Elektronenbewegung bestehen (wie Atomschwingungen, Fremdstoffstreuung usw.), desto besser ist die Leitfähigkeit.

Wolfram -Kupfer-Legierungen basieren hauptsächlich auf der Rolle der Kupferphase . Kupfer ist ein typischer guter Leiter mit einer großen Anzahl freier Elektronen und einer regelmäßigen Anordnung seiner Atome. Die Streuwirkung der Elektronen während der Bewegung ist schwach, sodass Strom effizient geleitet werden kann. In Wolfram-Kupfer- Legierungen wird Kupfer in kontinuierlicher oder halbkontinuierlicher Form in die Poren des Wolframskeletts gefüllt, um einen durchgehenden „leitenden Kanal“ zu bilden – wenn Strom durch die Legierung fließt, fließen Elektronen hauptsächlich durch den Kupferphasenkanal. Obwohl Wolfram selbst eine viel geringere Leitfähigkeit als Kupfer hat, blockiert es als Skelett nicht die Kontinuität der Kupferphase , sondern erhält deren Stabilität durch die Trägerstruktur. Darüber hinaus ist die Grenzfläche zwischen Wolfram und Kupfer fest verbunden, was den Streuverlust der Elektronen an der Grenzfläche reduziert und die Leitfähigkeitseffizienz weiter sicherstellt. Dieser Mechanismus der „kupferphasendominierten Leitfähigkeit und wolframphasenstabilisierten Struktur“ ermöglicht der Legierung, ihre hervorragende Leitfähigkeit bei gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften aufrechtzuerhalten.

2.1.4.2 Leitfähigkeitsänderungen bei unterschiedlichen Komponentenverhältnissen

Die Leitfähigkeit von Wolfram-Kupfer-Legierungen zeigt mit der Veränderung des Zusammensetzungsverhältnisses von Wolfram zu Kupfer eine deutliche Regelmäßigkeit. Der Kerntrend lautet: „Je höher der Kupfergehalt, desto besser die Leitfähigkeit; je höher der Wolframgehalt, desto schwächer die Leitfähigkeit.“ Diese Veränderung ergibt sich aus dem wesentlichen Unterschied in der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leitfähigkeit der beiden Legierungen.

Bei hohem Kupfergehalt ist der von der Kupferphase in der Legierung gebildete leitfähige Kanal vollständiger und dichter, der Weg für den Elektronenfluss ist glatter und weniger blockiert, sodass die Gesamtleitfähigkeit näher an der von reinem Kupfer liegt. Zu diesem Zeitpunkt liegt die Wolframphase in Form dispergierter Partikel vor, was die Kontinuität der Kupferphase geringfügig beeinträchtigt. Aufgrund des geringen Kupfergehalts reicht dies jedoch nicht aus, um den leitfähigen Kanal zu blockieren, und die Leitfähigkeit kann weiterhin auf einem hohen Niveau gehalten werden.

Mit steigendem Wolframgehalt nimmt der Anteil des Wolframskeletts allmählich zu, die Verteilung der Kupferphase wird durch die Wolframpartikel geteilt, einige leitfähige Kanäle können abgeschnitten oder verengt werden, und Elektronen müssen beim Fließen die Wolframpartikel umgehen, der Weg wird länger und die Streuung nimmt zu, wodurch die Leitfähigkeit entsprechend abnimmt. Bei einem zu hohen Wolframgehalt kann die Kupferphase möglicherweise keinen durchgehenden Kanal bilden und nur in isolierten kleinen Bereichen existieren. Zu diesem Zeitpunkt ist es für Elektronen schwierig, sich frei innerhalb der Legierung zu bewegen, und die Leitfähigkeit wird erheblich geschwächt.

Diese Änderung ist keine lineare „monotone Abnahme“, sondern hängt eng mit der Kontinuität der Kupferphase zusammen – solange die Kupferphase im Wesentlichen kontinuierlich bleiben kann, ist die Abnahme der Leitfähigkeit relativ sanft, auch wenn der Wolframgehalt zunimmt; sobald die Kupferphase vollständig geteilt ist, nimmt die Leitfähigkeit deutlich ab.

2.1.4.3 Vorteile leitfähiger Anwendungen in elektrischen Geräten

Bei elektrischen Geräten zeigt sich der leitfähige Anwendungsvorteil der Wolfram-Kupfer-Legierung vor allem darin, dass sowohl die Leitfähigkeit als auch die Anpassungsfähigkeit an die Arbeitsbedingungen berücksichtigt werden, wodurch in bestimmten Szenarien die Leistungslücke zwischen reinem Kupfer und reinem Wolfram geschlossen werden kann.

In Hochspannungsschaltern, Relais und anderen Geräten, die häufig Ströme ein- und ausschalten müssen, muss das Kontaktmaterial Strom leiten und der Lichtbogentemperatur sowie mechanischen Einflüssen beim Schalten standhalten. Obwohl reines Kupfer eine ausgezeichnete Leitfähigkeit aufweist, schmilzt es bei hohen Temperaturen leicht und weist keine ausreichende mechanische Festigkeit auf. Nach längerem Gebrauch neigt es zu Verformungen oder Ablationsfehlern. Reines Wolfram ist zwar hochtemperaturbeständig und hochfest, weist jedoch eine schlechte Leitfähigkeit auf und kann die Anforderungen an die Leitung großer Ströme nur schwer erfüllen. Eine Wolfram-Kupfer-Legierung erfüllt beide Anforderungen: Die Kupferphase sorgt für einen effizienten Stromfluss und verhindert eine übermäßige Erwärmung der Kontakte; die Wolframphase widersteht Lichtbogentemperatur und mechanischen Einflüssen, verlängert die Lebensdauer der Kontakte und reduziert Geräteausfälle.

Bei Teilen, die Gleitkontakt erfordern, wie z. B. Motorbürsten und leitfähigen Schleifern, muss das Material Reibung und Verschleiß standhalten und gleichzeitig Strom leiten. Reines Kupfer weist eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

geringe Verschleißfestigkeit auf, und langfristiges Gleiten führt zu instabiler Leitfähigkeit durch Verschleiß. Gewöhnliche Kupferlegierungen weisen eine begrenzte Verschleißfestigkeit auf und können die Leitfähigkeit durch zugesetzte Elemente verringern. Die Wolframphase der Wolfram-Kupfer-Legierung verbessert die Oberflächenverschleißfestigkeit und reduziert Verluste beim Gleiten; die Kupferphase sorgt für eine stabile Leitfähigkeit. Selbst bei leichtem Verschleiß an der Oberfläche kann die Kontinuität der inneren Kupferphase die Stromleitung und den stabilen Gerätebetrieb gewährleisten. Darüber hinaus wirken bei einigen Komponenten, die die Doppelfunktion „Leitfähigkeit + Wärmeableitung“ erfordern (z. B. Elektroden von Hochleistungsgeräten), die Leitfähigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung und die Wärmeleitfähigkeit der Kupferphase synergetisch zusammen: Sie leiten nicht nur Strom, sondern führen auch die beim Betrieb des Geräts entstehende Wärme ab und vermeiden so lokale Überhitzung und Leistungseinbußen. Dieser Vorteil von „einem Material für mehrere Anwendungen“ erhöht den Anwendungswert in elektrischen Geräten zusätzlich.

2.1.5 Gute Wärmeleitfähigkeit

Wolfram -Kupfer-Legierungen sind eine der wichtigsten Stützen für Hochtemperatur- und Hochleistungsanwendungen. Diese Leistung beruht nicht allein auf einer bestimmten Komponente, sondern ist das Ergebnis der Synergie von Wolfram und Kupfer in Struktur und Eigenschaften. Sie behalten nicht nur die effiziente Wärmeleitfähigkeit von Kupfer bei, sondern gewährleisten durch die Wolfram-Skelettstruktur auch die Stabilität des Wärmeleitungsprozesses. Im Vergleich zu reinem Kupfer ist die Wärmeleitfähigkeit leicht beeinträchtigt, bietet dafür aber eine stärkere mechanische Unterstützung. Im Vergleich zu reinem Wolfram ist die Wärmeleitfähigkeit deutlich verbessert, wodurch das Problem der Wärmestauung bewältigt wird. Diese ausgewogene Wärmeleitfähigkeit macht sie unverzichtbar in Anwendungen, in denen Wärmeübertragung und strukturelle Tragfähigkeit gleichzeitig erforderlich sind.

2.1.5.1 Grundlagen der Wärmeleitfähigkeit und des Wärmeleitungsmechanismus

Das Grundprinzip der Wärmeleitfähigkeit beruht auf der Fähigkeit, Wärme durch mikroskopische Bewegungen im Material von einem Hochtemperaturbereich in einen Niedertemperaturbereich zu übertragen. Ihr Kern liegt in der kinetischen Energieübertragung von Molekülen, Atomen oder Elektronen: Teilchen im Hochtemperaturbereich vibrieren stärker und übertragen durch Kollision Energie auf benachbarte Teilchen im Niedertemperaturbereich, wodurch eine allmähliche Wärmediffusion ermöglicht wird.

Der Wärmeleitfähigkeitsmechanismus einer Wolfram-Kupfer-Legierung basiert hauptsächlich auf der „elektronischen Wärmeleitfähigkeit“ der Kupferphase, ergänzt durch die „phononische Wärmeleitfähigkeit“ der Wolframphase. Kupfer ist ein Metall, das eine große Zahl freier Elektronen enthält. Nachdem diese Elektronen im Hochtemperaturbereich Energie aufgenommen haben, verstärkt sich ihre Bewegung und sie übertragen Wärme durch Kollisionen schnell in den Niedertemperaturbereich. Dies ist eine effiziente Art der Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit von Wolfram hingegen hängt hauptsächlich von Gitterschwingungen (d. h. „Phononen“) ab, und die Schwingungen der Atome in der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nähe der Gleichgewichtslage übertragen Wärme durch das Gitter. Obwohl die Effizienz geringer ist als die elektronische Wärmeleitfähigkeit von Kupfer, ist sie stabiler. In der Legierungsstruktur bildet die Kupferphase einen kontinuierlichen Wärmeleitungskanal und die Wärme diffundiert zunächst schnell durch die Kupferphase. Das Wolframskelett dient als „Hilfsweg für die Wärmeübertragung“ und unterstützt gleichzeitig die Integrität des Kupferphasenkanals, wodurch ein Bruch des Wärmeleitungspfades durch Hochtemperaturverformung vermieden wird. Dieser „Kupferphasen-dominierte, Wolframphasen-unterstützte“ Mechanismus ermöglicht der Legierung eine effiziente Wärmeübertragung und die Aufrechterhaltung der Stabilität der Wärmeleitungsstruktur bei Thermoschock.

2.1.5.2 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wärmeableitungseffekt

Die Wärmeleitfähigkeit ist die zentrale Grundlage des Wärmeableitungseffekts. Beide zeigen eine positive Korrelation: Je besser die Wärmeleitfähigkeit des Materials, desto schneller wird die Wärme von der Wärmequelle nach außen übertragen und desto größer ist der Wärmeableitungseffekt. Der Wärmeableitungseffekt wird jedoch nicht nur durch die Wärmeleitfähigkeit bestimmt, sondern auch durch die Wärmeableitungsfläche des Materials und den Kontaktzustand mit dem Wärmeableitungsmedium. Der Vorteil einer Wolfram-Kupfer-Legierung besteht darin, dass sie durch ihre effiziente Wärmeleitfähigkeit den Effekt anderer Wärmeableitungsbedingungen verstärkt. Wenn die Wärmequelle Wärme erzeugt, kann die Wolfram-Kupfer-Legierung mit ihrer guten Wärmeleitfähigkeit die Wärme schnell von der Oberfläche der Wärmequelle ableiten, um lokale Wärmestaus zu vermeiden. Die abgeführte Wärme wird über die Materialoberfläche an das Wärmeableitungsmedium wie Luft und Kühlmittel übertragen. Wenn die Wärmeleitfähigkeit des Materials selbst nicht ausreicht, kann die Wärme selbst bei einer großen Wärmeableitungsfläche nur schwer an die Oberfläche gelangen, wodurch die Wärmeableitung stark reduziert wird. Die gute Wärmeleitfähigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung verhindert zudem die Bildung von „Hot Spots“ (lokalen Hochtemperaturbereichen) im Material. Hot Spots sind oft der Schlüssel zu Bauteilausfällen durch Überhitzung. Eine gleichmäßige Wärmeleitfähigkeit verbessert daher indirekt die Zuverlässigkeit der gesamten Wärmeableitung. Man kann sagen, dass die Wärmeleitfähigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung die „Grundleistung“ für die Wärmeableitung liefert und so eine effektivere Wärmeableitung ermöglicht.

2.1.5.3 Anwendungswert der Wärmeleitfähigkeit in Arbeitsumgebungen mit hohen Temperaturen

In einer Hochtemperatur-Arbeitsumgebung muss die Wärmeleitfähigkeit des Materials nicht nur „effizient“, sondern auch „stabil“ sein – das heißt, sie darf durch den Anstieg der Umgebungstemperatur nicht wesentlich abnehmen. Der Anwendungswert der Wärmeleitfähigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung spiegelt sich in diesem Punkt wider. In den Teilen in der Nähe der Brennkammer von Luft- und Raumfahrttriebwerken ist die Umgebungstemperatur sehr hoch, und die Teile erzeugen durch die Arbeit zusätzliche Wärme. Bei instabiler Wärmeleitfähigkeit kann der Wärmestau dazu führen, dass die Teile die Toleranztemperatur überschreiten. Obwohl die Kupferphase in der Wolfram-Kupfer-Legierung bei hohen Temperaturen weicher werden kann, nimmt ihre Wärmeleitfähigkeit nicht wesentlich ab, solange sie den Schmelzpunkt nicht erreicht. Das Wolframskelett kann die strukturelle Stabilität

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aufrechterhalten und verhindern, dass sich die Kupferphase aufgrund hoher Temperaturen verformt und den Wärmeleitungsweg blockiert. So kann es kontinuierlich Wärme leiten und den sicheren Betrieb der Teile bei hohen Temperaturen gewährleisten.

Im Wärmeableitungssubstrat von Hochleistungshalbleiterbauelementen entsteht während des Betriebs eine große Wärmemenge, und die Umgebungstemperatur steigt mit der Betriebsdauer an. Überschreitet die Temperatur herkömmlicher wärmeleitender Materialien (wie z. B. reinem Aluminium) einen bestimmten Bereich, sinkt die Wärmeleitfähigkeit deutlich, was zu einem Ausfall der Wärmeableitung führt. Wolfram-Kupfer-Legierungen können bei höheren Temperaturen eine stabile Wärmeleitfähigkeit aufrechterhalten, die vom Bauelement erzeugte Wärme kontinuierlich an das Wärmeableitungselement übertragen und so Leistungseinbußen oder Schäden am Bauelement durch Überhitzung vermeiden.

Darüber hinaus muss die Elektrode in den Elektrodenteilen des Lichtbogenschweißens nicht nur Strom leiten, sondern auch der durch den Lichtbogen erzeugten, augenblicklichen hohen Temperatur standhalten. Bei schlechter Wärmeleitfähigkeit verbrennt die Elektrode selbst aufgrund der mangelnden Wärmeableitung schnell. Eine Wolfram-Kupfer-Legierung kann die Wärme des Lichtbogens durch effiziente Wärmeleitfähigkeit rechtzeitig ableiten, die Temperatur der Elektrode selbst senken, ihre Lebensdauer verlängern und die Stabilität des Schweißprozesses gewährleisten. Diese Eigenschaft, die Wärmeleitfähigkeit auch bei hohen Temperaturen aufrechtzuerhalten, macht sie zu einem Schlüsselmaterial, das Wärmeerzeugung und Wärmeableitung in Hochtemperaturumgebungen verbindet.

2.1.6 Korrosionsbeständigkeit und -mechanismus

Wolfram -Kupfer-Legierung ist nicht ihre herausragendste Eigenschaft, sondern zeigt ihren praktischen Wert in feuchten Umgebungen mit leicht korrosiven Medien. Ihre Korrosionsbeständigkeit wird nicht durch eine einzelne Komponente erreicht, sondern ist das Ergebnis der strukturellen Synergie von Wolfram und Kupfer und der „passiven Beständigkeit“ gegen den Korrosionsprozess. Sie verhindert nicht nur die schnelle Oxidation von reinem Kupfer in bestimmten Umgebungen, sondern gleicht auch die lokalen Korrosionsdefekte von reinem Wolfram in komplexen Medien aus und kann die Stabilität von Struktur und Leistung in einer Vielzahl von industriellen Umgebungen aufrechterhalten.

2.1.6.1 Einfluss unterschiedlicher Korrosionsumgebungen

Der Korrosionsgrad der Wolframkupferlegierung wird durch unterschiedliche Korrosionsumgebungen beeinflusst. Dieser wird hauptsächlich durch die drei Faktoren Medium, Luftfeuchtigkeit und Temperatur bestimmt. In feuchter Umgebung bildet Wasserdampf einen Wasserfilm auf der Oberfläche der Legierung. Befinden sich in der Luft geringe Mengen an Schadstoffen (wie Schwefeldioxid und Salz), wird der Wasserfilm zu einem schwachen Elektrolyten und verursacht leichte elektrochemische Korrosion. Die Kupferphase kann oxidieren, und es bildet sich ein Oxidfilm auf der Oberfläche. Dieser Oxidfilm ist jedoch dicht und kann eine weitere Ausbreitung der Korrosion bis zu einem gewissen Grad verhindern. Wolfram verträgt diese Umgebung besser und korrodiert kaum, sodass die Korrosion insgesamt langsamer verläuft. In sauren oder alkalischen Medien nimmt die Korrosion deutlich zu. Saure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umgebungen zerstören die Oxidschicht auf der Kupferoberfläche, wodurch sich die Kupferphase weiter auflöst. In alkalischen Umgebungen können chemische Reaktionen mit Kupfer stattfinden, bei denen lösliche Substanzen entstehen, wodurch der Verlust der Kupferphase beschleunigt wird. Obwohl die Wolframphase Säure- und Laugenkorrosion widersteht, löst sich die Legierungsstruktur mit zunehmendem Verlust der Kupferphase allmählich auf, was letztendlich die Gesamtleistung beeinträchtigt. In einer trockenen Umgebung mit hohen Temperaturen ist Korrosion hauptsächlich Oxidation. Hohe Temperaturen beschleunigen die Oxidationsreaktion von Kupfer, und es kann sich eine dickere Oxidschicht auf der Oberfläche bilden. Fällt die Oxidschicht ab, wird die neue Kupferoberfläche weiter oxidiert. Wolfram oxidiert bei hohen Temperaturen langsam, und die entstandene Oxidschicht kann an der Oberfläche haften bleiben und das Innere schützen. Daher ist die Gesamtkorrosion geringer als in einer feuchten oder sauren bzw. alkalischen Umgebung.

2.1.6.2 Innerer Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit

Die Wolfram-Kupfer-Legierung lässt sich als synergistischer Effekt von „korrosionsbeständigem Skelett der Wolframphase + Oxidations-Selbstschutz der Kupferphase + struktureller Dichtebarrriere“ zusammenfassen.

Die Wolframphase selbst weist eine hohe chemische Stabilität auf und reagiert in den meisten korrosiven Umgebungen nur schwer mit dem Medium. Das von ihr gebildete, durchgehende Skelett bildet die Grundlage für die Korrosionsbeständigkeit der Legierung. Selbst bei leichter Korrosion der Kupferphase behält das Wolframskelett seine strukturelle Integrität und verhindert so eine Gesamtschädigung der Legierung.

In feuchter oder leicht oxidierender Umgebung bildet sich auf der Kupferoberfläche ein Oxidfilm. Dieser Film verändert zwar die Oberflächenfarbe, seine Textur ist jedoch relativ dicht und kann den weiteren Kontakt des Mediums mit dem Kupfer im Inneren verhindern. Er bildet sozusagen eine „natürliche Barriere“, um die weitere Ausbreitung von Korrosion zu verlangsamen.

Darüber hinaus kann die dichte Struktur der Legierung auch die Korrosionsbeständigkeit verbessern. Durch einen optimierten Herstellungsprozess ist die Porosität im Inneren der Wolfram-Kupfer-Legierung gering, wodurch die Kanäle für das Eindringen korrosiver Medien ins Innere reduziert werden. Gleichzeitig ist die Grenzfläche zwischen Wolfram und Kupfer fest verbunden, wodurch verhindert wird, dass sich das Medium an der Grenzfläche sammelt und lokale Korrosionspunkte bildet, was das Korrosionsrisiko weiter reduziert. Dieser Mechanismus aus „Skelettkorrosionsbeständigkeit, Oxidationsselbstschutz und struktureller Penetrationsbeständigkeit“ ermöglicht der Legierung eine gute Stabilität in nicht extrem korrosiven Umgebungen.

2.1.6.3 Technische Mittel zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit

Um die Korrosionsbeständigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung zu verbessern, müssen die drei Maßnahmen „Korrosionsschutz“, „Oberflächenschutz“ verbessern“ und „Innenstruktur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimieren“ ergriffen werden. Die Auswirkungen korrosiver Medien auf das Material müssen durch gezielte technische Maßnahmen reduziert werden. Die Oberflächenbehandlung ist die direkteste technische Maßnahme. Durch galvanisches Beschichten (z. B. Verchromen oder Vernickeln) wird auf der Oberfläche der Legierung eine korrosionsbeständige Beschichtung gebildet. Diese Beschichtung ist chemisch sehr stabil und isoliert die Legierungsmatrix vollständig vom korrosiven Medium. Gleichzeitig oxidiert oder löst sich die Beschichtung nicht so leicht auf, was die Korrosionswahrscheinlichkeit deutlich reduziert. Durch chemische Passivierung kann mithilfe einer speziellen Lösung auch eine dichtere und stabilere Oxidschicht auf der Kupferphasenoberfläche gebildet werden, um den Selbstschutz zu verbessern, ohne die Kerneigenschaften der Legierung, wie z. B. die Leitfähigkeit, zu beeinträchtigen.

Die Optimierung der inneren Struktur kann die Korrosionsbeständigkeit grundlegend verbessern. Durch die Verfeinerung der Partikelgröße von Wolfram- und Kupferpulver und die Verbesserung der Mischgleichmäßigkeit können Komponentenseigerung und Porosität innerhalb der Legierung reduziert und die lokale Ansammlung korrosiver Medien vermieden werden. Der Einsatz moderner Sinterverfahren (wie z. B. heißisostatisches Pressen) kann die Dichte der Legierung erhöhen, Mikrorisse und Hohlräume im Inneren beseitigen, die Kanäle für korrosive Medien blockieren und die Korrosionsbeständigkeit strukturell verbessern. Auch die Zugabe korrosionsbeständiger Hilfselemente ist ein effektiver technischer Ansatz. Die Zugabe geringer Mengen korrosionsbeständiger Elemente (wie Chrom und Silizium) zur Legierung reichert diese Elemente in der Kupferphase oder an der Wolfram-Kupfer-Grenzfläche an. Dies beeinträchtigt weder die Leitfähigkeit des Kupfers noch den Skeletteffekt des Wolframs, verbessert aber gleichzeitig die Oxidationsbeständigkeit der Kupferphase bzw. die Festigkeit der Grenzflächenbindung und reduziert lokale Korrosion.

2.2 Einfluss des Zusammensetzungsverhältnisses auf die Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Legierung

Wolfram-Kupfer-Legierungen bestehen aus Wolfram (hohe Härte, hoher Schmelzpunkt, Sprödigkeit) und Kupfer (gute Plastizität, elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit). Das Zusammensetzungsverhältnis der beiden Legierungen (üblicherweise als Wolframgehalt angegeben, z. B. W70Cu30 bedeutet 70 % Wolfram und 30 % Kupfer) ist der entscheidende Faktor für die Leistung. Da sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Wolfram und Kupfer deutlich unterscheiden, führen Änderungen des Zusammensetzungsverhältnisses direkt zu regelmäßigen Änderungen der mechanischen Eigenschaften der Legierung (Härte, Festigkeit und Zähigkeit). Diese Änderung ist das Ergebnis des synergistischen Effekts von „Wolframphasen-Skelettunterstützung“ und „Kupferphasen-Plastizitätspufferung“.

2.2.1 Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften

Wolfram -Kupfer-Legierungen verkörpern die Balance zwischen der hohen Festigkeit und Härte von Wolfram und der Plastizität und Zähigkeit von Kupfer. Mit steigendem Wolframgehalt verändert sich die Legierung allmählich von „Kupfer als Matrix und Wolfram als Verstärkungsphase“ zu „Wolfram als Skelett und Kupfer als Füllphase“, und auch die mechanischen Eigenschaften verändern sich von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

„Plastizitätsdominiert“ zu „Steifigkeitsdominiert“. Umgekehrt nehmen mit steigendem Kupfergehalt Plastizität und Zähigkeit der Legierung deutlich zu, Härte und Festigkeit nehmen jedoch ab.

2.2.1.1 Einfluss auf die Härte

von Wolfram-Kupfer-Legierungen hängt stark vom Verhältnis ihrer Bestandteile ab, wobei Wolfram eine entscheidende Rolle bei der Verbesserung der Härte spielt. Bei niedrigem Wolframgehalt in der Legierung dominiert die Kupferphase und bildet eine kontinuierliche Matrix mit einer kleinen Menge darin eingebetteter, dispergierter Wolframpartikel. Zu diesem Zeitpunkt ist die Legierung insgesamt weicher und ihre Härte kommt der von reinem Kupfer nahe. Dies liegt daran, dass Kupfer eine relativ weiche Textur hat und äußeren Verformungen wie Einkerbungen und Kratzern nur begrenzt standhält. Beispielsweise hat eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit 10–20 % Wolfram eine Brinellhärte von etwa 80–120 HB und eignet sich daher besser für einige Anwendungsfälle, die keine hohe Härte, aber eine gute Verarbeitungsleistung und andere Eigenschaften (wie Leitfähigkeit) erfordern.

Mit zunehmendem Wolframgehalt, beispielsweise auf etwa 50 %, verändert sich die innere Struktur der Legierung deutlich. Die Wolframpartikel nähern sich einander an und bilden eine Art Skelettstruktur. Obwohl die Kupferphase noch vorhanden ist und die Lücken im Wolframskelett füllt, kommt ihre tragende Funktion nun stärker zum Tragen. Da Wolfram selbst eine extrem hohe Härte aufweist, erhöht das von ihm gebildete Skelett die Widerstandsfähigkeit der Legierung gegen Verformungen erheblich, wodurch die Härte der Legierung deutlich auf bis zu 200–250 HB erhöht wird. Dank dieser Härte behält die Legierung ihre Oberflächenintegrität auch bei mäßiger Reibung und Verschleiß und eignet sich für Teile, die einer gewissen Reibung ausgesetzt sind, wie z. B. mechanische Getriebekomponenten.

Wenn der Wolframgehalt weiter auf 70–80 % oder sogar mehr erhöht wird, hat die Wolframphase ein kontinuierliches und festes Skelett gebildet, und die Kupferphase füllt nur die winzigen Poren des Wolframskeletts aus. Zu diesem Zeitpunkt liegt die Härte der Legierung nahe an der von reinem Wolfram und kann 300 HB überschreiten. Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframgehalt eignen sich gut für extreme Arbeitsbedingungen mit hoher Belastung und hohem Verschleiß. Beispielsweise sind EDM-Elektroden während des Betriebs häufig hohen Temperaturen und hohen Druckstößen ausgesetzt, die durch Entladungen erzeugt werden. Das Material muss daher eine extrem hohe Härte aufweisen, um die Formgenauigkeit und Lebensdauer der Elektrode zu gewährleisten. Hochspannungsentladungskontakte erfordern ebenfalls Materialien mit hoher Härte, um Lichtbogenerosion und mechanischem Verschleiß beim häufigen Öffnen und Schließen zu widerstehen. Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframgehalt können diese Anforderungen gut erfüllen.

2.2.1.2 Einfluss auf die Festigkeit

Zugfestigkeit und Druckfestigkeit von Wolfram-Kupfer-Legierungen verändern sich je nach Zusammensetzung unterschiedlich. Bei einem niedrigen Wolframgehalt (z. B. $\leq 50\%$) trägt die Kupferphase als zusammenhängende Matrix die Hauptzugkraft. Die Zugfestigkeit der Legierung hängt dabei hauptsächlich von der plastischen Tragfähigkeit des Kupfers ab. Da Kupfer relativ wenig Festigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

besitzt und die verstärkende Wirkung der darin dispergierten Wolframpartikel begrenzt ist, steigt die Zugfestigkeit der Legierung nur langsam an. Beispielsweise beträgt die Zugfestigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung mit 30 % Wolfram etwa 300–350 MPa.

Steigt der Wolframgehalt auf 50–80 %, bildet die Wolframphase allmählich eine halbkontinuierliche oder sogar kontinuierliche Skelettstruktur. Die Kupferphase füllt die Lücken im Wolframskelett und trägt zur Bindung und Spannungsübertragung bei. Wird die Legierung nun Spannungen ausgesetzt, können diese effektiver über das Wolframskelett übertragen und verteilt werden, wodurch die Zugfestigkeit deutlich verbessert wird. Da Wolfram selbst eine hohe Festigkeit besitzt, erhöht seine Skelettstruktur die Gesamttragfähigkeit der Legierung erheblich. Gleichzeitig lindert die Kupferphase das Problem lokaler Spannungskonzentrationen. Beispielsweise kann die Zugfestigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung mit 60 % Wolfram 450–550 MPa erreichen. Bei einem Wolframanteil von 70–80 % steigt die Zugfestigkeit weiter auf etwa 600–700 MPa.

Steigt der Wolframgehalt jedoch weiter ($\geq 80\%$), nimmt die Zugfestigkeit nach Erreichen des Spitzenwerts leicht ab. Dies liegt daran, dass die Kupferphase einen zu geringen Anteil ausmacht und die Lücken zwischen den Wolframpartikeln nicht vollständig ausfüllen kann, was zu einer Schwächung der Wolfram-Wolfram-Grenzflächenbindung führt. Unter Zugbelastung neigen diese schwachen Grenzflächen zunächst zum Reißen, was wiederum zu einem Gesamtbruch führt und die Zugfestigkeit der Legierung verringert. Beispielsweise hat eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit 90 % Wolfram eine Zugfestigkeit von etwa 600–650 MPa, etwas weniger als eine Legierung mit 80 % Wolfram.

Bezüglich der Druckfestigkeit ist die Regel relativ einfach und direkt. Mit steigendem Wolframgehalt steigt die Druckfestigkeit weiter an. Denn während des Kompressionsprozesses stützt sich die Legierung hauptsächlich auf die durch die Wolframphase gebildete Skelettstruktur, um Druckverformungen zu widerstehen. Je höher der Wolframgehalt, desto stärker das Skelett und desto höher die Druckfestigkeit. Beispielsweise hat eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit 90 % Wolfram eine Druckfestigkeit von über 1000 MPa, während eine Legierung mit 50 % Wolfram nur etwa 600–700 MPa beträgt.

2.2.1.3 Einfluss auf die Zähigkeit

Die Zähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung wird hauptsächlich durch die Kupferphase bestimmt und korreliert signifikant negativ mit dem Wolframgehalt. Bei niedrigem Wolframgehalt ($\leq 50\%$) liegt die Kupferphase als kontinuierliche Matrix vor, was der Legierung eine gute Zähigkeit verleiht. Bei Stößen oder äußeren Kräften kann die Kupferphase durch plastische Verformung große Energiemengen absorbieren, Spannungen abbauen und die Gefahr von Rissbildung und -ausbreitung verringern. Obwohl geringe Mengen dispergierter Wolframpartikel die Kontinuität der Kupferphase beeinflussen, ändert dies nichts an der allgemeinen Energieabsorption der Legierung, die hauptsächlich auf plastischer Verformung beruht. Die Legierung weist eine gute Schlagzähigkeit auf. Beispielsweise beträgt die Schlagzähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung mit 30 % Wolfram etwa 15–20 J/cm² und liegt damit nahe an der Zähigkeit von reinem Kupfer. Sie behält ihre strukturelle Integrität auch in Umgebungen mit bestimmten Stößen und eignet sich für Bauteile, die eine gewisse Schlagfestigkeit erfordern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wenn der Wolframgehalt auf 50–80 % steigt, bildet die Wolframphase allmählich ein Skelett in der inneren Struktur der Legierung und die Kupferphase wandelt sich in eine dispergierte Phase um, die die Lücken im Wolframskelett füllt. Diese Strukturänderung führt zu einer erheblichen Verringerung des Raums für plastische Verformung der Kupferphase. Bei Einwirkung äußerer Kräfte kann sich die Kupferphase nicht mehr so vollständig verformen wie zuvor, um Energie zu absorbieren. Spannungen konzentrieren sich leicht an der Wolfram-Kupfer-Grenzfläche und verursachen Risse an der Grenzfläche. Daher nimmt die Zähigkeit der Legierung mit steigendem Wolframgehalt erheblich ab. Beispielsweise sinkt die Schlagzähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung mit 60 % Wolfram auf 5–10 J/cm². Ab diesem Punkt ist die Legierung bei Stößen anfälliger für Beschädigungen.

Bei einer weiteren Erhöhung des Wolframgehalts auf ≥ 80 % ist das Wolframskelett nahezu plastisch verformbar. Die Kupferphase füllt nur die winzigen Lücken, wodurch Spannungskonzentrationen nicht wirksam abgebaut werden können. Unter Stoßbelastung bricht das Wolframskelett sehr leicht direkt. Die Legierung absorbiert nur sehr wenig Energie und zeigt deutliche Sprödigkeit. Die Schlagzähigkeit ist extrem gering. Beispielsweise beträgt die Schlagzähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung mit 90 % Wolfram nur 1–3 J/cm² und liegt damit nahe an der Sprödigkeit von reinem Wolfram. Diese Legierung mit hohem Wolframgehalt sollte während des Gebrauchs keinen starken Stößen ausgesetzt sein und wird hauptsächlich in Bereichen eingesetzt, in denen hohe Anforderungen an Härte und Festigkeit, aber geringe Anforderungen an die Zähigkeit gestellt werden.

2.2.2 Einfluss auf physikalische Eigenschaften

Wolfram -Kupfer-Legierungen sind nicht festgelegt, sondern verändern sich regelmäßig mit der Änderung des Zusammensetzungsverhältnisses von Wolfram und Kupfer. Dies liegt daran, dass die physikalischen Eigenschaften von Wolfram und Kupfer offensichtlich unterschiedlich sind. Wenn der Anteil der beiden in der Legierung zunimmt oder abnimmt, kombiniert die Legierung die Eigenschaften der beiden Metalle und bildet neue physikalische Eigenschaften. Ob es sich um materialbedingte Eigenschaften wie Dichte und Schmelzpunkt oder um temperaturbedingte Eigenschaften wie den Wärmeausdehnungskoeffizienten handelt, der Einfluss des Zusammensetzungsverhältnisses ist deutlich erkennbar. Dieser Einfluss ermöglicht es auch, die Wolfram-Kupfer-Legierung durch Anpassung der Zusammensetzung an die physikalischen Leistungsanforderungen verschiedener Szenarien anzupassen.

2.2.2.1 Einfluss auf die Dichte

Wolfram -Kupfer-Legierungen hängen eng mit den Proportionen ihrer Bestandteile zusammen und zeigen ein deutliches Veränderungsmuster. Wolfram ist ein Metall mit hoher Dichte, weist ein hohes Atomgewicht und eine dichte Anordnung der Atome auf, was ihm eine extrem hohe Dichte verleiht. Obwohl die Dichte von Kupfer im Vergleich zu anderen Metallen im mittleren Bereich liegt, ist sie deutlich niedriger als die von Wolfram. Bei niedrigem Wolframgehalt im Legierungssystem nimmt die Kupferphase den Hauptanteil in der Legierungsstruktur ein und weist einen kontinuierlich verteilten Zustand auf. Die Dichteigenschaften der Legierung werden dann hauptsächlich von der Kupferphase beeinflusst, und die Gesamtdichte liegt nahe an der Dichte von reinem Kupfer. Dadurch bietet die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Legierung Vorteile in gewichtssensitiven Szenarien mit anderen Materialeigenschaften (wie guter Leitfähigkeit, bestimmter Verarbeitungsleistung usw.). Beispielsweise können Wolfram-Kupfer-Legierungen mit niedrigem Wolframgehalt bei einigen internen Verbindungskomponenten elektronischer Geräte mit strengen Gewichtsbeschränkungen die elektrischen Leistungsanforderungen erfüllen und gleichzeitig das Gesamtgewicht so weit wie möglich reduzieren.

Mit zunehmendem Wolframgehalt der Legierung nimmt der Anteil der hochdichten Wolframphase in der inneren Struktur der Legierung kontinuierlich zu, und ihr Beitrag zur Gesamtdichte der Legierung wird immer bedeutender. Dabei wird die ursprünglich von der Kupferphase dominierte, durchgehende Struktur allmählich aufgebrochen. Die Wolframpartikel nähern sich einander an und bilden allmählich eine Skelettstruktur, wobei die Kupferphase die Lücken im Wolframskelett füllt. Da die Dichte der Wolframphase deutlich höher ist als die der Kupferphase, steigt die Dichte der Legierung mit zunehmendem Wolframgehalt stetig an. Diese Eigenschaft der allmählich zunehmenden Dichte ermöglicht es der Legierung, in Anwendungsszenarien eingesetzt zu werden, die größeren Stoßkräften standhalten oder stabile Gegengewichte erfordern. Beispielsweise kann in einigen mechanischen Geräten mit komplexen Vibrationsumgebungen eine entsprechende Erhöhung des Wolframgehalts in der Wolfram-Kupfer-Legierung und eine Erhöhung ihrer Dichte die Stabilität der Komponenten in einer Vibrationsumgebung verbessern und das Risiko von Verschiebungen oder Schäden durch Vibrationen verringern.

Wenn der Wolframgehalt in der Legierung einen hohen Anteil erreicht, hat die Wolframphase eine kontinuierliche und stabile Skelettstruktur in der Legierung gebildet und die Kupferphase ist nur in die winzigen Poren des Wolframskeletts eingefüllt. Zu diesem Zeitpunkt werden die Dichteigenschaften der Legierung fast vollständig von der Wolframphase dominiert, und die Legierungsdichte liegt zudem nahe an der Dichte von reinem Wolfram. Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframgehalt sind in einigen Spezialbereichen von einzigartigem Wert. Beispielsweise muss das Material bei der Herstellung bestimmter Teile in der Luft- und Raumfahrt seine strukturelle Integrität bewahren, wenn es extremem Druck und Hochgeschwindigkeits-Luftstrom ausgesetzt ist. Die hochdichte Wolfram-Kupfer-Legierung kann diesen extremen Arbeitsbedingungen dank ihrer hohen Dichte und der hohen Festigkeit und Härte, die die Wolframphase mit sich bringt, wirksam standhalten; In einigen Szenarien der Nuklearindustrie, in denen hochenergetische Partikeleinschläge absorbiert oder hochenergetischen Stößen standgehalten werden müssen, können Wolframkupferlegierungen mit hohem Wolframgehalt und hoher Dichte ebenfalls eine Schlüsselrolle spielen, indem sie ihre hohe Dichte nutzen, um Aufprallenergie zu absorbieren und abzuleiten und so den sicheren Betrieb der Geräte zu gewährleisten.

