

Was Ist Eine Wolfram-Kupfer-Elektrode

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 Marktrendanalysen 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 Definition der Wolfram-Kupfer-Elektrode
- 1.2 Grundlegende Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Elektrode
- 1.3 Entwicklungsgeschichte der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Kapitel 2: Materialgrundlagen von Wolfram-Kupfer-Elektroden

- 2.1 Eigenschaften von Wolfram
- 2.2 Eigenschaften von Kupfer
- 2.3 Wolfram-Kupfer-Verbundmechanismus
 - 2.3.1 Physikalische Verträglichkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 2.3.1.1 Strukturelle Kompatibilität
 - 2.3.1.2 Thermische Verträglichkeit
 - 2.3.2 Leistungssynergie von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 2.3.2.1 Synergie von elektrischer und thermischer Leitfähigkeit
 - 2.3.2.2 Synergie zwischen Hochtemperaturbeständigkeit und Strukturstabilität
- 2.4 Wichtige Rohstoffanforderungen für Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 2.4.1 Anforderungen an Wolframpulver
 - 2.4.2 Anforderungen an Kupferpulver
 - 2.4.3 Standards für die Vorbehandlung von Rohstoffen

Kapitel 3: Physikalische und chemische Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden

- 3.1 Physikalische Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 3.1.1 Dichte der Wolfram-Kupfer-Elektrode
 - 3.1.1.1 Dichteberechnungsmethode
 - 3.1.1.2 Zusammenhang zwischen Dichte und Zusammensetzung
 - 3.1.1.3 Einfluss der Dichte auf Anwendungen
 - 3.1.2 Thermische Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 3.1.2.1 Wärmeleitfähigkeit
 - 3.1.2.2 Wärmeausdehnungskoeffizient
 - 3.1.2.3 Hohe Temperaturbeständigkeit
 - 3.2 Funktionale Leistung der Wolfram-Kupfer-Elektrode
 - 3.2.1 Leitfähigkeitseigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 3.2.1.1 Leitfähigkeit
 - 3.2.1.2 Spezifischer Widerstand
 - 3.2.1.3 Strombelastbarkeit
 - 3.2.2 Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 3.2.2.1 Lichtbogenerosionsmechanismus
 - 3.2.2.2 Bewertung der Ablationsresistenz
 - 3.2.2.3 Faktoren, die die Ablationsresistenz beeinflussen
 - 3.3 Weitere Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.1 Härte der Wolfram-Kupfer-Elektrode
- 3.3.2 Festigkeit der Wolfram-Kupfer-Elektrode
- 3.3.3 Zähigkeit der Wolfram-Kupfer-Elektrode
- 3.3.4 Verschleißfestigkeit der Wolfram-Kupfer-Elektrode
- 3.3.5 Korrosionsbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden
- 3.3.6 Anti-Schweiß- und Anti-Haft-Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden
- 3.4 CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode MSDS

Kapitel 4: Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden

- 4.1 Zusammensetzungsverhältnis Dominante Klassifizierung Wolfram-Kupfer-Elektrode
 - 4.1.1 Elektroden mit hohem Wolframgehalt (80 %–95 % Wolfram)
 - 4.1.2 Elektroden mit mittlerem Wolframgehalt (50–80 % Wolfram)
 - 4.1.3 Elektroden mit niedrigem Wolframgehalt (20–50 % Wolfram)
- 4.2 Anwendungsszenarioorientierte Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 4.2.1 Elektroden für die Funkenerosion
 - 4.2.2 Elektroden für Hochspannungsgeräte
 - 4.2.3 Elektroden im Schweißfeld
 - 4.2.4 Spezialelektroden für Luft- und Raumfahrt sowie militärische Anwendungen
- 4.3 Klassifizierung der morphologischen und strukturellen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 4.3.1 Blockelektroden
 - 4.3.2 Stabelektrode
 - 4.3.3 Blechelektrode
 - 4.3.4 Speziell geformte Elektroden
- 4.4 Leistungsorientierte Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 4.4.1 Hochleitfähige Elektroden
 - 4.4.2 Lichtbogenerosionsbeständige Elektroden
 - 4.4.3 Hochfeste Elektroden
 - 4.4.4 Hochhitzebeständige Elektroden
- 4.5 Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden nach Mikrostruktur
 - 4.5.1 Gleichmäßig verteilte Elektroden
 - 4.5.2 Skelettgefüllte Elektroden
 - 4.5.3 Gradientenverteilungselektrode
- 4.6 Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden nach makroskopischer physikalischer Form
 - 4.6.1 Dichte Elektrode
 - 4.6.2 Poröse Elektroden
 - 4.6.3 Verbundbeschichtungselektroden

Kapitel 5: Herstellungsprozess der Wolframkupferelektrode

- 5.1 Infiltrationsprozess
 - 5.1.1 Wolframskelett-Vorfertigung
 - 5.1.1.1 Wolframpulverformen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1.1.2 Wolfram-Skelett-Sintern
- 5.1.1.3 Wolfram-Skelettporenkontrolle
- 5.1.2 Infiltrationskontrolle
 - 5.1.2.1 Kupfermaterialvorbereitung
 - 5.1.2.2 Infiltrationstemperaturregelung
 - 5.1.2.3 Infiltrationszeitsteuerung
- 5.2 Nachbearbeitungstechnologie
 - 5.2.1 Schneiden
 - 5.2.2 Schleifen
 - 5.2.3 Oberflächenbehandlung
 - 5.2.4 Maßgenauigkeitskontrolle

Kapitel 6: Anwendungsszenarien von Wolframkupferelektroden

- 6.1 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in der Funkenerosion
 - 6.1.1 Anwendung in der Formenbearbeitung
 - 6.1.2 Anwendung bei der Verarbeitung schwer zu verarbeitender Materialien
 - 6.1.3 Vorteile der Anwendung in der Funkenerosion
- 6.2 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in Hochspannungsgeräten
 - 6.2.1 Anwendung in Hochspannungsschaltern
 - 6.2.2 Anwendung in Blitzableitern
 - 6.2.3 Anwendungsvorteile in elektrischen Hochspannungsgeräten
- 6.3 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden beim Schweißen und Löten
 - 6.3.1 Anwendungen beim Widerstandsschweißen
 - 6.3.2 Anwendung beim Löten
 - 6.3.3 Anwendungsvorteile im Schweißbereich
- 6.4 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in der Luft- und Raumfahrt sowie der Militärindustrie
 - 6.4.1 Anwendung in Raketentriebwerkskomponenten
 - 6.4.2 Anwendung in Leitkomponenten
 - 6.4.3 Anwendungsvorteile in der Luft- und Raumfahrt sowie der Militärindustrie

Kapitel 7: Qualitätskontroll- und Prüfnormen für Wolframkupferelektroden

- 7.1 Erkennung wichtiger Indikatoren der Wolfram-Kupfer-Elektrode
 - 7.1.1 Prüfung der physikalischen Eigenschaften einer Wolfram-Kupfer-Elektrode
 - 7.1.1.1 Dichtepförfverfahren und -normen
 - 7.1.1.2 Prüfmethöden und Normen für die thermische Leistung
 - 7.1.1.3 Leitfähigkeitsprüfmethöden und -standards
 - 7.1.2 Chemische Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 7.1.2.1 Methode zur Zusammensetzungsanalyse
 - 7.1.2.2 Prüfvörfahren für die Korrosionsbeständigkeit
 - 7.1.2.3 Prüfnormen für den Verunreinigungsgehalt
 - 7.1.3 Mechanische Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 7.1.3.1 Härteprüfvörfahren und -normen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.3.2 Festigkeitsprüfverfahren und -normen
- 7.1.3.3 Zähigkeitsprüfverfahren und -normen
- 7.2 Mikrostrukturprüfung der Wolfram-Kupfer-Elektrode
 - 7.2.1 Metallographische Analyse
 - 7.2.1.1 Metallographische Probenpräparation
 - 7.2.1.2 Bewertungskriterien für die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung
 - 7.2.1.3 Korngrößenerkennung
 - 7.2.2 Defekterkennung an Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 7.2.2.1 Porositätserkennungsmethode und zulässiger Bereich
 - 7.2.2.2 Methoden und Kriterien zur Risserkennung
 - 7.2.2.3 Methoden zur Einschlusserkennung und Kontrollstandards
- 7.3 Industriestandards für Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 7.3.1 Relevante nationale Normen
 - 7.3.1.1 Relevante Bestimmungen chinesischer Normen
 - 7.3.1.2 Industriestandardanforderungen
 - 7.3.2 Relevante internationale Normen
 - 7.3.2.1 Internationale Normen für Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 7.3.2.2 Wolfram-Kupfer-Elektrodennormen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern

Kapitel 8: Markt- und Technologietrends für Wolframkupferelektroden

- 8.1 Analyse der Industriekette von Wolfram-Kupfer-Elektroden
 - 8.1.1 Vorgelagerte Rohstoffversorgung
 - 8.1.2 Midstream-Produktion
 - 8.1.3 Downstream-Anwendungsmarkt
- 8.2 Technische Richtung der Wolfram-Kupfer-Elektrode
 - 8.2.1 Optimierung des Aufbereitungsprozesses
 - 8.2.2 Pfad zur Leistungsverbesserung
 - 8.2.3 Erkundung der Anwendungserweiterung

Anhang:

Glossar zu Wolframkupferelektroden

Verweise



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kapitel 1: Einführung

1.1 Definition der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Eine Wolfram-Kupfer-Elektrode ist eine Verbundelektrode aus Wolfram (W) und Kupfer (Cu), die durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration hergestellt wird. Ihre Definition umfasst ihre Zusammensetzung, Herstellungsmethode und funktionalen Eigenschaften in bestimmten Anwendungen. Wolfram-Kupfer-Elektroden verwenden typischerweise Wolfram als primäres Gerüstmaterial und Kupfer als Füllstoff. Die beiden Metalle werden in unterschiedlichen Anteilen kombiniert (z. B. WCu 70/30, WCu 80/20), wodurch ein Material mit hohem Schmelzpunkt, hoher Temperaturbeständigkeit und ausgezeichneter elektrischer Leitfähigkeit entsteht. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram von 3422 °C verleiht der Elektrode eine außergewöhnliche thermische Stabilität und Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion, während Kupfer mit einem Schmelzpunkt von 1083 °C eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit besitzt und so eine effiziente Stromübertragung und schnelle Wärmeableitung gewährleistet. Die Eigenschaften dieses Verbundmaterials führen zu einer breiten Anwendung in Anwendungen wie Funkenerosion (EDM), Widerstandsschweißen und elektrischen Kontakten. Die Definition einer Wolfram-Kupfer-Elektrode umfasst auch ihre Mikrostruktur. Die Elektroden werden durch Mischen von Wolfram- und Kupferpulvern mittels Pulvermetallurgie, Pressen und Sintern oder durch Infiltration von flüssigem Kupfer in das poröse Wolframskelett mittels Vakuuminfiltration hergestellt, was zu einer gleichmäßigen Phasenverteilung und geringer Porosität führt.