2.2.2.2 Einfluss auf den Schmelzpunkt

Das Schwankungsmuster des Schmelzpunkts einer Legierung ist komplex und hängt eng mit dem Verhältnis der Komponenten zusammen. Wolfram hat einen extrem hohen Schmelzpunkt und gehört zu den höchsten unter den unedlen Metallen. Dies ist auf die starke Bindungskraft zwischen den Atomen und seine komplexe Kristallstruktur zurückzuführen. Der Schmelzpunkt von Kupfer ist viel niedriger als der von Wolfram, und der Unterschied zwischen den beiden Schmelzpunkten ist erheblich. Bei einem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

niedrigen Wolframgehalt in der Legierung basiert die Mikrostruktur der Legierung auf der Kupferphase als zusammenhängende Matrix. Zu diesem Zeitpunkt wird der Schmelzpunkt der Legierung hauptsächlich durch die Eigenschaften der Kupferphase bestimmt, und der Gesamtschmelzpunkt liegt nahe am Schmelzpunkt von reinem Kupfer. Da die Legierung jedoch eine kleine Menge Wolframpartikel enthält, erhöhen diese hochschmelzenden Wolframpartikel den Schmelzpunkt der Legierung bis zu einem gewissen Grad. Obwohl dieser Verbesserungseffekt im Stadium eines niedrigen Wolframgehalts nicht sehr signifikant ist, hat er den Schmelzpunkt der Legierung im Vergleich zu reinem Kupfer bereits bis zu einem gewissen Grad erhöht. Diese Schmelzpunktcharakteristik ermöglicht den Einsatz von Wolfram-Kupfer-Legierungen mit niedrigem Wolframgehalt in bestimmten Szenarien, die keinen besonders hohen Schmelzpunkt erfordern, aber eine gewisse Temperaturbeständigkeit und andere Eigenschaften wie gute elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit erfordern. Beispielsweise kann diese Art von Legierung bei der Herstellung von Wärmeableitungskomponenten für bestimmte elektronische Geräte die strukturelle Stabilität aufrechterhalten und gute Wärmeableitungsfunktionen in einer Umgebung erfüllen, in der im normalen Betrieb des Geräts eine gewisse Wärmemenge erzeugt wird.

Mit zunehmendem Wolframgehalt der Legierung verändert sich deren innere Struktur deutlich, und die Wolframphase beginnt allmählich, eine Skelettstruktur zu bilden. Dabei wird der Einfluss der hochschmelzenden Wolframphase auf den Schmelzpunkt im Legierungssystem immer deutlicher. Da der Schmelzpunkt der Wolframphase deutlich höher ist als der der Kupferphase, schränkt die gebildete Skelettstruktur die Fluidität und atomare Diffusion der Kupferphase während des Erhitzungsprozesses bis zu einem gewissen Grad ein, sodass die Legierung insgesamt mehr Energie aufnehmen muss, um den Schmelzzustand zu erreichen, wodurch der Schmelzpunkt der Legierung stark ansteigt. In diesem Stadium steigt der Schmelzpunkt der Legierung mit zunehmendem Wolframgehalt allmählich an und zeigt einen relativ deutlichen Aufwärtstrend. Diese Eigenschaft verschafft der Legierung einen Vorteil bei der Herstellung einiger Komponenten, die in Umgebungen mit mittleren und hohen Temperaturen eingesetzt werden. Beispielsweise kann bei der Herstellung von internen Verbindungsteilen bestimmter Industrieöfen oder Schutzhüllen von Hochtemperatursensoren durch entsprechende Erhöhung des Wolframgehalts in der Wolfram-Kupfer-Legierung und Anhebung ihres Schmelzpunkts sichergestellt werden, dass die Komponenten in einer Hochtemperaturumgebung lange Zeit stabil arbeiten können, ohne zu schmelzen oder sich aufgrund von Temperaturanstiegen zu verformen, wodurch der normale Betrieb der Geräte sichergestellt wird. Wenn der Wolframgehalt in der Legierung einen hohen Wert erreicht, dominiert die kontinuierliche und stabile Wolframskelettstruktur und die Kupferphase füllt nur die winzigen Poren des Wolframskeletts. An diesem Punkt ist der Schmelzpunkt der Legierung deutlich angestiegen und nähert sich dem Schmelzpunkt von Wolfram. In diesem Fall zeigt die Legierung eine bemerkenswerte Stabilität in Umgebungen mit extrem hohen Temperaturen. Beispielsweise werden bei der Herstellung von Brennkammerkomponenten von Flugzeugtriebwerken und Wärmeschutzkomponenten für den Wiedereintritt in die Atmosphäre von Raumfahrzeugen diese Komponenten während des Betriebs einer Hochtemperaturumgebung von mehreren Tausend Grad ausgesetzt. Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframgehalt halten aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts extrem hohen Temperaturen stand. Sie verhindern effektiv das Schmelzen und Verformen von Bauteilen bei hohen Temperaturen und gewährleisten so den sicheren Betrieb von Flugzeugen oder

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Triebwerken. Gleichzeitig verleiht die Kupferphase der Legierung eine gewisse gute Wärmeleitfähigkeit, trägt zur Ableitung der durch hohe Temperaturen entstehenden Wärme bei und verbessert die Zuverlässigkeit der Legierung in Hochtemperaturumgebungen weiter.

2.2.2.3 Einfluss auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten

Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist ein wichtiger Indikator für die Dimensionsstabilität eines Materials bei Temperaturänderungen. Zwischen dem Wärmeausdehnungskoeffizienten einer Wolfram-Kupfer-Legierung und dem Anteil der Legierungsbestandteile besteht eine enge Beziehung. Kupfer hat einen relativ hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Dies bedeutet, dass sich bei Temperaturänderungen die thermische Bewegung der Kupferatome verstärkt und der Abstand zwischen den Atomen vergrößert, was zu einer deutlicheren Ausdehnung oder Kontraktion des Kupfermaterials führt. Wolfram hat einen relativ geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten, seine Atomstruktur ist relativ stabil, und die Änderung des Abstands zwischen den Atomen ist bei Temperaturänderungen relativ gering. Bei niedrigem Wolframgehalt in der Legierung dominiert die Kupferphase die Legierungsstruktur und weist einen kontinuierlichen Verteilungszustand auf. Die Wärmeausdehnungseigenschaften der Legierung werden dann hauptsächlich durch die Kupferphase bestimmt, und der Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung liegt nahe am Wärmeausdehnungskoeffizienten von reinem Kupfer. In diesem Fall kommt es bei Änderungen der Umgebungstemperatur zu einer starken Volumenänderung der Legierung. Wenn beispielsweise bei der Entwicklung mancher elektronischer Geräte eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit niedrigem Wolframgehalt als Verbindungskomponente verwendet wird, kann es bei längerem Betrieb und Erwärmung des Geräts oder bei starken Schwankungen der Umgebungstemperatur aufgrund des hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Legierung dazu kommen, dass sich die Verbindungskomponente durch Wärmeausdehnung und -kontraktion lockert, was die Stabilität der elektrischen Verbindung und die Gesamtleistung des Geräts beeinträchtigt.

Mit zunehmendem Wolframgehalt in der Legierung nimmt der Anteil der Wolframphase mit niedrigem Ausdehnungskoeffizienten in der inneren Struktur der Legierung kontinuierlich zu, wodurch ihre hemmende Wirkung auf die Gesamtwärmeausdehnung der Legierung zunehmend deutlicher wird. Dabei wird die ursprünglich von der Kupferphase dominierte, kontinuierliche Struktur allmählich aufgebrochen, und die Wolframphase beginnt, eine gewisse Skelettstruktur zu bilden. Die Kupferphase füllt die Lücken im Wolframskelett. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient der Wolframphase deutlich kleiner ist als der der Kupferphase, trägt sie zur Stabilisierung der Struktur und zur Begrenzung der Gesamtwärmeausdehnung der Legierung bei. Mit zunehmendem Wolframgehalt sinkt der Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung allmählich. Diese Eigenschaft der Änderung des Wärmeausdehnungskoeffizienten mit dem Wolframgehalt verleiht der Legierung ein breites Anwendungspotenzial in bestimmten Szenarien mit hohen Anforderungen an die Anpassung des Wärmeausdehnungskoeffizienten. Beispielsweise bestehen im Bereich der elektronischen Verpackung verschiedene elektronische Komponenten häufig aus verschiedenen Materialien, wobei die einzelnen Materialien unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen. Um sicherzustellen, dass während des Gerätebetriebs an den Verbindungsstellen zwischen verschiedenen Komponenten aufgrund

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

unterschiedlicher Wärmeausdehnung und -kontraktion aufgrund von Temperaturschwankungen keine Spannungskonzentrationen auftreten, die zu Verbindungsfehlern oder -schäden führen, ist es notwendig, Verpackungsmaterialien auszuwählen, deren Wärmeausdehnungskoeffizienten denen anderer Komponentenmaterialien entsprechen. Durch die Anpassung des Wolframgehalts in der Wolfram-Kupfer-Legierung kann deren Wärmeausdehnungskoeffizient innerhalb eines bestimmten Bereichs präzise eingestellt werden. Dadurch werden die Anforderungen an die Anpassung des Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien für elektronische Komponenten (wie Keramiksubstrate, Halbleiterchips usw.) erfüllt. So wird sichergestellt, dass elektronische Geräte bei unterschiedlichen Temperaturumgebungen stabil und zuverlässig funktionieren.

Wenn der Wolframgehalt in der Legierung einen hohen Anteil erreicht, dominiert die kontinuierliche und stabile Wolframskelettstruktur die Legierung und die Kupferphase füllt nur die winzigen Poren des Wolframskeletts aus. Zu diesem Zeitpunkt nähert sich der Wärmeausdehnungskoeffizient der Legierung dem von Wolfram an. Bei Temperaturänderungen verbessert sich die Dimensionsstabilität der Legierung erheblich und die Amplitude der Wärmeausdehnung und -kontraktion wird sehr klein. Diese Eigenschaft macht Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframgehalt in einigen hochpräzisen Bereichen, wie der Herstellung von Präzisionsinstrumenten und der Luft- und Raumfahrt, die eine extrem hohe Dimensionsstabilität erfordern, unverzichtbar. Beispielsweise sind bei der Herstellung optischer Instrumentenkomponenten für Raumfahrzeuge diese Instrumente extrem komplexen und drastisch wechselnden Temperaturumgebungen im Weltraum ausgesetzt, die von den extrem kalten Tiefen des Universums bis zu den Hochtemperaturumgebungen in Sonnennähe reichen können und der Temperaturbereich Hunderte von Grad Celsius erreichen kann. Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframgehalt und niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten können sicherstellen, dass die Strukturabmessungen optischer Instrumente bei derartigen extremen Temperaturschwankungen nahezu unverändert bleiben. Dadurch wird sichergestellt, dass die hochpräzise optische Leistung optischer Instrumente nicht beeinträchtigt wird und stabile und zuverlässige Beobachtungsdatenunterstützung für Weltraumerkundungsmissionen bereitgestellt wird.

2.2.2.4 Einfluss auf die Leitfähigkeit

Die Wolfram-Kupfer-Legierung ist eng mit dem Zusammensetzungsverhältnis verknüpft. Kupfer ist ein gut leitfähiges Metall mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, während Wolfram eine relativ geringe elektrische Leitfähigkeit aufweist. Mit steigendem Wolframgehalt in der Legierung nimmt die elektrische Leitfähigkeit allmählich ab. Dies liegt daran, dass Wolfram einen großen interatomaren Abstand und eine geringe Elektronenwolken-dichte aufweist. Bei Zugabe zur Kupfermatrix bildet es eine dispergierte Phase und eine Stapelstruktur, die den Elektronenfluss an den Korngrenzen und innerhalb der Körner behindert. Dadurch entstehen mehr Ionendefekte und Fremdatome, wodurch der freie Elektronentransport im Gitter behindert wird. Übersteigt der Wolframgehalt einen bestimmten Wert, verlangsamt sich die Leitfähigkeitsabnahme, wahrscheinlich weil die durch den höheren Wolframgehalt gebildeten elektronischen Barrieren interagieren und den Elektronenfluss einschränken. Im Gegenteil, ein höherer Kupfergehalt erhöht die Leitfähigkeit der Legierung, da Kupfer aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit Strom besser leiten kann.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.2.5 Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit

In Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit hat Kupfer eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Wolfram. Daher gilt im Allgemeinen: Je höher der Kupfergehalt in einer Wolfram-Kupfer-Legierung, desto höher ist die Wärmeleitfähigkeit. Das liegt daran, dass reine Metalle Wärme hauptsächlich über freie Elektronen leiten und Kupfer eine relativ hohe Konzentration freier Elektronen aufweist, wodurch Wärme effizienter übertragen werden kann. Ein zu hoher Kupfergehalt führt jedoch zu einer Verringerung des Wolframgehalts, wodurch andere Eigenschaften der Legierung negativ beeinflusst werden können, beispielsweise der Wärmeausdehnungskoeffizient erhöht wird. Gleichzeitig wird die Wärmeleitfähigkeit der Legierung auch von anderen Faktoren beeinflusst, beispielsweise der Dichte. Gas ist ein schlechter Wärmeträger. Wenn das Material Poren enthält, verringert sich mit zunehmender Porosität auch die Wärmeleitfähigkeit. Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hoher Dichte haben daher im Allgemeinen eine höhere Wärmeleitfähigkeit.

2.2.3 Einfluss auf chemische Eigenschaften

Wolfram-Kupfer-Legierungen weisen eine gute chemische Stabilität auf. Wolfram hat einen höheren Schmelzpunkt und eine bessere Oxidationsbeständigkeit. Mit steigendem Wolframgehalt verbessert sich die Oxidationsbeständigkeit der Legierung bis zu einem gewissen Grad. Kupfer in der Legierung oxidiert jedoch leicht bei hohen Temperaturen, sodass Faktoren wie das Wolfram-Kupfer-Verhältnis und die Einsatzumgebung berücksichtigt werden müssen. Wolfram und Kupfer selbst weisen eine gewisse Korrosionsbeständigkeit auf, und Wolfram-Kupfer-Legierungen weisen eine gute Beständigkeit gegenüber einigen gängigen Chemikalien und Umgebungen auf. In bestimmten chemischen Medien, wie beispielsweise stark oxidierenden Säuren, kann Kupfer jedoch korrodieren. Eine Erhöhung des Wolframgehalts kann die Korrosionsbeständigkeit der Legierung bis zu einem gewissen Grad verbessern. Auch der Gehalt an Verunreinigungen und der Herstellungsprozess beeinflussen die chemischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Legierungen. Beispielsweise führt ein zu hoher Sauerstoffgehalt zur Oxidation der Wolfram-Kupfer-Legierung, was ihre Festigkeit und Leitfähigkeit verringert.

2.2.3.1 Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit

Wolfram-Kupfer-Legierungen werden maßgeblich durch ihr Zusammensetzungsverhältnis beeinflusst und zeigen in unterschiedlichen korrosiven Umgebungen ein unterschiedliches Verhalten. Wolfram selbst ist chemisch stabil und kann seine Struktur in vielen gängigen korrosiven Medien vor leichter Korrosion bewahren. Bei einem relativ hohen Wolframgehalt in der Legierung kann die von der Wolframphase gebildete Skelettstruktur der Legierung eine gewisse Korrosionsbeständigkeit verleihen. Beispielsweise können Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframgehalt in einigen schwach sauren Umgebungen aufgrund der chemischen Stabilität des Wolframs die Korrosionsrate der gesamten Legierung wirksam verlangsamen. Denn um die Legierungsoberfläche zu durchdringen und ins Innere zu gelangen, muss das korrosive Medium zunächst die relativ stabile „Barriere“ der Wolframphase durchbrechen. Die starke Bindungskraft zwischen den Wolframatomten und die relativ stabile elektronische Struktur erschweren den Ionen im korrosiven Medium eine chemische Reaktion mit diesem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und verhindern so ein weiteres Eindringen der Korrosion.

Kupfer ist jedoch in bestimmten korrosiven Umgebungen relativ aktiv. In einigen stark oxidierenden Säurelösungen, wie z. B. Salpetersäure, reagiert Kupfer leicht mit Salpetersäure, wodurch entsprechende Kupfersalze entstehen und Stickoxide freigesetzt werden. Wenn der Kupfergehalt in der Legierung hoch ist, wirkt sich diese Aktivität negativ auf die Korrosionsbeständigkeit der Legierung aus. In einer solchen Umgebung wird die Kupferphase zum Hauptkorrosionsherd der Legierung, und das korrosive Medium reagiert bevorzugt mit Kupfer, was zu Korrosionsnarben, Rostflecken und anderen Erscheinungen auf der Oberfläche der Legierung führt, wodurch die Gesamtstruktur der Legierung zerstört und ihre Leistung verringert wird.

In neutralen oder schwach alkalischen wässrigen Umgebungen ist die Situation jedoch anders. Liegt der Kupfergehalt in einem bestimmten Bereich, bildet sich auf der Oberfläche der Legierung eine dünne Passivierungsschicht. Der Hauptbestandteil dieser Passivierungsschicht sind Kupferoxide oder -hydroxide. Diese Schicht weist eine gewisse Dichte auf und verhindert, dass gelöster Sauerstoff und andere korrosive Ionen in der Lösung in das Innere der Legierung gelangen. Dadurch wird die Korrosionsbeständigkeit der Legierung bis zu einem gewissen Grad verbessert. Beispielsweise kann bei der Auswahl des Auskleidungsmaterials für bestimmte industrielle Wasserleitungen die passivierende Eigenschaft des Kupfers genutzt werden, um die Integrität der Rohrauskleidung bei längerem Kontakt mit Wasser zu erhalten und Probleme wie Durchrostung zu reduzieren. Gleichzeitig kann die Wolframphase die strukturelle Festigkeit der Legierung erhöhen, sodass die Passivierungsschicht durch äußere Einflüsse wie Wasserströmungen nicht so leicht zerstört wird. Dies trägt zusätzlich zur Korrosionsbeständigkeit der Legierung bei.

2.2.3.2 Einfluss auf die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen

Die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen ist ein wichtiger Indikator zur Messung der Leistung einer Wolfram-Kupfer-Legierung in einer sauerstoffreichen Umgebung mit hohen Temperaturen und hängt eng mit dem Zusammensetzungsverhältnis zusammen. Wolfram hat einen extrem hohen Schmelzpunkt von 3410 °C und bei hohen Temperaturen kann sich auf seiner Oberfläche eine relativ stabile Oxidschicht bilden. Die Hauptbestandteile dieser Oxidschicht sind Oxide wie WO_3 , die eine gute Dichte und Stabilität aufweisen und die weitere Diffusion von Sauerstoff in die Legierung verhindern und die Legierung somit schützen können. Bei einem hohen Wolframgehalt in der Legierung bildet sich in einer sauerstoffreichen Umgebung mit hohen Temperaturen bevorzugt eine Oxidschicht aus Wolframoxid auf der Oberfläche der Legierung. Mit steigender Temperatur und im Laufe der Zeit wird diese Oxidschicht dicker und kann aufgrund ihrer stabilen Struktur weitere Reaktionen zwischen Sauerstoff und dem Inneren der Legierung wirksam verhindern, wodurch die Oxidationsbeständigkeit der Legierung bei hohen Temperaturen erheblich verbessert wird. Beispielsweise ist in den inneren Bauteilen einiger Hochtemperaturöfen eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit hohem Wolframanteil lange Zeit bei Temperaturen von 1000 °C oder mehr funktionsfähig. Der stabile Oxidfilm auf der Oberfläche der Legierung stellt sicher, dass die Bauteile lange Zeit nicht überoxidiert werden und ihre mechanischen Eigenschaften und ihre strukturelle Integrität erhalten bleiben.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kupfer hingegen hat einen relativ niedrigen Schmelzpunkt von 1080 °C und oxidiert bei hohen Temperaturen relativ schnell. Bei einem hohen Kupfergehalt in der Legierung oxidiert Kupfer in einer aeroben Umgebung mit hohen Temperaturen schneller zu Oxiden wie Cu_2O oder CuO . Verglichen mit Wolframoxiden haben diese Kupferoxide eine relativ lockere Struktur und können keine so wirksame Barrierschicht wie der Wolframoxidfilm bilden. Im weiteren Oxidationsprozess reichern sich weiterhin Kupferoxide an, wodurch nicht nur das Kupferelement in der Legierung verbraucht wird, sondern auch Risse und ein Abblättern des Oxidfilms verursacht werden können. Dadurch kann Sauerstoff leichter in den Oxidfilm eindringen und mit anderen Komponenten in der Legierung reagieren, wodurch die Oxidationsbeständigkeit der Legierung bei hohen Temperaturen verringert wird. Bei einigen elektrischen Kontaktmaterialien, die über lange Zeit stabil in einer aeroben Umgebung mit hohen Temperaturen funktionieren müssen, oxidiert der Kontakt schnell, wenn eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit zu hohem Kupfergehalt verwendet wird, da die Temperatur beim häufigen Ein- und Ausschalten der Stromversorgung steigt. Der lose Kupferoxidfilm, der sich auf der Oberfläche bildet, beeinträchtigt die Leitfähigkeit und Kontaktstabilität des Kontakts und kann in schweren Fällen sogar dazu führen, dass der Kontakt festklebt und versagt.

Innerhalb eines bestimmten Zusammensetzungsverhältnisses und Temperaturbereichs können jedoch Wechselwirkungen zwischen Wolfram- und Kupferoxiden auftreten, die komplexe Auswirkungen auf die Oxidationsbeständigkeit der Legierung bei hohen Temperaturen haben. Beispielsweise kann sich in bestimmten mittleren Temperaturbereichen (800 °C–1.200 °C) bei einem geeigneten Wolfram-Kupfer-Verhältnis in der Legierung Kupferoxid bis zu einem gewissen Grad mit Wolframoxid verbinden und eine vergleichsweise stabilere Oxidschichtstruktur bilden. Diese Oxidschicht weist eine gewisse Dichte und Flexibilität auf. Sie kann nicht nur die Barriereigenschaften von Wolframoxid nutzen, sondern mithilfe von Kupferoxid auch winzige Risse in der Oxidschicht bis zu einem gewissen Grad füllen und so die Oxidationsbeständigkeit der Legierung bei hohen Temperaturen in diesem Temperaturbereich bis zu einem gewissen Grad verbessern. Dieser Synergieeffekt stellt jedoch relativ hohe Anforderungen an das Zusammensetzungsverhältnis, und der Wolfram- und Kupfergehalt muss genau kontrolliert werden, um die beste Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen zu erzielen.

2.3 CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung Sicherheitsdatenblatt

Wolframkupferlegierungen sind Verbundwerkstoffe aus Wolfram (W) und Kupfer (Cu), die durch pulvermetallurgische Verfahren hergestellt werden. Sie bestehen üblicherweise aus 70–90 % Wolfram und 10–30 % Kupfer und werden häufig für elektrische Kontakte, Hochspannungsschalter und Elektroden zur Elektrobearbeitung verwendet. Das Produkt wird in der wissenschaftlichen Forschung und industriellen Fertigung eingesetzt. Spezifische Anwendungen können Kühlkörper, Elektroden usw. umfassen. Das Sicherheitsdatenblatt (MSDS) dient dazu, Arbeitern und Rettungskräften Hinweise zur sicheren Verwendung zu geben, einschließlich Informationen zur chemischen Zusammensetzung, zu potenziellen Gefahren und Handhabungsempfehlungen.

Gemäß dem allgemeinen Sicherheitsdatenblatt für Wolframkupferlegierungen wird Wolframkupferlegierung im Allgemeinen nicht als Gefahrstoff eingestuft (gemäß OSHA 29 CFR

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1910.1200), daher gibt es kein spezifisches Signalwort oder Gefahrenhinweis.

Wolfram -Kupfer-Legierungen enthalten Wolfram (CAS-Nr.: 7440-33-7, Gehalt 70–90 %) und Kupfer (CAS- Nr.: 7440-50-8, Gehalt 10–30 %).

Wolfram-Kupfer-Legierungen brennen unter normalen Bedingungen nicht leicht, der bei der Verarbeitung entstehende Staub kann jedoch Brände verursachen. Es wird empfohlen, Trockenpulver-, Schaum- oder Kohlendioxid-Feuerlöschmittel zu verwenden. Verwenden Sie niemals einen direkten Wasserstrahl zum Löschen von Metallpulverbränden, da Wasser die Reaktion verstärken kann. Beim Erhitzen können Metalloxiddämpfe freigesetzt werden. Feuerwehrleute sollten ein umluftunabhängiges Atemschutzgerät tragen, um das Einatmen giftiger Dämpfe zu vermeiden.

Wolfram -Kupfer-Legierung erfüllt die Anforderungen des TSCA-Inventars und stellt keine nennenswerte ökologische Gefahr dar. Verarbeitungsabfälle können jedoch leichte Auswirkungen auf die Umwelt haben. Eine chemische Sicherheitsbewertung ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Daher wird Vorsicht und die Einhaltung lokaler Vorschriften empfohlen.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung

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

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 3 Korrelation zwischen Mikrostruktur und Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Legierungen

Wolfram -Kupfer-Legierungen haben aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit ein breites Anwendungspotenzial in den Bereichen Elektrotechnik, Elektronik, Verteidigung und Industrie. Die Legierung wird pulvermetallurgisch hergestellt. Wolfram (W) dient als Matrix oder Verstärkungsphase und sorgt für einen hohen Schmelzpunkt und hohe Härte. Kupfer (Cu) trägt als Bindephase zu einer hohen elektrischen Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit bei und erfüllt die hohen Anforderungen in Umgebungen mit hohen Strömen, hohen Temperaturen und hohem Verschleiß. Die Leistungsfähigkeit von Wolfram-Kupfer-Legierungen hängt eng mit ihrer Mikrostruktur zusammen. Kornmorphologie, Phasenverteilung und Grenzflächeneigenschaften wirken sich direkt auf ihre mechanischen Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit und Haltbarkeit aus.

3.1 Einblicke in die mikrostrukturellen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Legierungen

Die Wolfram-Kupfer-Legierung ist die Grundlage ihrer Leistungsfähigkeit und spiegelt die Misch-, Press-, Sinter- und Nachbearbeitungsprozesse im Pulvermetallurgieprozess wider. Zu den mikrostrukturellen Eigenschaften zählen Kornmorphologie und -größe, Phasenverteilung und Grenzfläche, die mit Mikroskopen (wie Rasterelektronenmikroskop (REM) und Transmissionselektronenmikroskop (TEM)) analysiert werden. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) hält es während des Sinterns fest, und der niedrigere Schmelzpunkt von Kupfer (1085 °C) bildet eine flüssige Phase, die die Wolframpartikel benetzt und die Lücken füllt, wodurch eine einzigartige Verbundstruktur entsteht. Diese Struktur beeinflusst direkt die elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte und Lichtbogenerosionsbeständigkeit der Legierung. Die Kornmorphologie und -größe, die Phasenverteilung und die Grenzfläche werden im Folgenden detailliert analysiert.

3.1.1 Kornmorphologie und -größe

Wolfram -Kupfer-Legierungen bilden den Kern der mikrostrukturellen Eigenschaften, die die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Legierung bestimmen. Die Kornmorphologie besteht hauptsächlich aus Wolframpartikeln. Da Wolfram während des Sinterprozesses fest bleibt, behält seine Morphologie die Eigenschaften des Ausgangspulvers und ist üblicherweise polyedrisch oder nahezu kugelförmig. Die Kupferphase dringt als flüssige Bindephase bei hohen Temperaturen in die Lücken zwischen den Wolframpartikeln ein und bildet nach dem Abkühlen eine unregelmäßige Netzwerkstruktur bzw. Füllphase. Die Gleichmäßigkeit der Kornmorphologie wirkt sich direkt auf die Leistungskonstanz aus. Die gleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel trägt zum Spannungsabbau bei, während eine unregelmäßige Morphologie zu lokalen Schwachstellen führen kann.

Die Korngröße wird maßgeblich vom Herstellungsprozess beeinflusst. Die Partikelgröße des Wolframpulvers liegt üblicherweise im Bereich von 1–10 Mikrometern und kann durch Hochenergie-Kugelmahlen weiter auf den Nanometerbereich reduziert werden. Sintertemperatur und -zeit spielen eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wichtige Rolle für die Korngröße. Niedrigere Temperaturen erhalten kleinere Körner, während höhere Temperaturen Kornwachstum fördern können. Während des Flüssigphasensinterprozesses fördert die Fluidität der Kupfer-Flüssigphase die Umlagerung und das Wachstum der Wolframpartikel. Die Korngröße liegt üblicherweise zwischen 5–20 Mikrometern, abhängig vom Wolframgehalt und den Prozessparametern. Durch den Einsatz von nanoskaligem Wolframpulver kann die Korngröße bis in den Submikrometerbereich kontrolliert und so die Leistung deutlich verbessert werden.

Kornmorphologie und -größe haben einen erheblichen Einfluss auf die Leistung. Kleinere Körner erhöhen die Festigkeit und Härte der Legierung durch den Hall-Peage-Effekt, während feine Körner die Korngrenzendichte erhöhen, Versetzungsbewegungen blockieren und die Verformungsbeständigkeit verbessern. Beispielsweise kann durch die Reduzierung der Wolframpartikelgröße auf den Nanometerbereich die Härte um 20–30 % gesteigert werden, was die Legierung für Anwendungen mit hohem Verschleiß wie elektromechanische Elektroden geeignet macht. Die Korngröße beeinflusst auch die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit. Zu kleine Körner können den Korngrenzenwiderstand erhöhen und die Effizienz der Elektronen- und Wärmeübertragung verringern. Die Netzwerkstruktur der Kupferphase kann diesen Mangel jedoch ausgleichen. Eine gleichmäßige Kornmorphologie reduziert Spannungskonzentrationspunkte und erhöht die Ermüdungsbeständigkeit, insbesondere bei Temperaturwechselbeanspruchung oder mechanischen Stößen.

Die Optimierung des Herstellungsprozesses ist der Schlüssel zur Kontrolle von Kornmorphologie und -größe. Funkenplasmasintern (SPS) hemmt übermäßiges Kornwachstum und erhält durch schnelles Erhitzen und hohen Druck eine feine Kornstruktur. Heißisostatisches Pressen (HIP) beseitigt Porosität und verbessert die Konsistenz der Kornverteilung durch omnidirektionalen Druck. Die Zugabe von Spurenelementen (wie Nickel oder Eisen) kann die Korngrenzenenergie anpassen und die Mikrostruktur stabilisieren. Die Reduzierung der Korngröße verbessert zudem die Beständigkeit der Legierung gegen Lichtbogenerosion. Die feinen Wolframpartikel verteilen die Lichtbogenenergie und verringern das Risiko von Oberflächenschmelzen. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung ultrafeiner Nanopulver oder den Einsatz additiver Fertigungsverfahren zur präziseren Kornkontrolle. Kurz gesagt: Kornmorphologie und -größe von Wolfram-Kupfer-Legierungen bilden die Grundlage für deren Leistungsfähigkeit, insbesondere in Szenarien, in denen sowohl Festigkeit als auch Leitfähigkeit berücksichtigt werden müssen.

3.1.2 Phasenverteilung und Schnittstelle

Wolfram -Kupfer-Legierungen sind wichtige Bestandteile der mikrostrukturellen Eigenschaften, die die mechanischen und funktionellen Eigenschaften der Legierung direkt beeinflussen. Die Phasenverteilung beschreibt die räumliche Anordnung der Wolfram- und Kupferphasen in der Legierung, die Grenzfläche den Bindungsbereich zwischen beiden. Wolfram, eine hochschmelzende Phase, ist in dispergierten Partikeln verteilt, Kupfer, eine niedrighschmelzende Phase, bildet ein kontinuierliches oder halbkontinuierliches Bindungsnetzwerk. Die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung bestimmt die Leistungskonsistenz, und die Qualität der Grenzfläche beeinflusst Lastübertragung und Wärmediffusion. Die Bildung der Phasenverteilung hängt vom Sinterprozess ab. Das Flüssigphasensintern ist der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wichtigste Schritt. Kupfer schmilzt über 1085 °C, benetzt die Wolframpartikel und füllt die Lücken durch Kapillarwirkung. Bei hohem Wolframgehalt (z. B. W80/Cu20) ist die Kupferphase diskontinuierlich verteilt und umgibt isolierte Wolframpartikel. Bei hohem Kupfergehalt (z. B. W60/Cu40) bildet die Kupferphase ein kontinuierliches Netzwerk, in das die Wolframpartikel eingebettet sind. Die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung wird durch Hochenergie-Kugelmahl- und Pulvermischprozesse gesteuert. Eine zu kurze Kugelmahlzeit kann zur Wolfram-Agglomeration führen, während eine zu lange Kugelmahlzeit zu Verunreinigungen führen kann. Nach dem Sintern fixiert das Abkühlen und Erstarren der Kupferphase die Phasenverteilungsstruktur, und heißisostatisches Pressen kann die Gleichmäßigkeit weiter optimieren.

Die Qualität der Grenzfläche ist entscheidend für den Zusammenhang zwischen Phasenverteilung und Leistung. Die Grenzfläche zwischen Wolfram und Kupfer wird durch Flüssigphasensintern chemisch und mechanisch verbunden. Dabei dringt die flüssige Kupferphase in die Oberfläche der Wolframpartikel ein und verbessert die Haftung der Grenzfläche. Die metallurgische Bindung an der Grenzfläche reduziert Hohlräume und Defekte und verbessert die Lastübertragungseffizienz. Die Grenzfläche beeinflusst zudem die elektrische und thermische Leitfähigkeit. Ein durchgehendes Kupfernetzwerk ist über die Grenzfläche mit Wolfram verbunden und bildet so einen effizienten Elektronen- und Wärmeübertragungspfad. Eine verbesserte Grenzflächenfestigkeit wird durch die Zugabe von Spurenelementen wie Nickel erreicht, die die Benetzbarkeit verbessern und die Grenzflächenhaftung verstärken. Eine schwache Grenzfläche kann zu Delamination oder Rissbildung führen, insbesondere unter Lichtbogen- oder thermischer Belastung.

Phasenverteilung und Grenzfläche haben erhebliche Auswirkungen auf die Leistung. Eine gleichmäßige Phasenverteilung verbessert die Gesamteigenschaften der Legierung, die Wolframphase sorgt für Härte und Hochtemperaturbeständigkeit, und die Kupferphase gewährleistet elektrische und thermische Leitfähigkeit. Die Qualität der Grenzfläche wirkt sich direkt auf die Lichtbogenerosionsbeständigkeit aus, und eine starke Grenzfläche reduziert den konzentrierten Abtrag von Lichtbogenenergie an der Phasengrenze. Legierungen mit hohem Kupfergehalt (wie W70/Cu30) eignen sich aufgrund ihrer guten Kupferphasenkontinuität, ausgezeichneten elektrischen Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit für Wärmeableitungssubstrate; Legierungen mit hohem Wolframgehalt (wie W90/Cu10) eignen sich aufgrund ihrer dominanten Wolframphase, ihrer hohen Härte und Verschleißfestigkeit für Elektrodenanwendungen. Grenzflächendefekte wie Hohlräume oder unbenetzte Bereiche können die Leistung beeinträchtigen und müssen durch Prozessoptimierung beseitigt werden.

Verbesserungen im Herstellungsprozess sind der Schlüssel zur Optimierung der Phasenverteilung und der Grenzfläche. Vakuumsintern reduziert Oxidation und hält die Grenzfläche rein; stufenweises Erhitzen kontrolliert den Fluss der flüssigen Kupferphase und verbessert die Phasenverteilung. Der Einsatz von Nanopulvern vergrößert die Kontaktfläche der Grenzfläche und verbessert die Bindungsstärke. Optimierungsansätze umfassen die Entwicklung funktionaler Gradientenmaterialien, die schrittweise Veränderung der Wolfram- und Kupferphasenverteilung oder den Einsatz intelligenter Überwachungstechnologie zur Echtzeit-Bewertung der Grenzflächenqualität. Kurz gesagt: Die Phasenverteilung und die Grenzfläche von Wolfram-Kupfer-Legierungen tragen maßgeblich zu deren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung bei, insbesondere in Szenarien, in denen Leitfähigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und mechanische Festigkeit berücksichtigt werden müssen.

3.1.3 Porosität und Defektmanifestation

Wolfram -Kupfer-Legierungen zeichnen sich durch ihre Mikrostruktur aus, die sich direkt auf die mechanischen Eigenschaften, die Leitfähigkeit und die Haltbarkeit der Legierung auswirkt. Porosität bezeichnet die winzigen Lücken, die während des Sinterprozesses nicht vollständig von der flüssigen Kupferphase gefüllt werden. Zu den Defekten zählen Risse, unbenetzte Partikel oder Verunreinigungsagglomerationen. Diese Strukturdefekte werden üblicherweise durch mikroskopische Beobachtung oder Dichtepfung (z. B. mit der Archimedes-Methode) identifiziert. Die Porosität hängt eng mit dem Herstellungsprozess zusammen. Übermäßige Porosität kann die Dichte verringern und die Leistungskonsistenz beeinträchtigen.

Der Entstehungsmechanismus von Poren hängt hauptsächlich von den Pulvereigenschaften, der Gleichmäßigkeit der Pulvermischung und den Sinterbedingungen ab. Ungleichmäßige Partikelgröße oder Agglomeration des ursprünglichen Wolframpulvers können zu einer unzureichenden lokalen Kupfer-Flüssigphase führen und Mikroporen bilden. Unzureichender Druck oder schlechte Pulverfließfähigkeit beim Pressen können zu anfänglichen Hohlräumen führen. Sintern bei zu niedrigen Temperaturen (z. B. unter 1100 °C) oder zu kurzer Sinterzeit kann diese Hohlräume möglicherweise nicht vollständig beseitigen. Auch die Benetzbarkeit der Kupfer-Flüssigphase spielt eine wichtige Rolle. Der Benetzungswinkel zwischen Kupfer und Wolfram ist relativ hoch (ca. 30–40 °). Gelangen Verunreinigungen in die Sinteratmosphäre (z. B. in einer oxidierenden Umgebung), wird die Benetzung geschwächt und die Porosität erhöht. Typische Porengrößen liegen im Bereich von 1–10 Mikrometern. Eine ungleichmäßige Verteilung kann zur Bildung von Makroporen (> 20 Mikrometer) führen und die Leistung deutlich mindern.

Defekte können in verschiedenen Formen auftreten. Risse können durch thermische Spannungen oder Phasenwechselspannungen während des Pressens oder Abkühlens entstehen. Insbesondere bei hohem Wolframgehalt kann eine ungleichmäßige Schrumpfung der Kupferphase leicht zu Schnittstellenrissen führen. Unbenetzte Partikel sind Wolframpartikel, deren Oberfläche nicht vollständig von der flüssigen Kupferphase durchdrungen ist. Dies wird normalerweise durch eine zu niedrige Sintertemperatur oder einen zu niedrigen Kupfergehalt verursacht und tritt als isoliertes Wolframpartikel auf. Verunreinigungsagglomerationen (wie Oxide oder Carbide) können aus den Rohstoffen oder dem Verarbeitungsprozess stammen und sich an Korngrenzen oder Schnittstellen konzentrieren, was die Lastübertragung und Wärmediffusion beeinträchtigt. Die Dichte von Poren und Defekten kann durch heißisostatisches Pressen (HIP) oder Funkenplasmasintern (SPS) deutlich reduziert werden und die Dichte kann über 98 % erreichen.

Porosität und Defekte wirken sich erheblich auf die Leistung aus. Hohe Porosität verringert die Biegefestigkeit und Härte der Legierung, da die Hohlräume zu Spannungskonzentrationen werden, die leicht Brüche verursachen können, insbesondere bei Anwendungen mit hohem Verschleiß wie Elektroden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auch die elektrische und thermische Leitfähigkeit werden beeinträchtigt, da die Poren den elektrischen und thermischen Widerstand erhöhen und so die Effizienz der Strom- und Wärmeübertragung verringern. Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit wird ebenfalls reduziert, und die Poren neigen dazu, zu Lichtbogenenergiekonzentrationspunkten zu werden, was das Schmelzen der Oberfläche beschleunigt. Defekte wie Risse können sich unter Temperaturwechselbeanspruchung oder mechanischen Stößen ausbreiten und die Lebensdauer verkürzen. Zu den Optimierungsansätzen gehören die Verwendung von Nanopulvern zur Verbesserung der Partikelgleichmäßigkeit, die Optimierung der Sinterparameter (wie stufenweises Erhitzen) zur Reduzierung der Porosität oder das Füllen von Defekten durch Oberflächenbeschichtungen. Kurz gesagt: Die Kontrolle von Poren und Defekten ist der Schlüssel zur Verbesserung der Leistung von Wolfram-Kupfer-Legierungen.

3.1.4 Strukturelle Unterschiede bei verschiedenen Herstellungsverfahren

Wolfram -Kupfer-Legierungen variieren aufgrund unterschiedlicher Herstellungsverfahren erheblich. Gängige Verfahren sind die traditionelle Pulvermetallurgie, Kupferinfiltration, Spark-Plasma-Sintern (SPS) und additive Fertigung. Jede Methode hat einen individuellen Einfluss auf Kornmorphologie, Phasenverteilung, Porosität und Grenzflächenqualität. Die Prozessauswahl bestimmt direkt die Leistung der Legierung und muss entsprechend den Anwendungsanforderungen optimiert werden.

Die konventionelle Pulvermetallurgie ist ein weit verbreitetes Verfahren, das Pulvermischen, Pressen und Sintern umfasst. Wolfram- und Kupferpulver werden in einer Hochenergie-Kugelmühle gemischt, in Form gepresst und anschließend gesintert. Die Strukturmerkmale umfassen eine polyedrische Verteilung der Wolframpartikel, ein diskontinuierliches Netzwerk von Kupferphasen und eine Porosität von typischerweise 5 bis 10 %. Die Grenzflächenbindung hängt von der Benetzung der flüssigen Kupferphase ab, und die Qualität wird durch Sintertemperatur und -zeit gesteuert. Höhere Temperaturen können zu Kornwachstum führen und die Gleichmäßigkeit verringern. Geeignet für Wärmeableitungssubstrate mit hohen Anforderungen an elektrische und thermische Leitfähigkeit.

Bei der Kupferinfiltration wird die Legierung durch Sintern des Wolframskeletts und anschließende Infiltration mit flüssigem Kupfer hergestellt. Das Wolframskelett bildet bei höheren Temperaturen eine poröse Struktur, die mit Kupfer gefüllt wird. Die Strukturmerkmale sind: Die Wolframphase ist ein kontinuierliches Skelett, die Kupferphase ist gleichmäßig verteilt und die Porosität kann auf 2–5 % reduziert werden. Die Grenzflächenbindung ist stark, was die Anzahl unbenetzter Partikel reduziert. Der Prozess ist jedoch kompliziert und der Energieverbrauch hoch. Das Verfahren eignet sich für Elektrodenanwendungen, die eine hohe Dichte erfordern.

Beim Funkenplasmasintern (SPS) werden gepulster Strom und mechanischer Druck verwendet. Die Sinterzeit ist kurz (einige Minuten). Die strukturellen Merkmale sind feine Wolframpartikel, eine gleichmäßige Kupferphasenverteilung, eine Porosität von weniger als 2 % und klare Korngrenzen. Schnelles Erhitzen hemmt das Kornwachstum, und die Grenzflächenbindungskraft ist stark. Dies eignet sich für Anwendungen mit hoher Härte und Lichtbogenerosionsbeständigkeit, wie z. B. Kontakte. Nachteilig sind die hohen Gerätekosten und der eingeschränkte Anwendungsbereich.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Additive Fertigung (wie selektives Laserschmelzen SLM) bereitet Legierungen durch schichtweises Abscheiden von Pulver vor. Die strukturellen Merkmale sind eine Gradientenverteilung von Wolfram- und Kupferphasen, eine steuerbare Korngröße und eine Porosität, die von den Laserparametern abhängt und unter optimierten Bedingungen weniger als 3 % betragen kann. Die Schnittstellenqualität ist hoch und komplexe Geometrien werden unterstützt, aber thermische Spannung kann zu Mikrorissen führen. Geeignet für kundenspezifische Teile für die Luft- und Raumfahrt. Prozessunterschiede wirken sich auf die Leistung aus. Traditionelle Pulvermetallurgie ist wirtschaftlich, weist jedoch eine hohe Porosität auf und eignet sich für die Produktion im großen Maßstab. Kupferinfiltration hat eine gute Dichte, ist aber teuer. SPS bietet eine hohe Leistung, eignet sich aber für kleine Chargen. Additive Fertigung ist flexibel, erfordert aber eine Optimierung der thermischen Spannung. Optimierungsrichtungen umfassen die Kombination mehrerer Prozesse zur Verbesserung der Dichte oder den Einsatz intelligenter Überwachungstechnologie zur Anpassung der Parameter in Echtzeit. Kurz gesagt, strukturelle Unterschiede in den Herstellungsprozessen bieten vielfältige Möglichkeiten zur Leistungsoptimierung.

3.2 Die intrinsische Beziehung zwischen der Mikrostruktur und der Leistung der Wolfram-Kupfer-Legierung

Es besteht ein intrinsischer Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur einer Wolfram-Kupfer-Legierung und ihrer Leistung. Kornmorphologie, Phasenverteilung, Porosität und Defekte sowie der Herstellungsprozess bestimmen gemeinsam die elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Haltbarkeit. Die Optimierung der Mikrostruktur wird durch die Verbesserung der Grenzflächenbindung, die Reduzierung von Defekten und die Kontrolle des Phasenverhältnisses erreicht, um unterschiedlichen Anwendungsanforderungen gerecht zu werden.

Der Einfluss der Korngröße auf die Leistung spiegelt sich im Hall-Page-Effekt wider. Feine Körner erhöhen die Korngrenzendichte, erhöhen Festigkeit und Härte, können aber auch den Widerstand erhöhen und die Leitfähigkeit verringern. Die Phasenverteilung bestimmt die elektrischen und thermischen Leitungswege, das kontinuierliche Netzwerk der Kupferphase verbessert die Leistung und die Wolframphase erhöht die Hochtemperaturbeständigkeit. Porosität und Defekte reduzieren die Dichte, beeinträchtigen die Biegefestigkeit und die Lichtbogenerosionsbeständigkeit, und dichte Strukturen verbessern die Leistung deutlich. Die Qualität der Grenzfläche beeinflusst die Lastübertragung und Wärmediffusion, und eine starke Grenzfläche verbessert die Gesamtleistung.

Die Optimierung der Mikrostruktur muss mit dem Anwendungsszenario kombiniert werden. Das Wärmeableitungssubstrat erfordert eine hohe Kupferphasenkontinuität und die Elektrode eine hohe Wolframphasendichte. Zukünftige Forschungen können Nanokompositstrukturen oder funktionale Gradientendesigns untersuchen, um den intrinsischen Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und Leistung weiter aufzudecken.

3.2.1 Wirkungsmechanismus der Kornstruktur auf die Festigkeit

Der Einfluss der Kornstruktur auf die Festigkeit von Wolfram-Kupfer-Legierungen spiegelt sich

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hauptsächlich in der Barrierewirkung der Korngrenzen und der Fähigkeit zur Spannungsverteilung wider. Die Festigkeit ist die Widerstandsfähigkeit einer Legierung gegen Verformung oder Bruch und steht in direktem Zusammenhang mit der Korngröße und -morphologie. Kleinere Körner schränken die Bewegung von Versetzungen ein, ein wichtiger Verstärkungsmechanismus, indem sie die Dichte der Korngrenzen erhöhen. Korngrenzen wirken als Barrieren für Versetzungen und zwingen diese, sich aufzutürmen oder zu verwickeln. Dadurch wird mehr Energie für die weitere Bewegung verbraucht, was die Verformungsbeständigkeit der Legierung deutlich verbessert. Die gleichmäßige Verteilung der Körner optimiert diesen Effekt weiter, reduziert lokale Spannungskonzentrationspunkte und erhöht die Tragfähigkeit der Gesamtstruktur.

Auch die Kornmorphologie hat einen wichtigen Einfluss auf die Festigkeit. Regelmäßige polyedrische oder nahezu kugelförmige Körner können die einwirkende Last effektiver verteilen und eine übermäßige Spannungsansammlung in eine bestimmte Richtung vermeiden. Unregelmäßige oder flache Körner können dagegen zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung führen und das Bruchrisiko erhöhen. Während des Sinterprozesses werden die Neuordnung und das Wachstum der Körner durch Temperatur und Druck reguliert, und die Bildung feiner Körner hängt von schneller Abkühlung oder kurzzeitigen Sinterprozessen ab, die die dichte Verteilung der Korngrenzen aufrechterhalten. Die Wolframphase dient als Gerüst mit hoher Härte, und ihre Kornstruktur bietet der Legierung einen festen Halt, während die bindende Wirkung der Kupferphase die Verbindungsfestigkeit zwischen den Körnern weiter erhöht.

Dieser Wirkmechanismus ermöglicht Wolfram-Kupfer-Legierungen eine hohe Leistung in Anwendungen, die hohe Festigkeit erfordern. Beispielsweise kann die Feinkornstruktur bei mechanischen Stößen oder hohen Belastungen Verformungen effektiv widerstehen und die Lebensdauer von Komponenten verlängern. Der Effekt der Korngrenzenverstärkung hängt auch mit der Dichte der Mikrostruktur zusammen, und die Reduzierung von Poren oder Defekten verbessert die Festigkeit zusätzlich. Die Optimierung der Kornstruktur erfordert die Stabilisierung der Korngrenzen durch Kontrolle der Sinterparameter oder die Zugabe von Spurenelementen, um die mechanischen Eigenschaften der Legierung zu verbessern und so ihr Potenzial in hochzuverlässigen Szenarien zu steigern.

3.2.2 Mechanismus der Auswirkung der Kornstruktur auf die Zähigkeit

Der Einfluss der Kornstruktur auf die Zähigkeit von Wolfram-Kupfer-Legierungen spiegelt sich hauptsächlich in der Energieabsorptionsfähigkeit der Korngrenzen und der Koordination plastischer Verformung wider. Zähigkeit ist die Fähigkeit einer Legierung, Energie zu absorbieren und Bruch zu widerstehen, was eng mit der Korngröße und den Grenzflächeneigenschaften zusammenhängt. Größere Körner weisen im Allgemeinen eine höhere Plastizität auf und können Energie durch Versetzungsgleiten und Zwillingsverformung absorbieren, wodurch die Zähigkeit verbessert wird. Zu große Körner können jedoch die Festigkeit verringern und zu Leistungsungleichgewichten führen. Kleinere Körner erhöhen die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Risswachstum durch Erhöhung der Korngrenzendichte, können aber etwas Plastizität einbüßen. Daher muss ein Gleichgewicht zwischen Festigkeit und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zähigkeit gefunden werden.

Auch die Kornmorphologie hat einen signifikanten Einfluss auf die Zähigkeit. Eine regelmäßige Kornmorphologie trägt zu einer gleichmäßigen Spannungsübertragung bei und reduziert das Risiko von Rissbildung und -ausbreitung. Die Kupferphase fungiert als niedrigschmelzende Bindungsphase, und ihre Duktilität ermöglicht eine zusätzliche Energieabsorption zwischen den Körnern. Bei äußerer Belastung kann sich die Kupferphase plastisch verformen und so die spröde Wirkung der Wolframphase abmildern. Die Mikroverformung an den Korngrenzen baut zudem lokale Spannungskonzentrationen durch Versetzungsabsorption und Umverteilungsmechanismen ab. Während des Sinterprozesses fördert die Fluidität der flüssigen Kupferphase die enge Bindung zwischen den Körnern und verbessert die Zähigkeit, während die schnelle Abkühlung dazu beiträgt, die plastischen Eigenschaften der feinen Körner zu erhalten.

Dieser Wirkmechanismus verleiht der Wolfram-Kupfer-Legierung eine hervorragende Zähigkeit unter dynamischer Belastung oder Stößeinwirkung. Beispielsweise kann die koordinierte Verformungsfähigkeit der Kornstruktur bei Lichtbogeneinwirkung oder mechanischen Vibrationen Sprödbüche wirksam verhindern und die Lebensdauer von Bauteilen verlängern. Die Verbesserung der Zähigkeit hängt auch von der Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur ab. Die Reduzierung von Poren oder unbenetzten Bereichen erhöht die Effizienz der Lastübertragung.

3.2.3 Zusammenhang zwischen Phasenverteilung und Leitfähigkeit

Die Beziehung zwischen Phasenverteilung und elektrischer Leitfähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung spiegelt sich hauptsächlich in der Kontinuität der Kupferphase und der Dispersion der Wolframphase wider. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Maß für die Fähigkeit einer Legierung, elektrischen Strom zu leiten, und hängt direkt mit der Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung zusammen. Kupfer ist eine hochleitfähige Phase, und sein kontinuierliches Netzwerk ist die Grundlage der elektrischen Leitfähigkeit. Wenn die Kupferphase einen Durchgangspfad bildet, können Elektronen effizient übertragen werden, was die Leitfähigkeitseigenschaften der Legierung deutlich verbessert. Die dispergierte Verteilung der Wolframphase als Phase mit geringer Leitfähigkeitserhöhung behindert den Stromfluss nicht wesentlich, aber ein zu hoher Wolframgehalt kann den Widerstand erhöhen und die Gesamtleitfähigkeit verringern.

Die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung ist entscheidend für die elektrische Leitfähigkeit. Die Kontinuität der Kupferphase hängt von der vollständigen Benetzung und Füllung mit Kupfer während des Flüssigphasensinterprozesses ab. Wenn die Wolframpartikel agglomerieren oder die Kupferflüssigphase nicht ausreicht, können sich diskontinuierliche Bereiche bilden, die den Kontaktwiderstand erhöhen. Die gleichmäßige Dispersion der Wolframphase wird durch den Pulvermischprozess gesteuert. Die Kugelmahlzeit und die Gleichmäßigkeit des Mischens wirken sich direkt auf die Qualität der Phasenverteilung aus. Eine entsprechende Erhöhung der Sintertemperatur fördert den Fluss der Kupferflüssigphase, verbessert die Verbindung zwischen den Phasen und optimiert die elektrische Leitfähigkeit. Auch die Qualität der Grenzfläche spielt eine unterstützende Rolle. Die gute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kombination von Wolfram und Kupfer reduziert die Elektronenstreuung und sorgt für eine hohe Leitfähigkeit.

Diese Kombination macht Wolfram-Kupfer-Legierungen besonders für Anwendungen geeignet, die eine hohe Leitfähigkeit erfordern. Beispielsweise sorgt das kontinuierliche Netzwerk aus Kupferphasen in elektrischen Kontakten oder Wärmeableitungssubstraten für eine effiziente Stromübertragung und erfüllt die Anforderungen hoher Stromdichten. Die Optimierung der Phasenverteilung wirkt sich auch auf die Lichtbogenerosionsbeständigkeit aus. Die gleichmäßige Kupferphasenverteilung reduziert die Konzentrationspunkte der Lichtbogenenergie und unterstützt indirekt die Stabilität der Leitfähigkeit. Die Optimierung der Phasenverteilung erfordert eine Anpassung des Kupfergehalts oder einen mehrstufigen Sinterprozess, um die Netzwerkstruktur der Kupferphase zu verbessern, die Leitfähigkeit zu erhöhen und die Anforderungen leistungsstarker elektrischer Anwendungen zu erfüllen.

3.2.4 Zusammenhang zwischen Phasenverteilung und Wärmeleitfähigkeit

Die Phasenverteilung und Wärmeleitfähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung wird hauptsächlich durch die Konnektivität der Kupferphase und die Dispersion der Wolframphase bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit ist die Fähigkeit einer Legierung, Wärme zu übertragen, und steht in direktem Zusammenhang mit der Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung. Kupfer ist eine hochwärmeleitfähige Phase, und sein kontinuierliches Netzwerk ist die Grundlage für die Wärmeleitung. Wenn die Kupferphase einen Durchgangspfad bildet, kann die Wärme effizient übertragen werden, was die Wärmeableitungsleistung der Legierung deutlich verbessert. Da die Wolframphase eine Phase mit geringer Wärmeleitfähigkeit ist, behindert ihre verteilte Verteilung den Wärmefluss nicht wesentlich. Ein zu hoher Wolframgehalt kann jedoch die Gesamtwärmeleitfähigkeit verringern, da die Wärmeleitfähigkeit geringer ist als die von Kupfer. Die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung ist entscheidend für die Wärmeleitfähigkeit. Die Kontinuität der Kupferphase hängt vom vollständigen Fluss und Eindringen des Kupfers während des Flüssigphasensinterprozesses ab. Wenn die Wolframpartikel agglomerieren oder die flüssige Kupferphase ungleichmäßig verteilt ist, können sich Wärmewiderstandspunkte bilden, die die Wärmeübertragung behindern. Die gleichmäßige Verteilung der Wolframphase wird durch den Pulvermischprozess erreicht. Eine gute Durchmischung gewährleistet eine nahtlose Verbindung zwischen den Phasen und optimiert den Wärmeleitungsweg. Die richtige Regulierung der Sintertemperatur fördert die Benetzung und Füllung der flüssigen Kupferphase und verbessert die Wärmeübertragungseffizienz zwischen den Phasen. Auch die Qualität der Grenzfläche spielt dabei eine Rolle. Die gute Kombination aus Wolfram und Kupfer reduziert die Wärmestreuung und sorgt für eine effiziente Wärmediffusion.

Diese Beziehung ermöglicht Wolfram-Kupfer-Legierungen, sich in Anwendungen mit hoher Wärmeableitungsleistung zu bewährten Werkstoffen zu entwickeln. Beispielsweise kann in der Leistungselektronik oder bei Hochtemperaturgeräten das kontinuierliche Netzwerk aus Kupferphasen Wärme schnell ableiten und so Leistungseinbußen durch Überhitzung verhindern. Die Optimierung der Phasenverteilung wirkt sich auch auf die Lichtbogenerosionsbeständigkeit aus. Eine gleichmäßige Kupferphasenverteilung trägt zu einer gleichmäßigen Wärmeverteilung bei und reduziert lokale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturschäden durch Lichtbögen. Die Anpassung der Phasenverteilung erfordert eine Optimierung des Kupfergehalts oder einen mehrstufigen Sinterprozess, um sicherzustellen, dass die Kupferphase ein effektives Wärmeleitungsnetzwerk bildet, wodurch die Wärmeleitfähigkeit verbessert und die Anforderungen an ein leistungsstarkes Wärmemanagement erfüllt werden.

3.2.5 Einfluss von Poren und Defekten auf die Härte

Poren und Defekte wirken sich hauptsächlich auf die Härte von Wolfram-Kupfer-Legierungen aus, was sich in der Strukturdichte und Spannungsverteilung widerspiegelt. Härte ist die Widerstandsfähigkeit einer Legierung gegenüber Oberflächeneindrücken oder Verschleiß, die direkt mit der Integrität der Mikrostruktur zusammenhängt. Porosität, in Form winziger Lücken, reduziert die Gesamtdichte des Materials und schwächt seine Widerstandsfähigkeit gegen Verformungen. Defekte wie Risse oder unbenetzte Partikel werden zu Spannungskonzentrationspunkten, die leicht lokale Ausfälle verursachen und somit die Härte verringern können. Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur spielt eine Schlüsselrolle für die Härte, und das Vorhandensein von Poren und Defekten schwächt die mechanische Festigkeit der Legierung direkt.

Die Bildung von Poren ist in der Regel auf unzureichende Füllung oder Materialschumpfung während des Sinterns zurückzuführen. Wenn die flüssige Kupferphase nicht vollständig in die Lücken zwischen den Wolframpartikeln eindringt, verteilen sich die verbleibenden Hohlräume in der Legierung. Diese Poren neigen dazu, unter äußerer Belastung Spannungskonzentrationen zu verursachen, wodurch sich das Material bei niedrigeren Drücken verformt oder bricht. Defekte wie Risse können durch thermische Spannungen beim Pressen oder Abkühlen entstehen, insbesondere in Bereichen mit Phasenwechsel oder großen Temperaturgradienten. Die Ausdehnung der Risse verringert die Härte weiter. Unbenetzte Partikel existieren isoliert, da sie keine wirksame Bindung mit der Kupferphase haben, was die Tragfähigkeit der Gesamtstruktur schwächt. Diese Faktoren wirken zusammen und verringern den Oberflächenwiderstand der Legierung.

Der Einfluss von Poren und Defekten auf die Härte wirkt sich auch auf die Stabilität der mechanischen Eigenschaften aus. Höhere Porosität führt zu einer ungleichmäßigen Härteverteilung, und lokal kann es zu deutlicher Erweichung kommen. Besonders in Umgebungen mit hohem Verschleiß können Poren leicht zum Ausgangspunkt von Verschleiß werden. Das Vorhandensein von Defekten verstärkt diesen Effekt, und Risse können sich bei wiederholter Belastung ausbreiten und so das Materialversagen beschleunigen. Durch die Optimierung der Mikrostruktur kann die Härte durch die Beseitigung von Poren und die Reparatur von Defekten erhöht werden, beispielsweise durch einen verbesserten Sinterprozess oder den Einsatz von Nachbearbeitungstechnologien zur Erhöhung der Materialdichte.

3.2.6 Einfluss von Poren und Defekten auf die Korrosionsbeständigkeit

Poren und Defekte wirken sich hauptsächlich auf die Korrosionsbeständigkeit von Wolframkupferlegierungen aus, was sich in Oberflächenschutz und Mediendurchdringung widerspiegelt. Korrosionsbeständigkeit ist die Fähigkeit einer Legierung, Erosion durch Umwelteinflüsse (wie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sauerstoff, Feuchtigkeit oder Chemikalien) zu widerstehen, was direkt mit der Integrität der Mikrostruktur zusammenhängt. Poren, offene oder geschlossene Lücken, bieten korrosiven Medien einen Kanal, in das Innere einzudringen und so den Materialabbau zu beschleunigen. Defekte wie Risse oder Verunreinigungen werden zum Ausgangspunkt von Korrosion, die leicht lokale Korrosion oder Spannungsrisskorrosion verursachen und so die Korrosionsbeständigkeit verringern kann. Die Kompaktheit der Mikrostruktur spielt eine entscheidende Rolle für die Korrosionsbeständigkeit.

Poren ermöglichen das Eindringen korrosiver Medien in die Legierung, insbesondere in feuchter oder saurer Umgebung. Die in den Poren angesammelte Flüssigkeit kann dort elektrochemische Korrosion verursachen. Die Kupferphase ist als Bindephase anfällig für korrosive Medien. Poren verstärken die Oxidation oder Auflösung des Kupfers und schwächen so die Gesamtstabilität der Legierung. Defekte wie Risse bieten Korrosionsausbreitungspfade, und der hohe Spannungszustand an der Riss Spitze beschleunigt die Korrosionsreaktion, insbesondere bei hohen Temperaturen oder Lichtbogeneinwirkung, wo sich Defekte schnell zu schweren Schäden entwickeln können. Die Ansammlung von Verunreinigungen kann zudem zusätzliche elektrochemisch aktive Stellen schaffen und so die Korrosionsbeständigkeit weiter verringern.

Der Einfluss von Poren und Defekten auf die Korrosionsbeständigkeit spiegelt sich auch in der Leistung bei langfristiger Nutzung wider. Eine höhere Porosität führt zu einer verringerten Oberflächenschutzfähigkeit, insbesondere bei Kontakt mit korrosiven Gasen oder Flüssigkeiten. Die Korrosionsprodukte in den Poren können die Kanäle blockieren, können jedoch weitere Erosion nicht verhindern. Das Vorhandensein von Defekten führt dazu, dass die Korrosionsrate in lokalen Bereichen höher ist als die Gesamtrate. Insbesondere bei Spannungskorrosion oder Ermüdungskorrosion können Defekte Materialrisse verursachen. Eine Mikrostruktoptimierung verbessert die Korrosionsbeständigkeit durch die Reduzierung von Poren und Defekten, beispielsweise durch die Verringerung der Oxidation durch Vakuumsintern oder den Einsatz von Oberflächenbeschichtungen zur Isolierung korrosiver Medien. Die optimierte Legierung kann in rauen Umgebungen langfristig stabil bleiben und eignet sich für Anwendungen, die eine hohe Korrosionsbeständigkeit erfordern, wie z. B. Schiffsausrüstung oder chemische Verarbeitungskomponenten.

3.3 Entwicklung der Mikrostruktur der Wolfram-Kupfer-Legierung

Wolfram -Kupfer-Legierungen unterliegen während der Herstellung und Verwendung einer dynamischen Entwicklung. Ihr Änderungsverhalten wird von mehreren Faktoren bestimmt und beeinflusst direkt die Leistung der Legierung. Die Entwicklung der Mikrostruktur spiegelt die Anpassungsfähigkeit und Stabilität des Materials unter verschiedenen Bedingungen wider und beinhaltet die Anpassung der Kornmorphologie, der Phasenverteilung und der Defekteigenschaften. Im Folgenden wird die Entwicklung durch Änderungen der Komponentenverhältnisse, Strukturumwandlungen während der Wärmebehandlung und Rückwirkungen der Einsatzumgebung auf die Struktur detailliert erläutert. Textbeschreibungen verdeutlichen den Entwicklungsmechanismus, die Prozesseigenschaften und die Auswirkungen auf die Leistung und betonen deren Bedeutung für die Optimierung von Legierungsanwendungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3.1 Evolution durch veränderte Zusammensetzungsverhältnisse

Die Änderung des Zusammensetzungsverhältnisses ist ein wichtiger Faktor bei der Entwicklung der Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer- Legierungen. Die Anpassung des Verhältnisses von Wolfram zu Kupfer beeinflusst die Kornverteilung, die Phasengrenzfläche und die Poreneigenschaften . Bei steigendem Wolframgehalt dominieren dessen Partikel die Legierung und weisen eine dichtere Skelettstruktur auf, während sich die Kupferphase allmählich von einem kontinuierlichen Netzwerk in eine dispergierte Füllphase verwandelt. Diese Änderung führt dazu, dass die Kornmorphologie regelmäßiger wird, die Grenzflächenfläche abnimmt und die Porosität aufgrund unzureichender flüssiger Kupferphase zunimmt. Im Gegensatz dazu nimmt bei steigendem Kupfergehalt die Fließfähigkeit der flüssigen Kupferphase zu, wodurch die Wolframpartikel benetzt und die Lücken gefüllt werden, wodurch die Phasenverteilung gleichmäßiger wird, die Korngrenzen allmählich verschwimmen und die Porosität aufgrund der Füllwirkung des Kupfers abnimmt.

Die Anpassung des Zusammensetzungsverhältnisses beeinflusst auch die Entwicklung der Phasengrenzfläche. Bei einem hohen Wolframgehalt manifestiert sich die Grenzfläche hauptsächlich als direkter Kontakt zwischen Wolframpartikeln, wobei die Bindungsstärke von den Sinterbedingungen abhängt. Bei einem steigenden Kupfergehalt wird die Grenzfläche von der Kupferphase dominiert, der Benetzungseffekt verstärkt sich und die Grenzflächenbindungskraft verbessert sich, es kann jedoch zu thermischer Spannung kommen. Auch die Korngröße verändert sich mit der Änderung des Verhältnisses. Bei einem hohen Wolframgehalt bleiben die Körner größer, und bei einem hohen Kupfergehalt verfeinern sich die Körner durch die Umlagerung der flüssigen Phase. Diese Entwicklung wirkt sich direkt auf die Dichte der Mikrostruktur aus und beeinflusst somit die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Legierung.

Dieses Evolutionsgesetz ermöglicht es Wolfram-Kupfer-Legierungen, sich an unterschiedliche Anwendungsanforderungen anzupassen. Beispielsweise verbessert eine Erhöhung des Wolframanteils die Hochtemperaturbeständigkeit und die Lichtbogenerosionsbeständigkeit und macht sie für Umgebungen mit hohem Verschleiß geeignet. Eine Erhöhung des Kupferanteils verbessert die elektrische und thermische Leitfähigkeit und macht sie für Wärmeableitungssubstrate geeignet. Die Steuerung der Evolution erfordert die Optimierung des Pulvermischprozesses und der Sinterparameter, um eine koordinierte Entwicklung zwischen Zusammensetzungsverhältnis und Mikrostruktur zu gewährleisten.

3.3.2 Gefügeumwandlung bei der Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung ist ein wichtiger Schritt in der Entwicklung der Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer- Legierungen. Durch die Regulierung von Temperatur, Zeit und Atmosphäre löst sie Veränderungen wie Kornwachstum, Phasenrekombination und Defektbeseitigung aus. In der frühen Phase des Erhitzens schmilzt die Kupferphase aufgrund ihres niedrigeren Schmelzpunkts zuerst, benetzt die Wolframpartikel und füllt die Poren, wodurch die Phasenverteilung tendenziell gleichmäßiger wird. Mit steigender Temperatur beginnen sich die Körner neu anzuordnen und zu wachsen. Die Wolframpartikel können aufgrund von Wärmediffusion ihre Morphologie anpassen und die Korngrenzen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden allmählich deutlich oder verschmelzen. Eine langfristige Wärmebehandlung kann dazu führen, dass die Körner zu groß werden, thermische Spannungen an der Grenzfläche auftreten und die Poren aufgrund von Materialschrumpfung kleiner werden oder sich neu verteilen.

Wärmebehandlung bewirkt auch eine Veränderung der Phasenstruktur. Die Fließfähigkeit der flüssigen Kupferphase verbessert die Verbindung zwischen Wolframpartikeln, wodurch unbenetzte Bereiche gefüllt und die Grenzflächenbindungskraft verbessert werden. Zu hohe Temperaturen können jedoch dazu führen, dass Kupfer verflüchtigt oder oxidiert, was die Stabilität der Phasenverteilung beeinträchtigt. Defekte wie Risse oder Verunreinigungsansammlungen können während der Wärmebehandlung, insbesondere unter druckunterstützten Bedingungen, verschwinden oder wandern, und die Mikrostruktur neigt zu Dichte. Der Abkühlungsprozess behebt diese Veränderungen. Schnelles Abkühlen erhält feine Körner, langsames Abkühlen fördert Kornwachstum und Phasenstabilisierung.

Diese Strukturumwandlung ermöglicht die Anpassung der Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Legierungen. Beispielsweise verbessert eine geeignete Wärmebehandlung die Gleichmäßigkeit und Festigkeit des Materials und macht es für Kontaktanwendungen geeignet, die hohe Zuverlässigkeit erfordern. Überhitzung kann die Zähigkeit verringern, und die Parameter müssen sorgfältig kontrolliert werden. Die Optimierung der Wärmebehandlung muss mit spezifischen Prozessen wie stufenweiser Erwärmung oder Schutz vor Inertgas kombiniert werden, um eine optimale Entwicklung der Mikrostruktur zu erreichen.

3.3.3 Rückmeldungen der Nutzungsumgebung zur Struktur

Die Auswirkungen der Einsatzumgebung auf die Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer-Legierungen spiegeln sich in der Strukturanpassung und -degradation wider, die durch äußere Bedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Stromstärke und mechanische Beanspruchung verursacht wird. In einer Hochtemperaturumgebung kann die Kupferphase erweichen oder teilweise schmelzen, die Verbindung zwischen Wolframpartikeln wird durch thermische Belastung beeinträchtigt, und es können Mikrorisse oder Ablösungen an der Grenzfläche auftreten. Längerer Kontakt mit feuchten oder korrosiven Umgebungen macht die Kupferphase anfällig für Oxidation oder Erosion, und die Poren werden zum Eintrittskanal für korrosive Medien, was den Strukturabbau beschleunigt. Unter Einwirkung des Lichtbogens können sich die Oberflächenkörner durch Hochtemperaturablation verformen, und die Ausdehnung von Poren und Defekten verstärkt die Zerstörung der Mikrostruktur.

Die mechanische Belastungsumgebung hat einen erheblichen Einfluss auf die Struktur. Wiederholte Belastung kann zu Korndeformationen oder Brüchen, zur Bildung neuer Risse an der Grenzfläche und zur Porenausdehnung durch Spannungskonzentration führen. Bei Stromdurchfluss induzieren lokal hohe Temperaturen eine Phasenrekombination, die Kupferphase kann wandern oder sich verflüchtigen, und die Wolframskelettstruktur wird allmählich freigelegt. Zyklische Veränderungen in der Einsatzumgebung, wie z. B. Temperaturwechselbeanspruchung oder Lichtbogenschaltung, führen zu einer allmählichen Anpassung oder Verschlechterung der Mikrostruktur. Korngrenzen und Phasenverteilung können sich dynamisch verändern und die Langzeitleistung beeinträchtigen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Diese Rückkopplung führt dazu, dass die Wolfram-Kupfer-Legierung in unterschiedlichen Umgebungen unterschiedliche Haltbarkeitseigenschaften aufweist. Beispielsweise erhöhen strukturelle Anpassungen bei hohen Lichtbogentemperaturen die Korrosionsbeständigkeit, während in feuchten Umgebungen die Verschlechterung die Lebensdauer verkürzt. Umweltrückkopplungen bilden die Grundlage für die Optimierung des Designs, und struktureller Abbau kann durch Oberflächenbeschichtungen oder Umweltkontrolle gemildert werden.

3.4 Kontrollstrategie der Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer-Legierungen

Wolfram -Kupfer-Legierungen zielen darauf ab, Kornmorphologie, Phasenverteilung, Poreneigenschaften und Grenzflächenqualität durch verschiedene technische Maßnahmen zu optimieren, um die elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Haltbarkeit der Legierung zu verbessern. Die Kontrolle der Mikrostruktur ist der Schlüssel zu Hochleistungsanwendungen. Sie umfasst die Verfeinerung des Herstellungsprozesses, die Optimierung der Legierungszugabe und die eingehende Erforschung des Zusammenhangs zwischen Struktur und Leistung. Diese Strategien werden durch die Anpassung der Prozessparameter und die Gestaltung der Materialzusammensetzung an die vielfältigen Anforderungen von elektrischen Kontakten, Schweißelektroden und hochzuverlässigen Komponenten angepasst.

3.4.1 Kontrollmethoden basierend auf dem Herstellungsprozess

Die auf dem Herstellungsprozess basierende Kontrollmethode ist die Grundlage für die Regulierung der Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer-Legierungen. Die mikroskopischen Eigenschaften können durch Optimierung der Misch-, Press-, Sintern- und Nachbearbeitungsschritte präzise eingestellt werden. Der Pulvermischprozess ist der Ausgangspunkt der Regulierung. Die gleichmäßige Mischung von Wolfram- und Kupferpulver wird durch Hochenergie-Kugelmahlen oder mechanische Legierungstechnologie erreicht. Eine gute Pulvermischung kann die Partikelagglomeration verringern, die gleichmäßige Verteilung der Wolfram- und Kupferphasen sicherstellen und den Grundstein für die spätere Leistung legen. Die Parameteranpassung während des Pulvermischprozesses, wie Mahlzeit und Auswahl des Mediums, beeinflusst die Partikelgröße und Morphologie des Pulvers. Feine Partikel helfen, die Festigkeit zu verbessern, während größere Partikel die Zähigkeit verbessern können. Die Auswahl des geeigneten Pulverpartikelgrößenbereichs ist der Schlüssel zur Kontrolle der Korngröße und die Prozessgestaltung muss entsprechend der Zielleistung individuell angepasst werden.

Beim Pressen wird das Pulver durch Druck geformt, wodurch Korn-Anordnung und Porenverteilung vorab festgelegt werden. Die Gleichmäßigkeit des Drucks wirkt sich direkt auf die Kompaktheit des Grünkörpers aus. Zu niedriger Druck kann zu einer lockeren Struktur und erhöhter Porosität führen, während zu hoher Druck Partikelbrüche oder Spannungskonzentrationen verursachen kann. Durch die Gestaltung des Presswerkzeugs und die Optimierung der Prozessparameter können Dichte und geometrische Genauigkeit des Grünkörpers wirksam gesteuert werden, wodurch eine stabile Grundlage für das Sintern geschaffen wird. Die Mikrostruktur des Grünkörpers nach dem Pressen spiegelt vorab die Verteilungseigenschaften von Wolfram und Kupfer wider, und die Kupferphase beginnt, ihr

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Benetzungspotenzial zu zeigen, was das Flüssigphasensintern vorbereitet. Die Verfeinerung des Pressprozesses trägt dazu bei, anfängliche Defekte zu reduzieren und eine gute Grundlage für die anschließende Optimierung der Struktur zu legen.

Der Sinterprozess ist der wichtigste Schritt bei der Regulierung der Mikrostruktur. Durch eine Hochtemperaturbehandlung wird eine Phasenbindung erreicht und die Porosität verringert. Flüssigphasensintern ist ein gängiges Verfahren. Kupfer schmilzt bei hohen Temperaturen, benetzt Wolframpartikel und füllt Lücken, wodurch die Grenzflächenbindung verbessert wird. Die Kontrolle von Sinter Temperatur und -zeit ist entscheidend. Niedrigere Temperaturen helfen, feine Körner zu erhalten, während höhere Temperaturen den vollständigen Fluss der flüssigen Kupferphase fördern und unbenetzte Bereiche reduzieren. Durch die Wahl der Sinteratmosphäre, beispielsweise Vakuum oder Inertgasumgebung, kann das Eindringen oxidativer Verunreinigungen verhindert, die Reinheit von Wolfram und Kupfer erhalten und die Phasenverteilung optimiert werden. Stufenweises Erhitzen oder druckunterstützte Sinter Technologie verbessert die Mikrostruktur weiter, verringert die Porosität und erhöht die Dichte und eignet sich besonders für Anwendungen, die eine hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit erfordern. Die Optimierung des Sinterprozesses gewährleistet die Gleichmäßigkeit und Stabilität der Mikrostruktur.