In praktischen Anwendungen wird die Definition von Wolfram-Kupfer-Elektroden noch weiter gefasst und umfasst auch ihre funktionalen Eigenschaften, wie z. B. ihre Verwendung als Werkzeugelektroden beim Funkenerosionsbearbeiten (EDM) zum Entfernen von Werkstückmaterial oder als Elektroden beim Widerstandsschweißen, die hohen Stromstärken und Drücken standhalten. Das Verhältnis und der Herstellungsprozess können an spezielle Anforderungen angepasst werden. Elektroden mit einem hohen Wolframgehalt beispielsweise sind besser für Verschleiß und Lichtbogenbeständigkeit geeignet, während Elektroden mit einem hohen Kupfergehalt die elektrische Leitfähigkeit optimieren. Die Definition von Wolfram-Kupfer-Elektroden umfasst auch ihre Unterschiede zu herkömmlichen Elektroden aus einem Metall. Der Vorteil von Verbundwerkstoffen liegt in ihren ausgewogenen Eigenschaften von Wolfram und Kupfer, wodurch die Einschränkungen einzelner Materialien, wie z. B. der niedrige Schmelzpunkt von reinem Kupfer oder die geringe elektrische Leitfähigkeit von reinem Wolfram, überwunden werden. In den letzten Jahren wurde die Definition von Wolfram-Kupfer-Elektroden mit den Fortschritten in der Fertigungstechnologie schrittweise auf die Bereiche der additiven Fertigung und der Nanotechnologie ausgeweitet, wodurch verfeinerte Mikrostrukturen und neuartige Anwendungen erforscht werden.

1.2 Grundlegende Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Wolfram -Kupfer-Elektroden zeichnen sich durch ihre einzigartigen physikalischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften als Verbundwerkstoff aus, wodurch sie sich besonders für eine Vielzahl von Anwendungen eignen. Ihre elektrische Leitfähigkeit ist ein zentrales Merkmal von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Die hohe elektrische Leitfähigkeit der Kupferphase (ca. $5,8 \times 10^7$ S/m) sorgt für eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

effiziente Stromübertragung. Obwohl Wolfram eine geringere elektrische Leitfähigkeit (ca. $1,8 \times 10^7$ S/m) aufweist, kann die elektrische Leitfähigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden durch Optimierung der Kupferverteilung 80–90 % der Leitfähigkeit herkömmlicher Kupferelektroden erreichen und erfüllt so die Anforderungen von Funkenerosion und Schweißen. Die Wärmeleitfähigkeit ist ein weiteres wichtiges Merkmal. Die Kombination aus der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und der mäßigen Wärmeleitfähigkeit von Wolfram (ca. $174 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$) führt zu einer Legierung mit einer Wärmeleitfähigkeit zwischen 180 und $220 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$, die eine schnelle Ableitung der bei der Bearbeitung oder beim Schweißen entstehenden Wärme ermöglicht und so eine lokale Überhitzung verhindert.

Die hohe Temperaturbeständigkeit ist ein wesentlicher Vorteil von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Der extrem hohe Schmelzpunkt von Wolfram gewährleistet Stabilität in Lichtbögen und Hochtemperaturumgebungen. Nach dem Schmelzen füllt die Kupferphase die Poren und verbessert so die thermische Stabilität des Materials weiter, sodass es für extreme Bedingungen bis zu $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ geeignet ist. Die hohe Härte von Wolfram (ca. 3430 HV) und Verschleißfestigkeit tragen zu seiner Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion bei. Dies reduziert den Oberflächenabtrag der Elektrode beim EDM erheblich und verlängert ihre Lebensdauer. Mechanische Festigkeit und Härte sind ebenfalls wichtige Eigenschaften. Wolfram-Kupfer-Elektroden weisen eine Druckfestigkeit von über 1000 MPa und eine Härte zwischen 200 und 300 HV auf, sodass sie hohem Druck und häufiger mechanischer Beanspruchung standhalten können. Gleichzeitig sorgt die Kupferphase für Zähigkeit und verringert das Risiko von Sprödbrüchen.

Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient (ca. $6\text{--}8 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$) ist ein einzigartiger Vorteil von Wolframkupferelektroden. Sie passen zu Silizium- oder Keramiksubstraten, reduzieren Spannungen bei Temperaturwechseln und eignen sich besonders für mikroelektronische Verpackungen. Die chemische Stabilität des Wolframs und die Oberflächenbehandlung des Kupfers (z. B. Vernickeln) sorgen für Korrosionsbeständigkeit, sodass sie für feuchte oder industrielle Umgebungen geeignet sind. Mikrostrukturell gesehen gewährleisten die gleichmäßige Phasenverteilung und die geringe Porosität (typischerweise weniger als 1%) der Wolframkupferelektrode eine konstante Leistung. Diese grundlegenden Eigenschaften zusammen machen die Vielseitigkeit von Wolframkupferelektroden aus und ermöglichen ihnen gute Leistungen bei hochpräziser Verarbeitung, elektrischem Kontakt und Wärmemanagement. Mit der Entwicklung der Nanotechnologie und Oberflächenmodifizierung werden diese Eigenschaften in Zukunft voraussichtlich weiter optimiert.

1.3 Entwicklungsgeschichte der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Wolfram-Kupfer-Elektroden spiegeln die historische Entwicklung der Materialwissenschaften und der industriellen Anforderungen wider. Ihre Ursprünge reichen bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts zurück, mit Fortschritten in der Pulvermetallurgie und der rasanten Entwicklung der Elektroindustrie. Die Forschung und Entwicklung von Wolfram-Kupfer-Elektroden begann in den 1940er Jahren, angetrieben von den einzigartigen Eigenschaften von Wolfram und Kupfer in militärischen und industriellen Anwendungen. Der Schwerpunkt der frühen Forschung lag auf Pulvermetallurgieprozessen, und 1945 berichtete die American Society for Metals (ASM) erstmals über die Herstellung von Wolfram-Kupfer-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verbundwerkstoffen und untersuchte deren Anwendung in elektrischen Kontakten durch Mischen, Pressen und Sintern von Wolfram- und Kupferpulvern. Wolfram-Kupfer-Elektroden wurden zu diesem Zeitpunkt hauptsächlich in einfachen elektrischen Geräten eingesetzt, mit begrenzter Leistung, hoher Porosität und Verbesserungspotenzial bei Leitfähigkeit und Haltbarkeit.

In den 1950er- und 1970er -Jahren erlebte die Entwicklung von Wolfram-Kupfer-Elektroden mit der Einführung der Vakuuminfiltrationstechnologie eine Phase rasanten Wachstums. 1955 entwickelte Siemens erfolgreich das Vakuuminfiltrationsverfahren, bei dem flüssiges Kupfer in das gesinterte Wolframskelett infiltriert wurde, wodurch die Porosität deutlich reduziert und die Dichte und Leitfähigkeit des Materials verbessert wurden. Dieser technologische Durchbruch ermöglichte den Einsatz von Wolfram-Kupfer-Elektroden in der Funkenerosion (EDM) und machte sie ideal für die Bearbeitung harter Materialien wie Wolframkarbid. In den 1960er -Jahren optimierten japanische und amerikanische Unternehmen wie Toshiba und General Electric das Verhältnis und die Mikrostruktur weiter, sodass WCu 70/30 und WCu 80/20 zum Industriestandard wurden und weithin in Hochspannungsschaltern und Schweißelektroden verwendet werden.

In den 1980er- bis 2000er -Jahren erweiterten sich die Anwendungsgebiete von Wolfram-Kupfer-Elektroden auf die Mikroelektronik sowie die Luft- und Raumfahrt, was Innovationen in der Herstellungstechnologie vorantrieb. 1985 wurde die Technologie des heißisostatischen Pressens (HIP) eingeführt, die die Gleichmäßigkeit und mechanische Festigkeit des Materials verbesserte und den Anforderungen einer hochpräzisen Verarbeitung gerecht wurde. In den 1990er- Jahren erhöhte die Einführung von Nano-Wolframpulver den Grad der Kornverfeinerung und verbesserte die Verschleißfestigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit. Nach 2000, mit dem Aufkommen der additiven Fertigung und der 3D-Drucktechnologie, verlagerte sich die Herstellung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in Richtung individueller Anpassung, und Elektroden mit komplexen Geometrien wurden möglich. In den 2020er- Jahren konzentrierte sich die Forschung und Entwicklung von Wolfram-Kupfer-Elektroden, kombiniert mit künstlicher Intelligenz und Materialsimulation, auf funktional gradierte Materialien und Oberflächenmodifizierung, um den Anforderungen von 5G-Geräten und Hochtemperatursensoren gerecht zu werden. Bis 2025 sind Wolfram-Kupfer-Elektroden zu Kernmaterialien in der Hochleistungsverarbeitung und Elektronik geworden, und ihre Entwicklungsgeschichte spiegelt die tiefe Integration von technologischer Innovation und Anwendungsanforderungen wider.



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	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 alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 2: Materialbasis der Wolfram-Kupfer-Elektrode

2.1 Eigenschaften von Wolfram

Wolfram, ein wichtiger Bestandteil von Wolfram-Kupfer-Elektroden, besitzt Eigenschaften, die eine einzigartige Grundlage für Hochleistungsanwendungen bilden. Wolfram ist ein Metall mit hohem Schmelzpunkt; sein Schmelzpunkt liegt bei 3422 °C, dem höchsten aller bekannten Metalle. Diese Eigenschaft ermöglicht ihm, seine strukturelle Stabilität in Umgebungen mit extrem hohen Temperaturen aufrechtzuerhalten, und macht es besonders geeignet, dem Lichtbogen und den Hochtemperaturschocks standzuhalten, die beim Funkenerosionsschweißen (EDM) oder Widerstandsschweißen auftreten. Die Dichte von Wolfram von 19,25 g/cm³ verleiht der Elektrode eine hohe Masse und Verformungsbeständigkeit. Ihre Druckfestigkeit kann 1000 MPa übersteigen und ihre Härte beträgt ca. 3430 HV, was eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit und mechanische Festigkeit nachweist. Diese Eigenschaften ermöglichen es ihr, häufiger mechanischer Beanspruchung oder Lichtbogenerosion standzuhalten, wodurch die Lebensdauer der Elektrode verlängert wird. Obwohl ihre Wärmeleitfähigkeit von ca. 174 W/ m·K niedriger ist als die von Kupfer, gleicht ihr hoher Schmelzpunkt diesen Nachteil aus und stellt sicher, dass sie auch bei hohen Temperaturen ihre Form behält.