Nachbehandlungsprozesse bieten ergänzende Möglichkeiten zur Feinabstimmung der Mikrostruktur. Heißisostatisches Pressen beseitigt Restporosität durch omnidirektionalen Druck, verbessert die Konsistenz der Kornverteilung und steigert die Gesamtleistung des Materials. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Beschichten können Defekte reparieren und die Korrosions- und Erosionsbeständigkeit verbessern. Der Wärmebehandlungsprozess reguliert Kornwachstum und Phasenstabilität und gleicht Festigkeit und Zähigkeit durch Anpassung von Temperatur und Abkühlgeschwindigkeit aus. Die Wahl der verschiedenen Nachbehandlungsmethoden hängt von den spezifischen Anwendungsanforderungen ab. Beispielsweise kann bei Anwendungen mit hoher Leitfähigkeit eine Oberflächenreinigung Priorität haben, während bei Anwendungen mit hoher Verschleißfestigkeit eine Härtingsbehandlung erforderlich sein kann. Die auf dem Herstellungsprozess basierende Steuerungsmethode ermöglicht die Anpassung der Mikrostruktur der Wolfram-Kupfer-Legierung an unterschiedliche Leistungsanforderungen und bietet so eine solide Grundlage für hochzuverlässige Komponenten.

3.4.2 Optimierungsmethoden für die Zugabe von Legierungselementen

Art und Gehalt der zugesetzten Elemente wirken sich direkt auf Kornmorphologie, Phasenverteilung, Grenzflächenbindung und Defekteigenschaften aus und zielen darauf ab, die elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, mechanische Festigkeit oder Korrosionsbeständigkeit zu verbessern. Häufig zugesetzte Elemente sind Nickel, Eisen oder Kobalt, die durch chemische Affinität oder physikalische Einwirkung mit Wolfram und Kupfer interagieren und so die Mikrostruktur optimieren können.

Nickel kann als häufig zugesetztes Element die Benetzbarkeit von Kupfer und Wolfram deutlich verbessern. Durch die Zugabe von Nickel wird die Fließfähigkeit der flüssigen Kupferphase während des Flüssigphasensinterns verbessert, wodurch die Grenzfläche zwischen den Wolframpartikeln dichter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wird und unbenetzte Bereiche und Poren reduziert werden. Dieser Effekt der verbesserten Benetzung verbessert die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung und damit die Dichte und Festigkeit des Materials. Nickel kann außerdem stabile Verbindungen an den Korngrenzen bilden, wodurch das Kornwachstum gehemmt, eine feine Kornstruktur erhalten und die Verformungsbeständigkeit der Legierung verbessert wird. Die Zugabe von Eisen erhöht hauptsächlich die Diffusionsrate während des Sinterns, verbessert die gegenseitige Durchdringung zwischen Wolfram und Kupfer, verbessert die Grenzflächenqualität und steigert die Lastübertragungseffizienz. Aufgrund seiner Duktilität kann Kobalt die Zähigkeit in der Mikrostruktur zusätzlich unterstützen und die Sprödigkeit der Wolframphase abpuffern. Zur Optimierung zugesetzter Elemente gehört auch die Kontrolle ihrer Verteilung und ihres Gehalts. Eine übermäßige Zugabe kann zur Agglomeration von Verunreinigungen oder Phasentrennung führen und so die Stabilität der Mikrostruktur schwächen. Daher muss durch präzise Verhältnisse und Prozessanpassungen ein Gleichgewicht erreicht werden. Die Zugabe von Zusatzelementen erfolgt üblicherweise beim Pulvermischen durch Vermischen mit Wolfram- und Kupferpulvern, um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten. Während des Sinterprozesses können die zugesetzten Elemente mit Kupfer eine niedrigschmelzende eutektische Phase bilden, die Bildung der flüssigen Phase beschleunigen und die Mikrostruktur weiter optimieren. Eine anschließende Wärme- oder Oberflächenbehandlung kann die Wirkung der zugesetzten Elemente weiter stabilisieren und ihren Beitrag zur Leistung steigern.

Diese Optimierungsmethode ermöglicht es, die Mikrostruktur von Wolframkupferlegierungen an spezifische Anwendungsanforderungen anzupassen. Beispielsweise verbessert die Zugabe von Nickel bei Elektroden, die eine hohe Festigkeit erfordern, die Grenzflächenhaftung und -dichte; bei Kontakten, die eine hohe Zähigkeit erfordern, verbessert die Zugabe von Kobalt die Schlagfestigkeit. Die Regulierung der zugesetzten Elemente trägt zudem zur Verbesserung der Korrosions- und Lichtbogenerosionsbeständigkeit bei und verlängert die Lebensdauer durch die Reduzierung von Defekten und die Optimierung der Phasenverteilung. Zukünftige Entwicklungsrichtungen umfassen die Erforschung neuer zugesetzter Elemente oder Verbundphasen, die Kombination intelligenter Designtechnologien und die dynamische Optimierung der Mikrostruktur, um die Gesamtleistung von Wolframkupferlegierungen weiter zu verbessern.

3.4.3 Zusammenhang zwischen Strukturregulierung und Leistung

Die Strukturregulierung und Leistung von Wolfram-Kupfer-Legierungen zeigt sich in der Tatsache, dass die Optimierung der Mikrostruktur direkte Auswirkungen auf ihre elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Haltbarkeit hat. Dieser Zusammenhang wird durch die Anpassung der Kornmorphologie, Phasenverteilung, Poreneigenschaften und Grenzflächenqualität erreicht, was die entscheidende Rolle der Mikrostruktur für die makroskopische Leistung widerspiegelt. Die Verfeinerung der Kornstruktur verbessert die Verformungsbeständigkeit des Materials durch Erhöhung der Korngrenzendichte und damit einhergehend eine Verbesserung von Festigkeit und Härte und kann sich in gewissem Maße auf die Zähigkeit auswirken. Die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung bestimmt die Effizienz der elektrischen und thermischen Leitungswege. Das kontinuierliche Netzwerk der Kupferphase optimiert den Elektronen- und Wärmetransport, während die Dispersion der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframphase die Hochtemperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit unterstützt.

Die Kontrolle von Poren und Defekten ist ein Schlüsselement zwischen Strukturregulierung und Leistung. Die Reduzierung von Poren verbessert die Materialdichte, steigert die Biegefestigkeit und den Oberflächenwiderstand, reduziert den Wärme- und elektrischen Widerstand und verbessert die elektrische und thermische Leitfähigkeit. Die Beseitigung von Defekten wie Rissen oder unbenetzten Partikeln reduziert Spannungskonzentrationspunkte und verbessert die Ermüdungs- und Korrosionsbeständigkeit. Die Verbesserung der Grenzflächenqualität unterstützt indirekt die mechanischen Eigenschaften und die Lichtbogenerosionsbeständigkeit, indem sie die Bindungskraft zwischen den Phasen erhöht und so die Lastübertragung und die Wärmediffusionseffizienz optimiert. Die umfassende Strukturregulierung liegt in ihrer Fähigkeit, die gegenseitigen Einschränkungen dieser Eigenschaften auszugleichen, um den Anforderungen unterschiedlicher Anwendungen gerecht zu werden.

Dieser Zusammenhang ermöglicht die Optimierung der Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Legierungen durch mikrostrukturelle Anpassungen. Beispielsweise verbessern die kontinuierliche Verteilung von Kupferphasen und die Reduzierung der Porosität die Leistung von Wärmeableitungssubstraten mit hohen Anforderungen an die Leitfähigkeit deutlich; bei Elektroden mit hohen Anforderungen an die Verschleißfestigkeit erhöhen feine Körner und dichte Wolframskelette die Haltbarkeit. Die Strategie der Strukturregulierung offenbart jedoch auch Leistungsgrenzen. Zu feine Körner können die Zähigkeit verringern, und ein zu hoher Wolframgehalt kann die Sprödigkeit erhöhen. Um ein ausgewogenes Leistungsverhältnis zu erreichen, ist eine umfassende Regulierung erforderlich.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 4 Herstellungstechnologie der Wolfram-Kupfer-Legierung

Der Herstellungsprozess von Wolfram-Kupfer-Legierungen ist der Schlüssel zur Herstellung von Hochleistungsverbundwerkstoffen. Er umfasst verschiedene technische Methoden, um eine gleichmäßige Verbindung von Wolfram und Kupfer zu erreichen. Wolfram-Kupfer-Legierungen finden aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, hohen Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit breite Anwendung in der Elektro-, Elektronik- und Industriebranche. Ziel des Herstellungsprozesses ist die Optimierung der Mikrostruktur und Leistungsfähigkeit der Legierung durch die Kontrolle von Rohstoffen, Prozessparametern und Anlagenbedingungen. Verschiedene Herstellungsverfahren wie Vakuuminfiltration, Pulvermetallurgie und Kupferinfiltration haben ihre eigenen Eigenschaften und eignen sich für spezifische Anwendungsszenarien.

4.1 Herstellung einer Wolfram-Kupfer-Legierung durch Vakuuminfiltration

Die Herstellung einer Wolfram-Kupfer-Legierung durch Vakuuminfiltration ist ein Verfahren, bei dem flüssiges Kupfer bei hohen Temperaturen in das Innere des Wolframskeletts infiltriert wird, um eine dichte und gleichmäßige Verbundstruktur zu bilden. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram und der niedrige Schmelzpunkt von Kupfer werden genutzt, um durch Sintern ein poröses Wolframskelett herzustellen. Anschließend wird das Kupfer im Vakuum geschmolzen und infiltriert. Die Vakuumumgebung ist das Kernstück des Verfahrens. Sie entfernt Sauerstoff und Verunreinigungen aus der Luft, verhindert Oxidationsreaktionen und gewährleistet eine gute Bindung zwischen dem flüssigen Kupfer und dem Wolframskelett. Der Prozess umfasst die Herstellung des Wolframskeletts, die Infiltration des Kupfers sowie das Abkühlen und Erstarren. Die Steuerung jedes einzelnen Schritts beeinflusst direkt die Mikrostruktur und die Eigenschaften der Legierung. Die Vakuuminfiltration eignet sich besonders für Bauteile, die eine hohe Leitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit erfordern, wie z. B. Kontakte von Hochspannungsschaltern und Widerstandsschweißelektroden, da sie eine hohe Dichte und gleichmäßige Phasenverteilung ermöglicht. Die Optimierung des Prozesses konzentriert sich auf die Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Penetration, die Verringerung der Porosität und die Verbesserung der Grenzflächenbindung, um den vielfältigen Anwendungsanforderungen gerecht zu werden.

4.1.1 Infiltrationsprinzip und Ausrüstungsanforderungen

Die Herstellung einer Wolfram-Kupfer-Legierung durch Vakuuminfiltration basiert auf den Permeabilitätseigenschaften von flüssigem Kupfer im Vakuum. Kupfer dringt durch hohe Temperaturen in das Innere des Wolframskeletts ein und bildet einen homogenen Verbundwerkstoff. Der Kern des Infiltrationsprozesses besteht darin, dass Kupfer aufgrund seines niedrigen Schmelzpunkts beim Erhitzen flüssig wird und durch Kapillarwirkung und Schwerkraft in die feinen Poren des porösen Wolframskeletts eindringt. Als hochschmelzendes Material bleibt Wolfram fest und bildet ein stabiles Skelett, das das Eindringen des Kupfers unterstützt. Die Vakuumumgebung eliminiert Sauerstoff und Verunreinigungen in der Luft, um Oxidationsreaktionen zu verhindern und sicherzustellen, dass die Kupferflüssigkeit die Wolframoberfläche vollständig benetzen kann. Temperatur und Vakuumgrad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

während des Infiltrationsprozesses regulieren die Fließfähigkeit und Eindringtiefe der Kupferflüssigkeit, was sich direkt auf die Mikrostruktur und die Eigenschaften der Legierung auswirkt. Der Schlüssel zum Erfolg des Prozesses liegt in der guten Grenzflächenbindung und der gleichmäßigen Eindringung zwischen der Kupferflüssigkeit und dem Wolframskelett. Die Qualität der Grenzfläche und die Porenverteilung sind wichtige Faktoren für die Leistung. Für diesen Prozess ist spezielle Ausrüstung erforderlich. Kernstück ist ein Vakuuminfiltrationsofen mit Hochtemperatur-Heizsystem und effizienter Vakuumpumpe, der ein stabiles Vakuum aufrechterhält und Oxidation sowie die Bildung von Gasrückständen verhindert. Das Heizsystem nutzt Widerstands- oder Induktionsheiztechnologie und muss gleichmäßig aufheizen und die Temperatur präzise regeln können, um sicherzustellen, dass das Kupfer vollständig schmilzt und in jeden Winkel des Wolframskeletts eindringt. Die Vakuumpumpe muss ein hohes Saugvermögen und eine geringe Leckrate aufweisen, um einen Niederdruckzustand zu erreichen und Störungen durch Verunreinigungen zu vermeiden. Die Form bzw. der Tiegel dient zur Aufnahme des Wolframskeletts und enthält flüssiges Kupfer. Das Material muss hochtemperaturbeständig sein und darf keine chemischen Reaktionen mit Wolfram und Kupfer eingehen, um Verunreinigungen oder Strukturschäden zu vermeiden. Zusatzgeräte wie Temperatursensoren und Drucküberwachungssysteme überwachen die Prozessparameter in Echtzeit und gewährleisten so die Betriebskonsistenz. Zusammen gewährleisten diese Geräte die Effizienz und Zuverlässigkeit des Vakuuminfiltrationsprozesses und stellen sicher, dass die Mikrostruktur der Legierung die erwarteten Leistungsanforderungen erfüllt.

4.1.2 Prozessschritte und Parameteroptimierung

Die Herstellung einer Wolfram-Kupfer-Legierung durch Vakuuminfiltration ist ein systematischer Prozess, der koordinierte Abläufe in mehreren Schritten umfasst, um sicherzustellen, dass die Mikrostruktur und die Eigenschaften der Legierung den gewünschten Zielen entsprechen. Der Prozess beginnt mit der Herstellung und Formgebung von Wolframpulver. Durch Pressen oder Vorsintern wird ein poröses Wolframskelett geformt. Dabei ist auf die Porosität und mechanische Festigkeit des Skeletts zu achten, um einen geeigneten Kanal für die anschließende Kupferinfiltration zu schaffen. Anschließend wird das vorbereitete Wolframskelett in einen Vakuuminfiltrationsofen gegeben, eine entsprechende Menge Kupfermaterial hinzugefügt, der Ofenkörper verschlossen und das Vakuumssystem gestartet, um Sauerstoff und Verunreinigungen aus der Luft zu entfernen und eine reine Umgebung für die Infiltration zu schaffen. Die Heizphase ist der Kern des Prozesses. Die Temperatur muss schrittweise über den Schmelzpunkt von Kupfer erhöht werden, damit das flüssige Kupfer im Vakuum schmilzt und auf natürliche Weise infiltriert. Die Isolationsphase stellt sicher, dass das flüssige Kupfer die Poren des Wolframskeletts vollständig ausfüllt, indem sie die Verarbeitungszeit verlängert und die Phasenverteilung sowie die Grenzflächenbindung optimiert. Die Kühlphase steuert die Abkühlrate, um die Mikrostruktur zu fixieren und Defekte oder Inhomogenitäten durch thermische Spannungen zu vermeiden. Der reibungslose Ablauf jedes Schritts hängt von der präzisen Kontrolle der Prozessparameter ab, um die Qualität des Endprodukts sicherzustellen.

Der Schwerpunkt der Parameteroptimierung liegt auf der Abstimmung von Temperatur, Vakuum und Zeit. Die Temperaturregelung erfolgt stufenweise. Die Niedertemperatur-Vorwärmphase reduziert den

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Thermoschock, die Hochtemperaturphase sorgt für das vollständige Schmelzen des Kupfers, und die Zwischenübergangsphase gleicht die Wärmeverteilung aus, um lokale Überhitzung zu vermeiden. Die Anpassung des Vakuums wirkt sich direkt auf die Benetzung und den Verunreinigungsgehalt der Kupferflüssigkeit aus. Ein zu niedriges Vakuum kann dazu führen, dass Restgase die Penetration beeinträchtigen. Ein zu hohes Vakuum erfordert ein Gleichgewicht zwischen Anlagenkomplexität und Prozesseffizienz und muss dynamisch an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Die Zeitoptimierung umfasst die Zuteilung der Zeit für jede Heiz-, Isolier- und Kühlphase. Zu kurze Zeit kann zu unzureichender Penetration oder Restporen führen, zu lange Zeit kann zu übermäßiger Korngröße oder Kupferverflüchtigung führen und die Leistung beeinträchtigen. Der Prozessablauf muss auch die Vorbehandlung des Wolframskeletts, wie z. B. Oberflächenreinigung oder Porenanpassung, berücksichtigen, um die Penetrationsfähigkeit des Kupfers zu verbessern. Die dynamische Anpassung der Parameter erfolgt durch Prozesssimulation und experimentelle Verifizierung, um die Dichte und Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur sicherzustellen und die Leistungsverbesserung zu unterstützen.

Die Optimierung der Prozessschritte beeinflusst die Leistung der Legierung maßgeblich. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung und eine ausreichende Eindringzeit können die elektrische und thermische Leitfähigkeit verbessern und die Legierung somit für Anwendungen als Wärmeableitungssubstrat geeignet machen. Eine stabile Vakuumumgebung und eine angemessene Abkühlrate erhöhen die mechanische Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit und machen die Legierung somit für Elektrodenkomponenten geeignet. Jeder Prozessschritt muss eng mit dem vorherigen verknüpft sein. Kontrollverlust in einem dieser Schritte kann zu vermehrten Defekten oder einer ungleichmäßigen Phasenverteilung führen. Zukünftige Entwicklungsrichtungen umfassen die Einführung intelligenter Überwachungssysteme zur dynamischen Parameteroptimierung durch Echtzeit-Verfolgung von Temperatur, Vakuumniveau und Eindringtiefe, um die Prozesseffizienz und Produktqualität zu verbessern. Diese Methode bietet eine zuverlässige Garantie für die industrielle Produktion von Wolfram-Kupfer-Legierungen.

4.1.3 Vorteile und Grenzen des Verfahrens

Die Herstellung einer Wolfram-Kupfer-Legierung durch Vakuuminfiltration bietet aufgrund ihrer einzigartigen Prozesseigenschaften erhebliche Vorteile, unterliegt aber auch gewissen Einschränkungen. Diese Eigenschaften bestimmen gemeinsam den Anwendungsbereich und die Optimierungsrichtung. Ein Vorteil ist die hohe Dichte. Das vollständige Eindringen von Kupferflüssigkeit in einer Vakuumumgebung kann die Porosität deutlich reduzieren und die Gesamtfestigkeit und Stabilität des Materials erhöhen. Diese dichte Struktur verleiht der Legierung hervorragende mechanische Eigenschaften und hohe Haltbarkeit, wodurch sie sich besonders für Anwendungen mit hohen Belastungen eignet. Ein weiterer Vorteil ist die gleichmäßige Phasenverteilung. Die gute Kombination aus Wolframskelett und Kupferphase optimiert die elektrische und thermische Leitfähigkeit, wodurch die Legierung auch in Umgebungen mit hohen Strömen und hohen Temperaturen gute Leistungen erbringt. Der Schutz der Vakuumumgebung reduziert den Eintrag oxidativer Verunreinigungen, erhält die Reinheit des Materials und schafft eine zuverlässige Grundlage für den langfristigen Einsatz. Die Steuerbarkeit des Prozesses ermöglicht zudem die Herstellung komplexer Formen oder großformatiger

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Teile, die unterschiedlichen Verarbeitungsanforderungen gerecht werden und ihre Flexibilität unter Beweis stellen.

Das Verfahren ist jedoch auch mit Einschränkungen behaftet. Die Anlagen sind komplex, die Betriebskosten hoch und der Vakuumofen sowie die zugehörigen Zusatzgeräte müssen streng gewartet werden. Dies erhöht den Produktionsaufwand und begrenzt den Einsatz in kostensensitiven Szenarien. Der Prozesszyklus ist lang und umfasst mehrstufige Vorgänge. Von der Herstellung des Wolframskeletts bis zur Kupferinfiltration vergeht viel Zeit, was die Effizienz der Massenproduktion beeinträchtigen kann. Unter bestimmten Bedingungen, insbesondere bei ungleichmäßiger Porosität des Wolframskeletts oder unzureichendem Vakuumgrad, besteht das Risiko einer Kupferverflüchtigung oder einer ungleichmäßigen Infiltration, was die Stabilität der Produktqualität beeinträchtigt. Zudem ist das Verfahren stark von der Reinheit und Vorbehandlung der Rohstoffe abhängig. Jegliche Defekte oder Inhomogenitäten der Rohstoffe können sich auf das Endprodukt übertragen und erfordern zusätzliche Qualitätskontrollen und Prozessanpassungen.

Diese Vorteile und Einschränkungen prägen die Anwendungsszenarien von Wolframkupferlegierungen, die durch Vakuuminfiltration hergestellt werden. Die Vorteile verschaffen ihr einen Vorteil in Bereichen, die hohe Leistung erfordern, wie beispielsweise bei Hochspannungsschalterkontakten, wo die hohe Dichte und Leitfähigkeit der Legierung eine zuverlässige Schaltleistung gewährleisten. Bei Widerstandsschweißelektroden unterstützen die gleichmäßige Phasenverteilung und die hohe Temperaturbeständigkeit den Langzeiteinsatz. Auch in der Luft- und Raumfahrt profitieren komplex geformte Wolframkupferteile wie Kühlkörper und elektrische Kontakte von diesem Verfahren. Einschränkungen legen nahe, dass es durch andere Methoden wie die Pulvermetallurgie ergänzt werden muss, um Kosten zu senken oder die Effizienz zu steigern.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 5 Leistungstests und Charakterisierungsmethoden für Wolfram-Kupfer-Legierungen

Wolframkupferlegierungen eignen sich gut zur Bewertung ihrer elektrischen Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, mechanischen Festigkeit und Haltbarkeit, die direkt ihre Anwendungseffekte in der Elektro-, Elektronik- und Industriebranche bestimmen. Die Prüfmethode umfasst die Messung physikalischer, mechanischer und elektrischer Eigenschaften und zeigt durch standardisierte Verfahren und fortschrittliche Charakterisierungstechniken den Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur und den makroskopischen Eigenschaften der Legierung auf.

5.1 Prüfung der physikalischen Eigenschaften einer Wolfram-Kupfer-Legierung

Bei Wolframkupferlegierungen werden die grundlegenden physikalischen Eigenschaften wie Dichte, elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit bewertet, die eng mit der Mikrostruktur und dem Herstellungsprozess zusammenhängen. Die Dichtemessung spiegelt die Kompaktheit der Legierung wider, die sich direkt auf die elektrische Leitfähigkeit und die mechanische Festigkeit auswirkt. Die elektrische Leitfähigkeitsmessung bewertet die Elektronendurchlässigkeit, die für elektrische Kontakte geeignet ist. Die Wärmeleitfähigkeitsmessung misst die Wärmeableitungseffizienz, die für Wärmeableitungsanwendungen entscheidend ist. Die Prüfung der physikalischen Eigenschaften erfolgt zerstörungsfrei oder minimal zerstörungsfrei, um die Integrität der Probe zu gewährleisten und gleichzeitig zuverlässige Daten zu liefern. Die Prüfergebnisse bilden die Grundlage für Prozessoptimierung und Leistungsverbesserung. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Dichteprüfmethode sowie die Normen und Verfahren zur Härteprüfung.

5.1.1 Dichteprüfverfahren

Mit der Dichteprüfmethode wird die Volumeneinheitsmasse einer Wolframkupferlegierung gemessen, die die Kompaktheit und Porosität ihrer Mikrostruktur widerspiegelt und ein wichtiger Indikator zur Beurteilung der Herstellungsqualität ist. Das Prüfprinzip basiert auf dem archimedischen Prinzip. Durch Messen des Gewichtsunterschieds der Probe in Luft und Flüssigkeit wird ihre wahre Dichte berechnet. Der Vorgang erfordert zunächst die Herstellung von Proben mit regelmäßigen Formen oder ohne offensichtliche Defekte. Anschließend werden sie gereinigt und getrocknet, um Oberflächenverunreinigungen zu entfernen. Anschließend wird die Probe auf eine Präzisionswaage gehängt, ihr Gewicht in der Luft wird gemessen und sie dann in eine Flüssigkeit bekannter Dichte (z. B. destilliertes Wasser) getaucht, um ihren Auftrieb in der Flüssigkeit zu messen. Der Gewichtsunterschied wird mit der Dichte der Flüssigkeit kombiniert, um das Volumen der Probe zu erhalten. Schließlich wird die Dichte berechnet, indem die Masse durch das Volumen geteilt wird.

Die Prüfmethode erfordert strenge experimentelle Bedingungen, um die Genauigkeit zu gewährleisten. Die Flüssigkeitstemperatur muss konstant gehalten werden, um den Einfluss der Wärmeausdehnung auf den Dichtewert zu vermeiden. Die Genauigkeit der Waage muss ausreichen, um kleine Gewichtsänderungen zu erkennen und Messfehler zu reduzieren. Die Probenoberfläche darf keine Blasen aufweisen, was durch Vakuumentgasung oder Oberflächenbehandlung erreicht werden kann. Während

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Prüfung werden mehrere Messungen durchgeführt und der Durchschnitt ermittelt, um zufällige Fehler auszuschließen. Die Dichteprüfung eignet sich zur Erkennung von Porosität und Gleichmäßigkeit im Herstellungsprozess. Eine geringere Dichte kann auf einen höheren Porositätsgehalt hinweisen, während eine höhere Dichte eine bessere Kompaktheit widerspiegelt. Die Prüfergebnisse liefern eine direkte Grundlage für die Optimierung des Sinterprozesses und die Reduzierung von Defekten und werden häufig in der Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung eingesetzt.

5.1.2 Härteprüfnormen und -verfahren

Härteprüfnormen und -verfahren dienen der Bewertung der Widerstandsfähigkeit von Wolframkupferlegierungen gegen Oberflächeneindrücke und Verschleiß und spiegeln ihre mechanischen Eigenschaften und Haltbarkeit wider. Das Prüfprinzip basiert auf der Belastung der Probenoberfläche mit einem standardisierten Eindringkörper. Die Tiefe bzw. Fläche des Eindringkörpers wird gemessen, wodurch indirekt die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Verformungen ermittelt wird. Gängige Prüfnormen sind Brinellhärte, Rockwellhärte und Vickershärte, die für unterschiedliche Härtebereiche und Probeneigenschaften geeignet sind. Bei der Brinellhärte wird eine hohe Belastung durch einen Stahlkugel-Eindringkörper aufgebracht, der sich für weichere oder gleichmäßigere Materialien eignet. Bei der Rockwellhärte wird ein Diamantkegel oder eine Stahlkugel verwendet, um dünne Proben oder die Oberflächenhärte schnell zu messen. Bei der Vickershärte wird ein viereckiger Diamantpyramiden-Eindringkörper verwendet, der sich für kleine Flächen oder komplexe Strukturen eignet.

Der Prüfungsvorgang erfordert zunächst die Vorbereitung einer ebenen Probenoberfläche. Unebenheiten werden durch Schleifen oder Polieren entfernt. Der Eindringkörper muss vollständig auf der Oberfläche aufliegen. Wählen Sie den passenden Prüfstandard und Eindringkörpertyp aus und bestimmen Sie Belastung und Eindringzeit entsprechend der Probengröße und dem erwarteten Härtebereich. Nach dem Aufbringen der Belastung wird der Eindringkörper entfernt und die geometrischen Eigenschaften des Eindrucks, wie Durchmesser oder Diagonale, gemessen. Für eine genaue Messung verwenden Sie ein Mikroskop oder ein spezielles Messgerät. Die Prüfung muss an mehreren Stellen wiederholt werden, um den Einfluss von Oberflächeninhomogenitäten auszuschließen. Für repräsentative Ergebnisse wird der Durchschnittswert berechnet. Achten Sie während des Prüfungsvorgangs auf Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit, um die Messgenauigkeit durch äußere Einflüsse zu vermeiden. Die Härteprüfung ist für die Leistungsbewertung von großer Bedeutung. Eine hohe Härte geht in der Regel mit feiner Körnung und dichter Struktur einher und spiegelt die Verschleißfestigkeit der Legierung wider, die sich für Elektroden- oder Schneidwerkzeuganwendungen eignet. Die Prüfergebnisse können auch verwendet werden, um Fehler im Vorbereitungsprozess, wie Poren oder unbenetzte Bereiche, zu erkennen, die zu einer lokalen Härteminderung führen können. Standardisierte Abläufe gewährleisten die Vergleichbarkeit der Testergebnisse und liefern eine wissenschaftliche Grundlage für die Materialauswahl und Prozessverbesserung.

5.1.3 Leitfähigkeitsprüfverfahren

Mit der Leitfähigkeitsprüfmethode lässt sich die Stromleitfähigkeit von Wolframkupferlegierungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beurteilen. Sie spiegelt die Konnektivität der Kupferphase in ihrer Mikrostruktur und die Effektivität des Leiterpfades wider und ist ein wichtiger Indikator zur Messung der elektrischen Eigenschaften der Legierung. Das Prüfprinzip basiert auf dem Ohmschen Gesetz. Durch Messung des Stroms der Probe bei einer bestimmten Spannung wird deren Leitfähigkeit berechnet. Der Prüfvorgang erfordert zunächst die Vorbereitung einer regelmäßig geformten Probe, deren Oberfläche poliert werden muss, um den Einfluss des Kontaktwiderstands zu verringern. Zur Messung wird die Vier-Sonden-Methode oder die Zwei-Sonden-Methode verwendet. Bei der Vier-Sonden-Methode werden vier Elektroden auf der Probenoberfläche platziert, Strom angelegt bzw. Spannung gemessen, wodurch Störungen durch den Kontaktwiderstand eliminiert werden. Bei der Zwei-Sonden-Methode werden Spannung und Strom direkt an beiden Enden gemessen, was sich für längere Proben eignet. Die Prüfausrüstung umfasst ein Präzisionsnetzteil, ein Amperemeter und ein Voltmeter, um die Messgenauigkeit zu gewährleisten.

Der Testvorgang muss bei konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt werden, um zu vermeiden, dass Umweltfaktoren die Leitfähigkeit beeinflussen. Die Probe muss festen Kontakt mit der Elektrode haben. Eine gute Verbindung kann durch Klemmen oder leitfähige Paste erreicht werden. Nach Anlegen eines stabilen Stroms werden die Spannungs- und Stromwerte aufgezeichnet, der spezifische Widerstand berechnet und basierend auf der Probengeometrie in Leitfähigkeit umgerechnet. Der Durchschnittswert verschiedener Punkte wird mehrfach gemessen, um die Repräsentativität der Ergebnisse sicherzustellen und lokale Inhomogenitäten auszuschließen. Der Leitfähigkeitstest eignet sich, um den Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Verteilung der Kupferphasen zu erkennen. Eine höhere Leitfähigkeit ist normalerweise mit einem kontinuierlichen Netzwerk von Kupferphasen verbunden und spiegelt eine gute Mikrostruktur wider.

5.1.4 Prüfverfahren für die Wärmeleitfähigkeit

Mit der Wärmeleitfähigkeitsprüfmethode lässt sich die Wärmeleitfähigkeit von Wolframkupferlegierungen beurteilen. Sie spiegelt den Einfluss der Phasenverteilung und der Grenzflächenqualität in der Mikrostruktur auf die Wärmeleitung wider und ist ein wichtiger Indikator zur Messung der Wärmeableitungsleistung. Das Prüfprinzip basiert auf dem Fourierschen Gesetz. Die Wärmeleitfähigkeit wird durch Messung der Wärmeübertragungsrate in der Probe berechnet. Für den Vorgang wird zunächst eine regelmäßig geformte Probe vorbereitet. Die Oberfläche muss flach sein, um einen guten Wärmekontakt zu gewährleisten. Zu den häufig verwendeten Methoden gehören die stationäre und die transiente Methode. Die stationäre Methode misst den Temperaturgradienten durch Anlegen eines konstanten Wärmestroms an beiden Enden der Probe; die transiente Methode erhitzt die Probenoberfläche kurzzeitig, zeichnet die Temperaturänderung über die Zeit auf und leitet daraus die Temperaturleitfähigkeit ab.

Der Testprozess muss in einer temperaturkontrollierten Umgebung durchgeführt werden. Dabei werden eine Wärmequelle und Thermoelemente oder Infrarotsensoren zur Messung der Temperaturverteilung eingesetzt. Die stationäre Methode erfordert stabile Temperaturen an beiden Enden der Probe und einen gleichmäßigen Wärmefluss. Wärmedämmmaterialien reduzieren die seitliche Wärmeableitung. Das Übergangsgesetz erfordert schnell reagierende Geräte, wie beispielsweise ein Laserblitzmessgerät, um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturänderungen zu erfassen. Die geometrischen Abmessungen und Kontaktflächen der Probe müssen mit dem Testgerät übereinstimmen, um einen freien Wärmeübertragungsweg zu gewährleisten. Um experimentelle Fehler auszuschließen, sollte der Durchschnittswert mehrerer Tests ermittelt werden. Die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit eignet sich, um den Einfluss von Herstellungsprozessen auf die Konnektivität von Kupferverbindungen zu bewerten. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit geht üblicherweise mit einer gleichmäßigen Phasenverteilung und geringer Porosität einher, was für Anwendungen mit Wärmeableitungssubstraten geeignet ist. Die Testergebnisse liefern eine wissenschaftliche Grundlage für die Optimierung des Wärmemanagements. Zukünftig kann die Messgenauigkeit durch die Kombination mit Wärmebildtechnologie verbessert werden.

5.2 Bewertung der chemischen Eigenschaften einer Wolfram-Kupfer-Legierung

der Wolframkupferlegierung ist es, ihre Korrosionsbeständigkeit und chemische Stabilität in unterschiedlichen Umgebungen zu untersuchen. Dabei wird der Einfluss der Mikrostruktur auf die Anpassungsfähigkeit an die Umgebung berücksichtigt, die für die Gewährleistung langfristiger Zuverlässigkeit entscheidend ist. Zu den Bewertungsmethoden gehören Eintauchtests, Korrosionsratenmessung und Oberflächenanalyse, die die Einsatzumgebung simulieren, um die chemische Reaktion und das Abbauverhalten der Legierung zu beobachten. Im Vorgang wird zunächst die Probe vorbereitet, die Oberfläche muss gereinigt werden, um Verunreinigungen zu entfernen, und dann wird sie in eine saure, salzige oder feuchte Umgebung gelegt, um die Einsatzbedingungen zu simulieren. Beim Eintauchtest werden Oberflächenveränderungen beobachtet, indem die Probe lange Zeit exponiert wird. Bei der Korrosionsratenmessung wird die Reaktionsrate anhand von Gewichtsverlust oder Dickenreduzierung berechnet. Oberflächenanalysen wie Rasterelektronenmikroskopie oder Röntgen-Photoelektronenspektroskopie werden verwendet, um Zusammensetzung und Verteilung der Korrosionsprodukte zu ermitteln.

Der Bewertungsprozess muss Umgebungsparameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Medienkonzentration kontrollieren, um externe Störungen zu vermeiden. Nehmen Sie regelmäßig Proben, reinigen und trocknen Sie diese, beobachten Sie Gewicht oder Oberfläche und dokumentieren Sie die Entwicklung. Bilden Sie den Mittelwert mehrerer Tests, um zufällige Einflüsse auszuschließen. Die chemische Leistungsbewertung eignet sich zur Erkennung der Korrosionsempfindlichkeit von Kupfer. Porosität und Defekte können das Eindringen des Mediums beschleunigen und die Stabilität verringern. Die Bewertungsergebnisse bilden die Grundlage für die Optimierung der Oberflächenbehandlung und die Auswahl korrosionsbeständiger Beschichtungen, die häufig in Schiffsausrüstungen und chemischen Prozesskomponenten eingesetzt werden.

5.2.1 Prüfumgebung und -methoden für Korrosionsbeständigkeit

Die Testumgebung und -methode für die Korrosionsbeständigkeit werden verwendet, um die Korrosionsbeständigkeit von Wolframkupferlegierungen in verschiedenen Medien zu bewerten. Sie spiegeln die Anpassungsfähigkeit ihrer Mikrostruktur und Zusammensetzung an die chemische Umgebung wider und sind der Schlüssel zur Sicherstellung der Langzeitstabilität. Die Testumgebung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

muss tatsächliche Einsatzbedingungen wie feuchte, saure oder salzhaltige Umgebungen simulieren, um mögliche Korrosionsszenarien zu reproduzieren. Der Vorgang umfasst zunächst die Vorbereitung einer flachen Probe, die Reinigung der Oberfläche von Verunreinigungen und die Sicherstellung, dass die Testergebnisse nicht durch Kontamination beeinflusst werden. Häufig verwendete Testumgebungen sind Salzsprühkammern, Tauchbecken für Säurelösungen oder Feuchtwärmekammern. Salzsprühkammern simulieren Meeres- oder Industrieumgebungen, saure Lösungen wie Schwefelsäure oder Salzsäure simulieren chemische Verarbeitungsbedingungen und Feuchtwärmekammern simulieren die kombinierten Auswirkungen von hoher Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Die Proben werden diesen Umgebungen für eine bestimmte Zeit ausgesetzt und Oberflächenveränderungen werden regelmäßig beobachtet.

Zu den Prüfmethoden gehören die Gewichtsverlustmethode und die elektrochemische Methode. Die Gewichtsverlustmethode berechnet die Korrosionsrate anhand der Gewichtsänderung der Probe vor und nach dem Eintauchen und erfordert genaues Wiegen und Aufzeichnen der Zeit. Die elektrochemische Methode misst Korrosionspotenzial und Stromdichte mithilfe eines Potentiometers, um das dynamische Verhalten des Korrosionsprozesses zu bewerten. Umgebungsparameter wie Temperatur, Medienkonzentration und Einwirkzeit müssen während der Prüfung kontrolliert werden, um Störungen durch externe Faktoren zu vermeiden. Um zufällige Fehler auszuschließen, wird der Durchschnittswert aus mehreren Prüfungen ermittelt, und die Korrosionsmorphologie wird unter dem Mikroskop beobachtet. Der Korrosionsbeständigkeitstest eignet sich, um die relative Korrosionsempfindlichkeit von Kupfer zu ermitteln. Porosität und Defekte können das Eindringen des Mediums beschleunigen und die Stabilität beeinträchtigen. Die Prüfergebnisse bilden die Grundlage für die Optimierung des Oberflächenschutzes und die Auswahl korrosionsbeständiger Anwendungen. Zukünftig kann eine Umgebung mit multifaktorieller Kopplung entwickelt werden, um die praktische Aussagekraft des Tests zu erhöhen.

5.2.2 Testmethode für die antioxidative Leistung

Mit dem Oxidationsbeständigkeitstest lässt sich die Oxidationsbeständigkeit einer Wolframkupferlegierung bei hohen Temperaturen oder in sauerstoffhaltigen Umgebungen beurteilen. Er gibt Aufschluss über die Oxidationsbeständigkeit der Mikrostruktur und ist ein wichtiger Indikator für Anwendungen mit hoher Zuverlässigkeit. Das Testprinzip basiert darauf, die Probe einer oxidierenden Atmosphäre auszusetzen, um die Bildung einer Oxidschicht auf der Oberfläche und den Grad der Materialzersetzung zu beobachten. Im Vorgang wird die Probe zunächst vorbereitet, die Oberfläche poliert, um das Oxid zu entfernen, und sichergestellt, dass der Ausgangszustand gleich bleibt. Gängige Methoden sind der Hochtemperatur-Oxidationstest und der zyklische Oxidationstest. Beim Hochtemperatur-Oxidationstest wird die Probe in einen Hochtemperaturofen gegeben, mit Luft oder Sauerstoff durchströmt und kontinuierlich erhitzt, um das Oxidationsverhalten zu beobachten; beim zyklischen Oxidationstest werden thermische Zyklusbedingungen simuliert, abwechselnd erhitzt und abgekühlt, und die Stabilität der Oxidationsbeständigkeit bewertet. Die Testausrüstung muss über eine präzise Temperaturregelung und Gaszufuhr verfügen. Während des Tests müssen Heizzeit, Temperatur und Dicke der Oxidschicht aufgezeichnet, regelmäßig Proben entnommen, gereinigt und gewogen sowie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Massenzunahme bzw. Oberflächenveränderung berechnet werden. Mittels Mikroskop- oder Röntgenbeugungsanalyse können Zusammensetzung und Verteilung der Oxidationsprodukte ermittelt werden. Die Testumgebung muss eine stabile Sauerstoffkonzentration aufweisen, um Störungen durch andere Gase zu vermeiden. Um Versuchsfehler auszuschließen, ist der Mittelwert mehrerer Tests zu ermitteln. Der Test der antioxidativen Leistung eignet sich zur Ermittlung der Oxidationsneigung der Kupferphase bei hohen Temperaturen. Die Stabilität der Wolframphase spielt eine schützende Rolle, und Poren können die Oxidation verstärken. Die Testergebnisse liefern Hinweise zur Optimierung von Hochtemperaturprozessen und zur Auswahl antioxidativer Beschichtungen. Zukünftig kann Echtzeit-Überwachungstechnologie kombiniert werden, um die Testgenauigkeit und den Anwendungswert zu verbessern.

5.3 Charakterisierungstechnologie der Mikrostruktur von Wolframkupferlegierungen

Zu den Charakterisierungstechniken gehören optische Mikroskope, Rasterelektronenmikroskope und Transmissionselektronenmikroskope. Optische Mikroskope dienen der Beobachtung makroskopischer Oberflächenmerkmale, Rasterelektronenmikroskope ermöglichen hochauflösende Morphologie- und Zusammensetzungsanalysen und Transmissionselektronenmikroskope ermöglichen die detaillierte Untersuchung von Korngrenzen und Phasengrenzflächen. Der Prozess beginnt mit der Vorbereitung der Probe, die geschnitten, geschliffen und poliert werden muss. Einige Technologien erfordern ein Ausdünnen oder Ätzen zur Kontrastverbesserung.

Der Prüfprozess erfordert die Auswahl geeigneter Bedingungen entsprechend der Technologie. Die optische Mikroskopie erfordert eine geeignete Färbung, die Rasterelektronenmikroskopie eine Vakuumumgebung und die Anpassung des Elektronenstrahls, und die Transmissionselektronenmikroskopie eine hochpräzise Probenvorbereitung. Die Analyseergebnisse quantifizieren Korngröße und Porenverteilung mithilfe einer Bildverarbeitungssoftware und bestimmen die Phasenzusammensetzung in Kombination mit einer Energiespektrumanalyse. Die Charakterisierungstechnologie eignet sich, um den Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Mikrostruktur zu erfassen. Kornverfeinerung und gleichmäßige Phasenverteilung verbessern die Leistung. Die Ergebnisse bilden eine wissenschaftliche Grundlage für Prozessoptimierung und Fehlerkontrolle und können zukünftig mit dreidimensionaler Bildgebungstechnologie kombiniert werden, um die Mikrostruktur vollständig zu charakterisieren.

5.3.1 Metallografische Mikroskop-Beobachtungsmethode

Die metallografische Mikroskopie dient der Untersuchung mikrostruktureller Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Legierungen wie Kornmorphologie, Phasenverteilung und Porosität und zeigt den Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Mikrostruktur auf. Das Prüfprinzip basiert auf der Reflexion oder Transmission von sichtbarem Licht durch die Probenoberfläche zur Vergrößerung und Beobachtung mikroskopischer Details. Die Probe wird zunächst vorbereitet. Dazu werden die Proben geschnitten, geschliffen und poliert, um eine ebene Oberfläche zu erhalten. Anschließend erfolgt chemisches Ätzen oder elektrolytisches Polieren, um den Kontrast zwischen Wolfram- und Kupferphasen zu verstärken und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korn- und Phasengrenzen besser sichtbar zu machen. Die Probe wird auf dem Objektisch fixiert und Fokus und Lichtquelle des Mikroskops so eingestellt, dass die Mikrostruktur bei unterschiedlichen Vergrößerungen beobachtet werden kann. Während der Prüfung muss eine geeignete Beleuchtungsart wie Hellfeld oder Dunkelfeld gewählt werden, um bestimmte Merkmale besser sichtbar zu machen. Der Bediener zeichnet das Bild durch ein Okular oder ein digitales Bildgebungssystem auf, um Korngröße, gleichmäßige Phasenverteilung und Defekte zu analysieren. Verschiedene Bereiche werden mehrmals beobachtet, um Repräsentativität zu gewährleisten und lokale Inhomogenitäten auszuschließen. Die metallografische Mikroskopbeobachtung eignet sich zur vorläufigen Beurteilung der Wirkung des Herstellungsprozesses. Eine Kornverfeinerung oder Optimierung der Phasenverteilung ist in der Regel mit einer Leistungsverbesserung verbunden.

5.3.2 Anwendung der Rasterelektronenmikroskop-Analyse

Rasterelektronenmikroskopie dient der hochauflösenden Charakterisierung der Mikrostruktur und Zusammensetzungsverteilung von Wolfram-Kupfer-Legierungen und deckt so feine Merkmale der Kornmorphologie, Phasengrenzflächen und Defekte auf. Das Prüfprinzip basiert auf der Bestrahlung der Probenoberfläche durch einen Elektronenstrahl, der Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen erzeugt und so Informationen über Morphologie und Zusammensetzung liefert. Die Probe wird zunächst vorbereitet: Sie wird geschnitten, geschliffen, poliert und einer leitfähigen Behandlung, wie z. B. einer Goldbeschichtung oder Kohlenstoffbeschichtung, unterzogen, um Aufladungseffekte zu vermeiden. Die Probe wird in eine Vakuumkammer gelegt, und die Elektronenstrahlparameter, wie Beschleunigungsspannung und Arbeitsabstand, werden so angepasst, dass die Probenoberfläche abgetastet wird. Während der Prüfung liefert das Sekundärelektronenbild Details der Oberflächenmorphologie, das Rückstreuielektronenbild verdeutlicht den Kontrast verschiedener Phasen, und die energiedispersive Spektralanalyse (EDS) bestimmt die Elementverteilung. Der Bediener kann Vergrößerung und Detektormodus anpassen, um Korngrenzen, Poren und Phasenverteilung zu beobachten. Verschiedene Bereiche werden mehrfach abgetastet, um die Vollständigkeit zu gewährleisten, und die Daten werden mithilfe kombinierter Software verarbeitet. Mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie können mikroskopische Veränderungen, die durch den Herstellungsprozess verursacht werden, wie beispielsweise reduzierte Poren oder verbesserte Schnittstellen, erkannt werden. Die entsprechenden Ergebnisse dienen als Orientierung für die Leistungsoptimierung.

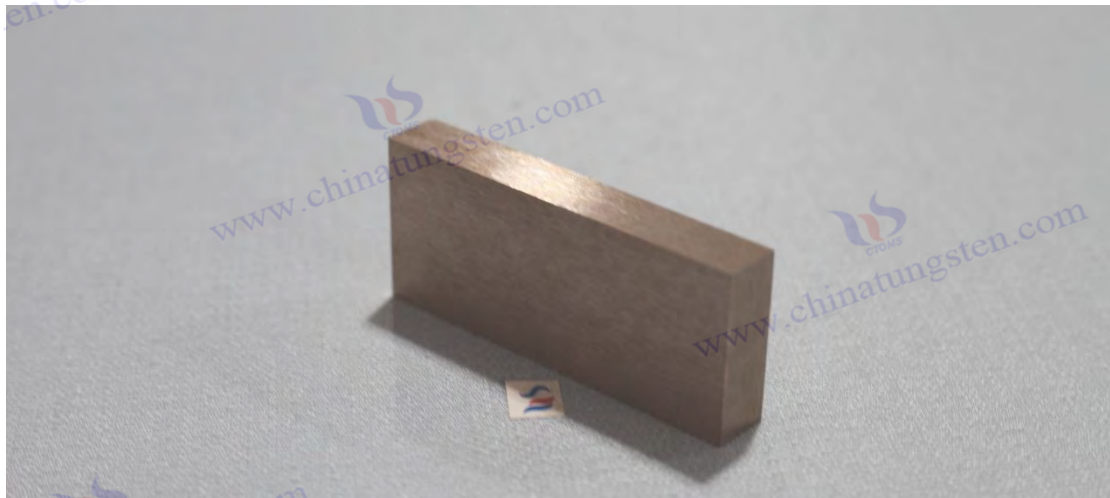
5.3.3 Röntgenstrukturanalyse

Die Röntgenstrukturanalyse dient der Bestimmung der Kristallstruktur, Phasenzusammensetzung und Gitterparameter von Wolframkupferlegierungen sowie der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Mikrostruktur und Leistung. Das Prüfprinzip basiert auf der Bragg-Beugung von Röntgenstrahlen an der Kristallebene der Probe. Dabei entstehen charakteristische Spektrallinien, die die atomare Anordnung im Material widerspiegeln. Vorgehensweise: Pulver- oder Flachproben vorbereiten und auf die gewünschte Korngröße mahlen oder die Oberfläche polieren, um Struktureffekte zu vermeiden. Die Probe in das Röntgendiffraktometer legen, die Röntgenquelle und den Detektorwinkel einstellen und einen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bestimmten 2θ -Winkelbereich abtasten.

Während des Tests werden Position und Intensität der Beugungsspitzen aufgezeichnet, die Kristallphaseneigenschaften von Wolfram und Kupfer analysiert und mögliche Verunreinigungen oder Oxide erkannt. Mithilfe der Software kann der Bediener die Spitzenform anpassen und Korngröße und -spannung bestimmen. Mehrere Messungen werden gemittelt, um Gerätefehler auszuschließen. Die Röntgenbeugungsanalyse eignet sich zur Bewertung des Einflusses des Sinterprozesses auf die Kristallphase. Die Schärfe der Spitze spiegelt die Korngröße wider, und der Spitzenversatz zeigt den Spannungszustand an. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Optimierung der Mikrostruktur und die Leistungsvorhersage. Zukünftig kann die Synchrotronstrahlungstechnologie zur Verbesserung der Genauigkeit kombiniert werden.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung

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 6 Vielfältige Anwendungsgebiete von Wolfram-Kupfer-Legierungen

Wolframkupferlegierungen profitieren von ihren einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften und finden Anwendung in zahlreichen Branchen wie der Elektro-, Luftfahrt-, Elektronik- und industriellen Fertigung. Ihre hervorragende elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit machen sie zur idealen Wahl für Hochleistungskomponenten. Die Anwendungsbereiche erweitern sich ständig und umfassen Niederspannungsschalter, Hochspannungsschalter, Kühlkörper und EDM-Elektroden. Wolframkupferlegierungen erfüllen durch unterschiedliche Herstellungsverfahren und Strukturdesigns vielfältige Leistungsanforderungen.

6.1 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen im elektrischen Bereich

Wolfram-Kupfer-Legierungen werden häufig in der Elektrotechnik eingesetzt, insbesondere in Bereichen, in denen hohe Leitfähigkeit und Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion erforderlich sind. Zu den Anwendungen in der Elektrotechnik zählen Niederspannungsschalter, Hochspannungsschalter und elektrische Kontakte. Wolfram-Kupfer-Legierungen erfüllen aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts (Wolfram) und ihrer hohen Leitfähigkeit (Kupfer) die Anforderungen an hohe Ströme, hohe Spannungen und häufiges Schalten. Die Mikrostruktur der Legierung wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration optimiert, wobei Phasenverteilung und -dichte ihre Leistung direkt beeinflussen. In Niederspannungsschaltern ist die Wolfram-Kupfer-Legierung eine Schlüsselkomponente, die die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der Geräte deutlich verbessert.

6.1.1 Anwendung in Niederspannungs-Leistungsschaltern

Wolframkupferlegierungen in Niederspannungsschaltern sind eine wichtige Anwendung in der Elektrotechnik, insbesondere in Kontaktkomponenten. Niederspannungsschalter dienen zum Ein- und Ausschalten von Stromkreisen. Häufige Schaltvorgänge und Lichtbogenbildung stellen hohe Anforderungen an die Materialien. Wolframkupferlegierungen erfüllen diese Anforderungen dank ihrer hohen Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und Leitfähigkeit und finden breite Anwendung in Haushaltsgeräten, industriellen Steuerungen und Stromverteilungssystemen. Sie bieten vielfältige Anwendungsformen, darunter bewegliche und statische Kontakte sowie Elektrodenkomponenten. Prozessoptimierungen gewährleisten die Leistungsstabilität. In diesem Abschnitt werden die Leistungsanforderungen an Kernkomponenten, Anwendungsformen und die Auswirkungen einer verbesserten Lebensdauer detailliert erläutert.

6.1.1.1 Leistungsanforderungen an Werkstoffe von Kernkomponenten von Niederspannungs-Leistungsschaltern

Die Leistungsanforderungen an die Werkstoffe der Kernkomponenten von Niederspannungsschaltern, wie Kontakte und Elektroden, umfassen verschiedene Aspekte, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Geräte zu gewährleisten. Erstens muss das Material eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aufweisen, um Strom effizient zu übertragen und Energieverluste sowie Wärmeentwicklung zu reduzieren. Eine gute Wärmeleitfähigkeit ist eine weitere wichtige Voraussetzung, um die durch Lichtbögen oder hohe Ströme entstehende Wärme schnell abzuleiten und so lokale Überhitzung zu verhindern. Zweitens muss das Material eine hohe Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion aufweisen, um der durch Lichtbögen beim Schalten verursachten Oberflächenablation zu widerstehen und so die Stabilität im Langzeiteinsatz zu gewährleisten. Darüber hinaus ist eine hohe Temperaturbeständigkeit entscheidend, und die Kernkomponenten müssen extremen Temperaturen standhalten, ohne sich beim Abschalten hoher Ströme zu verformen oder zu schmelzen. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit sind ebenfalls erforderlich, um häufige mechanische Schaltvorgänge zu ermöglichen und Verschleiß oder Bruch zu verhindern. Korrosionsbeständigkeit trägt zur Aufrechterhaltung der Leistung in feuchten oder industriellen Umgebungen bei. Schließlich muss das Material eine ausreichende Härte aufweisen, um dem Kontaktdruck standzuhalten und gleichzeitig ausreichend zäh zu sein, um Sprödbruch zu vermeiden. Diese Anforderungen bestimmen gemeinsam die Materialauswahl für Niederspannungsschalterkomponenten, und Wolframkupferlegierungen sind aufgrund ihrer umfassenden Leistung die erste Wahl.

6.1.1.2 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen in Kontaktkomponenten

Wolframkupferlegierungen in Kontaktbaugruppen von Niederspannungsschaltern variieren je nach Designanforderungen und Einsatzbedingungen. Eine gängige Form ist die Verwendung von Wolframkupferlegierungen als Kontaktmaterial, das direkt für die beweglichen und statischen Kontakte des Schalters verwendet wird und dank seiner hohen Leitfähigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit häufigen Ein- und Ausschaltvorgängen standhält. Die Legierung wird üblicherweise mit einem höheren Wolframanteil hergestellt (z. B. WCu 70/30 oder WCu 80/20). Wolfram bietet hohe Temperaturbeständigkeit und Verschleißschutz, während Kupfer die Kontinuität des Leiterbahnverlaufs gewährleistet. Eine weitere Form ist eine Verbundstruktur, bei der Wolframkupferlegierungen als Kontaktoberflächenschicht mit anderen Substraten wie Kupfer oder Stahl kombiniert und durch Schweißen oder Einpressen integriert werden, um ein optimales Preis-Leistungs-Verhältnis zu erzielen.

Wolframkupferlegierungen können durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren in spezielle Formen gebracht werden, beispielsweise als runde oder rechteckige Kontakte, um sich an das Design verschiedener Schalter anzupassen. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Beschichten können die Korrosionsbeständigkeit und Lichtbogentoleranz zusätzlich verbessern. In anspruchsvollen Anwendungsfällen werden Wolframkupferlegierungen zu Mehrschichtstrukturen verarbeitet, mit einer inneren Schicht mit hohem Wolframanteil zur Erhöhung der Haltbarkeit und einer äußeren Schicht mit hohem Kupferanteil zur Verbesserung der Leitfähigkeit. Die Kontaktbaugruppe wird üblicherweise verschraubt oder eingebettet, um einen stabilen Kontakt mit dem Schalterkörper zu gewährleisten.

6.1.1.3 Einfluss der Anwendung auf die Lebensdauer von Niederspannungs-Leistungsschaltern

Wolfram -Kupfer-Legierungen in Kontaktkomponenten von Niederspannungsschaltern verbessern dank ihrer hervorragenden Leistung die Lebensdauer der Geräte deutlich. Die hohe Beständigkeit der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Legierung gegen Lichtbogenerosion reduziert Ablation und Materialverlust an der Kontaktoberfläche und verlängert so die Ein- und Ausschaltzyklen des Schalters. Die hohe Temperaturbeständigkeit gewährleistet die Stabilität der Kontakte beim Trennen bei hohen Strömen und reduziert mechanische Ausfälle oder Leistungseinbußen durch Überhitzung. Die gute elektrische und thermische Leitfähigkeit mindert den thermischen Widerstandseffekt, verlangsamt die Alterung der Kontakte und erhöht die Zuverlässigkeit im Langzeitbetrieb. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit unterstützen häufige Schaltvorgänge, reduzieren das Risiko von Kontaktverschleiß oder -bruch und verlängern so die Lebensdauer zusätzlich. Darüber hinaus verbessern die gleichmäßige Phasenverteilung und die geringe Porosität der Wolfram-Kupfer-Legierung die strukturelle Integrität des Kontakts und reduzieren frühzeitige Ausfälle durch mikroskopische Defekte. Die Korrosionsbeständigkeit spielt insbesondere in feuchten oder industriellen Umgebungen eine schützende Rolle und reduziert die negativen Auswirkungen von Oberflächenoxidation oder -erosion auf die Lebensdauer. Nach der Anwendung verlängern sich die Wartungsintervalle von Niederspannungsschaltern, die Ausfallrate sinkt und die Gesamtbetriebseffizienz verbessert sich. In der Praxis verlängert sich der Austauschzyklus von Kontaktkomponenten erheblich, insbesondere in hochfrequenten Anwendungsszenarien wie industriellen Steuerungssystemen oder Haushaltsgeräten. Der Einsatz von Wolfram-Kupfer-Legierungen verlängert die Lebensdauer von Geräten und steigert den wirtschaftlichen Nutzen. Zukünftig kann der lebensdauerverlängernde Effekt durch Optimierung der Legierungsverhältnisse und der Oberflächenbehandlung weiter gesteigert werden.

6.1.2 Anwendung im Hochspannungsschalter

Die Anwendung in Hochspannungsschaltern ist eine wichtige Erscheinungsform der Wolframkupferlegierung in der Elektrotechnik und spielt insbesondere in Szenarien eine Schlüsselrolle, in denen mit hoher Spannung und starken Lichtbögen umgegangen werden muss. Hochspannungsschalter werden zur Schaltungssteuerung und zum Schutz in Stromversorgungssystemen eingesetzt und umfassen Geräte wie Hochspannungsleistungsschalter, Trennschalter und Erdungsschalter. Diese Geräte erzeugen beim Schalten von Hochspannungsströmen starke Lichtbögen, was extrem hohe Anforderungen an die Materialeistung stellt. Wolframkupferlegierung hat sich aufgrund ihrer hervorragenden Leitfähigkeit, hohen Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit zu einem idealen Material für Kernkomponenten von Hochspannungsschaltern entwickelt. Ihre Mikrostruktur wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert, um eine stabile Leistung unter extremen Arbeitsbedingungen zu gewährleisten. In Anwendungen wird Wolframkupferlegierung hauptsächlich für Kontakte, bewegliche und statische Elektroden sowie Lichtbogenlöschvorrichtungen verwendet, was die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Schaltern deutlich verbessert.

6.1.2.1 Arbeitsumgebung von Hochspannungsschaltern und Materialtoleranzstandards für Kernkomponenten

Die Arbeitsumgebung von Hochspannungsschaltern ist extrem rau und beinhaltet die kombinierten Auswirkungen von hohen Temperaturen, hohem Druck, starken Lichtbögen und mechanischer Belastung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dies stellt hohe Anforderungen an die Materialtoleranz der Kernkomponenten. Die hohen Temperaturen in der Arbeitsumgebung werden hauptsächlich durch Lichtbögen verursacht. Die beim Abschalten des Stroms schlagartig freigesetzte Energie kann zu einem starken Anstieg der lokalen Temperatur führen. Das Material muss eine ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit aufweisen und darf bei Temperaturen von mehreren Tausend Grad Celsius weder schmelzen noch seine Form verlieren. Kernkomponenten wie Kontakte und Elektroden müssen dieser extremen Hitzebelastung standhalten und gleichzeitig ihre strukturelle Integrität bewahren. Zweitens geht die Hochspannungsumgebung mit hoher Spannung einher. Die Kontinuität und Stärke des Lichtbogens erfordern eine extrem hohe Beständigkeit des Materials gegen Lichtbogenerosion, um Oberflächenabtrag oder Materialverlust zu verhindern und die Lebensdauer zu verlängern. Häufige mechanische Schaltvorgänge bringen zudem Stöße und Vibrationen mit sich. Das Material muss eine ausreichende mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit aufweisen, um Verschleiß- und Bruchgefahr zu widerstehen und so eine langfristige Betriebsstabilität zu gewährleisten. Korrosionsbeständigkeit ist ein weiterer wichtiger Toleranzstandard, insbesondere im Außenbereich oder in der Industrie, wo Hochspannungsschalter Feuchtigkeit, Salznebel oder Chemikalien ausgesetzt sein können. Das Material muss oxidations- und korrosionsbeständig sein und die elektrische Leistungsfähigkeit aufrechterhalten. Elektrische und thermische Leitfähigkeit sind gleichermaßen wichtig. Effiziente Stromübertragung und Wärmeableitung können die Auswirkungen von Widerstandserwärmung reduzieren, das Risiko lokaler Überhitzung verringern und umliegende Komponenten schützen. Die Härte des Materials muss moderat sein, um dem Kontaktdruck standzuhalten, ohne durch übermäßige Sprödigkeit zu reißen. Gleichzeitig muss die Zähigkeit ausreichen, um Aufprallenergie zu absorbieren. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, haben internationale und industrielle Normen wie IEC 62271 und ANSI/IEEE C37.04 Leistungsmaßstäbe für Hochspannungsschaltermaterialien festgelegt, die Lichtbogenfestigkeitsprüfungen, thermische Stabilitätsprüfungen und Bewertungen der mechanischen Haltbarkeit umfassen. Materialien müssen nach diesen strengen Normen geprüft werden, um eine hervorragende Leistung in der komplexen Umgebung von Hochspannungsschaltern zu gewährleisten. Wolfram-Kupfer-Legierungen erfüllen diese Anforderungen aufgrund ihrer umfassenden Leistungsfähigkeit und werden zum bevorzugten Material.

6.1.2.2 Leistung von Wolfram-Kupfer-Legierungen bei der Erfüllung der Anforderungen an Hochspannungsschalter

Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram verleihen der Legierung eine hervorragende Beständigkeit gegen hohe Temperaturen und Lichtbogenerosion. Wenn der Hochspannungsschalter den Hochspannungsstrom abschaltet, wird die durch den Lichtbogen erzeugte extreme Hitze effektiv von der Wolframphase absorbiert und abgeleitet, wodurch ein Schmelzen oder eine starke Ablation des Kontakts verhindert wird. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer gewährleistet eine effiziente Stromübertragung, reduziert den thermischen Widerstandseffekt und bietet einen stabilen Leiterpfad für die Lichtbogenlöschvorrichtung. Die Mikrostruktur der Legierung wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert.

Wolframkupferlegierungen sind besonders wichtig für Hochspannungsschalter. Die effiziente Wärmeableitung leitet die Lichtbogenwärme schnell an die Umgebung ab, senkt die lokale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kontakttemperatur und verlängert die Lebensdauer. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit ermöglichen häufiges Schalten. Die Duktilität der Kupferphase erhöht die Zähigkeit der Legierung und reduziert das Risiko von Rissen durch Stöße oder Vibrationen. Die chemische Stabilität von Wolfram schützt die Legierung vor Feuchtigkeit und industrieller Verschmutzung, und die Oberflächenbehandlung der Kupferphase kann die Korrosionsbeständigkeit weiter verbessern. In der Praxis weist die Wolframkupferlegierung zudem eine ausgezeichnete elektrische Kontaktstabilität auf, reduziert Kontaktwiderstand und Wärmeentwicklung und erhöht die Gesamtzuverlässigkeit der Geräte. Durch verschiedene Verhältnisse, wie z. B. WCu 70/30 oder WCu 80/20, kann die Leistung der Legierung an spezifische Anforderungen angepasst werden. WCu 80/20 eignet sich besser für hohe Lichtbogenbelastungen, während WCu 70/30 bei Bedarf an höherer Leitfähigkeit die bessere Wahl ist. Diese Leistungsmerkmale machen Wolframkupferlegierungen zur idealen Wahl für Kernkomponenten von Hochspannungsschaltern.

6.1.2.3 Anwendungsunterschiede von Wolfram-Kupfer-Legierungen in Hochspannungsschaltern unterschiedlicher Spannungsniveaus

Wolfram -Kupfer-Legierungen in Hochspannungsschaltern verschiedener Spannungsstufen spiegeln sich hauptsächlich in den unterschiedlichen Anforderungen an Spannung, Stromstärke und Lichtbogenintensität wider, die sich auf das Legierungsverhältnis, den Herstellungsprozess und das Komponentendesign auswirken. Die Spannungsstufen von Hochspannungsschaltern werden im Allgemeinen in Mittelspannung (1 kV bis 35 kV), Hochspannung (35 kV bis 230 kV) und Ultrahochspannung (über 230 kV) unterteilt. Jede Stufe weist deutlich unterschiedliche Anwendungsformen und Leistungsanforderungen an Wolfram-Kupfer-Legierungen auf. In Mittelspannungsschaltern ist die Lichtbogenintensität relativ gering und Wolfram-Kupfer-Legierungen werden üblicherweise durch ein pulvermetallurgisches Verfahren mit einem WCu- Verhältnis von 70/30 hergestellt, wobei der Schwerpunkt auf der Optimierung von Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit liegt. Die Kontaktkomponenten bestehen meist aus einfachen geometrischen Formen, bei denen Kosteneffizienz und Langzeitstabilität im Vordergrund stehen. Die Beständigkeit der Legierung gegen Lichtbogeneosion ist ausreichend, um Schaltvorgänge in Mittelspannungsumgebungen zu bewältigen.

Hochspannungsschalter (z. B. 110 kV bis 230 kV) sind stärkeren Lichtbögen und Wärmebelastungen ausgesetzt. Wolfram-Kupfer-Legierungen verwenden in der Regel Wolframanteile von 80/20 oder höher, um die Hochtemperaturbeständigkeit und Lichtbogeneosionsbeständigkeit zu verbessern. Der Herstellungsprozess kann mit Vakuuminfiltration kombiniert werden, um eine höhere Dichte und Gleichmäßigkeit zu gewährleisten. Das Kontaktdesign besteht häufig aus einer Mehrschichtstruktur oder einem Verbundwerkstoff mit einer inneren Schicht mit hohem Wolframanteil zur Lichtbogenbeständigkeit und einer äußeren Schicht mit hohem Kupferanteil zur Optimierung der Leitfähigkeit. Mit zunehmender Größe und Gewicht der Komponenten müssen die mechanische Festigkeit und das Wärmemanagement berücksichtigt werden. Zur Verbesserung der Haltbarkeit werden häufig Oberflächenbeschichtungen oder Wärmebehandlungen eingesetzt. Ultrahochspannungsschalter stellen höchste Anforderungen an die Materialeistung. Die Lichtbogenenergie ist extrem hoch. Wolfram-Kupfer-Legierungen können WCu- Verhältnisse von 90/10 verwenden, um komplex geformte Kontakte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Lichtbogenlöschvorrichtungen durch additive Fertigung oder Plasmaspritztechnologie herzustellen. Die Legierung muss eine extrem hohe Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Diese Unterschiede spiegeln den Einfluss der Spannungsstufen auf die Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen wider. Bei Niederspannung stehen Kosten und Leitfähigkeit im Vordergrund, bei Mittel- und Hochspannung die Lichtbogenbeständigkeit und das Wärmemanagement, und bei Ultrahochspannung sind extreme Leistung und komplexe Strukturen gefragt. Vorbereitung und Nachbearbeitung müssen an die Spannungsstufe angepasst werden. Zukünftig können intelligentes Design und die Kombination verschiedener Technologien genutzt werden, um die Anforderungen höherer Spannungsstufen zu erfüllen und den Anwendungsbereich weiter zu erweitern.

6.1.3 Anwendung von Relais und offenen Leistungsschaltern

Wolframkupferlegierungen in Relais und Luftleistungsschaltern sind eine wichtige Erscheinungsform der Wolframkupferlegierung in der Elektrotechnik, insbesondere in Szenarien, die eine hochzuverlässige elektrische Steuerung und Absicherung erfordern. Als Signalsteuergeräte mit geringem Stromverbrauch sind Relais auf Kontakte angewiesen, um das Ein- und Ausschalten von Stromkreisen zu realisieren, und häufige mechanische Einwirkungen stellen Anforderungen an die Haltbarkeit der Materialien. Luftleistungsschalter werden verwendet, um Stromkreise vor Überlastung oder Kurzschlusschäden zu schützen. Ihre Lichtbogenlöschsysteme müssen hohen Strömen und starken Lichtbögen standhalten, wofür Hochleistungsmaterialien erforderlich sind. Wolframkupferlegierungen haben sich aufgrund ihrer hervorragenden Leitfähigkeit, Verschleißfestigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit zum Kernmaterial für Relaiskontakte und Lichtbogenlöschkammern von Luftleistungsschaltern entwickelt.

6.1.3.1 Anforderungen an die Verschleißfestigkeit von Relaismaterialien und Eignung der Wolframkupferlegierung

Die Anforderungen an die Verschleißfestigkeit der Materialien von Relais ergeben sich aus den häufigen mechanischen Schaltvorgängen und dem Kontaktdruck, die sich direkt auf die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Kontakte auswirken. Verschleißfestigkeit ist eine zentrale Anforderung, da die Kontakte beim Schalten von Signalen mit geringer Leistung wiederholtem physischen Kontakt und Trennung standhalten müssen. Langfristiger Betrieb kann zu Oberflächenverschleiß, Materialübertragung oder -haftung führen, was wiederum einen erhöhten Kontaktwiderstand oder Ausfall verursacht. Das Material muss außerdem eine ausreichende Härte aufweisen, um Eindrückungen zu widerstehen, gleichzeitig aber eine angemessene Zähigkeit aufweisen, um Sprödbrüche durch übermäßige Härtung zu verhindern. Elektrische Leitfähigkeit ist eine weitere wichtige Anforderung, um einen Pfad mit geringem Widerstand zur Unterstützung der Signalübertragung zu gewährleisten. Hohe Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit helfen, gelegentlich hohe Stromstärken oder Lichtbogenbedingungen zu bewältigen. Darüber hinaus ist Korrosionsbeständigkeit besonders in feuchten oder industriellen Umgebungen wichtig, um zu verhindern, dass Oxidation oder Verunreinigungen die Leistung beeinträchtigen. Wolfram-Kupfer-Legierungen zeichnen sich durch eine extrem hohe Anpassungsfähigkeit aus und erfüllen die Verschleißfestigkeitsanforderungen von Relais. Die Wolframphase sorgt für hohe Härte und Verschleißfestigkeit, widersteht Oberflächenverschleiß

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch häufigen Kontakt und verlängert die Kontaktlebensdauer. Die Kupferphase sorgt für eine hervorragende Leitfähigkeit, gewährleistet eine stabile Signalübertragung und reduziert den thermischen Effekt des Widerstands. Die Mikrostruktur der Legierung wird durch pulvermetallurgische Verfahren optimiert. Die Kornverfeinerung erhöht die Verschleißfestigkeit, während die geringe Porosität Materialabplatzungen während des Verschleißes reduziert. Das Vakuuminfiltrationsverfahren erhöht die Dichte zusätzlich, verbessert die Grenzflächenbindung zwischen Wolfram und Kupfer und reduziert mechanische Spannungskonzentrationspunkte. Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit unterstützt gelegentliches Schalten mit hoher Energie, während die chemische Stabilität von Wolfram die Korrosionsbeständigkeit gewährleistet. In der Praxis reduziert der Einsatz von Wolfram-Kupfer-Legierungen (wie WCu 70/30) in Relaiskontakten den Verschleiß deutlich und verlängert die Lebensdauer der Geräte, insbesondere im Hochfrequenzbetrieb oder in rauen Umgebungen. Zukünftig können die Verschleißschutzeigenschaften durch Oberflächenhärtung oder die Zugabe von Spurenelementen weiter verbessert werden.

6.1.3.2 Einbauort und Funktionsrealisierung der Wolfram-Kupfer-Legierung im Relais

Die Wolframkupferlegierung im Relais ist hauptsächlich in der Kontaktbaugruppe konzentriert, und die spezifische Position und Funktionsrealisierung hängen eng mit den Designanforderungen zusammen. Der Kontakt ist die Kernkomponente des Relais und verantwortlich für das Ein- und Ausschalten des Stromkreises. Aus der Wolframkupferlegierung wird üblicherweise ein beweglicher oder statischer Kontakt hergestellt, der zwischen dem mechanischen Antriebsmechanismus und der Basis des Relais installiert wird. Der bewegliche Kontakt wird durch eine elektromagnetische Spule oder einen mechanischen Hebel angetrieben, um den statischen Kontakt zu berühren oder zu trennen und so die Signalsteuerung abzuschließen. Die Installationsform besteht meist aus Schweißen oder Pressen, um den Kontakt aus der Wolframkupferlegierung auf dem Kupfer- oder Stahlsubstrat zu befestigen und so die elektrische Verbindung und mechanische Stabilität sicherzustellen. Bei der Wahl der Installationsposition müssen Kontaktdruck und Lichtbogenverteilung berücksichtigt werden. Die Kontaktoberfläche wird üblicherweise poliert, um die Kontaktfläche zu optimieren und den Widerstand zu verringern.

Im Hinblick auf die funktionale Umsetzung nutzen Kontakte aus Wolframkupferlegierungen ihre hohe Leitfähigkeit, um die zuverlässige Übertragung von Signalen mit geringer Leistung zu gewährleisten. Die Kupferphase bildet einen durchgehenden Leiterpfad. Die hohe Härte und Verschleißfestigkeit der Wolframphase unterstützen häufiges mechanisches Schalten, verhindern Verschleiß oder Anhaften und gewährleisten die langfristige Kontaktstabilität. Die Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenerosion spielt bei Hochspannung oder Überlast eine wichtige Rolle, da sie Lichtbogenschäden an den Kontakten reduziert und die innere Struktur des Relais schützt. Der Einbauort kann auch Hilfselektroden oder Lichtbogenisolationsteile umfassen. Wolframkupferlegierungen unterstützen durch ihre hohe Temperaturbeständigkeit die Lichtbogenlöschung und Wärmeableitung. Bei einigen anspruchsvollen Relais wird die Wolframkupferlegierung mehrschichtig aufgebaut, mit einer inneren Wolframschicht zur Erhöhung der Haltbarkeit und einer äußeren Kupferschicht zur Optimierung der Leitfähigkeit. Die Effektivität der funktionalen Umsetzung hängt von der Kontrolle der Montagegenauigkeit und der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prozessoptimierung, wie z. B. Schweißqualität und Oberflächenbehandlung, ab. Zukünftig kann die Montagekonsistenz durch automatisierte Montagetechnologie verbessert werden.

6.1.3.3 Materialeleistungsanforderungen für Lichtbogenlöschsysteme von offenen Leistungsschaltern

Ein RC-Löschsystem von Luftleistungsschaltern ist auf die extremen Arbeitsbedingungen beim Abschalten von Hochstrom ausgelegt und muss in vielerlei Hinsicht strenge Anforderungen erfüllen. Erstens muss das Lichtbogenlöschsystem eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion aufweisen, da der starke Lichtbogen, der beim Abschalten von Hochstrom entsteht, die Materialoberfläche verbrennt. Zudem muss das Material mehreren Lichtbogenschlägen ohne Ausfall standhalten können. Hohe Temperaturbeständigkeit ist der Schlüssel. Die Lichtbogentemperatur kann Tausende von Grad erreichen. Das Material muss bei hohen Temperaturen seine strukturelle Integrität bewahren, um Schmelzen oder Verformung zu verhindern. Zweitens sind elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit entscheidend. Eine effiziente Stromübertragung und Wärmeableitung können resistive thermische Effekte verringern, lokale Überhitzung reduzieren und umliegende Komponenten schützen. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit ermöglichen die häufige Bewegung von Lichtbogenlöschgittern oder -kontakten und widerstehen mechanischer Belastung und Verschleiß.