Die chemische Stabilität von Wolfram ist eine weitere herausragende Eigenschaft. Es ist beständig gegenüber Säuren, Laugen und oxidierenden Substanzen und besonders resistent gegen erhebliche Oberflächenkorrosion in feuchten oder industriellen Umgebungen. Dies garantiert den Einsatz von Wolfram-Kupfer-Elektroden im Außenbereich oder unter rauen Bedingungen. Wolfram hat jedoch eine relativ geringe elektrische Leitfähigkeit (ca. $1,8 \times 10^7$ S/m), was seine alleinige Verwendung einschränkt und die Verbindung mit anderen hochleitfähigen Materialien erfordert. Der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt ca. 4,5 ppm/°C und entspricht damit vielen Keramik- oder Halbleitermaterialien. Dies reduziert die Spannung bei Temperaturwechseln und bietet einen Vorteil bei der Verpackung von Mikroelektronik. Wolfram lässt sich schlecht bearbeiten und muss durch Pulvermetallurgie oder Hochtemperatursintern hergestellt werden. Seine feinkörnige Struktur kann jedoch durch Prozessoptimierung die Leistung verbessern. In den letzten Jahren hat die Einführung von Nano-Wolframpulver die Gleichmäßigkeit und Festigkeit von Wolfram weiter verbessert und ihm ein größeres Anwendungspotenzial für hochpräzise Elektroden verliehen.

2.2 Eigenschaften von Kupfer

Kupfer, ein weiterer wichtiger Bestandteil von Wolfram-Kupfer- Elektroden, besitzt Eigenschaften, die ihnen eine außergewöhnliche elektrische und thermische Leistung verleihen. Obwohl der Schmelzpunkt von Kupfer mit 1083 °C niedriger ist als der von Wolfram, ist es aufgrund seiner hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit ein ideales Material für eine effiziente Stromübertragung und Wärmeableitung. Bei Wolfram-Kupfer- Elektroden wird die Kupferphase durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration in das Wolframskelett eingearbeitet, wodurch ein durchgehendes leitfähiges Netzwerk entsteht, das eine stabile Stromübertragung beim EDM oder Schweißen gewährleistet. Mit einer Dichte von 8,96 g/cm³ ist Kupfer leichter als Wolfram, seine Duktilität und Zähigkeit bieten jedoch zusätzliche mechanische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Flexibilität und verringern so das Risiko eines Sprödbruchs unter mechanischer Belastung.

Die Korrosionsbeständigkeit von Kupfer ist in reinem Zustand gering und wird leicht durch Oxidation oder Sulfidierung beeinträchtigt. In Wolfram-Kupfer- Verbundwerkstoffen bietet die chemische Stabilität des Wolframs jedoch Schutz, und die Kupferoberfläche kann zusätzlich mit einer Beschichtung (wie Nickel oder Gold) überzogen werden, um ihre Witterungsbeständigkeit zu verbessern. Kupfer hat einen relativ hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten von etwa 17 ppm/°C, aber durch die Kombination mit Wolfram passt es zu Silizium- oder Keramiksubstraten und ist daher für mikroelektronische Anwendungen geeignet. Kupfer lässt sich hervorragend bearbeiten, was präzises Schneiden und Formen erleichtert und die Herstellung komplexer Elektrodenformen unterstützt. Die Tendenz von Kupfer, bei hohen Temperaturen weich zu werden, schränkt jedoch seine alleinige Verwendung ein, sodass es auf Wolfram als Verstärkung angewiesen ist. In den letzten Jahren wurde hochreines Elektrolytkupfer weithin eingesetzt, um die Auswirkungen von Verunreinigungen auf die elektrische und thermische Leitfähigkeit zu reduzieren. Die Eigenschaften von Kupfer verleihen Wolfram-Kupfer-Elektroden eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, wodurch sie in elektrischen und thermischen Managementanwendungen gute Leistungen erbringen.

2.3 Wolfram-Kupfer-Verbundmechanismus

Der Mechanismus der Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe ist der Schlüssel zum Verständnis der Grundlagen der Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Er umfasst die Wechselwirkung zwischen Wolfram und Kupfer auf mikroskopischer Ebene und die Optimierung des Herstellungsprozesses. Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Das Grundprinzip besteht darin, den hohen Schmelzpunkt von Wolfram als Gerüst und den niedrigen Schmelzpunkt von Kupfer als Füllphase zu nutzen, um ein komplementäres Leistungssystem zu bilden. Bei der Pulvermetallurgie werden Wolframpulver und Kupferpulver in einem bestimmten Verhältnis gemischt, zu einem Rohling gepresst und anschließend bei hoher Temperatur gesintert. Das Kupfer benetzt die Wolframpartikel in der flüssigen Phase, füllt die Poren und bildet eine gleichmäßige Verbundstruktur. Durch Vakuuminfiltration wird zunächst ein poröses Wolframgerüst hergestellt, das dann in einer Vakuumumgebung über den Schmelzpunkt von Kupfer erhitzt wird. Flüssiges Kupfer infiltriert und füllt den Rohling, wodurch die Dichte des Materials erhöht wird.

Der Kern des Verbundmechanismus liegt in der physikalischen und chemischen Unverträglichkeit von Wolfram und Kupfer. Zwischen den beiden bildet sich keine nennenswerte Verbindung, und die Grenzfläche ist hauptsächlich mechanisch gebunden und teilweise diffundiert, wodurch Phasenübergänge oder die Bildung spröder Phasen minimiert werden. Das Wolframskelett bietet strukturelle Unterstützung und Hochtemperaturbeständigkeit, während die Kupferphase ein kontinuierliches Netzwerk bildet und die elektrische und thermische Leitfähigkeit optimiert. In der Mikrostruktur sind Wolframpartikel typischerweise als unregelmäßige Polygone mit einer Größe von 5 bis 20 Mikrometern verteilt. Kupfer füllt die Poren, und die Porosität kann auf unter 1 % gehalten werden. Wärmebehandlung und druckunterstützte Verfahren (wie heißisostatisches Pressen) verbessern die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grenzflächenbindung und Gleichmäßigkeit weiter. Der Verbundmechanismus beinhaltet auch eine Anpassung der Wärmeausdehnung.

2.3.1 Physikalische Verträglichkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die physikalische Kompatibilität von Wolfram-Kupfer-Elektroden ist ein wichtiger Bestandteil ihres Verbundmechanismus. Dabei kommt es auf die Abstimmung der thermischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Wolfram und Kupfer an. Die thermische Kompatibilität spiegelt sich zunächst in der Übereinstimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) wider. Wolfram hat einen CTE von 4,5 ppm/°C, Kupfer hingegen von 17 ppm/°C. Bei alleiniger Verwendung ist der Unterschied erheblich. Durch Anpassung des Verbundverhältnisses (z. B. WCu 85/15) kann der endgültige CTE jedoch auf 6–8 ppm/°C gesteuert werden, nahe an dem von Silizium- oder Keramiksubstraten, wodurch die Spannungskonzentration bei Temperaturwechseln reduziert wird. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig bei mikroelektronischen Gehäusen und Sensoranwendungen, um Verformungen oder Brüche des Gehäuses zu verhindern.

Die mechanische Verträglichkeit zeigt sich im Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit. Wolfram hat eine Härte von bis zu 3430 HV, Kupfer hingegen nur von etwa 70 HV. Durch die Compoundierung liegt die Härte von Wolfram-Kupfer-Elektroden üblicherweise zwischen 200 und 300 HV und vereint Verschleißfestigkeit mit Duktilität. Das Wolframskelett bietet mechanischen Halt, während die Kupferphase die Zähigkeit erhöht, Aufprallenergie absorbiert und Sprödbrüchen vorbeugt, insbesondere beim EDM, wo der Oberflächenverschleiß der Elektroden reduziert wird. Die elektrische Verträglichkeit ist der Kern. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer und die geringere Leitfähigkeit von Wolfram ($1,8 \times 10^7$ S/m) werden durch ein kontinuierliches Netzwerk von Kupferphasen koordiniert. Die elektrische Leitfähigkeit liegt bei nahezu 80–90 % von reinem Kupfer und erfüllt damit die Anforderungen für die Hochstromübertragung.

Zur physikalischen Kompatibilität gehört auch die Grenzflächenstabilität. Zwischen Wolfram und Kupfer findet keine nennenswerte chemische Reaktion statt; die Grenzfläche ist primär mechanisch gebunden und diffundiert, was die Bildung spröder Phasen minimiert und die Langzeitstabilität verbessert. Der Vakuuminfiltrationsprozess optimiert die Grenzflächenbenetzung, reduziert ungefüllte Poren und verbessert die Dichte. Auch die Wärmeleitfähigkeit spiegelt die Kompatibilität wider: Die Kupferphase dominiert die Wärmeleitung und die Wolframphase sorgt für thermische Stabilität. Zukünftig könnten Nanopulver oder Oberflächenmodifizierungen die Kompatibilität weiter verbessern und Anwendungen in anspruchsvolleren Umgebungen ermöglichen, wie z. B. Hochtemperatursensoren oder 5G-Geräte.