Korrosionsbeständigkeit ist in Außen- oder Industrieumgebungen besonders wichtig, um zu verhindern, dass Feuchtigkeit oder Chemikalien das Material angreifen, und um die Leistung langfristig aufrechtzuerhalten. Die Härte des Materials muss moderat sein, damit es Lichtbögen und mechanischem Druck standhält, ohne aufgrund übermäßiger Sprödigkeit zu reißen. Die Zähigkeit muss Aufprallenergie absorbieren. Das Design des Lichtbogenlöschsystems erfordert außerdem, dass das Material Lichtbögen schnell löschen und mit der Lichtbogenblaswirkung des Luftmediums zusammenwirken kann, um den Lichtbogen schnell zu unterbrechen. Internationale Normen wie IEC 60947 und ANSI/IEEE C37.13 haben Leistungsstandards für Lichtbogenlöschmaterialien festgelegt, darunter Lichtbogenbeständigkeitstests und Tests zur thermischen Stabilität. Materialien müssen anhand dieser Normen geprüft werden, um eine hervorragende Leistung in der komplexen Umgebung von Luftleistungsschaltern sicherzustellen. Wolfram-Kupfer-Legierungen erfüllen diese Anforderungen aufgrund ihrer umfassenden Leistung und sind zur bevorzugten Wahl für Lichtbogenlöschsysteme geworden.

6.1.3.4 Anwendungsprinzip der Wolfram-Kupfer-Legierung in der Lichtbogenlöschkammer eines Luftleistungsschalters

Wolframkupferlegierungen in Lichtbogenlöschkammern von Luftleistungsschaltern zeichnen sich durch ihre hervorragende Leistung beim Trennen bei hohem Strom aus, insbesondere bei der Lichtbogenkontrolle und dem Wärmemanagement. In der Anwendung werden Wolframkupferlegierungen hauptsächlich für Lichtbogenlöschgitter, Kontakte und Trennerkomponenten verwendet. Dank ihrer hohen Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und hohen Temperaturen halten sie den extremen Bedingungen beim Trennen stand. Das Prinzip besteht darin, dass beim Trennen eines

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hohen Stroms durch den Luftleistungsschalter ein Lichtbogen im Kontaktspace entsteht. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte der Wolframphase absorbieren die Lichtbogenenergie wirksam, um Oberflächenablation oder Materialverlust zu verhindern. Die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit der Kupferphase überträgt Strom schnell und verteilt Wärme, senkt die lokale Temperatur und beschleunigt zusammen mit der geblasenen Luft die Lichtbogenlöschung.

Die Optimierung der Mikrostruktur ist der Schlüssel zum Anwendungsprinzip. Die gleichmäßige Verteilung von Wolfram und Kupfer wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration erreicht. Dies reduziert die Porosität und erhöht die Dichte, um eine gleichmäßige Verteilung der Lichtbogenenergie zu gewährleisten. Die Komponenten der Wolfram-Kupfer-Legierung in der Lichtbogenlöschkammer sind als segmentierte Strukturen ausgeführt. Der Lichtbogen wird zwischen den Gittern aufgeteilt, wodurch die Kühlfläche vergrößert und die Lichtbogenlöscheffizienz verbessert wird. Die mechanische Festigkeit der Legierung unterstützt häufiges Öffnen und Schließen, während die Zähigkeit mechanische Spannungen absorbiert und Rissausbreitung verhindert. Die Korrosionsbeständigkeit schützt die Komponenten vor Umwelteinflüssen und verlängert die Lebensdauer. Das Anwendungsprinzip beinhaltet auch eine Synergie mit dem Luftmedium. Die Oberfläche der Wolfram-Kupfer-Legierung bildet unter der Einwirkung des Lichtbogens eine schützende Oxidschicht, die die Lichtbogenunterbrechung unterstützt.

6.1.4 Anwendung in Trennschaltern und Erdungsschaltern

Wolframkupferlegierungen in Trennschaltern und Erdungsschaltern sind eine wichtige Anwendung in der Elektrotechnik, insbesondere bei Isolations- und Erdungsvorgängen in Stromversorgungssystemen. Trennschalter dienen zur Isolierung von Stromkreisen im Leerlauf, um ein versehentliches Einschalten zu verhindern, während Erdungsschalter bei Wartungsarbeiten oder Störungen eine sichere Erdung gewährleisten und Kurzschlussströme standhalten müssen. Wolframkupferlegierungen haben sich aufgrund ihrer hervorragenden Leitfähigkeit, hohen Temperaturbeständigkeit und mechanischen Festigkeit zum Kernmaterial dieser Schalter entwickelt. Die Mikrostruktur der Legierung wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert, um eine stabile Leistung bei Langzeitbelastung und extremen Strombedingungen zu gewährleisten. In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an die Wetterbeständigkeit des Materials von Trennschaltern bei langfristiger Einwirkung, das Anwendungsdesign von Wolframkupferlegierungen im leitfähigen Kontaktteil von Trennschaltern, die Anforderungen an Materialfestigkeit und Leitfähigkeit von Erdungsschaltern bei Kurzschlussströmen, der Mechanismus von Wolframkupferlegierungen zur Gewährleistung des sicheren Betriebs von Erdungsschaltern und die Auswahlkriterien für Wolframkupferlegierungen in Trennschaltern und Erdungsschaltern ausführlich erörtert.

6.1.4.1 Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit von Werkstoffen für Trennschalter, die über längere Zeiträume Umgebungseinflüssen ausgesetzt sind

Die Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit der Materialien von Trennschaltern in Umgebungen mit langfristiger Beanspruchung ergeben sich aus der Tatsache, dass diese üblicherweise im Freien oder

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

in industriellen Umgebungen installiert werden und verschiedenen natürlichen und menschlichen Einflüssen standhalten müssen. Witterungsbeständigkeit muss vor allem auch Korrosionsbeständigkeit umfassen. Trennschalter sind häufig Regen, Salznebel oder Industrieabgasen ausgesetzt. Die Materialien müssen oxidations-, rost- und korrosionsbeständig sein und ihre elektrische Leitfähigkeit sowie mechanische Integrität bewahren. Zweitens ist die Beständigkeit gegen UV-Alterung eine wichtige Anforderung. Langfristige Sonneneinstrahlung kann zu Oberflächenschädigungen des Materials führen, und es muss über lichtbeständige Eigenschaften verfügen, um Leistungseinbußen vorzubeugen. Darüber hinaus ist die Beständigkeit gegen hohe und niedrige Temperaturen entscheidend. Änderungen der Umgebungstemperatur können zu thermischer Spannung führen. Das Material muss unter extremen Wetterbedingungen, wie hohen Temperaturen im Sommer oder großer Kälte im Winter, stabil bleiben. Auch die Feuchtigkeitsbeständigkeit muss berücksichtigt werden. Eine feuchte Umgebung kann zum Versagen der Oberflächenisolationsschicht oder zu elektrischer Korrosion führen und so den sicheren Betrieb beeinträchtigen.

Mechanische Haltbarkeit ist eine weitere wichtige Anforderung. Häufige Betätigung oder Windlasten von Trennschaltern können Vibrationen und Verschleiß verursachen. Das Material muss ausreichend hart und ermüdungsbeständig sein, um Rissen oder Verformungen vorzubeugen. Die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit müssen auch bei längerer Belastung erhalten bleiben, um die Zuverlässigkeit der Isolierung zu gewährleisten. Internationale Normen wie IEC 62271-102 legen Anforderungen an die Bewitterungsbeständigkeit von Trennschaltermaterialien fest, darunter Salzsprühtests, UV-Belastungstests und Temperaturwechseltests. Das Material muss diese Tests bestehen, um seine Langzeitstabilität im Außenbereich nachzuweisen.

6.1.4.2 Anwendungsdesign der Wolframkupferlegierung im leitfähigen Kontaktteil des Trennschalters

Die Wolfram-Kupfer-Legierung im leitfähigen Kontaktteil des Trennschalters ist auf ihre Leistung im Leerlauftrennbetrieb ausgelegt. Der leitfähige Kontaktteil umfasst den beweglichen Kontakt, den statischen Kontakt und die Anschlussklemme. Die Wolfram-Kupfer-Legierung wird üblicherweise im Verhältnis WCu 70/30 oder WCu 80/20 hergestellt und durch Pulvermetallurgie eine hochdichte Struktur erzeugt. Bei der Konstruktion wird die Legierung in eine bestimmte Form gebracht, beispielsweise einen zylindrischen oder plattenförmigen Kontakt, und die Oberfläche wird poliert, um die Kontaktfläche zu optimieren und Widerstand und Wärme zu reduzieren. Die Installationsform wird meist verschraubt oder geschweißt, um eine stabile elektrische Verbindung mit dem Hauptkörper des Trennschalters zu gewährleisten. Einige Konstruktionen verfügen zudem über einen Federmechanismus, um einen konstanten Kontaktdruck aufrechtzuerhalten.

Das Anwendungsdesign berücksichtigt auch die Optimierung der Mikrostruktur. Die Wolframphase bietet hohe Härte und Verschleißfestigkeit für langfristigen mechanischen Kontakt, während die Kupferphase eine effiziente Stromübertragung gewährleistet. Die Beständigkeit der Legierung gegen Lichtbogenerosion spielt bei gelegentlichen Hochspannungsanwendungen eine Rolle, um Oberflächenablation zu verhindern. Im Design kann eine Verbundstruktur verwendet werden, bei der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eine Wolfram-Kupfer-Legierung als Kontaktschicht mit einem Kupfer- oder Aluminiumsubstrat kombiniert wird, um Kosten zu senken und die Gesamtleitfähigkeit zu verbessern. Oberflächenbehandlungen wie Versilberung oder Beschichtung können die Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit verbessern und die Anpassung an Außenumgebungen ermöglichen. Das Design muss auch die Anpassung der Wärmeausdehnung berücksichtigen.

6.1.4.3 Anforderungen an die Materialfestigkeit und Leitfähigkeit von Erdungsschaltern bei Kurzschlussstrom

Die Anforderungen an die Materialfestigkeit und Leitfähigkeit des Erdungsschalters bei Kurzschlussströmen ergeben sich aus seiner wichtigen Schutzfunktion im Fehlerfall. Kurzschlussströme können Tausende von Ampere erreichen, und die sofort freigesetzte Energie stellt extrem hohe Anforderungen an das Material. Zunächst muss das Material eine ausgezeichnete mechanische Festigkeit aufweisen, um der elektromagnetischen Kraft und der Aufprallkraft des Kurzschlussstroms standzuhalten und eine Verformung oder einen Bruch des Kontakts zu verhindern. Die Festigkeit muss auch die mechanische Wirkung des Erdungsvorgangs unterstützen, um einen stabilen Kontakt zu gewährleisten. Die Leitfähigkeit ist die wichtigste Anforderung. Eine effiziente Stromübertragung kann die Kurzschlussenergie schnell zur Erde ableiten und so Geräteschäden und Risiken für Personen reduzieren. Das Material muss außerdem eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, um die Kurzschlusswärme schnell abzuleiten und zu verhindern, dass eine lokale Überhitzung zum Schmelzen oder Versagen führt.

Hohe Temperaturbeständigkeit ist entscheidend. Kurzschlussströme können Hochtemperaturlichtbögen verursachen, und die Materialien müssen unter extremen thermischen Bedingungen ihre strukturelle Integrität bewahren. Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit unterstützt mehrere Kurzschlüsse und reduziert die lebensdauerbeeinträchtigende Oberflächenerosion. Korrosionsbeständigkeit ist besonders wichtig bei Erdungsschaltern im Außenbereich, um zu verhindern, dass Feuchtigkeit oder Salznebel die Leitfähigkeit beeinträchtigen. Härte und Zähigkeit müssen ausgewogen sein, wobei die Härte dem Kontaktdruck standhält und die Zähigkeit die Aufprallenergie absorbiert. Internationale Normen wie IEC 62271-102 und IEEE C37.41 legen Anforderungen an Festigkeits- und Leitfähigkeitstests für Erdungsschaltermaterialien fest, einschließlich Kurzschlussfestigkeitstests und Bewertungen der thermischen Stabilität. Wolframkupferlegierungen erfüllen diese Anforderungen aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Leitfähigkeit, und die Leistung kann zukünftig durch Optimierung des Legierungsverhältnisses verbessert werden.

6.1.4.4 Mechanismus aus Wolfram-Kupfer-Legierung zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs des Erdungsschalters

Wolfram -Kupfer-Legierungen gewährleisten den sicheren Betrieb von Erdungsschaltern aufgrund ihrer umfassenden Leistung unter Kurzschlussbedingungen. Dieser Mechanismus spiegelt sich zunächst in der hohen Leitfähigkeit wider. Die Kupferphase sorgt für einen kontinuierlichen Strompfad, leitet Kurzschlussenergie schnell in die Erde ab, reduziert die Systemspannung und schützt die Geräte. Der hohe Schmelzpunkt und die hohe Erosionsbeständigkeit der Wolframphase absorbieren die Energie des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kurzschlusslichtbogens, verhindern ein Schmelzen oder eine starke Ablation des Kontakts und gewährleisten die Zuverlässigkeit des Erdungskontakts. Die Mikrostruktur der Legierung wird durch Vakuuminfiltration oder ein pulvermetallurgisches Verfahren optimiert. Die Dichte reduziert die Porosität, verbessert die Schlagfestigkeit und thermische Stabilität und hält der Kurzschlussstrombelastung stand.

Der Mechanismus für mechanische Festigkeit und Zähigkeit unterstützt die mechanische Wirkung des Erdungsvorgangs. Die Wolframphase bietet Härte, um elektromagnetischen Kräften zu widerstehen, und die Kupferphase verbessert die Duktilität, absorbiert Aufprallenergie und verhindert Rissausbreitung. Der Wärmeleitmechanismus leitet Kurzschlusswärme schnell ab, senkt die lokale Temperatur und schützt umliegende Komponenten. Der Korrosionswiderstandsmechanismus widersteht dank der chemischen Stabilität von Wolfram Umwelterosion, und die Oberflächenbehandlung der Kupferphase verbessert die Witterungsbeständigkeit zusätzlich. In Anwendungen werden Wolfram-Kupfer-Legierungen häufig zu Kontakten oder Steckverbindern verarbeitet, die als Mehrschichtstrukturen ausgeführt sind. Die dicke Wolframschicht widersteht Lichtbögen, und die dicke Kupferschicht optimiert die Leitfähigkeit. In Kombination mit der Lichtbogenbeblasung oder der segmentierten Struktur des Erdungsschalters wird der Lichtbogen schneller gelöscht. Zukünftig kann intelligentes Monitoring eingesetzt werden, um die Leistung der Legierung in Echtzeit zu bewerten und die Sicherheit zu erhöhen.

6.1.4.5 Auswahlkriterien für Wolfram -Kupfer-Legierungen in Trenn- und Erdungsschaltern

Wolfram -Kupfer-Legierungen in Trennschaltern und Erdungsschaltern basieren auf einer umfassenden Bewertung der Anwendungsanforderungen und Umgebungsbedingungen. Das wichtigste Kriterium ist die Leitfähigkeit. Die Legierung muss eine effiziente Stromübertragung gewährleisten. Der Kupfergehalt liegt üblicherweise zwischen 20 % und 40 %. Gängige Wahl sind WCu 70/30 oder WCu 80/20. Hohe Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit sind weitere Kriterien. Hochspannungs- und Kurzschlusszenarien erfordern einen höheren Wolframgehalt, beispielsweise WCu 90/10, und der Herstellungsprozess muss die Dichte optimieren.

Korrosionsbeständigkeit und Witterungsbeständigkeit sind wichtige Kriterien bei der Auswahl. Für den Außenbereich sollten Legierungen mit Oberflächenbehandlung oder Beschichtung gewählt werden. Der Wärmeausdehnungskoeffizient muss auf den Untergrund abgestimmt sein, um thermische Spannungen zu reduzieren. Kosten und Verarbeitbarkeit beeinflussen ebenfalls die Auswahl. Bei komplexen Bauteilen kann die Pulvermetallurgie bevorzugt werden, und Verbundstrukturen können in kostensensitiven Szenarien eingesetzt werden. Internationale Normen wie IEC 62271-102 und Industriespezifikationen liefern Leistungsmaßstäbe.

6.2 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen im Bereich der Elektronik

Wolframkupferlegierungen werden häufig in der Elektronik verwendet, insbesondere in Szenarien, die eine hochpräzise Verarbeitung und ein effizientes Wärmemanagement erfordern. Der Elektronikbereich umfasst Elektroden für die Funkenerosion (EDM), Kühlkörper für elektronische Gehäuse und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Steckverbinder für Hochfrequenzschaltungen. Wolframkupferlegierungen erfüllen mit ihrer hohen Verschleißfestigkeit von Wolfram und der hohen Leitfähigkeit von Kupfer die Anforderungen der Präzisionsfertigung und des Wärmemanagements. Beim EDM wird die Legierung als Elektrodenmaterial verwendet, um Werkstückmaterial effizient zu entfernen und gleichzeitig eine lange Lebensdauer zu gewährleisten. In elektronischen Gehäusen unterstützen ihr niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient und ihre Wärmeleitfähigkeit die Wärmeableitung von hochdichten integrierten Schaltkreisen. In Hochfrequenzanwendungen gewährleistet die Leitfähigkeit der Legierung die Stabilität der Signalübertragung. In diesem Abschnitt werden die Leistungsanforderungen von EDM-Elektroden und die Vorteile von Wolframkupferlegierungen eingehend analysiert.

6.2.1 Leistungsanforderungen an EDM-Elektroden und Vorteile der Wolfram-Kupfer-Legierung

Die Leistungsanforderungen an EDM-Elektroden hängen eng mit den Vorteilen von Wolframkupferlegierungen zusammen. Dank ihrer umfassenden Leistungsfähigkeit nimmt die Legierung eine wichtige Position in der Hochpräzisionsbearbeitung ein. EDM entfernt Werkstückmaterialien durch elektrische Funkenentladung, was hohe Anforderungen an die Leitfähigkeit, Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit der Elektrodenmaterialien stellt. Wolframkupferlegierungen erfüllen diese Anforderungen dank der hohen Härte von Wolfram und der hohen Leitfähigkeit von Kupfer perfekt. WCu -Verhältnisse von 70/30 und 80/20 sind gängige Optionen, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit zu erreichen. Die Mikrostruktur der Legierung wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert, um eine geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung zu gewährleisten und so die Bearbeitungsgenauigkeit und Lebensdauer zu verbessern. In diesem Abschnitt werden die Leistungsindexanforderungen des EDM-Prozesses an Elektrodenmaterialien, die Anforderungen an die Leistungsunterschiede der Elektroden in verschiedenen Bearbeitungsszenarien, die Anpassungsanalyse von Wolframkupferlegierungen hinsichtlich Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit, der Vergleich der Leistungsvorteile gegenüber herkömmlichen Elektrodenmaterialien sowie die Auswahlkriterien für Elektroden aus Wolframkupferlegierungen in gängigen EDM- Geräten detailliert erläutert.

6.2.1.1 Leistungsindexanforderungen an Elektrodenmaterialien für EDM-Prozesse

Die Leistungsanforderungen an das Elektrodenmaterial im EDM-Prozess ergeben sich aus dem einzigartigen Prinzip des Werkstückmaterialabtrags durch elektrische Funkenentladung, das mehrere wichtige Eigenschaften beinhaltet. Zunächst muss das Material eine ausgezeichnete Leitfähigkeit aufweisen, um eine effiziente Stromübertragung zu gewährleisten, eine stabile Funkenentladung zu erzeugen und Energieverluste sowie Ungleichmäßigkeiten während der Bearbeitung zu reduzieren. Die elektrische Leitfähigkeit wirkt sich direkt auf die Entladungseffizienz aus, insbesondere bei der Feinbearbeitung, bei der Elektroden einen Pfad mit geringem Widerstand bilden müssen. Die Wärmeleitfähigkeit ist ein weiterer wichtiger Indikator. Eine gute Wärmeableitung kann die durch die Entladung erzeugte Wärme schnell an die Außenseite der Elektrode übertragen und so verhindern, dass lokale Überhitzung zu Elektrodenverformungen oder Verbrennungen auf der Werkstückoberfläche führt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verschleißfestigkeit ist eine wichtige Anforderung. Die Entladung zwischen Elektrode und Werkstück während des EDM-Prozesses führt zu Materialverlust.

Ebenso wichtig ist die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Häufige Entladungen können zu Ablation oder Materialübertragung auf der Elektrodenoberfläche führen. Das Material muss energiereichen Lichtbögen standhalten, ohne sich schnell zu zersetzen. Hohe Temperaturbeständigkeit ist unerlässlich. Die lokale Temperatur im Moment der Entladung kann mehrere Tausend Grad erreichen. Das Material muss unter extremen thermischen Bedingungen seine strukturelle Integrität bewahren, um Schmelzen oder Risse zu verhindern. Mechanische Festigkeit und Verarbeitbarkeit sind ebenfalls zu berücksichtigen. Die Elektrode muss mechanischem Klemm- und Bearbeitungsdruck standhalten und gleichzeitig präzise Schnitte in komplexe Formen, wie tiefe Löcher oder feine Strukturen, ermöglichen. Korrosionsbeständigkeit ist besonders wichtig bei der Bearbeitung bestimmter chemisch aktiver Werkstücke. Um Schäden an der Elektrodenoberfläche oder Verunreinigungen der Werkstückoberfläche zu vermeiden, ist eine geringe Porosität der Elektrode und eine gleichmäßige Mikrostruktur erforderlich, um eine gleichmäßige Entladung zu gewährleisten und Verarbeitungsfehler zu vermeiden. Internationale Normen wie ISO 14132 und JIS B 6402 haben Leistungsstandards für EDM-Elektrodenmaterialien festgelegt, darunter Leitfähigkeitsprüfungen, Verschleißfestigkeitsprüfungen und die Bewertung der thermischen Stabilität. Wolfram-Kupfer-Legierungen erfüllen diese Anforderungen aufgrund ihrer umfassenden Eigenschaften und werden zum bevorzugten Material für EDM.

6.2.1.2 Unterschiedliche Anforderungen an die Elektrodenleistung in unterschiedlichen Verarbeitungsszenarien

Die unterschiedlichen Anforderungen an die Elektrodenleistung in verschiedenen Verarbeitungsszenarien spiegeln die verschiedenen Anforderungen der Werkstückmaterialien, der Verarbeitungsgenauigkeit und der Effizienz wider und wirken sich direkt auf das Verhältnis und die Anwendungsform der Wolframkupferlegierung aus. In Präzisionsschneidszenarien wie der Verarbeitung von Formen, Mikrozahnrädern oder präzisen elektronischen Komponenten muss die Elektrode eine extrem hohe Verarbeitungsgenauigkeit und Oberflächengüte aufweisen. Sie muss eine geringe Porosität und eine feine Körnung aufweisen, um eine gleichmäßige Entladung zu gewährleisten. Die Leitfähigkeit muss stabil sein, um eine genaue Stromsteuerung zu unterstützen, und die Verschleißfestigkeit muss exzellent sein, um Elektrodenverluste zu verringern und die Lebensdauer zu verlängern. Das häufig verwendete Verhältnis WCu 70/30 hat einen moderaten Anteil an Kupferphase, die die Leitfähigkeit sicherstellt und eine gewisse Verschleißfestigkeit aufrechterhält. In groben Verarbeitungsszenarien wie dem Entfernen großer Materialmengen oder dem Öffnen grober Formhohlräume stehen effiziente Entladung und schneller Materialabtrag im Vordergrund. Leitfähigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit sind wichtiger und die Anforderungen an die Verschleißfestigkeit sind relativ gering. Das Verhältnis WCu 60/40 kann gewählt werden, um die Leitfähigkeit zu verbessern und die Verarbeitung zu beschleunigen.

Bei der Bearbeitung von Werkstoffen mit hohem Schmelzpunkt oder hoher Härte (wie Wolframstahl, Wolframkarbid oder Titanlegierungen) muss die Elektrode eine höhere Beständigkeit gegen hohe Temperaturen und Lichtbogenerosion aufweisen. WCu 80/20 oder Legierungen mit höherem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframanteil sind besser geeignet. Die Wärmeleitfähigkeit muss ebenfalls verbessert werden, um die hochenergetische Wärme abzuleiten und die Wärmeeinflusszone des Werkstücks zu reduzieren. Bei der Bearbeitung von tiefen Löchern oder komplexen Geometrien muss die Elektrode eine gute mechanische Festigkeit und Verarbeitbarkeit aufweisen, schlanke Strukturen oder komplexe Formen unterstützen und durch Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit vielseitig einsetzbar sein. Häufig wird ein WCu 70/30-Verhältnis in Kombination mit Oberflächenpolitur verwendet. Bei der Bearbeitung von nichtleitenden Werkstoffen (wie Keramik) ist eine zusätzliche Elektrodenkonstruktion erforderlich, wobei die Leitfähigkeitsanforderungen auf die zusätzlichen Werkstoffe abgestimmt werden müssen. WCu 60/40 mit hohem Kupferanteil kann gewählt werden. Verschiedene Szenarien beeinflussen auch die Bearbeitungsgeschwindigkeit und die Kosten. Für das Präzisionsschneiden werden in der Regel hochpräzise und langlebige Werkstoffe verwendet, während die Grobbearbeitung kostenoptimiert und effizient ist. In Zukunft können das Legierungsverhältnis und die Prozessparameter dynamisch angepasst werden, um sich an unterschiedliche Verarbeitungsanforderungen anzupassen und die Elektrodenleistung weiter zu verbessern.

6.2.1.3 Analyse der Verträglichkeit von Wolfram-Kupfer-Legierungen hinsichtlich Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit

Die Kompatibilitätsanalyse der Wolframkupferlegierung hinsichtlich Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit spiegelt ihre einzigartigen Vorteile als EDM-Elektrode wider. Die Leitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Kupferphase gewährleistet. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer gewährleistet eine effiziente Stromübertragung, erzeugt eine stabile elektrische Funkenentladung und verringert Energieverlust und Ungleichmäßigkeit während der Verarbeitung. Die Mikrostruktur der Legierung wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert. Das kontinuierliche Netzwerk der Kupferphase verringert den Widerstand und verbessert die Entladungsgleichmäßigkeit. Die Verhältnisse WCu 70/30 und WCu 60/40 bieten eine gute Leitfähigkeit und eignen sich für Szenarien, die eine hocheffiziente Verarbeitung erfordern. Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit ergänzen sich. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Kupferphase überträgt die Entladungswärme schnell an die Außenseite der Elektrode, verringert die lokale Temperatur und verhindert Verformungen oder Risse, insbesondere beim Präzisionsschneiden.

Die Verschleißfestigkeit wird hauptsächlich durch die Wolframphase gewährleistet, deren hohe Härte und Verschleißfestigkeit dem durch Funkenentladung verursachten Materialverlust widerstehen. Die feine Körnung und die gering poröse Struktur verbessern die Oberflächenstabilität und verringern Elektrodenverschleiß und -erosion, insbesondere bei der Hochenergiebearbeitung. Die hohe Temperaturbeständigkeit der Wolframphase unterstützt die Hochenergieentladung. WCu 80/20 weist eine bessere Verschleißfestigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit auf und eignet sich für die Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte. Die Grenzflächenbindung zwischen Wolfram und Kupfer wird durch Prozessoptimierung erreicht, wodurch das Ablösungsrisiko verringert und die Verschleißfestigkeit langfristig aufrechterhalten wird. Kompatibilitätsanalysen zeigen, dass sich bei Wolfram-Kupfer-Legierungen durch Anpassung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses ein Gleichgewicht zwischen Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit erreichen lässt. WCu 70/30 ist eine allgemeine Wahl,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die beide Leistungen berücksichtigt, während WCu 80/20 besser für hohe Anforderungen an die Verschleißfestigkeit geeignet ist.

6.2.1.4 Leistungsvorteile gegenüber herkömmlichen Elektrodenmaterialien

Verglichen mit herkömmlichen Elektrodenmaterialien wie reinem Kupfer, reinem Wolfram und Graphit zeigt eine Wolfram-Kupfer-Legierung eine deutliche Leistungsüberlegenheit. Erstens ist eine Wolfram-Kupfer-Legierung im Vergleich zu reinem Kupfer beständiger gegen hohe Temperaturen und Lichtbogenerosion. Reines Kupfer schmilzt oder verformt sich bei energiereichen Entladungen leichter, während die Wolframphase der Wolfram-Kupfer-Legierung die thermische Stabilität verbessert und die Lebensdauer der Elektrode verlängert. In Bezug auf die Leitfähigkeit ist reines Kupfer etwas besser, aber eine Wolfram-Kupfer-Legierung nähert sich dessen Niveau an, indem sie die Kupferphasenverteilung optimiert. Sie ist außerdem verschleißfest und reduziert Verluste, was sich insbesondere bei der Langzeitverarbeitung bemerkbar macht. Verglichen mit reinem Wolfram sind die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Legierung erheblich verbessert. Die geringe elektrische Leitfähigkeit von reinem Wolfram begrenzt die Entladungseffizienz, während die Kupferphase der Wolfram-Kupfer-Legierung diesen Mangel ausgleicht und für eine effiziente Verarbeitung geeignet ist.

Im Vergleich zu Graphitelektroden weist eine Wolfram-Kupfer-Legierung eine bessere mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit auf. Graphit bricht oder verschleißt leicht bei der Bearbeitung komplexer Formen, während eine Wolfram-Kupfer-Legierung Präzisionsschneiden und die Bearbeitung tiefer Löcher unterstützt und eine höhere Bearbeitungsgenauigkeit aufweist. Graphit hat eine hohe Leitfähigkeit, aber seine Beständigkeit gegen hohe Temperaturen und Lichtbogenerosion ist nicht so gut wie die einer Wolfram-Kupfer-Legierung. Bei der Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte und geringer Oberflächenrauheit treten große Verluste auf. Die geringe Porosität und die gleichmäßige Mikrostruktur der Wolfram-Kupfer-Legierung gewährleisten eine gleichmäßige Bearbeitung, während Graphit aufgrund seiner Porosität eine ungleichmäßige Entladung verursachen kann. Im umfassenden Vergleich bietet eine Wolfram-Kupfer-Legierung Vorteile in Bezug auf Haltbarkeit, Präzision und Anpassungsfähigkeit an verschiedene Szenarien, insbesondere bei den Anforderungen an hohe Präzision, lange Lebensdauer und komplexe Bearbeitung. Traditionelle Materialien wie reines Kupfer, reines Wolfram und Graphit sind schwer zu übertreffen.

6.2.1.5 Auswahlkriterien für Elektroden aus Wolfram-Kupfer-Legierungen in gängigen EDM-Geräten

Die Wahl von Elektroden aus Wolfram-Kupfer-Legierungen in gängigen EDM-Geräten erfolgt nach einer umfassenden Bewertung der Geräteeigenschaften und Verarbeitungsanforderungen, die sich direkt auf die Verarbeitungsqualität und -effizienz auswirken. Der wichtigste Standard ist zunächst die Leitfähigkeit. Die Legierung muss auf die Entladeparameter des Geräts abgestimmt sein. Das Verhältnis von WCu 60/40 zu WCu 80/20 wird entsprechend der Stromstärke und Verarbeitungsgenauigkeit ausgewählt. Die Leitfähigkeit muss mit dem Stromnetz kompatibel sein, um eine stabile Entladung zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewährleisten. Verschleißfestigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit sind entscheidend. Die Verarbeitung von Materialien mit hoher Härte oder Hochenergieszenarien erfordert einen höheren Wolframgehalt. WCu 80/20 oder WCu 90/10 sind besser geeignet. Der Herstellungsprozess muss eine geringe Porosität gewährleisten, um Verluste zu minimieren. Eine hohe Temperaturbeständigkeit unterstützt eine Hochenergieentladung, und bei der Auswahl müssen die maximale Entladeleistung und die Impulsparameter des Geräts berücksichtigt werden.

Mechanische Festigkeit und Verarbeitbarkeit beeinflussen die Elektrodenformung. Komplexe Formen oder schlanke Strukturen erfordern leicht zerspanbare Legierungen, wobei die Oberflächenrauheit der Bearbeitungsgenauigkeit entsprechen muss. Um diese beiden Aspekte auszugleichen, wird häufig ein Verhältnis von WCu 70/30 verwendet. Korrosionsbeständigkeit ist bei der Bearbeitung chemisch aktiver Werkstücke wichtig, und die Auswahl kann eine Oberflächenbeschichtung oder -verstärkung umfassen. Kosten und Verfügbarkeit müssen ebenfalls berücksichtigt werden. WCu 70/30 ist eine wirtschaftliche Wahl und für die allgemeine Verarbeitung geeignet. Hochwertige Geräte können hohe Wolframanteile verwenden, um hohe Haltbarkeitsanforderungen zu erfüllen. Gerätehersteller stellen technische Richtlinien zur Verfügung, und die Auswahl muss durch Verschleißfestigkeitsprüfungen, Leitfähigkeitsprüfungen und Verarbeitungstests bestätigt werden. Internationale Normen wie ISO 14132 bieten Leistungsreferenzen.

6.2.2 Rolle im Bereich der Mikroelektronik

Die Mikroelektronik stellt extrem hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Materialien. Sie benötigt eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit für eine effiziente Übertragung elektronischer Signale und Wärme sowie einen geeigneten Wärmeausdehnungskoeffizienten für Kernkomponenten wie Chips. Zudem ist eine gewisse strukturelle Festigkeit erforderlich, um den Anforderungen an Präzisionsgehäuse gerecht zu werden. Dank ihrer einzigartigen Kombination von Eigenschaften spielt Wolfram-Kupfer-Legierung in diesem Bereich eine wichtige Rolle und hat sich zu einem Schlüsselmaterial für die Verbindung von Kerngeräten mit externen Schaltkreisen und die Lösung von Wärmeableitungsproblemen entwickelt.

6.2.2.1 Anforderungen an Präzision und Stabilität von Materialien für mikroelektronische Bauelemente

Die Anforderungen an Präzision und Stabilität der Materialien mikroelektronischer Geräte ergeben sich aus ihrer hohen Integration und winzigen Größe, die sich direkt auf Leistung und Zuverlässigkeit der Geräte auswirkt. Präzision erfordert zunächst einmal, dass das Material eine extrem hohe Maßgenauigkeit und Oberflächenebenheit aufweist. Mikroelektronische Geräte wie Chips und Sensoren liegen üblicherweise im Mikron- oder Nanometerbereich. Durch präzise Verarbeitung muss das Material eine geringe Rauheit und Konsistenz erreichen, um eine gleichmäßige elektrische Verbindung und Wärmeleitung zu gewährleisten. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein wichtiger Indikator. Das Material muss einen Pfad mit geringem Widerstand bieten, um eine schnelle Signalübertragung zu unterstützen und Signaldämpfung oder -störungen zu vermeiden. Die Wärmeleitfähigkeit ist ebenso wichtig. Eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

effiziente Wärmeableitung kann die Betriebstemperatur des Chips senken und Leistungseinbußen oder Ausfälle durch Überhitzung verhindern.

Stabilität erfordert, dass das Material auch im Langzeitbetrieb seine konstante Leistung behält. Hohe Temperaturbeständigkeit ist dabei entscheidend. Die Betriebstemperatur des Chips kann über 150 °C erreichen, und das Material darf bei hohen Temperaturen weder seine Form verlieren noch oxidieren. Ermüdungsbeständigkeit und mechanische Stabilität halten häufigen Temperaturwechseln und mechanischen Belastungen stand, um Mikrorisse oder eine Delamination der Zwischenschichten zu verhindern. Ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient ist eine wichtige Voraussetzung, da er der Wärmeausdehnung siliziumbasierter Materialien (wie Chipsubstraten) entspricht, um Verformungen oder Brüche durch thermische Belastung zu reduzieren. Korrosionsbeständigkeit und chemische Stabilität sind besonders in feuchten oder sauren Umgebungen wichtig, um zu verhindern, dass Materialabbau die Lebensdauer des Geräts beeinträchtigt. Internationale Standards wie JEDEC JESD22 und IPC-6012 haben Leistungsmaßstäbe für mikroelektronische Materialien festgelegt, einschließlich Temperaturwechselprüfungen und Zuverlässigkeitsbewertungen. Wolfram-Kupfer-Legierungen erfüllen diese Anforderungen aufgrund ihrer umfassenden Leistungsfähigkeit und haben sich zum bevorzugten Material in der Mikroelektronik entwickelt.

6.2.2.2 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen in mikroelektronischen Gehäusen

Wolframkupferlegierungen kommen in mikroelektronischen Gehäusen in verschiedenen Formen vor, je nach Gehäusotyp und Anforderungen an das Wärmemanagement. Eine gängige Form besteht darin, aus Wolframkupferlegierungen Kühlkörpersubstrate herzustellen, die direkt für Chipgehäuse verwendet werden. WCu -Verhältnisse von 85/15 oder 90/10 werden durch ein pulvermetallurgisches Verfahren hergestellt. Die Dicke beträgt üblicherweise zwischen 0,5 und 2 mm, und die Oberfläche wird poliert, um den Wärmekontakt zu optimieren. Eine andere Form ist eine Verbundstruktur, die eine Wolframkupferlegierung als Kühlkörperschicht verwendet, mit einem Keramik- (wie AlN) oder Metallsubstrat (wie Cu-Mo) kombiniert und durch Diffusionsschweißen oder Presspassung integriert wird, um Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit auszugleichen. In der Anwendung kann die Legierung auch zu komplexen Formen verarbeitet werden, beispielsweise zu Kühlkörpern mit Mikrokanälen, um den Anforderungen von Gehäusen mit hoher Dichte gerecht zu werden.

Die Einbauform wird meist durch Kleben oder Verschrauben fixiert, um einen engen Kontakt mit dem Chip oder dem Gehäuse zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen wie Vernickeln oder Vergolden können die Korrosionsbeständigkeit und Schweißbarkeit verbessern und sich an verschiedene Verpackungsverfahren anpassen. In einigen Hochleistungsanwendungen wird Wolframkupferlegierung als funktionales Gradientenmaterial eingesetzt, wobei der Wolframgehalt vom Substrat zur Oberfläche hin abnimmt, um die thermische Anpassung und Leitfähigkeit an den Chip zu optimieren. Im Verpackungsbereich wird die Legierung auch für Leadframes oder Verbindungselemente verwendet, wobei das WCu -Verhältnis 70/30 die Signalübertragung und Wärmeableitung unterstützt. Die Anwendungsform nutzt die geringe Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit der Wolframkupferlegierung voll aus, um die hohen Anforderungen an Präzision und Zuverlässigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mikroelektronischer Verpackungen zu erfüllen. Zukünftig können komplexere Anwendungsformen mittels 3D-Drucktechnologie entwickelt werden.

6.2.2.3 Mechanismen zur Verbesserung der Wärmeableitungseffizienz und der Lebensdauer mikroelektronischer Geräte

Wolfram -Kupfer-Legierungen verbessern die Wärmeableitungseffizienz und Lebensdauer mikroelektronischer Bauelemente dank ihres hervorragenden Wärmemanagements und ihrer strukturellen Stabilität. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Legierung leitet die vom Chip erzeugte Wärme schnell an die Wärmeableitungsfläche ab, senkt die Betriebstemperatur und verhindert Leistungseinbußen durch thermische Spannungsakkumulation. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht dem siliziumbasierten Material, reduziert Verformungen oder Risse während thermischer Zyklen und erhöht die mechanische Stabilität der Gehäusestruktur. Der hohe Schmelzpunkt und die hohe Temperaturbeständigkeit der Wolframphase unterstützen den Chip in einer Betriebsumgebung über 150 °C und verhindern Materialabbau.