2.3.1.1 Strukturelle Kompatibilität

Bei Wolfram-Kupfer-Elektroden ist die physikalische Kompatibilität entscheidend. Dabei spielen die geometrische Übereinstimmung und die Grenzflächenstabilität der Wolfram- und Kupfer-Mikrostrukturen eine entscheidende Rolle, was sich direkt auf die mechanischen Eigenschaften und die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

langfristige Zuverlässigkeit der Elektrode auswirkt. Die strukturelle Kompatibilität spiegelt sich vor allem in der Abstimmung zwischen dem Wolframgerüst und der Kupferfüllphase wider, die durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren erreicht wird. Bei der Pulvermetallurgie werden Wolframpulver (typischerweise 5–20 Mikrometer groß) und Kupferpulver in einem bestimmten Verhältnis (z. B. WCu 70/30) gemischt und zu einem Grünkörper gepresst. Beim Sintern benetzt das flüssige Kupfer die Wolframpartikel und füllt die Poren. Dadurch entsteht eine Verbundstruktur mit Wolfram als kontinuierlichem Gerüst und Kupfer als dispergierter Phase. Der Vakuuminfiltrationsprozess erzeugt zunächst ein poröses Wolframgerüst. Dieses wird dann im Vakuum über den Schmelzpunkt von Kupfer (1083 °C) erhitzt, wodurch flüssiges Kupfer eindringen und die Poren füllen kann. Dies reduziert die Porosität erheblich (normalerweise unter 1 %) und verbessert die Dichte und Konsistenz des Materials. Die Wolframpartikel sind in einem unregelmäßigen polygonalen Muster verteilt, wobei das Kupfer die Lücken gleichmäßig füllt. Die Schnittstelle ist hauptsächlich mechanisch verzahnt und diffundiert, wodurch das Risiko von Mikrorissen oder Delamination minimiert wird. Strukturelle Kompatibilität spiegelt sich auch in der Gleichmäßigkeit der Korngröße und Phasenverteilung wider. Feine Körner, die durch die Einführung von Nano-Wolframpulver erreicht werden, verbessern die mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit und erreichen eine Druckfestigkeit von über 1000 MPa und eine Härte zwischen 200 und 300 HV. Das kontinuierliche Netzwerk aus Kupferphasen unterstützt die Integrität des leitfähigen Pfads und verringert die Widerstandsvariabilität. Mikroskopische Analysen zeigen, dass die gleichmäßige Phasenverteilung die Gesamtstabilität der Elektrode verbessert. Beim Funkerosionsbearbeiten (EDM) verringert die strukturelle Gleichmäßigkeit die Entladungsvariabilität und verbessert die Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächenqualität. Bei mikroelektronischen Gehäusen gewährleistet die strukturelle Kompatibilität eine spannungsarme Verbindung mit Silizium (CTE ca. 2,6 ppm/°C) oder Keramiks substraten und verhindert so Verformungen oder Brüche bei Temperaturwechseln. Mechanische Tests und Rasterelektronenmikroskopie haben gezeigt, dass die Stabilität der Grenzflächenbindung der Schlüssel zur strukturellen Kompatibilität ist und Ausfälle durch thermische oder mechanische Spannungen reduziert.

Darüber hinaus ist der Herstellungsprozess entscheidend für die strukturelle Kompatibilität. Beim Heißisostatischen Pressen (HIP) wird Druck in alle Richtungen bei hohen Temperaturen eingesetzt, um die Poren weiter zu verdichten, die Grenzflächenbindung zwischen Wolfram und Kupfer zu verbessern und die Ermüdungsbeständigkeit des Materials zu erhöhen. Durch Nanotechnologie hergestellte ultrafeine Pulver erhöhen die Korngrenzenfestigkeit und eignen sich daher für hochpräzise Elektroden. Zur Optimierung der strukturellen Kompatibilität gehören auch die Kontrolle der Pulverpartikelgröße und die Anpassung der Sinterparameter. Zukünftige dynamische Simulationen und Prozessinnovationen werden die Kornverteilung weiter verfeinern und die Porosität auf unter 0,5 % reduzieren. Dies ermöglicht Anwendungen mit komplexen Geometrien oder hoher Haltbarkeit, wie z. B. Komponenten für die Luft- und Raumfahrt oder Elektroden für 5G-Geräte.

2.3.1.2 Thermische Verträglichkeit

Die thermische Verträglichkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden ist ein Schlüsselement ihrer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

physikalischen Verträglichkeit. Dabei geht es um die Koordination von Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit zwischen Wolfram und Kupfer, was sich auf die Stabilität und Zuverlässigkeit der Elektrode bei Temperaturwechselbeanspruchung und in Hochtemperaturumgebungen auswirkt. Der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) von Wolfram beträgt 4,5 ppm/°C, der von Kupfer 17 ppm/°C. Während der Unterschied bei alleiniger Verwendung erheblich ist, kann der CTE von Wolfram-Kupfer-Elektroden durch Anpassung des Verbundverhältnisses auf 6–8 ppm/°C gesteuert werden. Dieser Wert ähnelt dem von Silizium- (ca. 2,6 ppm/°C) oder Aluminiumoxidkeramik-Substraten (ca. 7 ppm/°C). Dies reduziert die Spannungskonzentration bei Temperaturwechselbeanspruchung und verhindert Verformungen oder Brüche des Gehäuses. Dies ist besonders effektiv bei mikroelektronischen Gehäusen und Hochtemperatursensoranwendungen. Das Erreichen der thermischen Verträglichkeit beruht auf der Optimierung des Wolfram- Kupfer-Verhältnisses. Beispielsweise ist ein WCu -Verhältnis von 85/15 bei hohen Temperaturen gut geeignet. Thermische Simulationen haben die Spannungsarmut bestätigt, wobei die Wärmeausdehnung bis auf 10 % mit der des Siliziumsubstrats übereinstimmt.

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein weiterer wichtiger Aspekt der thermischen Verträglichkeit. Kupfer hat eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 400 W/ m· K und ist damit höher als Wolfram mit 174 W/ m· K . Die Wärmeleitfähigkeit einer Wolfram-Kupfer-Verbundelektrode liegt zwischen 180 und 220 W/ m· K . Die Kupferphase dominiert die Wärmeleitung, während die Wolframphase für die thermische Stabilität sorgt. Beim EDM sorgt die hohe Wärmeleitfähigkeit für eine schnelle Entladungswärmeverteilung (die augenblicklich Temperaturen von Tausenden von °C erreicht) und verhindert so eine lokale Überhitzung der Elektrode, die zu Verformungen oder Verbrennungen im Werkstück führen könnte. Zudem verbessert sich die Oberflächenqualität. Beim Widerstandsschweißen verringert eine gleichmäßige Wärmeverteilung die Wärmeeinflusszone (WEZ) und verbessert so die Festigkeit und Haltbarkeit der Schweißverbindung. Zur thermischen Verträglichkeit gehören auch unterschiedliche Schmelzpunkte. Der Schmelzpunkt von Wolfram von 3422 °C und der Schmelzpunkt von Kupfer von 1083 ° C werden durch Flüssigphasensintern harmonisiert. Das Kupfer füllt das Wolframskelett bei hohen Temperaturen und verbessert so die thermische Stabilität. Experimentelle Daten zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit von WCu 70/30 einen stabilen Betrieb bei einem Strom von 200 A und einer Temperatur von 300 °C unterstützt. Die Einführung feiner Körner durch Nanotechnologie optimiert den Wärmeleitungspfad weiter und reduziert den Wärmewiderstand um etwa 15 %.

Die thermische Kompatibilität wird auch von der Mikrostruktur beeinflusst. Geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung verringern die Streuung bei der Wärmeleitung, während heißisostatisches Pressen (HIP) die Wärmeleitfähigkeit der Schnittstelle verbessert. Thermische Ermüdungstests zeigen, dass die Verformungsrate von Wolfram-Kupfer-Elektroden bei Temperaturwechselbeanspruchung von -50 °C bis 300 °C weniger als 0,1 % beträgt, was ihre ausgezeichnete thermische Stabilität belegt. Durch ein funktionales Gradientendesign (bei dem der Wolframgehalt von innen nach außen allmählich abnimmt) oder die Einführung von Zwischenphasen (wie Molybdän) kann die thermische Kompatibilität künftig weiter optimiert werden, um noch größere Temperaturunterschiede oder komplexe Anforderungen an das Wärmemanagement zu bewältigen, wie etwa bei Hochtemperatur-Drucksensoren oder Stromversorgungsgeräten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.2 Leistungssynergie von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die synergetische Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden ist die ultimative Manifestation ihres Verbundmechanismus. Diese Synergie beinhaltet die komplementären Effekte von Wolfram und Kupfer hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, mechanischer Festigkeit und Haltbarkeit, die zusammen die Gesamtleistung der Elektrode in einer Vielzahl von Anwendungen verbessern. Diese synergetische Leistung beruht auf optimierten Herstellungsprozessen wie Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration, um eine gleichmäßige Verteilung und Grenzflächenstabilität zwischen dem Wolframskelett und dem Kupferfüllstoff sicherzustellen. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) bietet Beständigkeit gegen hohe Temperaturen und Lichtbogenerosion, während die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit von Kupfer die elektrische und thermische Managementleistung optimiert. Die Wolfram-Kupfer-Verbundelektrode erreicht ein Gleichgewicht zwischen einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von 6–8 ppm/°C und einer Wärmeleitfähigkeit von 180–220 W/ m· K und erfüllt damit die Anforderungen mikroelektronischer Gehäuse und Hochtemperatursensoren. Die geringe Porosität und die feine Korngröße der Mikrostruktur verbessern die mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit, was zu einer Druckfestigkeit von über 1000 MPa und einer Härte zwischen 200 und 300 HV führt.

2.3.2.1 Synergie von elektrischer und thermischer Leitfähigkeit

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind ein zentraler Ausdruck ihrer synergetischen Leistung. Diese Synergie beruht auf den komplementären elektrischen und thermischen Eigenschaften von Wolfram und Kupfer, die die Effizienz der Elektrode in EDM-, Schweiß- und Mikroelektronikanwendungen direkt steigern. Die elektrische Leitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Kupferphase gewährleistet, die eine hohe Leitfähigkeit von $5,8 \times 10^7$ S/m aufweist und ein durchgehendes leitfähiges Netzwerk bildet, das eine effiziente Stromübertragung gewährleistet. Trotz der geringeren Leitfähigkeit von Wolfram in Wolfram-Kupfer-Elektroden kann durch Optimierung des Kupferanteils (z. B. WCu Bei WCu 70/30 kann die Leitfähigkeit 80–90 % der von reinem Kupfer erreichen und erfüllt damit die hohen Stromanforderungen der Funkenerosion und die niedrigen Widerstandsanforderungen des Schweißens. Die gleichmäßige Verteilung der Kupferphase in der Mikrostruktur reduziert Widerstandsschwankungen und verbessert die Entladungsstabilität, insbesondere bei Präzisionsbearbeitungsanwendungen wie Mikroformen. Experimentelle Daten zeigen, dass WCu 70/30 unter Hochstrombedingungen eine elektrische Leitfähigkeit nahe der von reinem Kupfer erreicht und so eine hochpräzise und effiziente Bearbeitung ermöglicht.

Die Synergie der Wärmeleitfähigkeit ist eng mit der elektrischen Leitfähigkeit verbunden. Kupfer hat eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 400 W/ m· K, die deutlich höher ist als die von Wolfram mit 174 W/ m· K. Die Wärmeleitfähigkeit der Wolfram-Kupfer-Verbundelektrode liegt zwischen 180 und 220 W/ m· K. Die Kupferphase dominiert die Wärmeübertragung, während die Wolframphase für thermische Stabilität sorgt. Beim EDM leitet die Wärmeleitfähigkeit die Entladungswärme schnell an die Außenseite der Elektrode ab und verhindert so eine lokale Überhitzung, die zu Verformungen oder Verbrennungen im Werkstück führen könnte. Beim Widerstandsschweißen reduziert die gleichmäßige Wärmeverteilung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Wärmeeinflusszone (WEZ), wodurch die Festigkeit und Haltbarkeit der Schweißverbindung verbessert und die WEZ innerhalb von 0,1 mm gehalten wird. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) stellt die strukturelle Integrität unter Hochtemperatur-Lichtbogenbedingungen sicher, während der niedrige Schmelzpunkt von Kupfer (1083 °C) die Kontinuität des Wärmeleitungs-pfads durch Flüssigphasenfüllung verbessert. Die Wärmeleitfähigkeit eines WCu -Verhältnisses von 85/15 unterstützt einen stabilen Betrieb bei 300 °C.

Diese synergetische Leistung zeigt sich auch in der Kombination aus niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten und Wärmeleitfähigkeit, die die thermische Spannung verringert und die Langzeitstabilität verbessert. Durch die Nanotechnologie werden feine Körner (<5 Mikrometer) eingeführt, wodurch das elektrische und thermische Leitfähigkeitsnetzwerk weiter optimiert und der Wärmewiderstand um ca. 15 % bzw. 10 % gesenkt wird, sodass sich die Technologie für die Wärmeableitung von Hochleistungs-chips eignet. In der Praxis zeigt sich die synergetische Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in Hochspannungsschalterkontakten und 5G-Geräten, beispielsweise durch die Aufrechterhaltung der Leitfähigkeitsstabilität und der Wärmemanagementeffizienz bei einem Strom von 500 A. In Zukunft kann der synergetische Effekt durch Anpassung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses, Einführung einer Zwischenphase (wie Molybdän) oder Oberflächenmodifizierung (wie Versilberung) verstärkt werden, um höhere Ströme oder komplexe Wärmemanagementanforderungen zu bewältigen, beispielsweise bei Hochtemperatursensoren oder Stromübertragungsgeräten.

2.3.2.2 Synergie zwischen Hochtemperaturbeständigkeit und Strukturstabilität

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind ein Schlüsselement ihrer Leistungssynergie. Diese Synergie beruht auf den komplementären Effekten von Wolfram und Kupfer in Hochtemperaturumgebungen und gewährleistet die Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer der Elektrode unter extremen Bedingungen. Die Hochtemperaturbeständigkeit von Wolfram wird hauptsächlich durch Wolfram gewährleistet, dessen Schmelzpunkt bei 3422 °C liegt – der höchste aller Metalle. Dank dieser Eigenschaft können Wolfram-Kupfer-Elektroden Lichtbogenschlägen von bis zu 3000 °C bei der Funkenerosion (EDM) oder beim Widerstandsschweißen standhalten, ohne nennenswert zu schmelzen oder sich zu verformen. In Verbundstrukturen dient Wolfram als Skelettmaterial und bildet ein hochfestes, thermisch stabiles Netzwerk, das thermischen Spannungen bei hohen Temperaturen standhält. In praktischen Anwendungen, wie der Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte (wie Wolframstahl) oder der Trennung bei hohen Strömen, gewährleistet die Hochtemperaturbeständigkeit von Wolfram die Integrität der Elektrodenoberfläche und reduziert Ablation und Materialverlust.

Die Synergie der strukturellen Stabilität hängt von der Kupferfüllung und der Optimierung der Mikrostruktur ab. Kupfer hat einen Schmelzpunkt von 1083 °C. Beim Sintern oder bei der Vakuuminfiltration füllt es das Wolframskelett in flüssiger Form und erhöht so die Dichte des Materials. Die Porosität wird üblicherweise unter 1 % gehalten. Diese porenarme Struktur reduziert das Risiko von Mikrorissen bei Temperaturwechselbeanspruchung. Die Duktilität der Kupferphase absorbiert zusätzlich thermische Spannungen und verhindert Sprödbrüche. Die gleichmäßige Verteilung von Wolframpartikeln und Kupfer in der Mikrostruktur wird durch Pulvermetallurgie oder heißisostatisches

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pressen (HIP) erreicht. Die feinen Körner verbessern die Ermüdungsbeständigkeit und die Druckfestigkeit kann über 1000 MPa erreichen.

Die Synergie zwischen Hochtemperaturbeständigkeit und struktureller Stabilität spiegelt sich auch in der Anpassung der Wärmeausdehnung wider. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram ist proportional zum hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kupfer, was zu einem zusammengesetzten Wärmeausdehnungskoeffizienten von 6–8 ppm/°C führt, der dem von Silizium (2,6 ppm/°C) oder Keramiksubstraten nahekommt und die thermische Spannungskonzentration reduziert. In mikroelektronischen Gehäusen verhindert diese Eigenschaft Verformungen zwischen Chip und Elektroden; in Hochtemperatursensoren unterstützt sie den langfristigen Hochtemperaturbetrieb. Oberflächenbehandlungen (wie Vernickelung) erhöhen die Oxidationsbeständigkeit zusätzlich und verlängern die Lebensdauer in feuchten oder industriellen Umgebungen.

2.4 Anforderungen an die wichtigsten Rohstoffe für Wolfram-Kupfer-Elektroden

Anforderungen an die Reinheit der Rohstoffe

Als Schlüsselmaterial, das in vielen High-End-Bereichen weit verbreitet ist, hängt die Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden eng mit der Qualität der verwendeten Schlüsselrohstoffe – Wolframpulver und Kupferpulver – zusammen. Hochreine Rohstoffe sind der Grundstein für die hervorragende Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Bei der Herstellung von Wolfram-Kupfer-Elektroden muss die Reinheit des Wolframpulvers üblicherweise über 99,9 % liegen. Selbst in einigen Anwendungsszenarien mit extrem hohen Anforderungen an die Elektrodenleistung, wie etwa der ultrapräzisen Funkenerosion, muss die Reinheit höher sein. Denn das Vorhandensein von Verunreinigungen, selbst in kleinsten Mengen, kann Defekte innerhalb der Elektrode verursachen und die Gleichmäßigkeit der Materialstruktur zerstören. Enthält das Wolframpulver beispielsweise Verunreinigungselemente wie Eisen und Nickel, können diese Verunreinigungen beim Hochtemperatursintern mit Wolfram und Kupfer reagieren und spröde Phasen bilden, wodurch die Festigkeit und Zähigkeit der Elektrode verringert wird und sie während des Gebrauchs anfällig für Risse oder sogar Brüche wird.

Ebenso ist die Reinheit des Kupferpulvers entscheidend. Die Reinheit von hochwertigem Kupferpulver sollte in der Regel nicht unter 99,95 % liegen. Unreines Kupferpulver kann Oxide, Feuchtigkeit oder andere Verunreinigungen enthalten, die die Leitfähigkeit und Duktilität des Kupfers stark beeinträchtigen. In Wolfram-Kupfer-Elektroden trägt Kupfer hauptsächlich zu einer guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit bei. Ist das Kupferpulver unrein, verringert sich die elektrische und thermische Leitfähigkeit der Elektrode erheblich.

Kontrolle der Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung

Neben der Reinheit sind auch die Partikelgröße und -verteilung von Wolfram- und Kupferpulvern wichtige Faktoren für die Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Die Partikelgröße muss je nach den verschiedenen Herstellungsverfahren und endgültigen Anwendungsszenarien genau ausgewählt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Im herkömmlichen pulvermetallurgischen Verfahren zur Herstellung von Wolfram-Kupfer-Elektroden wird die Partikelgröße von Wolframpulver im Allgemeinen zwischen 1 und 10 µm kontrolliert. Feineres Wolframpulver kann die Kontaktfläche zwischen Wolfram und Kupfer vergrößern, die Diffusion und Verschmelzung zwischen den Elementen während des Sinterprozesses fördern und die Bildung einer gleichmäßigeren und dichteren Mikrostruktur erleichtern, wodurch die Festigkeit und Härte der Elektrode verbessert und sie besser für die Verarbeitung von Materialien mit hoher Härte geeignet wird. Zu feines Wolframpulver kann jedoch auch einige Probleme mit sich bringen, wie z. B. eine schlechte Fließfähigkeit, die eine gleichmäßige Verteilung während des Pulvermisch- und -formprozesses erschwert und leicht zu einer ungleichmäßigen Dichte im Grünkörper führt. Gröberes Wolframpulver weist zwar eine bessere Fließfähigkeit auf, vergrößert jedoch die inneren Poren der gesinterten Elektrode im Verhältnis, wodurch die Dichte verringert und die Gesamtleistung der Elektrode beeinträchtigt wird.

Kupferpulver hat typischerweise eine relativ feine Partikelgröße. Dies liegt daran, dass Kupfer einen niedrigeren Schmelzpunkt hat und sich daher die Lücken zwischen Wolframpartikeln während des Sinterprozesses leichter füllen lässt. Kupferpulver mit der richtigen Partikelgröße gewährleistet eine gute Benetzbarkeit und bildet gleichzeitig eine stabile Grenzfläche mit Wolfram. Beispielsweise kann das Kupfer bei EDM-Elektroden bei entsprechender Partikelgröße die Wärme schnell ableiten, wenn sich die Elektrode während der Entladung lokal erwärmt. So wird übermäßiger Verschleiß der Elektrode durch lokale Überhitzung verhindert.

Darüber hinaus ist auch die Gleichmäßigkeit der Partikelgrößenverteilung entscheidend. Idealerweise sollten sowohl Wolfram- als auch Kupferpulver eine enge Partikelgrößenverteilung aufweisen. Ist die Partikelgrößenverteilung zu breit, können sich Partikel unterschiedlicher Größe beim Mischen leicht trennen, was zu einer ungleichmäßigen Zusammensetzung und Leistung des endgültigen Elektrodenmaterials führt. So können beispielsweise Bereiche mit großen Wolframpulverpartikeln zwar eine hohe Härte, aber keine ausreichende Zähigkeit aufweisen, während Bereiche mit kleinen Partikeln eine geringe Dichte aufweisen können, was zu Leistungseinbußen im Einsatz führt.

Umfassender Einfluss der Rohstoffeigenschaften auf die Elektrodenleistung

Die inhärenten Eigenschaften von Wolfram und Kupfer spielen eine entscheidende Rolle für die Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Der extrem hohe Schmelzpunkt (3410 °C) und die Härte von Wolfram verleihen Wolfram-Kupfer-Elektroden eine ausgezeichnete Hochtemperatur- und Verschleißfestigkeit. In Hochtemperaturumgebungen, beispielsweise beim Betrieb von Hochspannungsentladungsröhrenelektroden, wo die momentane Temperatur des Kontaktmaterials Tausende von Grad Celsius erreichen kann, erhält Wolfram die Grundform und strukturelle Integrität der Elektrode und verhindert so Erweichung und Verformung durch hohe Temperaturen. Darüber hinaus macht seine hohe Härte die Elektrode weniger verschleißanfällig bei der Bearbeitung von Werkstücken mit hoher Härte, wie beispielsweise beim EDM von Hartmetallformen, und gewährleistet so die Bearbeitungsgenauigkeit.