Die optimierte Mikrostruktur reduziert Poren und Defekte, verbessert die Kontinuität des Wärmeleitpfads und das WCu- Verhältnis 85/15 sorgt für eine hervorragende Wärmeableitungseffizienz. Die gleichmäßige Phasenverteilung reduziert den Wärmewiderstand, die Kupferphase sorgt für eine effiziente Wärmeverteilung und die Wolframphase unterstützt die strukturelle Integrität. Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit schützen die Legierung vor Feuchtigkeit und Chemikalien und verlängern so die Lebensdauer. In Anwendungen reduziert die effiziente Wärmeableitung der Wolfram-Kupfer-Legierung die Wärmelokalisierung, verlangsamt die Chipalterung und erhöht die Lebensdauer von Tausenden von Stunden bei herkömmlichen Materialien auf über 10.000 Stunden, insbesondere bei Hochleistungsrechnern und 5G-Geräten.

6.2.2.4 Design der Montagestruktur im Chip-Packaging-Modul

Das Design der Montagestruktur im Chip-Packaging-Modul muss die Leistungsfähigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung optimal nutzen, um Wärmemanagement und elektrische Verbindungen zu optimieren. Wolfram-Kupfer-Legierungen werden häufig als Wärmeableitungssubstrat unter dem Chip platziert und über Wärmeleitpaste (z. B. Wärmeleitpaste) mit der Chipunterseite verbunden, um eine effiziente Wärmeableitung zu gewährleisten. Die Montage erfolgt meist durch Verschrauben oder Verkleben. Die Substratdicke richtet sich nach der Chipleistung und liegt gängig im Bereich von 0,5 mm bis 1,5 mm. Das Design umfasst außerdem eine Mikrokanal- oder Rippenstruktur zur Vergrößerung der Wärmeableitungsfläche. Das WCu -Verhältnis von 90/10 unterstützt Hochleistungschips, und die Oberflächenbeschichtung verbessert die Schweißbarkeit.

Das Design der elektrischen Verbindungen verwendet Wolfram-Kupfer-Legierung für Leadframes oder Verbindungen. Das WCu- Verhältnis 70/30 wird durch Einpressen oder Schweißen integriert und mit dem Chip-Pad verbunden, um einen Pfad mit geringem Widerstand zu gewährleisten. Das strukturelle Design berücksichtigt die Anpassung der Wärmeausdehnung, und das Design mit geringer thermischer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Spannung aus Wolfram-Kupfer-Legierung und Keramik- oder Siliziumsubstrat verhindert ein Verziehen des Gehäuses. Der Einbauort umfasst außerdem eine zusätzliche Wärmeableitungsschicht, kombiniert mit einem Luft- oder Flüssigkeitskühlsystem, um den Wärmeflussweg zu optimieren. Das Design muss die thermische Spannung und die mechanische Stabilität durch eine Finite-Elemente-Analyse überprüfen. Internationale Standards wie JEDEC JESD51 bieten Richtlinien für das Wärmemanagement.

6.2.2.5 Anforderungen an Reinheit und Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer-Legierungen im Bereich der Mikroelektronik

Die Anforderungen an Reinheit und Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer-Legierungen in der Mikroelektronik ergeben sich aus dem Bedürfnis nach hoher Präzision und Zuverlässigkeit. Die Reinheitsanforderungen sind extrem hoch, und der Verunreinigungsgehalt von Wolfram und Kupfer muss unter 0,1 % liegen, um eine verringerte Leitfähigkeit oder eine Behinderung der Wärmeleitung zu vermeiden. Der Sauerstoffgehalt muss niedrig gehalten werden, um die Bildung von Oxiden zu verhindern, die die Mikrostruktur beeinträchtigen.

Zur Reinheit gehört auch die Kontrolle von Spurenelementen. Beispielsweise kann die Dotierung mit Eisen oder Silizium eine Schwächung der Korngrenzen verursachen, die durch hochreine Rohstoffe und Vakuumprozesse gewährleistet werden muss. Internationale Normen wie ASTM B702 legen die Zusammensetzungsanforderungen für hochreine Wolfram-Kupfer-Legierungen fest. Die Mikrostruktur erfordert eine gleichmäßige Phasenverteilung. Die Partikelgröße von Wolfram und Kupfer muss im Bereich von 5–20 Mikrometern liegen. Feine Körner verbessern die mechanische Festigkeit und die Wärmeleitfähigkeit.

Die Porosität muss unter 1 % liegen, um die Kontinuität der Wärmeleitung und der elektrischen Eigenschaften zu gewährleisten. Die Grenzflächenbindung muss eng sein, um das Risiko eines Ablösens zu verringern. Die Mikrostruktoptimierung im Verhältnis WCu 85/15 wird häufig in anspruchsvollen Szenarien eingesetzt. Mikrodefekte wie Risse oder unbenetzte Bereiche müssen mittels Rasterelektronenmikroskopie verifiziert werden. Aufbereitungsverfahren wie das heißisostatische Pressen (HIP) können die strukturelle Gleichmäßigkeit verbessern. Zukünftig können Reinheit und Mikroqualität durch Nanotechnologie oder Phased-Array-Verfahren weiter verbessert werden.

6.2.3 Anwendung im Bereich Sensorik

Als zentrales Gerät zur Erfassung von Umweltinformationen arbeiten Sensoren häufig in komplexen Umgebungen, beispielsweise in Industrieumgebungen mit hohen Temperaturen, in feuchten Außenumgebungen oder in mechanischen Systemen mit Vibrationen und Stößen. Dies stellt hohe Anforderungen an die Stabilität, Anpassungsfähigkeit und Funktionalität der Sensormaterialien. Wolframkupferlegierungen haben aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit, Vibrationsfestigkeit, guten Wärmeleitfähigkeit und strukturellen Stabilität ihren Anwendungswert im Sensorbereich zunehmend unter Beweis gestellt und sind zu einem wichtigen Material für die Verbesserung der Sensorzuverlässigkeit geworden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

6.2.3.1 Materialleistungsanforderungen für die Arbeitsumgebung des Sensors

Die Leistungsanforderungen an das Material in der Arbeitsumgebung des Sensors variieren aufgrund der vielfältigen Anwendungsszenarien, was sich direkt auf die Genauigkeit und Lebensdauer des Sensors auswirkt. Zunächst einmal ist die Hochtemperaturbeständigkeit eine zentrale Anforderung. Viele Sensoren, wie Hochtemperatur-Drucksensoren oder Thermoelemente, müssen in Umgebungen über 200 °C bis 1000 °C funktionieren. Das Material muss seine strukturelle Stabilität und Leitfähigkeit bewahren, um Leistungseinbußen durch thermische Verformung oder Oxidation zu vermeiden. Korrosionsbeständigkeit ist eine weitere zentrale Anforderung. Sensoren sind oft sauren, alkalischen oder feuchten Umgebungen ausgesetzt, wie etwa in der Chemie- oder Schiffahrtsindustrie. Das Material muss chemischer Erosion widerstehen, damit Oberflächenzersetzungen die Messgenauigkeit nicht beeinträchtigen. Mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit unterstützen den Langzeiteinsatz von Sensoren unter Vibration oder mechanischer Belastung und verhindern Komponentenverschleiß oder -bruch, insbesondere in Industrieanlagen.

Die elektrische Leitfähigkeit ist für elektrische Signalsensoren (wie resistive oder kapazitive Sensoren) von entscheidender Bedeutung. Das Material muss einen Pfad mit geringem Widerstand bieten, um die Genauigkeit und Stabilität der Signalübertragung zu gewährleisten. Die Wärmeleitfähigkeit ist bei Hochtemperatur- oder Hochleistungssensoren wichtig. Eine effiziente Wärmeableitung senkt die Betriebstemperaturen und schützt empfindliche Komponenten. Ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient passt zum Substrat, reduziert die Spannungskonzentration während thermischer Zyklen und verbessert die strukturelle Integrität. Lichtbogenerosionsbeständigkeit ist bei Hochspannungssensoren erforderlich, um Funkenschäden zu vermeiden. Verarbeitbarkeit und Maßgenauigkeit erfordern, dass sich das Material leicht und präzise schneiden lässt, um die Strukturanforderungen von Mikrosensoren (wie MEMS) im Mikrometerbereich zu erfüllen. Internationale Normen wie IEC 60751 und ASTM E1137 haben Leistungsmaßstäbe für Sensormaterialien festgelegt, einschließlich Temperaturbeständigkeitsprüfungen und Zuverlässigkeitsbewertung. Wolfram-Kupfer-Legierungen haben sich aufgrund ihrer umfassenden Leistung zur Erfüllung dieser Anforderungen zum bevorzugten Material im Sensorbereich entwickelt.

6.2.3.2 Mögliche Anwendungen von Wolfram-Kupfer-Legierungen in Sensorelementen

Die Wolframkupferlegierung in sensorempfindlichen Elementen variiert je nach Sensortyp und Funktionsanforderungen. Eine mögliche Form ist die Herstellung eines sensitiven Elements eines resistiven Temperatursensors aus Wolframkupferlegierungen. Das WCu- Verhältnis 70/30 wird pulvermetallurgisch hergestellt und zu einer Dünnschicht- oder Filamentstruktur verarbeitet. Dabei werden die hohe Leitfähigkeit der Kupferphase und die Stabilität der Wolframphase zur präzisen Messung von Temperaturänderungen genutzt. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung als Membran oder Kontakt eines Drucksensors. Das WCu -Verhältnis 85/15 wird durch ein Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert und erreicht eine Dicke zwischen 0,1 mm und 0,5 mm. Die Oberflächenpolitur gewährleistet einen hohen Kontakt und unterstützt die Deformationserkennung unter hohem Druck. In Weg- oder Beschleunigungssensoren kann Wolframkupferlegierung als Elektrode oder

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verbindungsstück verwendet werden. Das WCu- Verhältnis 60/40 wird durch Pressen oder Schweißen integriert und vereint hohe Leitfähigkeit und mechanische Festigkeit, um dynamische Messanforderungen zu erfüllen. Mögliche Anwendungen umfassen auch Heizelemente für Gassensoren. Die Legierung wird zu Mikroheizplatten verarbeitet. Das WCu -Verhältnis 80/20 unterstützt eine hohe Temperaturstabilität und die Oberflächenbeschichtung verbessert die Korrosionsbeständigkeit. Die Installation erfolgt meist durch Kleben oder Mikroschweißen, wobei eine enge Integration mit dem Sensorsubstrat erfolgt. Das Design kann eine Mehrschichtstruktur aufweisen, mit einer inneren Wolframschicht zur Verbesserung der Haltbarkeit und einer äußeren Kupferschicht zur Optimierung der Leitfähigkeit. Diese Anwendungsformen nutzen die Leistungsfähigkeit von Wolframkupferlegierungen voll aus, um die hohen Anforderungen an Präzision und Zuverlässigkeit empfindlicher Komponenten zu erfüllen. Zukünftig können komplexere Anwendungsstrukturen mittels 3D-Drucktechnologie entwickelt werden.

6.2.3.3 Anwendungsdesign von Sensor-Wärmeableitungskomponenten basierend auf hoher Wärmeleitfähigkeit

Das Anwendungsdesign von Sensor-Wärmeableitungskomponenten mit hoher Wärmeleitfähigkeit nutzt die Wärmemanagement-Fähigkeiten von Wolframkupferlegierungen, um die Leistung und Lebensdauer von Sensoren in Hochtemperaturumgebungen zu verbessern. Wolframkupferlegierungen werden häufig als Wärmeableitungssubstrat verwendet und unter dem Sensorelement platziert. WCu 85/15 oder WCu 90/10 wird pulvermetallurgisch hergestellt. Die Dicke liegt zwischen 1 mm und 3 mm, die Oberflächenebenheit ist besser als 5 μm , um einen engen Kontakt mit dem Sensorelement zu gewährleisten. Das Design umfasst außerdem eine Mikrokanal- oder Rippenstruktur, um die Wärmeableitungsfläche zu vergrößern, Wärme schnell an den externen Kühler oder die Umgebungsluft zu übertragen und die Temperatur des Sensorelements zu senken.

Die Montage erfolgt per Schraubbefestigung oder wärmeleitender Verbindung, integriert in das Sensorgehäuse oder das Luftkühlsystem. Das thermische Schnittstellenmaterial (z. B. ein Wärmeleitpad) optimiert den thermischen Kontaktwiderstand. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient (ca. 7 ppm/ $^{\circ}\text{C}$) ist auf das Silizium- oder Keramiksubstrat abgestimmt, reduziert Spannungen bei Temperaturwechseln und beugt Gehäuserissen vor. Die Wärmeableitungskomponente kann mit einem aktiven Kühlsystem kombiniert werden. Das WCu- Verhältnis 70/30 ist vorteilhaft für Leichtbauanwendungen, und die Oberflächenvernickelung verbessert die Korrosionsbeständigkeit. In Anwendungen reduziert die effiziente Wärmeableitung die Betriebstemperatur empfindlicher Komponenten deutlich und verlängert deren Lebensdauer, insbesondere bei Hochtemperatur-Drucksensoren oder Infrarotsensoren.

6.3 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen in der Luft- und Raumfahrt

Die Luft- und Raumfahrt stellt höchste Anforderungen an die Materialverträglichkeit. Sie muss extrem hohen Temperaturen, hohem Druck und hohen Luftgeschwindigkeiten standhalten und gleichzeitig strukturelle Stabilität und zuverlässige Funktion gewährleisten. Wolfram-Kupfer-Legierungen haben

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sich aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts und ihrer hohen Festigkeit sowie der hohen Wärmeleitfähigkeit und Thermoschockbeständigkeit von Kupfer zum Kernwerkstoff für viele Schlüsselkomponenten in diesem Bereich entwickelt. In Bereichen wie Feststoffraketen, dem Wärmeschutz von Raumfahrzeugen und Satellitenkomponenten kommen ihre Eigenschaften der „Ausgewogenheit zwischen hoher Temperaturbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit“ sowie der „Kombination aus Festigkeit und Schlagzähigkeit“ voll zum Tragen. Eine der repräsentativsten Anwendungen ist die Auskleidung von Feststoffraketen Düsen.

6.3.1 Anwendung der Düsenhalsauskleidung für Feststoffraketen

Die Auskleidung der Feststoffraketen Düse ist der „Hals“ der Raketentriebwerksdüse. Sie ist dafür verantwortlich, das heiße Gas mit hoher Geschwindigkeit auszustößen und so Schub zu erzeugen. Ihre Leistung bestimmt direkt die Antriebseffizienz und Startsicherheit der Rakete. Aufgrund der extrem komplexen Arbeitsumgebung sind die umfassenden Leistungsanforderungen an das Material extrem hoch. Durch Leistungsoptimierung und Prozessanpassung hat sich Wolfram-Kupfer-Legierung als ideales Material für diese Komponente erwiesen.

6.3.1.1 Arbeitsumgebung der Düsenhalsauskleidung von Feststoffraketen

Die Arbeitsumgebung der Düsenauskleidung einer Feststoffrakete gleicht einer „Material-Hölle“ und muss gleichzeitig mehreren extremen Bedingungen standhalten. Nach der Zündung der Rakete strömt das durch die Verbrennung des Festtreibstoffs entstehende heiße Verbrennungsgas mit Überschallgeschwindigkeit durch die Düsenauskleidung. Die Temperatur des Gases kann mehrere Tausend Grad Celsius erreichen und reicht aus, um die meisten Metalle schlagartig zu schmelzen. Die vom Hochgeschwindigkeitsluftstrom mitgeführten Feststoffpartikel treffen mit extrem hoher Geschwindigkeit auf die Oberfläche der Düsenauskleidung und erzeugen einen kontinuierlichen „Sandstrahleffekt“, der die Materialoberfläche kontinuierlich abträgt. Die im Verbrennungsgas enthaltenen oxidierenden Gase und korrosiven Partikel reagieren chemisch mit der Oberfläche der Düsenauskleidung und verschlimmern so den Materialverlust. Noch schwerwiegender ist, dass die Temperatur der Düsenauskleidung in der kurzen Zeitspanne zwischen der Zündung und dem Abschalten des Triebwerks stark von Raumtemperatur auf hohe Temperaturen ansteigt und anschließend wieder schnell abkühlt. Die enormen Temperaturschwankungen erzeugen starke thermische Spannungen, die leicht zu Rissen im Material führen können. Diese kombinierte Umgebung aus „Hochtemperaturverbrennung + Hochgeschwindigkeitsreinigung + chemischer Korrosion + Thermoschock“ stellt eine extreme Herausforderung für die Toleranz des Materials dar.

6.3.1.2 Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften der Düsenhalsauskleidung

Die Einsatzumgebung der Düsenhalsauskleidung bestimmt die hohen Leistungsanforderungen an das Material. Erstens muss das Material extrem temperaturbeständig sein, darf bei Temperaturen von mehreren Tausend Grad Celsius nicht schmelzen oder sich verformen und muss seine strukturelle Integrität bewahren. Zweitens muss es eine ausgezeichnete Erosions- und Verschleißfestigkeit aufweisen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dem ständigen Aufprall von Hochgeschwindigkeitsluft und Partikeln standhalten und den Oberflächenverlust minimieren. Drittens muss die Wärmeleitfähigkeit hervorragend sein, damit die von der Oberfläche aufgenommene Wärme schnell abgeleitet werden kann, um lokale Überhitzung und Ablation zu vermeiden. Gleichzeitig ist die Temperaturwechselbeständigkeit unerlässlich, um bei plötzlichen Temperaturschwankungen die Entstehung von thermischen Spannungen und die Entstehung von Rissen zu reduzieren. Schließlich muss das Material eine ausreichende strukturelle Festigkeit aufweisen und darf unter Hochdruckgaseinwirkung nicht brechen oder zerfallen. Nur wenn diese Anforderungen gleichzeitig erfüllt sind, kann die stabile Funktion der Düsenhalsauskleidung während des Raketenbetriebs gewährleistet werden.

6.3.1.3 Leistung der Wolfram-Kupfer-Legierung zur Erfüllung der Anforderungen an die Düsenhalsauskleidung

Die Wolfram-Kupfer-Legierung ist genau auf die Anforderungen der Düsenhalsauskleidung abgestimmt. Ihr Hauptvorteil liegt in der „synergistischen Komplementarität von Wolfram und Kupfer“. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram ermöglicht es der Legierung, in Hochtemperaturgasen stabil zu bleiben. Selbst wenn die Oberfläche extrem hohen Temperaturen ausgesetzt ist, schmilzt das durch die Wolframphase gebildete Skelett nicht und widersteht direkt dem „Hochtemperaturbrennen“. Die hohe Festigkeit und Härte von Wolfram verleihen der Legierung eine hervorragende Erosionsbeständigkeit, die dem Aufprall von Hochgeschwindigkeitspartikeln standhält, den Oberflächenverschleiß reduziert und mit „Hochgeschwindigkeitserosion“ fertig wird. Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer spielt eine Schlüsselrolle – sie kann Wärme schnell von der Oberfläche der Halsauskleidung in den Innenraum oder das Kühlsystem leiten, Ablation durch lokale Wärmestauung vermeiden und das Problem der „Wärmestauung“ lösen. Gleichzeitig kann die Plastizität von Kupfer die durch plötzliche Temperaturänderungen verursachte thermische Spannung verringern, das Risiko von Sprödrissen des Wolframskeletts verringern und die Temperaturwechselbeständigkeit verbessern. Darüber hinaus ist die strukturelle Festigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung nach der Verdichtung ausreichend, um der Einwirkung von Hochdruckgas standzuhalten und die Stabilität der Form der Halsauskleidung zu gewährleisten.

6.3.1.4 Formgebungsprozess und strukturelle Gestaltung der Wolfram-Kupfer-Legierung in der Düsenhalsauskleidung

Wolfram-Kupfer-Legierung in der Düsenhalsauskleidung erfordert einen präzisen Formprozess und ein präzises Strukturdesign, um die Leistung zu maximieren. Der Formprozess basiert auf Pulvermetallurgie: Zunächst werden Wolframpulver und Kupferpulver in einem bestimmten Verhältnis gemischt und durch eine Form in die ursprüngliche Form der Halsauskleidung (Grünling) gepresst; dann werden Wolframpartikel durch Hochtemperatursintern zu einem durchgehenden Skelett kombiniert, und dann wird das Kupfer verwendet, um die Skelettporen durch den Infiltrationsprozess zu füllen und so die Dichte des Materials sicherzustellen; schließlich wird die gekrümmte Oberflächenform durch Präzisionsbearbeitung zugeschnitten, um die Montagegenauigkeit mit anderen Teilen der Düse sicherzustellen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der strukturelle Entwurf konzentriert sich auf die „funktionelle Anpassung“: Die Oberfläche der Kehlenauskleidung weist ein bogenförmig gekrümmtes Oberflächendesign auf, um sich der Gasströmungsbahn anzupassen und lokalen Verschleiß durch Luftstromeinwirkung zu reduzieren. Einige Kehlenauskleidungen sind innen mit winzigen Kühlkanälen versehen, die in Kombination mit der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer die Wärme schnell über das Kühlmittel abführen können. An der Verbindung mit anderen Teilen der Düse wird eine abgestufte Dichtungsstruktur verwendet, um Gaslecks bei hohen Temperaturen zu vermeiden. Gleichzeitig wird die Dicke der Kehlenauskleidung entsprechend der Kraftverteilung angepasst – der Bereich mit der stärksten Gaseinwirkung wird entsprechend verdickt, um die Festigkeit zu gewährleisten und gleichzeitig Materialabfall zu reduzieren. Dieses Design aus „Prozess zur Gewährleistung der Dichte + Struktur zur Optimierung von Kraft und Wärmeableitung“ ermöglicht es, die Leistung der Wolfram-Kupfer-Legierung voll auszuschöpfen.

6.3.1.5 Verbesserung der Lebensdauer der Düsenhalsauskleidung nach Verwendung einer Wolfram-Kupfer-Legierung

Im Vergleich zu herkömmlichen Materialien (wie reinem Wolfram, Keramik usw.) verlängert eine Wolfram-Kupfer-Legierung die Lebensdauer der Düsenhalsauskleidung deutlich und verbessert sie von der Einmalverwendung zur Mehrfachbelastbarkeit. Traditionelles reines Wolfram ist zwar hochtemperaturbeständig, aber spröde und weist eine geringe Thermoschockbeständigkeit auf. Es neigt bei plötzlichen Temperaturschwankungen zur Rissbildung und versagt oft bereits nach einer Zündung aufgrund von Rissen. Keramikmaterialien sind zwar verschleißfest, weisen jedoch eine schlechte Wärmeleitfähigkeit auf, und ihre Oberfläche neigt durch Wärmestau zu lokaler Ablation. Ihre Lebensdauer ist daher extrem kurz.

Wolframkupferlegierungen lösen diese Probleme durch ihre synergetische Wirkung: Die Wolframphase ist temperaturbeständig und erosionsbeständig, wodurch der Oberflächenverschleiß reduziert wird; die Kupferphase leitet Wärme effizient, um lokale Überhitzung und Ablation zu vermeiden; die verbesserte Thermoschockbeständigkeit reduziert die Rissbildung; in Verbindung mit dem dichten Formverfahren und dem optimierten Strukturdesign hält die Düsenauskleidung mehreren Zünd- und Abschaltzyklen stand. In der Praxis kann die Düsenauskleidung aus Wolframkupferlegierung nicht nur einen Start absolvieren, sondern einige Modelle können auch für mehrere Tests oder die Wiederverwendung von Raketen verwendet werden. Dies reduziert die Austauschhäufigkeit und das Ausfallrisiko erheblich und verbessert gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit von Raketenstarts.

6.3.2 Mögliche Anwendungen in Flugzeugtriebwerkskomponenten

Das Triebwerk ist das „Herzstück“ eines Flugzeugs. Seine Leistung bestimmt direkt dessen Kraft, Effizienz und Sicherheit. Da die Anforderungen der Luftfahrtindustrie an das Schub-Gewichts-Verhältnis und die Treibstoffeffizienz der Triebwerke steigen, werden die Arbeitsumgebungen der Kernkomponenten immer anspruchsvoller, was höhere Anforderungen an die Gesamtleistung der Materialien stellt. Wolfram-Kupfer-Legierungen mit ihren ausgewogenen Eigenschaften hinsichtlich Hochtemperaturbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und struktureller Festigkeit haben an wichtigen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stellen wie den Hot-End-Komponenten von Flugzeugtriebwerken ein großes Anwendungspotenzial bewiesen und sollen die Leistungsengpässe herkömmlicher Materialien unter extremen Arbeitsbedingungen lösen.

6.3.2.1 Merkmale der Arbeitsumgebung wichtiger Flugzeugtriebwerkskomponenten

Die Arbeitsumgebung wichtiger Flugzeugtriebwerkskomponenten (insbesondere heißer Endkomponenten wie Brennkammern, Turbinenschaufeln, Düsen usw.) weist vier Hauptmerkmale auf: „hohe Temperatur, hoher Druck, hochfrequente Vibrationen und Korrosion“. Die Verbrennungstemperatur des Kraftstoffs in der Brennkammer kann Tausende von Grad Celsius erreichen, und die Turbinenschaufeln müssen unter der Umspülung mit heißem Verbrennungsgas mit hoher Geschwindigkeit rotieren (die Geschwindigkeit kann Tausende von Umdrehungen pro Minute erreichen) und dabei enormen Zentrifugalkräften und thermischen Belastungen standhalten; die Spaltkomponenten zwischen dem Hochdruckkompressor und der Turbine müssen in einer Hochdruckgasumgebung abgedichtet bleiben und gleichzeitig der lokal hohen Temperatur standhalten, die durch die Reibung des Luftstroms entsteht; außerdem verursachen die im Verbrennungsgas enthaltenen Sulfide, Stickoxide und andere Komponenten eine kontinuierliche Korrosion der Komponentenoberfläche; die Temperatur- und Druckschwankungen während des Start-, Beschleunigungs- und Verzögerungsprozesses des Motors verursachen ebenfalls hochfrequente thermische Ermüdung und mechanische Vibrationen der Komponenten. Diese kombinierte Umgebung aus „kontinuierlich hoher Temperatur + Wechsellast + Korrosionserosion + Vibrationseinwirkung“ stellt eine harte Probe auf die Stabilität und Haltbarkeit des Materials dar.

6.3.2.2 Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften von Flugzeugtriebwerkskomponenten

Aufgrund der extremen Arbeitsbedingungen stellen die Leistungsanforderungen an die Werkstoffe von Flugzeugtriebwerkskomponenten vielfältige Anforderungen. Erstens muss das Material eine ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit aufweisen und seine mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Härte) auch bei langfristig hohen Temperaturen ohne nennenswerte Abnahme beibehalten, um Verformungen oder Brüche durch Erweichung zu vermeiden. Zweitens muss die Wärmeleitfähigkeit hervorragend sein und die Wärme schnell von der Bauteiloberfläche ableiten können, um die Entstehung lokaler Hotspots und das Risiko von thermischer Ermüdung zu verringern. Drittens muss das Material eine gute Temperaturwechselbeständigkeit und mechanische Zähigkeit aufweisen, um Risse bei Temperatur- und Druckschwankungen zu reduzieren und Vibrationen standzuhalten. Gleichzeitig ist Korrosionsbeständigkeit unabdingbar und das Material muss der Erosion durch korrosive Komponenten im Gas standhalten, um Oberflächenablösungen oder strukturelle Schwächungen zu vermeiden.

6.3.2.3 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen in heißen Endteilen von Flugzeugtriebwerken

Der Einsatz von Wolframkupferlegierungen in den Hot-End-Komponenten von Flugzeugtriebwerken konzentriert sich hauptsächlich auf die Kernposition, „sowohl Wärmeleitung als auch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturbeständigkeit berücksichtigen zu müssen“, und die Anwendungsform wird entsprechend den verschiedenen Funktionen der Komponenten angepasst. Im Bereich der Brennkammerauskleidungen können Wolframkupferlegierungen mit hohem Wolframgehalt zur Herstellung dünnwandiger Auskleidungen verwendet werden, wobei die Hochtemperaturbeständigkeit von Wolfram genutzt wird, um direkter Flammenverbrennung standzuhalten, während die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer Wärme schnell an das Kühlsystem übertragen kann, um eine lokale Überhitzung der Auskleidungen zu vermeiden; an der Rand- oder Spitzendichtung der Turbinenschaufel kann Wolframkupferlegierung als verschleißfester wärmeleitender Einsatz verwendet und in die Schaufelmatrix eingebettet werden – ihre hohe Härte kann Reibung und Verschleiß mit dem Gehäuse widerstehen und ihre Wärmeleitfähigkeit kann die Schaufel bei der Wärmeableitung unterstützen und die thermische Spannungskonzentration reduzieren; In Kraftstoffdüsen oder Zündkomponenten kann Wolframkupferlegierung zu Düsenkernen verarbeitet werden. Dabei ist die hohe Temperaturbeständigkeit entscheidend für die Stabilität der Kraftstoffzerstäubung, während die Wärmeleitfähigkeit verhindert, dass die Düsen durch Überhitzung aufgrund von Kohlenstoffablagerungen verstopfen. Darüber hinaus können Wolframkupferlegierungen auch in Zusatzkomponenten wie den Wärmeschutzdichtungen des Motors und den Gehäusen von Hochtemperatursensoren durch kundenspezifische Strukturen eine Rolle spielen.

6.3.2.4 Leistungsoptimierungsrichtung der Wolfram-Kupfer-Legierung für Flugzeugtriebwerksanwendungen

Um die Anforderungen von Flugzeugtriebwerken besser zu erfüllen, muss sich die Leistungsoptimierung von Wolfram-Kupfer-Legierungen auf die Verbesserung von Schwächen und die Stärkung von Vorteilen konzentrieren. Um die Hochtemperaturbeständigkeit zu verbessern, können geringe Mengen hochschmelzender Legierungselemente (wie Molybdän und Niob) zugesetzt werden, um die Wolframpartikel zu verfeinern, die Hochtemperaturstabilität des Wolframgerüsts zu verbessern und die Erweichung bei langfristig hohen Temperaturen zu reduzieren. Um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern, können Oberflächenmodifizierungstechnologien (wie Plasmapermeationsschichten und Antioxidationsbeschichtungen) eingesetzt werden, um eine dichte Schutzschicht auf der Oberfläche der Legierung zu bilden und so Gaskorrosion zu widerstehen, ohne die Wärmeleitfähigkeit zu beeinträchtigen. Um die mechanische Belastbarkeit zu verbessern, kann die Bindungsstärke der Wolfram-Kupfer-Grenzfläche durch Anpassung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses (z. B. moderate Erhöhung des Kupfergehalts) oder Optimierung des Sinterprozesses verbessert werden, wodurch das Risiko von Sprödbrüchen verringert wird. Für die Verarbeitbarkeit können Präzisionsverfahren wie Pulverspritzguss entwickelt werden, um eine nahezu fertige Formgebung komplexer Strukturen (wie Mikrokühlkanäle und speziell geformte Oberflächen) zu erreichen und so die Schwierigkeit der nachfolgenden Verarbeitung zu verringern. Darüber hinaus können Wolfram-Kupfer-Legierungen mit Gradientenstruktur entwickelt werden – ein hoher Wolframanteil an der Oberfläche des Bauteils verbessert die Temperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit, ein hoher Kupferanteil in der inneren Schicht verbessert die Wärmeleitfähigkeit und Zähigkeit und die Anpassung an die unterschiedlichen Positionsanforderungen des Bauteils durch Leistungszonierung. Diese Optimierungsrichtungen zielen darauf ab, Wolfram-Kupfer-Legierungen von der „potenziellen Anwendung“ zur „tatsächlichen Anpassung“ zu führen, um die strengen Standards von Flugzeugtriebwerken zu erfüllen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.3 Anwendung in elektrischen Systemen von Raumfahrzeugen

Das elektrische System eines Raumfahrzeugs ist das „Nervenzentrum“, das den normalen Betrieb des Raumfahrzeugs gewährleistet. Es ist für die Energieübertragung, die Befehlssteuerung und die Stromversorgung der Geräte verantwortlich. Seine Zuverlässigkeit steht in direktem Zusammenhang mit dem Erfolg oder Misserfolg der Mission. Im Weltraum wird das elektrische System extremen Umweltbelastungen ausgesetzt, und Wolframkupferlegierungen haben sich aufgrund ihrer „hervorragenden elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sowie ihrer hohen Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion“ als ideales Material für Kernkomponenten wie Schütze und Leistungsschalter erwiesen und leisten damit einen wichtigen Beitrag zum stabilen Betrieb des elektrischen Systems.

6.3.3.1 Anforderungen an die Arbeitsumgebung und Zuverlässigkeit der elektrischen Systeme von Raumfahrzeugen

Die Arbeitsumgebung des elektrischen Systems eines Raumfahrzeugs weist zwei Hauptmerkmale auf: extrem und nicht wartungsfähig. Beim Betrieb im Orbit muss das System einem Vakuum sowie wechselnden hohen und niedrigen Temperaturen standhalten. Im Vakuum gibt es keine Wärmeableitung durch die Luft, was leicht zu einem Wärmestau in den Komponenten führt. Plötzliche Temperaturschwankungen führen dazu, dass sich das Material ausdehnt und zusammenzieht, was zu Spannungsermüdung führt. Gleichzeitig gibt es im Weltraum hochenergetische Teilchenstrahlung, die die Übertragung elektrischer Signale beeinträchtigen kann. Und die starken Vibrationen und Stöße während der Startphase stellen die strukturelle Integrität der Komponenten auf die Probe.

Aufgrund dieser Umwelteigenschaften liegen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Systems nahe an „Null-Ausfall“: Die Kernkomponenten müssen über einen Missionszyklus von mehreren Tagen bis mehreren Jahren stabil funktionieren, ohne dass es zu Problemen wie schlechtem Kontakt oder Lichtbogenerosion kommt. Elektrische Verbindungen müssen auch bei extremen Temperaturen und Vibrationen leitfähig bleiben, und Lichtbogenlöschkomponenten müssen den Strom zuverlässig unterbrechen. Selbst bei Partikelstrahlung oder Mikrometeoriteneinschlägen müssen plötzliche Ausfälle vermieden werden. Tritt ein Fehler auf, kann er direkt zum Scheitern der Mission führen, da er im Orbit nicht repariert werden kann.

6.3.3.2 Anforderungen an die Materialeigenschaften von Kernkomponenten elektrischer Systeme von Raumfahrzeugen

Die Leistungsanforderungen an Materialien für Kernkomponenten elektrischer Systeme von Raumfahrzeugen (wie Schützkontakte und Lichtbogenlöschkammern für Leistungsschalter) konzentrieren sich stark auf „elektrische Stabilität“ und „Umweltanpassungsfähigkeit“. Erstens muss das Material eine ausgezeichnete Leitfähigkeit aufweisen, um eine effiziente Stromübertragung zu gewährleisten und die durch Kontaktwiderstand verursachte Wärme zu reduzieren. Zweitens ist die Lichtbogenerosionsbeständigkeit entscheidend – der beim Ein- und Ausschalten der Kontakte entstehende Lichtbogen verbrennt die Oberfläche, und das Material muss dem Schmelzen und Spritzen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von Hochtemperaturlichtbögen standhalten. Gleichzeitig muss die Wärmeleitfähigkeit hervorragend sein, und die vom Lichtbogen erzeugte Wärme muss schnell abgeleitet werden können, um eine Überhitzung der Komponenten zu vermeiden. Darüber hinaus muss das Material eine gute Temperaturwechselbeständigkeit und mechanische Festigkeit aufweisen und darf bei wechselnden hohen und niedrigen Temperaturen sowie Vibrationsschocks nicht reißen oder sich verformen. Schließlich darf das Material in einer Vakuumumgebung keine flüchtigen Stoffe freisetzen (um eine Kontamination optischer Geräte zu vermeiden) und muss eine hohe chemische Stabilität aufweisen und darf nicht mit dem umgebenden Medium reagieren.

6.3.3.3 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen in Schützkontakten von Raumfahrzeugen

Der Schütz ist der „Schalter“, der das Ein- und Ausschalten des Stromkreises im elektrischen System des Raumfahrzeugs steuert. Seine Kontakte sind die zentralen Funktionskomponenten, und die Verwendung einer Wolfram-Kupfer-Legierung in den Kontakten entspricht genau den funktionalen Anforderungen. Die Schützkontakte erzeugen beim Ein- und Ausschalten einen kurzen Lichtbogen. Die Wolframphase in der Wolfram-Kupfer-Legierung kann der hohen Temperatur des Lichtbogens standhalten und ein Schmelzen und Verformen der Kontakte verhindern; die Kupferphase gewährleistet eine ausgezeichnete Leitfähigkeit, verringert den Kontaktwiderstand und reduziert die Wärmeentwicklung während der Leitung. Konstruktiv gesehen haben die Kontakte oft die Form einer „Wolfram-Kupfer-Verbandschicht“ – der hohe Wolframgehalt an der Oberfläche erhöht die Lichtbogenbeständigkeit, und der etwas höhere Kupfergehalt in der unteren Schicht verbessert die Verschweißbarkeit mit der Basis.

6.3.3.4 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen in Lichtbogenlöschkomponenten von Leistungsschaltern in Raumfahrzeugen

Leistungsschalter sind die „Sicherheitsvorrichtungen“ der elektrischen Systeme von Raumfahrzeugen. Bei Überlastung oder Kurzschluss des Stromkreises muss der Strom schnell unterbrochen und der Lichtbogen gelöscht werden. Wolfram- Kupfer-Legierungen spielen eine Schlüsselrolle bei lichtbogenlöschenden Komponenten (wie etwa den Wänden der Lichtbogenlöschkammer und den Lichtbogenkontakten). Beim Löschen des Lichtbogens schmilzt die vom Lichtbogen erzeugte hohe Temperatur leicht die Oberfläche der Komponente, und die Wolframphase der Wolfram-Kupfer-Legierung kann hohen Temperaturen standhalten und die Oberflächenablation verringern; die hohe Wärmeleitfähigkeit der Kupferphase kann die Lichtbogenwärme schnell an die Kühlstruktur ableiten und so das Löschen des Lichtbogens beschleunigen.