Kupfer mit seiner hervorragenden elektrischen und thermischen Leitfähigkeit verleiht Wolfram-Kupfer-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektroden die Vorteile einer schnellen Wärmeableitung und effizienten Stromleitung. Beim Funkenerosionsschweißen erzeugen häufige Entladungen zwischen Elektrode und Werkstück eine große Menge Wärme. Kupfer kann diese Wärme schnell ableiten, wodurch die Elektrodentemperatur gesenkt, Wärmeverformung und Wärmeermüdung verringert und die Lebensdauer der Elektrode verlängert wird. Eine gute elektrische Leitfähigkeit gewährleistet einen stabilen Entladungsprozess und verbessert die Bearbeitungseffizienz. Wenn Wolframpulver und Kupferpulver in einem bestimmten Verhältnis gemischt werden, ergänzen und synergetisch wirken die beiden, um die Leistung der Wolfram-Kupfer-Elektrode zu bestimmen. Ein geeignetes Wolfram-Kupfer-Verhältnis sorgt für ein optimales Gleichgewicht zwischen Festigkeit, Härte, elektrischer und thermischer Leitfähigkeit und Ablationsbeständigkeit. Beispielsweise erfordern Widerstandsschweißelektroden im Allgemeinen eine höhere Härte und Leitfähigkeit, und der Wolframgehalt kann entsprechend erhöht werden.

2.4.1 Anforderungen an Wolframpulver

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind entscheidend für die Gewährleistung der strukturellen Stabilität und Leistung während des Verbundprozesses. Diese Anforderungen betreffen Reinheit, Partikelgröße und Morphologie. Reinheit ist von größter Bedeutung und erfordert Verunreinigungen unter 0,1 %, insbesondere Sauerstoff, Kohlenstoff und Eisen. Übermäßige Verunreinigungen können Korngrenzen schwächen und die Leitfähigkeit verringern, was die Elektrodenleistung beeinträchtigt. Internationale Normen wie ASTM B702 schreiben vor, dass hochreines Wolframpulver durch Wasserstoffreduktion oder chemische Fällung mit einem Sauerstoffgehalt unter 0,05 % hergestellt werden muss. Die Partikelgröße ist ein weiterer wichtiger Parameter. Die Partikelgröße variiert typischerweise zwischen 1 und 20 Mikrometer. Feine Partikel werden durch Nanotechnologie eingebracht, um die Korngleichmäßigkeit und mechanische Festigkeit zu verbessern, während grobe Partikel (> 20 Mikrometer) für die grobe Elektrodenverarbeitung verwendet werden. Die Wahl der Partikelgröße hängt von der Anwendung ab. Die Morphologie erfordert sphärisches oder nahezu sphärisches Wolframpulver, um die Porosität zu reduzieren und die Sinterdichte zu erhöhen. Rasterelektronenmikroskopische Analysen zeigen, dass sphärische Pulver eine bessere Fließfähigkeit als unregelmäßige Pulver aufweisen und die Fülleffizienz um etwa 15 % verbessern. Um die chemische Stabilität zu gewährleisten, muss Wolframpulver sauren und alkalischen Umgebungen standhalten, um Oxidation während des Herstellungsprozesses zu verhindern. Die Dicke der Oberflächenoxidschicht muss unter 10 nm gehalten werden. Die Fließfähigkeit, gemessen mit der Hall-Effekt-Durchflussmethode, liegt über 20 s/50 g, wodurch eine gleichmäßige Pulvermischung gewährleistet wird. Die Schüttdichte von Wolframpulver beeinflusst die Verdichtung und muss auf Kupferpulver abgestimmt werden, um das Risiko einer Delaminierung zu verringern. Herstellungsverfahren wie Plasmasphäroidisierung oder mechanisches Legieren können die Partikelgrößenverteilung optimieren. Hochreine Nano-Wolframpulver können in Zukunft die mikrostrukturelle Konsistenz von Elektroden verbessern und sie so für hochpräzise Anwendungen wie mikroelektronische Verpackungen und 5G-Geräte geeignet machen.

2.4.2 Anforderungen an Kupferpulver

Bei Wolfram-Kupfer-Elektroden liegt der Schwerpunkt auf der Leitfähigkeit und den Fülleigenschaften,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

um die elektrischen und thermischen Managementfähigkeiten des Verbundmaterials sicherzustellen. Reinheit ist eine zentrale Anforderung. Der Verunreinigungsgehalt des Kupferpulvers muss weniger als 0,05 % betragen und der Sauerstoffgehalt muss unter 0,03 % gehalten werden. Zu viel Sauerstoff kann zur Bildung von Kupferoxid führen und so die Leitfähigkeit und Benetzbarkeit verringern. Elektrolytisches Kupferpulver oder zerstäubtes Kupferpulver wird durch Zerstäuben von hochreinem Elektrolyt oder Inertgas hergestellt und entspricht der Norm ASTM B413. Die Partikelgröße beträgt typischerweise zwischen 5 und 15 Mikrometer. Eine feine Partikelgröße verbessert die Fülleffizienz, während eine grobe Partikelgröße für schnelles Sintern geeignet ist. Sie muss auf die Partikelgröße des Wolframpulvers abgestimmt sein und das Partikelgrößenverhältnis muss zwischen 1:2 und 1:3 gehalten werden, um die Phasenverteilung zu optimieren.

Das Kupferpulver muss eine kugelförmige oder nahezu kugelförmige Form haben, um die Porosität zu minimieren und die Fließfähigkeit zu verbessern. Die Hall-Effekt-Flussrate muss besser als 15 s/50 g sein, die Schüttdichte muss etwa 4–6 g/cm³ betragen und das Pulver muss auf koordinierte Weise mit dem Wolframpulver verdichtet werden. Für die chemische Stabilität ist eine weniger als 5 nm dicke Oxidschicht auf der Oberfläche erforderlich, um die Porenbildung während des Sinterns zu verhindern. Eine Oberflächenbehandlung (wie etwa eine organische Beschichtung) kann die Oxidationsbeständigkeit verbessern. Die elektrische Leitfähigkeit muss an die von reinem Kupfer heranreichen ($5,8 \times 10^7$ S/m), und die Wärmeleitfähigkeit muss etwa 400 W/m·K betragen, um die Leistung der Elektrode zu unterstützen. Herstellungsverfahren wie Wasser- oder Gaszerstäubung können die Pulvereigenschaften beeinflussen. Zukünftige Bemühungen, wie die Verwendung von ultrafeinen Kupferpulvern oder Legierungen (z. B. Cu-Ag), können die Benetzbarkeit und Leitfähigkeitsstabilität verbessern

2.4.3 Standards für die Vorbehandlung von Rohstoffen

Wolfram-Kupfer-Elektroden gewährleisten eine gleichmäßige Pulvermischung und kontrollierbare Herstellungsprozesse, die sich direkt auf die Qualität des Verbundwerkstoffs auswirken. Die Trocknung ist ein kritischer Schritt. Wolfram- und Kupferpulver müssen im Vakuum oder in einer Inertgasumgebung (z. B. Argon) getrocknet werden, um die Bildung von Poren während des Sinterns zu verhindern. Eine gleichmäßige Mischung wird durch eine Kugelmühle oder einen V-Mischer erreicht. Die Partikelgrößenverteilung nach dem Mischen wird auf ± 5 % genau kontrolliert, und die Phasenkonsistenz wird durch Röntgenbeugung (XRD) überprüft.

Die Partikelgrößenklassifizierung erfolgt durch Sieben. Die Siebgröße wird an die Partikelgrößenanforderungen angepasst, um übergroße oder ultrafeine Partikel zu entfernen. Die Standardabweichung der Partikelgrößenverteilung beträgt weniger als 10 %. Die Oberflächenbehandlung umfasst Desoxidation oder Beschichtung, und die Oxidschicht wird durch Wasserstoffreduktion entfernt. Die Fließfähigkeit des Pulvers wird mit der Hall-Durchflussmethode geprüft. Ein Wert von besser als 20 s/50 g gewährleistet eine gleichmäßige Pressung. Lagerung und Transport erfordern eine versiegelte Verpackung, geschützt vor Licht und Feuchtigkeit, um Oxidation zu vermeiden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 3: Physikalische und chemische Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden beruhen auf der Synergie von Wolfram und Kupfer und vereinen die wesentlichen Vorteile beider Metalle. Die physikalische Dichte steigt mit steigendem Wolframgehalt und bleibt insgesamt auf einem hohen Niveau. Der Schmelzpunkt bleibt aufgrund der hohen Schmelzpunkteigenschaften von Wolfram, das reinem Kupfer weit überlegen ist, auf einem hohen Niveau und hält sofortigen Thermoschocks in Hochtemperaturumgebungen stand, ohne sich leicht zu verformen. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit sind hervorragend, und die Elektrode leitet Strom effizient und leitet die während des Betriebs entstehende Wärme schnell ab, wodurch Verluste durch lokale Überhitzung wirksam vermieden werden. Die mechanischen Eigenschaften zeichnen sich durch eine moderate Härte und hohe Druckfestigkeit bei gleichzeitiger Berücksichtigung eines gewissen Zähigkeitsgrads aus und brechen bei mechanischen Stößen nicht so leicht. Darüber hinaus ist der lineare Ausdehnungskoeffizient niedrig und die thermische Stabilität ausgezeichnet. Selbst in Umgebungen mit großen Temperaturschwankungen bleibt die Größe stabil, sodass sich die Elektrode für Präzisionsbearbeitungsszenarien mit hohen Genauigkeitsanforderungen eignet.

3.1 Physikalische Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Wolfram-Kupfer-Elektroden mit Dichte, Wärmeausdehnungskoeffizient, elektrischer Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit bilden die Grundlage für ihre überlegene Leistung in einem breiten Anwendungsspektrum. Diese Eigenschaften wirken sich direkt auf die Stabilität und Effizienz der Elektrode beim EDM, Schweißen und in der mikroelektronischen Verpackung aus. Die physikalischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden beruhen auf den kombinierten Eigenschaften von Wolfram und Kupfer: Wolfram bietet einen hohen Schmelzpunkt und mechanische Festigkeit, während Kupfer eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit beiträgt. Die Optimierung der Mikrostruktur durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren führt zu einer gleichmäßigen Phasenverteilung und geringer Porosität. Diese kombinierte Leistung ermöglicht es Wolfram-Kupfer-Elektroden, ihre Zuverlässigkeit auch bei hohen Temperaturen, hohen Stromstärken und komplexen Umgebungen aufrechtzuerhalten.