In einer Vakuum-Lichtbogenlöschumgebung setzt die Wolfram-Kupfer-Legierung keine flüchtigen Komponenten frei, wodurch die Vermischung von Verunreinigungsgasen mit dem Lichtbogen vermieden und die Lichtbogenlöscheffizienz sichergestellt wird; gleichzeitig verhindert ihre Thermoschockbeständigkeit, dass die Komponenten beim plötzlichen Wechsel von hoher Temperatur zu niedriger Vakuumtemperatur reißen, und erhält so die strukturelle Integrität. Diese Leistung ermöglicht es Leistungsschaltern, den Strom zuverlässig zu unterbrechen und die Sicherheit des Stromkreises in Notsituationen zu gewährleisten .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.3.5 Die Rolle der Wolfram-Kupfer-Legierung bei der Gewährleistung der Betriebsstabilität und Lebensdauer elektrischer Systeme von Raumfahrzeugen

Wolfram-Kupfer-Legierung verbessert die Zuverlässigkeit der Kernkomponenten und gewährleistet so die Betriebsstabilität und Lebensdauer des elektrischen Systems von Raumfahrzeugen. Im Schütz reduziert die Lichtbogenerosionsbeständigkeit den Kontaktverschleiß, erhöht die Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge von Tausenden auf Zehntausende und verlängert den Komponentenaustauschzyklus. Die stabile Leitfähigkeit verhindert lokale Überhitzung durch Kontakterwärmung und verringert das Risiko eines Stromkreisausfalls. Im Leistungsschalter sorgt die effiziente Lichtbogenlöschung und Ablationsbeständigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung dafür, dass der Strom bei Überlastung schnell unterbrochen werden kann, um die Ausbreitung von Fehlern zu verhindern. Gleichzeitig verhindern die Thermoschockbeständigkeit und die mechanische Festigkeit des Materials Komponentenausfälle bei langfristig hohen und niedrigen Temperaturen sowie Vibrationen und sind somit für den mehrjährigen Missionszyklus des Raumfahrzeugs geeignet. Die geringe Flüchtigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung verhindert zudem die Kontamination anderer Geräte, gewährleistet indirekt den koordinierten Betrieb des gesamten elektrischen Systems und reduziert materialbedingte Kettenausfälle.

6.3.3.6 Materialauswahlkriterien und Qualitätskontrollanforderungen für Wolfram-Kupfer-Legierungen in Raumfahrzeugenanwendungen

Wolfram-Kupfer-Legierungen für Raumfahrzeuge müssen strenge Materialauswahl- und Qualitätskontrollen durchlaufen, um ihre Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Bei der Materialauswahl muss zunächst das Zusammensetzungsverhältnis geklärt werden. Bei den Kontakten des Schützes müssen sowohl die Leitfähigkeit als auch die Lichtbogenbeständigkeit berücksichtigt werden. Üblicherweise werden die Serien W70-Cu30 bis W80-Cu20 ausgewählt. Lichtbogenlöschkomponenten benötigen einen höheren Wolframgehalt (W85-Cu15 und höher), um die Hochtemperaturbeständigkeit zu verbessern. Gleichzeitig muss die Materialdichte über 98 % liegen, um zu verhindern, dass innere Poren zu Schwachstellen der Lichtbogenerosion werden. Die Leitfähigkeit muss ≥ 40 % IACS (International Annealed Copper Standard) betragen, um eine effiziente Stromübertragung zu gewährleisten. Die Qualitätskontrolle durchläuft den gesamten Prozess: Die Reinheit der Rohstoffe muss geprüft werden, um zu verhindern, dass Verunreinigungen die Leitfähigkeit beeinträchtigen. Der Formprozess nutzt Vakuumsintern und Infiltration, um Oxidation und Porosität zu reduzieren. Das fertige Produkt muss Umwelttests wie Hoch- und Tieftemperaturzyklen, Vibration und Schock bestehen, um die Leistungsstabilität zu überprüfen. Schließlich sind Lichtbogenerosionssimulationstests erforderlich, um sicherzustellen, dass die Funktion auch nach Tausenden von Ein- und Ausschaltzyklen erhalten bleibt. Nur durch eine vollständige Kettenkontrolle können Wolframkupferlegierungen die Null-Fehler-Anwendungsanforderungen von Raumfahrzeugen erfüllen.

6.4 Anwendung in anderen Bereichen

Wolframkupferlegierungen sind nicht nur auf anspruchsvolle Bereiche wie die Luft- und Raumfahrt beschränkt. Ihre Eigenschaften „hohe Temperaturbeständigkeit, ausgewogene elektrische und thermische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leitfähigkeit“ sowie „kontrollierbare Dichte und Festigkeit“ zeigen auch in der Metallurgie, im Sport, in der Medizin, in der Kernenergie und anderen Bereichen einen einzigartigen Wert. Durch die Optimierung der Zusammensetzung und des Prozesses entsprechend den Anforderungen verschiedener Szenarien hat sich die Wolframkupferlegierung schrittweise von „Spezialmaterialien“ auf zivile und industrielle Szenarien ausgeweitet und ist zu einer wichtigen Wahl geworden, um die Leistungsengpässe herkömmlicher Materialien zu beheben.

6.4.1 Anwendungsszenarien in der metallurgischen Industrie

Die Hochtemperaturschmelz-, Gieß- und Verarbeitungsverbindungen der metallurgischen Industrie stellen außerordentliche Anforderungen an die Hochtemperaturbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Materialien. Wolfram-Kupfer-Legierungen spielen in mehreren Kernszenarien eine Rolle. Unter den Elektrodenmaterialien für das Vakuumschmelzen können Wolfram-Kupfer-Legierungen aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit als Elektroden für das Lichtbogenschmelzen verwendet werden. Die Wolframphase widersteht der Hochtemperatur-Lichtbogenenergie während des Schmelzens und die Kupferphase gewährleistet eine stabile Stromübertragung, während sie die Lichtbogenwärme schnell ableitet, um eine Überhitzung der Elektrode zu vermeiden. In den verschleißfesten Teilen des Stranggusskristallisators kann eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit hohem Wolframgehalt in den Innenwandeinsatz des Kristallisators eingearbeitet werden. Ihre Verschleißfestigkeit kann der Erosion von Hochtemperatur-Stahlschmelzen widerstehen und ihre Wärmeleitfähigkeit unterstützt die schnelle Abkühlung und Formgebung des Stahls, wodurch das Phänomen des Stahlklebens verringert wird. Bei den lokalen Einsätzen von Metalldruckgussformen (wie Formanguss, Kern und anderen leicht verschleißenden Teilen) kann die hohe Festigkeit und Wärmeschockbeständigkeit der Wolfram-Kupfer-Legierung die Lebensdauer der Form verlängern und Risse durch wiederholtes Erhitzen und Abkühlen vermeiden. Darüber hinaus können die hohe Temperaturbeständigkeit und die Abdichtung im Hochtemperatursensorgehäuse metallurgischer Detektionsgeräte auch die Detektionsgenauigkeit sicherstellen.

6.4.2 Anwendungsfälle im Sportgerätebereich

Im Bereich Sportgeräte konzentriert sich die Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen auf die Kernanforderung, hohe Dichte mit Stoßdämpfung zu kombinieren. Die Anwendungsfälle konzentrieren sich auf Präzisionssportgeräte. Im Ausgleichsgewicht von Bogenschießausrüstung bietet eine Wolfram-Kupfer-Legierung mit hohem Wolframanteil dank ihrer hohen Dichte ausreichend Gewicht auf kleinem Raum. Dies hilft Bogenschützen, den Schwerpunkt des Pfeilschafts zu optimieren und die Schussstabilität zu verbessern. Gleichzeitig verleiht die Kupferphase dem Gewichtsblock eine gewisse Robustheit, um ein Brechen bei Kollisionen zu verhindern. Im Gewichtskern von Billardqueues kann eine Wolfram-Kupfer-Legierung herkömmliche Bleiblöcke ersetzen. Durch die Anpassung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses zur Steuerung der Gewichtsverteilung werden nicht nur die Anforderungen an die Kraftübertragung beim Schlagen erfüllt, sondern auch die giftige Bleibelastung vermieden. Im Griffgewicht hochwertiger Angelruten vereinen sich Dichte und Korrosionsbeständigkeit – es verbessert nicht nur das Griffgefühl durch das Gewicht, sondern ist auch rostbeständig und verlängert die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lebensdauer der Ausrüstung. Diese Anwendungsfälle nutzen alle die Vorteile der Wolfram-Kupfer-Legierung „kontrollierbare Dichte + Ungiftigkeit + gute Formbarkeit“, um herkömmliche Schwermetallmaterialien zu ersetzen .

6.4.3 Exploration im Bereich Medizinprodukte

Der Bereich der Medizintechnik stellt hohe Anforderungen an die biologische Sicherheit, Präzision und Funktionalität der Materialien. Die Erforschung und Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen konzentriert sich auf Szenarien, die eine Kombination aus hoher Dichte und Strahlenschutz erfordern. In Dosiskalibriergeräten für die Strahlentherapie können Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframanteil als Strahlungsabschwächer eingesetzt werden. Wolfram schirmt Röntgen- und Gammastrahlen stark ab und ermöglicht eine präzise Kontrolle der Strahlendosis. Kupfer verbessert die Verarbeitungsgenauigkeit des Materials und ermöglicht die Herstellung komplexer Dämpfungskanäle, um die Kalibrierungsgenauigkeit zu gewährleisten. Gleichzeitig verhindern seine Ungiftigkeit und chemische Stabilität eine Kontamination der Geräte. In Positionierungskomponenten interventioneller Medizinprodukte (z. B. den Entwicklungsmarkierungen von Gefäßstents) kann die hohe Dichte von Wolfram-Kupfer-Legierungen unter Röntgenstrahlen deutlich sichtbar gemacht werden, um Ärzten die Lokalisierung des Stents zu erleichtern. Die Verarbeitbarkeit der Kupferphase ermöglicht die Einbringung der Markierungen in Mikrostrukturen, ohne die Flexibilität des Stents zu beeinträchtigen. Derzeit befinden sich diese Anwendungen noch in der Erkundungsphase. Der Kern besteht darin, die Biokompatibilität durch eine Oberflächenpassivierungsbehandlung weiter zu verbessern, um die Grundlage für klinische Anwendungen zu legen.

6.4.4 Anwendungsperspektiven im Bereich der Kernenergie

Die extremen Umgebungsbedingungen (hohe Temperaturen, Strahlung, hoher Druck) im Kernenergiebereich erfordern extrem hohe Materialtoleranzen . Wolfram-Kupfer-Legierungen bieten aufgrund ihrer Eigenschaften „Strahlungsbeständigkeit bei hohen Temperaturen und stabiler Wärmeleitfähigkeit“ breite Anwendungsmöglichkeiten. In Steuerstabführungskomponenten von Kernreaktoren können Wolfram-Kupfer-Legierungen als Führungsrohre eingesetzt werden – Wolfram ist hoch strahlungsbeständig und behält seine strukturelle Stabilität auch bei Neutronenstrahlung. Die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer leitet Wärme aus dem Reaktor ab, um eine Verformung des Führungsrohrs durch Überhitzung zu verhindern und die reibungslose Bewegung der Steuerstäbe zu gewährleisten. Gleichzeitig schützt die Korrosionsbeständigkeit vor Erosion durch Reaktorkühlmittel. In Abschirmkomponenten von Anlagen zur Behandlung nuklearer Abfälle können Wolfram-Kupfer-Legierungen mit hohem Wolframanteil zu Abschirmbehältern verarbeitet werden. Die strahlenabschirmende Wirkung von Wolfram zur Isolierung von Atom Müll wird genutzt. Die Kupferphase verbessert die Abdichtung und Verarbeitbarkeit des Behälters und erleichtert so die Herstellung komplexer Dichtungsstrukturen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 7 Zukünftiger Entwicklungstrend der Wolfram-Kupfer-Legierung

Wolframkupferlegierungen konzentrieren sich auf kontinuierliche Optimierung und Innovation in Hochleistungsanwendungen und kombinieren neue Technologien, um ihre Leistung zu verbessern und ihre Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern. Die zukünftige Entwicklung konzentriert sich auf neue Herstellungstechnologien, Strategien zur Leistungssteigerung und nachhaltiges Design, um den wachsenden Anforderungen der Bereiche Elektrotechnik, Luft- und Raumfahrt sowie neue Energien gerecht zu werden.

7.1 Erforschung neuer Herstellungstechnologien für Wolfram-Kupfer-Legierungen

Wolfram-Kupfer-Legierungen zielen darauf ab, die Grenzen traditioneller Verfahren zu überwinden und fortschrittliche Fertigungsmethoden einzuführen, um die Mikrostrukturkontrolle und Leistung zu verbessern. Diese Technologien optimieren die Verteilung von Wolfram und Kupfer, reduzieren Defekte und verbessern die Funktionalität durch innovative Materialverarbeitungs- und Umformungsverfahren. Die Entwicklung neuer Herstellungstechnologien wird den breiten Einsatz von Legierungen in komplexen Geometrien, hochpräzisen Komponenten und kundenspezifischen Anwendungen fördern.

7.1.1 Potenzielle Anwendungen der additiven Fertigungstechnologie

Die additive Fertigungstechnologie als potenzielle Anwendung für die Herstellung von Wolfram-Kupfer-Legierungen bietet die Möglichkeit, durch schichtweises Abscheiden von Materialien komplexe Strukturen zu erzielen. Basierend auf computergestütztem Design verwendet die Technologie Pulverbettsschmelzen oder gerichtete Energieabscheidung, um Wolfram- und Kupferpulver schichtweise zu schmelzen und zu verfestigen und so Legierungsteile mit maßgeschneiderten Mikrostrukturen zu bilden. Das Anwendungspotenzial liegt in der Fähigkeit, die lokale Verteilung von Wolfram und Kupfer präzise zu steuern, funktionale Gradientenmaterialien zu erzeugen und ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Leitfähigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit in verschiedenen Bereichen des Bauteils zu erreichen. Das Verfahren ermöglicht die Konstruktion komplexer Geometrien, wie interner Kühlkanäle oder Leichtbaustrukturen, um die hohen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt sowie elektronischer Geräte zu erfüllen.

Zu den additiven Fertigungstechnologien gehören außerdem die Reduzierung von Materialabfall und die Verkürzung von Produktionszyklen sowie die direkte Formgebung anhand digitaler Modelle, um Kleinserien oder individuelle Produktionsanforderungen zu erfüllen. Bei Wolfram-Kupfer-Legierungen kann diese Technologie die Kornmorphologie und Phasenverteilung optimieren, die Grenzflächenbindung verbessern und Porosität sowie unbenetzte Bereiche in herkömmlichen Verfahren reduzieren. Mögliche Anwendungsszenarien sind Hochleistungskühlkörper, präzise elektrische Kontakte und kundenspezifische Schweißelektroden, insbesondere bei Komponenten mit komplexen Innenstrukturen. Zukünftige Entwicklungen müssen Probleme wie die Gleichmäßigkeit der Pulvermischung, die Kontrolle der thermischen Spannung und die Optimierung der Nachbearbeitung lösen, um die Zuverlässigkeit und Konsistenz der Komponenten zu verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1.2 Ausblick auf weitere hochmoderne Präparationstechnologien

Neben der additiven Fertigungstechnologie bieten auch andere hochmoderne Herstellungstechnologien vielfältige Möglichkeiten für die künftige Entwicklung von Wolfram-Kupfer-Legierungen. Zu diesen Technologien zählen Nanotechnologie, Plasmaspritzen und Selbstorganisationsverfahren, die die Leistungsfähigkeit von Legierungen durch innovatives Materialdesign und Verarbeitungsverfahren verbessern sollen. Bei der Nanotechnologie werden ultrafeine Wolfram- und Kupferpulver verwendet, um die Gleichmäßigkeit und Dichte der Mikrostruktur zu verbessern und so möglicherweise die Leitfähigkeit und die mechanische Festigkeit zu steigern. Bei der Plasmaspritztechnologie werden Wolfram- und Kupferpartikel durch ein Hochgeschwindigkeitsplasma geschmolzen und abgeschieden. Dies eignet sich zur schnellen Herstellung von Beschichtungen oder komplexen Oberflächen und ist für verschleiß- und korrosionsbeständige Anwendungen geeignet. Das Selbstorganisationsverfahren nutzt die chemischen oder physikalischen Eigenschaften des Materials selbst, um die Phasenverteilung auf molekularer Ebene zu regulieren und neue Verbundstrukturen zu erforschen.

Die Zukunftsaussichten dieser Spitzentechnologien liegen in ihrer Fähigkeit, die Grenzen traditioneller Pulvermetallurgie- oder Schmelzinfiltrationsverfahren zu überwinden und mehr Flexibilität und Funktionalität zu bieten. Beispielsweise können mithilfe der Nanotechnologie feinere Korngrößen erzielt und die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion verbessert werden. Durch Plasmaspritzen lassen sich Oberflächen von Bauteilen rasch reparieren oder verbessern, und Selbstorganisationsverfahren eröffnen möglicherweise neue Bereiche intelligenter Materialgestaltung. Zukünftige Entwicklungsrichtungen umfassen die Integration mehrerer Technologien, etwa die Kombination von Nanopulvern und additiver Fertigung, oder die Synergie von Plasmaspritzen und Oberflächenbehandlung zur Optimierung von Mikrostruktur und Leistung. Die Herausforderungen liegen in der Prozesskomplexität, der Kostenkontrolle und der Umsetzbarkeit von Großanwendungen. Die Weiterentwicklung dieser Technologien wird neue Anwendungsperspektiven für Wolfram-Kupfer-Legierungen eröffnen.

7.2 Forschungsrichtung der Leistungsoptimierung von Wolframkupferlegierungen

der Wolfram-Kupfer-Legierung ist es, die elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Haltbarkeit durch intensive Materialentwicklung und Prozessoptimierung umfassend zu verbessern, um den zunehmend komplexen Anwendungsanforderungen gerecht zu werden. Der Kern der Leistungsoptimierung liegt in der Abstimmung der Eigenschaften von Wolfram und Kupfer, der Feinabstimmung der Mikrostruktur und der Entwicklung maßgeschneiderter Lösungen für spezifische Anwendungsszenarien. Die Forschungsrichtung umfasst die Verbesserung der Gesamtleistung und die Stärkung spezifischer Anwendungsszenarien und betont die Rolle innovativer Methoden bei der Förderung der Legierungsentwicklung.

7.2.1 Forschungsrichtungen zur Verbesserung der Gesamtleistung

Die Forschungsrichtung der umfassenden Leistungsverbesserung konzentriert sich auf die gleichzeitige Verbesserung der verschiedenen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Legierungen, einschließlich

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

elektrischer Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, mechanischer Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit, um eine umfassende Leistungsoptimierung zu erreichen. Der Kern der Forschung liegt in der Feinsteuerung der Mikrostruktur, der Reduzierung von Defekten und der Verbesserung der Materialdichte durch Optimierung von Korngröße, Phasenverteilung und Grenzflächenbindung. Eine mögliche Methode ist die Entwicklung einer neuen Pulvermischtechnologie, um eine gleichmäßige Verteilung von Wolfram und Kupfer sicherzustellen, die Kontinuität der Kupferphase zu verbessern und so die elektrische und thermische Leitfähigkeit zu steigern, während gleichzeitig eine stabile Struktur der Wolframphase zur Unterstützung der mechanischen Festigkeit erhalten bleibt. Techniken zur Grenzflächenverbesserung, wie die Einführung einer Zwischenphase oder Oberflächenmodifizierung, können die Haftung zwischen Wolfram und Kupfer verbessern und das Risiko einer Ablösung verringern.

Eine weitere Forschungsrichtung ist die Erforschung mehrphasiger Verbundwerkstoffe. Durch die Zugabe von Spurenadditiven oder Zweitphasenmaterialien wird die Mikrostruktur so angepasst, dass Festigkeit und Zähigkeit in Einklang stehen. Bei der Auswahl der Additive muss deren chemische Verträglichkeit mit Wolfram und Kupfer berücksichtigt werden, um neue Schwachstellen zu vermeiden. Prozessinnovationen wie stufenweises Sintern oder druckunterstützte Behandlung können die Porosität zusätzlich reduzieren und die Gesamtstabilität des Materials verbessern. Verbesserungen der Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit können durch Oberflächenbehandlung oder Beschichtungstechnologie erreicht werden, um die Kupferphase vor Umwelterosion zu schützen und gleichzeitig die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram zu erhalten. Zukünftige Forschung kann auch Simulationstechnologie und künstliche Intelligenz kombinieren, um den Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und Leistung vorherzusagen und die Herstellungsparameter dynamisch zu optimieren. Fortschritte in diesen Bereichen werden die umfassende Leistungsfähigkeit von Wolfram-Kupfer-Legierungen in einer Vielzahl von Hochleistungsanwendungen fördern.

7.2.2 Leistungssteigerung in bestimmten Anwendungsszenarien

Die Forschungsrichtung Leistungssteigerung in spezifischen Anwendungsszenarien zielt darauf ab, die Leistung von Wolfram-Kupfer-Legierungen in spezifischen Bereichen wie elektrischen Kontakten, Schweißelektroden und Luft- und Raumfahrtkomponenten anzupassen und zu optimieren. Bei elektrischen Kontaktanwendungen liegt der Schwerpunkt der Verbesserung auf der Verbesserung der Leitfähigkeit und der Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Die Netzwerkstruktur der Kupferphase kann optimiert werden, um die Effizienz der Elektronenübertragung zu erhöhen, während hochtemperaturbeständige Beschichtungen oder Oberflächenmodifikationen zur Reduzierung lichtbogenbedingter Oberflächenschäden eingesetzt werden können. Die Forschung kann Methoden zur dynamischen Anpassung des Wolframgehalts erforschen, um eine bessere Verschleißfestigkeit und Stabilität bei Hochstrombelastung zu gewährleisten.

Bei Schweißelektrodenanwendungen liegt der Schwerpunkt der Leistungssteigerung in der Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit und der Antihafteigenschaft. Die Antischmelzeigenschaften des Skeletts können durch Erhöhung des Wolframanteils verbessert werden, während gleichzeitig der Sinterprozess optimiert und die Porosität reduziert wird, um die Wärmeleitung zu verbessern. Die Verstärkung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grenzflächenbindung ist ebenfalls entscheidend, um ein Anhaften der Kupferphase am Werkstück bei hohen Temperaturen zu verhindern. Forschung kann Benetzungsverbesserer oder mehrschichtiges Strukturdesign einbeziehen. Die Anforderungen an Luft- und Raumfahrtkomponenten wie Kühlkörper konzentrieren sich auf Wärmeleitfähigkeit und geringes Gewicht. Durch funktionales Gradientendesign kann eine hohe Wärmeleitfähigkeitsverteilung der Kupferphase an der Oberfläche erreicht werden, während die Wolframphase im Inneren strukturellen Halt bietet. Forschungsschwerpunkte umfassen die Entwicklung neuer Formgebungstechnologien zur Optimierung der inneren Porositätsverteilung. Diese spezifischen Verstärkungsstudien müssen mit den tatsächlichen Bedingungen des Anwendungsszenarios wie Temperatur, mechanischer Belastung und Nutzungszyklus kombiniert werden, um gezielte Test- und Verifizierungsmethoden zu entwickeln. Zukünftige Entwicklungen können adaptives Materialdesign erforschen, das es Legierungen ermöglicht, ihre Leistung dynamisch an Umgebungsänderungen anzupassen, oder intelligente Fertigungstechnologien nutzen, um die Leistung in Echtzeit zu überwachen und zu optimieren.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung

Anhang

Anhang A Chinesischer Nationalstandard für Wolfram-Kupfer-Legierungen

Chinas nationale Normen für Wolframkupferlegierungen werden von der chinesischen Standardisierungsbehörde (SAC) erlassen, um die Herstellung, Leistung und Anwendung von Wolframkupferlegierungen zu regeln und so Produktqualität und Branchenkonsistenz sicherzustellen. Diese Normen beziehen sich hauptsächlich auf Wolframkupferlegierungspulver, Fertigteile und entsprechende Prüfverfahren. Obwohl es keine einzelne nationale Norm speziell für Wolframkupferlegierungen gibt, lassen sich relevante Normen aus den allgemeinen Spezifikationen für Wolfram und Kupferlegierungen ableiten. Das nationale Normensystem Chinas umfasst die GB/T-Reihe. Einige Normen, wie z. B. GB/T 26055-2022 (rekonstituiertes Wolframcarbidpulver), beinhalten die Herstellungsanforderungen für Materialien auf Wolframbasis und können als Referenz verwendet werden. GB/T 38470-2023 und GB/T 38471-2023 legen die Qualitätsstandards für sekundäre Kupferlegierungen bzw. Kupferrohstoffe fest und sind indirekt auf die Qualitätskontrolle der Kupferphase von Wolframkupferlegierungen anwendbar. Darüber hinaus enthalten GB/T 5242-2006 und GB/T 5243-2006 Prüfvorschriften sowie Verpackungs- und Transportspezifikationen für Hartmetallprodukte, die teilweise auch auf die Prüfung und den Transport von Wolfram-Kupfer-Legierungen ausgedehnt werden können. Diese Normen gewährleisten Materialhomogenität und Leistungskonsistenz durch chemische Analyse, Dichtebestimmung und mikrostrukturelle Bewertung.

Charakteristisch für chinesische Normen ist ihre Anpassungsfähigkeit an heimische Rohstoffe und Verfahren sowie ihre Betonung von Umweltschutz und Qualitätsüberwachung. Mit der Verschärfung der Schrottimportrichtlinien, beispielsweise durch die Einführung der neuen Zollnormen im Jahr 2023, wurden in den letzten Jahren höhere Anforderungen an die Reinheit und den Gehalt an nichtmetallischen Verunreinigungen in Kupferrohstoffen gestellt, was sich indirekt auf die Herstellung von Wolframkupferlegierungen auswirkt. Die Normen enthalten in der Regel Anforderungen an Materialzusammensetzung, physikalische Eigenschaften und Verarbeitungstechnologie und zielen darauf ab, den Bedarf der heimischen Industrie zu decken, beispielsweise bei der Herstellung von elektrischen Kontakten und Schweißelektroden. Zukünftig könnten die Normen weiter verfeinert werden, um Anforderungen an neue Herstellungstechnologien zu berücksichtigen und so an den technologischen Fortschritt und den internationalen Wettbewerb angepasst zu werden.

Anhang B Internationale Normen für Wolfram-Kupfer-Legierungen

Internationale Normen für Wolframkupferlegierungen werden hauptsächlich von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) und anderen nationalen oder regionalen Normungsgremien entwickelt, um einen einheitlichen Referenzrahmen für die globale Lieferkette bereitzustellen. Zwar gibt es keine internationale Norm speziell für Wolframkupferlegierungen, doch relevante Spezifikationen können den allgemeinen Normen für Wolframlegierungen und Kupferlegierungen entnommen werden. ISO 18119 behandelt Wolframlegierungspulver, die bei der Herstellung von Hartmetall verwendet werden, legt grundlegende Anforderungen an die Pulverherstellung und -eigenschaften fest und kann als Basis für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rohstoffe aus Wolframkupferlegierungen verwendet werden. Andere internationale Normen, wie JIS H 3201 (Japanischer Industriestandard), spezifizieren die Eigenschaften von Wolframlegierungspulvern, von denen einige auf Wolframkupfer-Verbundwerkstoffe anwendbar sind. Obwohl sich die internationalen ASTM-Normen und EN-Normen nicht direkt auf Wolframkupferlegierungen beziehen, können ihre Prüfmethoden für Metallmaterialien (wie Dichte- und Härteprüfungen) zur Leistungsbewertung verwendet werden.

Die Merkmale internationaler Normen sind ihre länderübergreifende Anwendbarkeit, der Schwerpunkt auf Materialkonsistenz und Handelsfreundlichkeit. Industrienormen (wie ASTM, JIS und DIN) in verschiedenen Ländern und Regionen wie den Vereinigten Staaten, Japan und Europa haben durch gegenseitige Unterstützung und Anerkennung ein globales Spezifikationssystem gebildet. Die internationalen Anwendungen von Wolfram-Kupfer-Legierungen, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt und bei der Verpackung von Elektronikprodukten, haben dazu geführt, dass sich diese Normen auf hohe elektrische Leitfähigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit konzentrieren. Einige große Pulverhersteller haben auch interne Spezifikationen entwickelt, um die Mängel internationaler Normen zu beheben und eine qualitativ hochwertige Versorgung sicherzustellen. Internationale Normen unterstützen jedoch aufkommende Herstellungstechnologien wie die additive Fertigung noch nicht in vollem Umfang und müssen in Zukunft möglicherweise aktualisiert werden, um sie an die technologische Entwicklung anzupassen. Alles in allem bieten internationale Normen eine wichtige Orientierungshilfe für den weltweiten Handel und die Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen, ihre konkrete Umsetzung muss jedoch mit den tatsächlichen Bedingungen jedes Landes in Einklang gebracht werden.

Anhang C Wolfram-Kupfer-Legierungsstandards in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern

Normen für Wolframkupferlegierungen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern werden von den jeweiligen nationalen oder regionalen Normungsorganisationen festgelegt, um Materialeigenschaften, Herstellungsverfahren und Anwendungsanforderungen zu standardisieren und so den globalen Handel und die industrielle Entwicklung zu unterstützen. Obwohl es keine einheitliche internationale Norm speziell für Wolframkupferlegierungen gibt, leiten sich die relevanten Spezifikationen in der Regel von den allgemeinen Normen für Wolframlegierungen, Kupferlegierungen oder Verbundwerkstoffe ab. Nachfolgend finden Sie eine Übersicht über die Normen der wichtigsten Länder und Regionen.

In Europa und den USA bilden die internationalen ASTM-Normen in den USA und die EN-Normen in Europa die wichtigsten Bezugsrahmen. ASTM-Normen wie ASTM B702 decken die Herstellungs- und Leistungsanforderungen von elektrischen Kontaktmaterialien aus Wolfram-Kupfer ab und betreffen Parameter wie Dichte, Leitfähigkeit und Härte, bieten jedoch keine detaillierten Spezifikationen für alle Arten von Wolfram-Kupfer-Legierungen. EN-Normen konzentrieren sich hauptsächlich auf Kupfer und Kupferlegierungen und sind indirekt auf die Qualitätskontrolle der Kupferphase von Wolfram-Kupfer-Legierungen anwendbar. Diese Normen legen Wert auf die Materialkonsistenz und die Wiederholbarkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Prüfmethode und werden häufig bei elektrischen Kontakten und Kühlkörperanwendungen eingesetzt. Europäische und amerikanische Normen stellen hohe Anforderungen an hohe Leitfähigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit. Einige Unternehmen wie American Elements und Plansee haben interne Spezifikationen formuliert, um die Mängel der allgemeinen Normen zu beheben.

Japanische JIS-Normen (wie JIS H 3201) legen die Eigenschaften von Wolframlegierungspulvern fest, von denen einige auf Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe anwendbar sind, wobei der Schwerpunkt auf der Gleichmäßigkeit der Pulverpartikelgröße und der chemischen Zusammensetzung liegt. Wolfram-Kupfer-Legierungen werden in der japanischen Industrie meist für Elektroden zur Funkenerosion (EDM) und Hochspannungsschalterkontakte eingesetzt und die Normen betonen die Lichtbogenerosionsbeständigkeit und die elektrische Leitfähigkeit. Koreanische Normen werden von den Koreanischen Industriestandards (KS) formuliert. Spezifikationen wie KS D 2101 betreffen Materialien auf Wolframbasis und sind auf pulvermetallurgische Prozesse für Wolfram-Kupfer-Legierungen anwendbar. Südkorea konzentriert sich auf die Herstellung hochpräziser Komponenten und die Normen stellen besondere Anforderungen an Mikrostruktur und Wärmeleitfähigkeit, was den Bedarf des Landes in den Bereichen elektronische Verpackung und Luft- und Raumfahrt widerspiegelt.

Die Standards dieser Länder unterscheiden sich. Europa und die USA legen den Schwerpunkt auf Vielseitigkeit und Handelskompatibilität, während Japan und Südkorea den technischen Details spezifischer Industrieanwendungen mehr Aufmerksamkeit schenken. Die Leistungsanforderungen an das Verhältnis von Wolfram-Kupfer-Legierungen (z. B. WCu 70/30, WCu 80/20) können je nach Standard unterschiedlich sein, erfordern aber im Allgemeinen eine hohe Dichte, geringe Wärmeausdehnung und hervorragende Leitfähigkeit. Die aktuellen Standards unterstützen neue Technologien wie die additive Fertigung nur eingeschränkt und müssen möglicherweise in Zukunft aktualisiert werden, um dem technologischen Fortschritt gerecht zu werden. Insgesamt bieten diese Standards wichtige Orientierungshilfen für die internationale Zusammenarbeit und Anwendung von Wolfram-Kupfer-Legierungen, ihre Umsetzung muss jedoch den industriellen Besonderheiten und Marktanforderungen der einzelnen Länder Rechnung tragen.

Anhang D Glossar der Wolfram-Kupfer-Legierungen

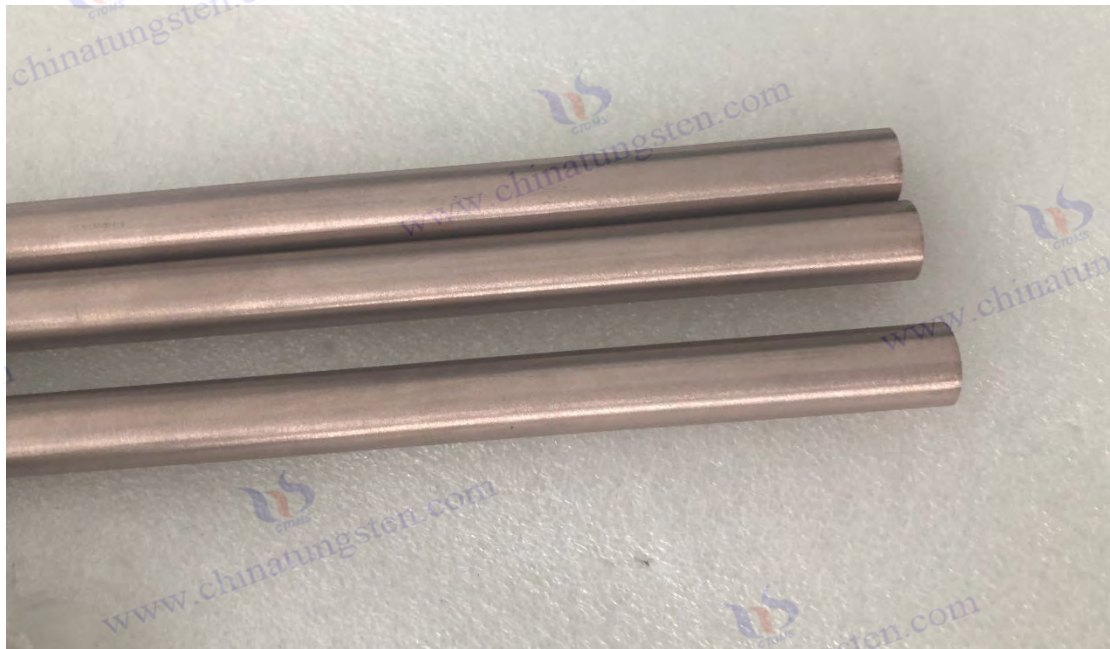
der Begriff	Definition
Wolfram-Kupfer-Legierung	aus Wolfram und Kupfer durch Pulvermetallurgie oder Infiltration, wobei hoher Schmelzpunkt und elektrische Leitfähigkeit kombiniert werden.
Pulvermetallurgie	Der Prozess der Legierungsherstellung durch Mischen, Pressen und Sintern von Metallpulvern eignet sich für die gleichmäßige Verteilung der Wolfram-Kupfer-Legierung.
Vakuuminfiltration	Durch das Infiltrieren von flüssigem Kupfer in das Wolframskelett in einer Vakuumumgebung wird eine hochdichte Wolfram-Kupfer-Legierung hergestellt.

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

Körnung	Die durchschnittliche Größe der Wolfram- oder Kupferpartikel in der Legierung beeinflusst die Festigkeit und Leitfähigkeit.
Phasenverteilung	Wolfram- und Kupferphasen in der Legierung bestimmen die elektrischen und thermischen Leitungswege.
Porosität	Der Anteil ungefüllter Hohlräume in einer Legierung beeinflusst die Dichte und die mechanischen Eigenschaften.
Schnittstellenverbindung	Die Wolfram- und Kupferphasen beeinflussen die Lastübertragung und die Ablösefestigkeit.
Elektrische Leitfähigkeit	Die Fähigkeit der Legierung, elektrischen Strom zu übertragen, wird hauptsächlich durch die Kontinuität der Kupferphase bestimmt.
Wärmeleitfähigkeit	Die Fähigkeit der Legierung, Wärme zu übertragen, hängt von der Kupferphasenverteilung und der mikrostrukturellen Homogenität ab.
Lichtbogenerosionsbeständigkeit	Die Fähigkeit der Legierung, der Lichtbogenablation bei hohen Temperaturen zu widerstehen, wird durch die Stabilität der Wolframphase und die Verteilung der Poren beeinflusst.
Flüssigphasensintern	Die Dichte der Legierung wird durch einen Sinterprozess bei hohen Temperaturen unter Verwendung einer Kupfer-Flüssigphase verbessert, die Wolframpartikel benetzt und füllt.
Heißisostatisches Pressen	Die Legierung wird bei hoher Temperatur unter Anwendung von omnidirektionalem Druck behandelt, um die Porosität zu verringern und die Mikrostruktur zu verbessern.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung

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

Verweise

Chinesische Literatur

- [1] Chinesische Vereinigung für Normung. GB/T 26055-2022 Rekonstituiertes Wolframkarbidpulver. Peking: China Standards Press.
- [2] Chinesische Vereinigung für Normung. (2023). GB/T 38470-2023 Sekundäre Kupferlegierungen. Peking: China Standards Press.
- [3] Chinesische Vereinigung für Normung. GB/T 38471-2023 Qualitätsanforderungen für Kupferrohstoffe. Peking: China Standards Press.
- [4] Chinesische Vereinigung für Normung. GB/T 5242-2006 Prüfvorschriften für Hartmetallprodukte. Peking: China Standards Press.
- [5] Chinesische Vereinigung für Normung. GB/T 5243-2006 Spezifikation für Verpackung und Transport von Hartmetallprodukten. Peking: China Standards Press.

Englische Literatur

- [1] Internationale Organisation für Normung. (2020). ISO 18119: Wolframlegierungspulver für Hartmetalle. Schweiz: ISO.
- [2] Japanisches Komitee für Industrienormen. (2018). JIS H 3201: Eigenschaften von Wolframlegierungspulver. Tokio: Japanische Normungsvereinigung.
- [3] ASTM International. (2019). ASTM B702: Standard-Spezifikation für elektrisches Kontaktmaterial aus Wolfram-Kupfer. USA: ASTM.
- [4] Europäisches Komitee für Normung. (2017). EN 13601: Kupfer und Kupferlegierungen – Stäbe. Brüssel: CEN.
- [5] Koreanische Agentur für Technologie und Standards. (2021). KS D 2101: Pulvermetallurgie-Spezifikationen für Wolfram-basierte Werkstoffe. Seoul: KATS.



CTIA GROUP LTD Wolfram-Kupfer-Legierung

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