3.1.1 Dichte der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Die physikalischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden sind ein wichtiger Indikator. Sie spiegeln die Dichte und Porosität im Material wider und wirken sich direkt auf die mechanische Festigkeit, die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit aus. Die Dichteigenschaften ergeben sich aus dem Verhältnis von Wolfram und Kupfer und der Optimierung des Herstellungsprozesses. Die hohe Dichte von Wolfram und die geringere Dichte von Kupfer werden durch ein bestimmtes Verhältnis ausgeglichen, um einen Verbundwerkstoff mit spezifischen Masse- und Volumeneigenschaften zu bilden. Die Dichte bestimmt die Verschleißfestigkeit und Verformungsbeständigkeit der Elektrode während der Verarbeitung. In mikroelektronischen Anwendungen trägt eine angemessene Dichte dazu bei, die Elektrode an das Substrat anzupassen und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Spannungskonzentrationen zu reduzieren. Herstellungsverfahren wie Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration beeinflussen die Gleichmäßigkeit der endgültigen Dichte erheblich, indem sie Sintertemperatur und -druck steuern. Eine geringere Porosität geht normalerweise mit höheren Dichtewerten einher, was die Gesamtleistung des Materials verbessert.

Die Messung und Kontrolle der Dichte ist bei der Herstellung von Wolfram-Kupfer- Elektroden von entscheidender Bedeutung und beeinflusst ihre Leistung in praktischen Anwendungen, beispielsweise die Materialabtragsrate bei der Funkenerosion oder die Effizienz des Wärmemanagements beim Schweißen. Je nach Anwendungsszenario kann es erforderlich sein, das Wolfram-Kupfer-Verhältnis anzupassen, um die Dichteigenschaften zu optimieren. Beispielsweise eignen sich Elektroden mit hoher Dichte besser für Szenarien, die eine lange Lebensdauer erfordern, während Elektroden mit geringerer Dichte für Leichtbaukonstruktionen verwendet werden können. Phasenverteilung und Kompaktheit in der Mikrostruktur sind Schlüsselfaktoren für die Dichteleistung, und künftige Forschungen können die Dichtesteuerbarkeit durch neue Verfahren weiter verbessern. In diesem Abschnitt werden Dichteberechnungsmethoden näher untersucht und ihre Rolle bei der Leistungsoptimierung analysiert.

3.1.1.1 Dichteberechnungsmethode

Die Dichteberechnung ist ein wissenschaftlicher Ansatz zur Bestimmung der Dichte von Wolfram-Kupfer- Elektroden. Sie umfasst sowohl experimentelle Messungen als auch theoretische Ableitungen mit dem Ziel, die innere Kompaktheit und Porosität des Materials genau zu bestimmen. Eine häufig verwendete Methode ist die Archimedische Methode, die den Massenunterschied zwischen der Elektrode in Luft und Flüssigkeit misst und dies mit dem Volumen kombiniert, um die Dichte zu berechnen. Diese Methode nutzt den Auftrieb eines Objekts in einer Flüssigkeit. Die Trockenmasse der Elektrode wird zuerst gewogen und dann in eine bestimmte Flüssigkeit (wie destilliertes Wasser) getaucht. Der Massenunterschied nach dem Eintauchen wird gemessen und das Volumen wird indirekt mithilfe der Auftriebsformel berechnet. Die Dichte wird dann als Verhältnis von Masse zu Volumen berechnet. Diese Methode eignet sich für unregelmäßig geformte Elektrodenproben. Es ist wichtig sicherzustellen, dass die Flüssigkeit nicht chemisch mit dem Material reagiert, und die Temperatur zu kontrollieren, um Fehler zu minimieren.

Ein anderer Ansatz ist die theoretische Berechnung. Dabei werden Mischungsregeln verwendet, um die Gesamtdichte des Verbundwerkstoffs anhand der Volumenanteile und jeweiligen Dichten von Wolfram und Kupfer zu schätzen. Diese Methode erfordert genaue Angaben zu den Komponentenverhältnissen und geht davon aus, dass Wolfram und Kupfer während des Verbundprozesses keine signifikanten Volumenänderungen erfahren. Die Dichte ist ein gewichteter Durchschnitt der Dichten der Komponenten. Die Berechnung muss die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung berücksichtigen. Tatsächlich gemessene Werte können aufgrund von Porosität oder mikroskopischen Defekten von den theoretischen Werten abweichen und müssen durch mikroskopische Analyse korrigiert werden. Theoretische Berechnungen eignen sich für vorläufige Konstruktionen und Prozessoptimierungen, experimentelle Ergebnisse müssen jedoch überprüft werden. Zusätzlich können Röntgentomographie (XCT) oder Quecksilbereindringanalyse zur zerstörungsfreien Prüfung der Elektrodenporosität und Dichteverteilung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eingesetzt werden. Diese Methoden bewerten die Dichte der inneren Struktur durch Bildrekonstruktion oder Druckeindringanalyse und eignen sich für Elektroden mit komplexen Geometrien. Die Wahl der Berechnungsmethode hängt von den experimentellen Bedingungen und Genauigkeitsanforderungen ab. Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit werden häufig mehrere Methoden kombiniert.

3.1.1.2 Zusammenhang zwischen Dichte und Zusammensetzung

Die Beziehung zwischen Dichte und Zusammensetzung ist der Schlüssel zum Verständnis der physikalischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden, da sie den Einfluss des Verhältnisses von Wolfram zu Kupfer auf die Dichte und Massenverteilung des Materials widerspiegelt. Die Dichte von Wolfram-Kupfer-Elektroden wird hauptsächlich durch das Verhältnis ihrer Komponenten bestimmt. Wolfram hat eine höhere Dichte als Kupfer. Eine Erhöhung des Wolframgehalts führt üblicherweise zu einer Erhöhung der Gesamtdichte, während die geringere Dichte von Kupfer bei hohen Kupfergehalten eine verdünnende Wirkung hat. Das Zusammensetzungsverhältnis wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren präzise gesteuert. Beispielsweise dominieren bei den gängigen Verhältnissen WCu 70/30 und WCu 80/20 die hohen Dichteigenschaften von Wolfram, während der Fülleffekt von Kupfer die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur optimiert. Änderungen der Zusammensetzung wirken sich direkt auf die Phasenverteilung aus. Wolfram bietet als Gerüstmaterial strukturelle Unterstützung, und Kupfer füllt die Poren in Form einer flüssigen Phase. Durch Anpassen des Verhältnisses ändern sich Porosität und Dichte des Materials und somit die Dichteleistung.

Die Abhängigkeit der Dichte von der Zusammensetzung hängt auch eng mit dem Herstellungsprozess zusammen. In der Pulvermetallurgie bestimmen das Partikelgrößenverhältnis und die Gleichmäßigkeit der Mischung von Wolfram- und Kupferpulver die Gleichmäßigkeit der Komponentenverteilung. Sintertemperatur und -druck beeinflussen zusätzlich die Benetzungs- und Füllwirkung des Kupfers und wirken sich somit auf die endgültige Dichte aus. Bei der Vakuuminfiltration hängen die Porosität des Wolframskeletts und die Eindringtiefe des Kupfers direkt vom Zusammensetzungsverhältnis ab. Ein hoher Wolframgehalt kann zu einer unzureichenden Porenfüllung und einer geringeren Dichte führen, während ein hoher Kupfergehalt die Fülleffizienz verbessert. Mikrostrukturanalysen zeigen, dass geringfügige Änderungen des Zusammensetzungsverhältnisses zu Unterschieden im Phasengrenzflächenbereich führen und sich somit auf die Gesamtdichte des Materials auswirken. Theoretisch lässt sich die Beziehung zwischen Dichte und Zusammensetzung mithilfe eines gewichteten Durchschnittsmodells ableiten, bei dem der Beitrag der Dichte jeder Komponente nach dem Volumenanteil gewichtet wird. Der tatsächliche Wert wird jedoch von der Porosität und der Grenzflächenbindung beeinflusst und muss experimentell überprüft werden.

Darüber hinaus wird das Verhältnis zwischen Zusammensetzung und Dichte auch durch Verunreinigungen und Zusatzstoffe beeinflusst. Geringe Mengen an Verunreinigungen können die Grenzflächeneigenschaften verändern und die Dichtestabilität beeinträchtigen. Unterschiedliche Anwendungen stellen unterschiedliche Anforderungen an Zusammensetzung und Dichte. Beispielsweise eignen sich Elektroden mit hoher Dichte besser für verschleißfeste Anwendungen, während Elektroden mit niedriger Dichte für Leichtbaukonstruktionen verwendet werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.1.3 Einfluss der Dichte auf Anwendungen

Die Dichte ist einer der wichtigsten Leistungsparameter von Wolfram-Kupfer- Elektroden. Ihr Niveau und ihre Verteilung bestimmen direkt die Anwendbarkeit, Stabilität und Effizienz der Elektrode in verschiedenen Anwendungsszenarien. Insbesondere in High-End-Bereichen wie EDM, Schweißen und Mikroelektronik-Verpackung können geringe Dichteunterschiede zu erheblichen Leistungsschwankungen führen und somit den Gesamtprozesseffekt beeinträchtigen.

1. Die Beziehung zwischen Dichte und mechanischen Eigenschaften und ihre Auswirkungen auf die Anwendung

Wolframkupferelektroden weisen eine positive Korrelation mit ihrer mechanischen Festigkeit und Verschleißfestigkeit auf. Elektroden mit hoher Dichte weisen eine extrem geringe innere Porosität auf, und die Wolframpartikel und Kupferphasen sind eng miteinander verbunden und bilden eine dichte Mikrostruktur. Dadurch kann das Material Spannungen bei äußeren Kräften oder hohen Temperaturen gleichmäßig verteilen, wodurch lokale Brüche oder Verformungen unwahrscheinlicher werden. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig beim Funkenerosionsschweißen: Hochfrequenzentladungen zwischen Elektrode und Werkstück erzeugen augenblicklich hohe Temperaturen und mechanische Stöße. Elektroden mit hoher Dichte können dank ihrer höheren Druckfestigkeit und Verformungsbeständigkeit der Aufprallkraft während des Entladungsprozesses effektiv standhalten, Ablationsspuren an der Oberfläche reduzieren und das Risiko lokaler Einbrüche aufgrund einer losen Struktur verringern. Beispielsweise können Wolframkupferelektroden mit hoher Dichte bei der Präzisionsbearbeitung hochfester Materialien wie Formstahl eine stabile Formgenauigkeit aufrechterhalten und einen gleichmäßigen Entladungsspalt gewährleisten. Dadurch verbessern sie die Oberflächengüte und Maßgenauigkeit des Werkstücks und verlängern die Lebensdauer einer einzelnen Elektrode.

Im Gegensatz dazu haben Elektroden mit geringer Dichte mehr Poren im Inneren, was die Grenzfläche zwischen Wolfram und Kupfer verringert und die allgemeine Verschleißfestigkeit des Materials reduziert. Dieser Elektrodentyp eignet sich besser für Verarbeitungsaufgaben mit geringer Belastung und kurzen Zyklen, wie z. B. die EDM-Bearbeitung kleiner Kunststoffteile, bei der relativ geringe Anforderungen an Präzision und Haltbarkeit gestellt werden. Hier macht sich der Kostenvorteil von Elektroden mit geringer Dichte bemerkbar. Bei Verarbeitungsszenarien mit hoher Energie und langer Laufzeit werden die Poren von Elektroden mit geringer Dichte jedoch zu Spannungskonzentrationspunkten. Mit zunehmender Verarbeitungszeit bilden sich wahrscheinlich Mikrorisse um die Poren herum, was schließlich zum Versagen der Elektrode führt und die Austauschhäufigkeit sowie die Produktionskosten erhöht.

2. Einfluss der Dichte auf die Wärmeleitfähigkeit und Prozessoptimierung

Die Dichte ist der Hauptfaktor, der die Wärmeleitfähigkeit von Wolframkupferelektroden beeinflusst. Eine hohe Dichte geht normalerweise mit einer besseren Wärmeleitfähigkeitseffizienz einher. Im Material dient die Kupferphase als Hauptwärmeleiter und die Kontinuität ihrer Verteilung hängt direkt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von der Materialdichte ab: In Elektroden mit hoher Dichte kann die Kupferphase die Lücken zwischen den Wolframpartikeln gleichmäßiger füllen und ein kontinuierliches Wärmeleitnetzwerk bilden, wodurch die im Verarbeitungsbereich erzeugte Wärme (wie die momentan hohe Temperatur während einer elektrischen Funkenentladung) schnell in das Innere der Elektrode diffundieren und durch die Gerätehalterung abgeleitet werden kann, wodurch das Risiko einer lokalen Überhitzung verringert wird. Diese effiziente Wärmeableitungsfähigkeit ist entscheidend für die Verarbeitungsgenauigkeit – wenn sich Wärme auf der Elektrodenoberfläche staut, führt dies zu einem plötzlichen lokalen Temperaturanstieg, der nicht nur das Oberflächenmaterial der Elektrode schmelzen oder verdampfen und so zu einem Verlust der Elektrodengröße führen kann, sondern auch die Entladungsstabilität beeinträchtigt. Beispielsweise können bei der Präzisionsbearbeitung komplexer gekrümmter Oberflächen wie etwa Flugzeugtriebwerksschaufeln die effizienten Wärmeableitungseigenschaften hochdichter Wolframkupferelektroden die Temperaturstabilität während der Langzeitbearbeitung sicherstellen, die Konsistenz der Entladungsparameter aufrechterhalten und letztendlich eine hochpräzise Formgebung des Werkstücks erreichen.

Elektroden mit geringer Dichte weisen eine diskontinuierliche Kupferphasenverteilung auf. Die Poren behindern die Wärmeleitung, bilden eine „Wärmewiderstandszone“ und verringern die Wärmeableitungseffizienz. Bei Verarbeitungsszenarien mit geringer Leistung ist dieser Defekt möglicherweise nicht offensichtlich, aber bei der Hochenergie-Elektroerosion (z. B. der Grobbearbeitung großer Formen) erhöht die Wärmestauung den Elektrodenverschleiß erheblich. Dadurch muss der Prozess die Entladungsenergie reduzieren, um eine Überhitzung zu vermeiden, was indirekt die Verarbeitungseffizienz verringert. Daher sind Elektroden mit hoher Dichte bei Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Wärmeableitung eine wichtige Wahl zur Verbesserung der Prozessstabilität.

3. Vielfältige Rollen der Dichte bei Schweißanwendungen

Beim Schweißen beeinflusst die Dichte von Wolframkupferelektroden die elektrische Leitfähigkeit und das Wärmemanagement und beeinflusst so direkt die Qualität und Effizienz des Schweißvorgangs. Elektroden mit hoher Dichte weisen eine gleichmäßige Verteilung der Kupferphasen und einen geringeren Widerstand auf. Dadurch wird ein stabiler Stromübertragungspfad für den Schweißprozess gewährleistet und die durch übermäßigen Widerstand entstehende Widerstandswärme reduziert. Diese zusätzliche Wärme verschwendet nicht nur Energie, sondern kann auch zu einer Überhitzung und Verformung der Elektrode selbst führen, wodurch die Kontaktstabilität zwischen Elektrode und Werkstück beeinträchtigt wird. Beim Widerstandspunktschweißen von Automobilkarosserien beispielsweise können Wolframkupferelektroden mit hoher Dichte eine stabile Stromabgabe bei hohen Strömen aufrechterhalten und so die Wärmekonzentration und Linsenbildung an der Schweißstelle sicherstellen, wodurch Defekte wie Kaltschweißnähte oder Schweißdurchdringungen vermieden werden. Bei kontinuierlichen Schweißprozessen wie dem Rollnahtschweißen kann ihre hervorragende elektrische Leitfähigkeit zudem Stromschwankungen reduzieren und die Gleichmäßigkeit der Schweißnaht sicherstellen.

Das Verhältnis zwischen Dichte und Elektrodengewicht wirkt sich auch auf Schweißgeräte aus.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektroden mit hoher Dichte sind schwerer und eignen sich für stationäre automatisierte Schweißgeräte – die Roboterarme oder Vorrichtungen solcher Geräte haben eine hohe Tragfähigkeit, und Gegengewichte können angepasst werden, um einen präzisen Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück zu gewährleisten. Bei tragbaren Schweißgeräten (wie z. B. Handpunktschweißpistolen) erhöhen zu schwere Elektroden jedoch die Arbeitsbelastung des Bedieners. In diesem Fall ist der Gewichtsvorteil von Elektroden mit geringer Dichte deutlicher. Ihr Design muss Gewicht und Leistung ausbalancieren, typischerweise durch Optimierung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses, um die Dichte zu reduzieren und gleichzeitig die elektrische und thermische Leitfähigkeit des Kerns so weit wie möglich zu erhalten.

Darüber hinaus stellt die Temperaturwechselbeanspruchung beim Schweißen besondere Anforderungen an die Elektrodendichte. Elektroden mit hoher Dichte sind aufgrund ihrer dichten Struktur und gleichmäßigeren Wärmeausdehnung weniger anfällig für Risse aufgrund innerer Spannungskonzentrationen beim wiederholten Erhitzen und Abkühlen und eignen sich daher für Hochfrequenzschweißanwendungen (z. B. Serienschweißen in der Haushaltsgeräteproduktion). Bei Elektroden mit geringer Dichte kann es jedoch nach längerer Temperaturwechselbeanspruchung aufgrund von Spannungskonzentrationen um die Poren zu Oberflächenablösungen kommen, was ihre Lebensdauer verkürzt.

4. Die Beziehung zwischen Dichte und Zuverlässigkeit in mikroelektronischen Verpackungen

Mikroelektronik-Gehäuse stellen noch strengere Anforderungen an die Dichte von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Die wichtigste Anforderung besteht darin, eine Anpassung der Wärmeausdehnung und mechanische Stabilität zwischen Elektrode und Substrat zu erreichen. Bei Chip-Gehäusen müssen die Elektroden fest mit Materialien wie Silizium-Wafern und Keramiksubstraten verbunden werden. Unterschiedliche Materialien haben jedoch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten. Ist die Elektrodendichte zu hoch, kann ihr Gesamtwärmeausdehnungskoeffizient erheblich von dem des Substrats abweichen. Bei Temperaturzyklen entstehen an der Schnittstelle zwischen Elektrode und Substrat erhebliche Spannungen. Langfristige Akkumulation kann zu Löttrissen, Schaltkreisunterbrechungen und sogar Gehäuseausfällen führen. Daher müssen Wolfram-Kupfer-Elektroden für Mikroelektronik-Gehäuse die Dichte präzise steuern, um den Wärmeausdehnungskoeffizienten auf einen Bereich nahe dem des Substrats einzustellen. Typischerweise werden Designs mit mittlerer bis hoher Dichte verwendet, die sowohl die strukturelle Dichte zur Unterstützung der Stromübertragung sicherstellen als auch die Wärmespannung durch eine optimierte Porenverteilung (wie eine kleine Anzahl gleichmäßig verteilter Mikroporen) mindern, um langfristige Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Gleichzeitig ist die mechanische Stabilität hochdichter Elektroden für die Mikroelektronik-Verpackung unerlässlich. Bei der Chip-Verpackung müssen die Elektroden den mechanischen Belastungen durch Bonden, Verpacken und andere Prozesse standhalten. Die hohe Druckfestigkeit hochdichter Elektroden verhindert Verformungen oder Brüche durch äußere Kräfte und gewährleistet eine präzise Ausrichtung zwischen Elektroden und Chip-Pins. Bei Elektroden niedriger Dichte mit ungleichmäßiger Porenverteilung kann es jedoch unter dem Bonddruck zu lokalem Kollaps kommen, was die Stabilität der elektrischen Verbindung beeinträchtigt. Beispielsweise kann bei der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochfrequenz-Verpackung von 5G-Chips selbst eine leichte Elektrodenverformung zu erhöhten Signalübertragungsverlusten führen.

5. Einfluss der Dichte auf Herstellungskosten und Szenarioanpassung

Die Dichte steht auch in direktem Zusammenhang mit den Herstellungskosten und dem Verarbeitungsaufwand von Wolframkupferelektroden. Die Herstellung von Elektroden mit hoher Dichte erfordert höhere Sinterdrücke, längere Haltezeiten und sogar sekundäre Druckbeaufschlagungsprozesse, um die innere Porosität zu reduzieren, was zweifellos den Energieverbrauch der Geräte und die Produktionszyklen erhöht. Gleichzeitig ist die Verarbeitung von Materialien mit hoher Dichte (wie Präzisionsschleifen und Drahtschneiden) schwieriger und der Werkzeugverschleiß tritt schneller ein, was die Herstellungskosten weiter in die Höhe treibt. In High-End-Anwendungsszenarien (wie der Verarbeitung von Präzisionskomponenten für Luft- und Raumfahrttriebwerke) überwiegen die Leistungsvorteile jedoch, um die Kostensteigerung auszugleichen. Die Verluste durch Geräteausfälle oder Produktverschrottung übersteigen die Kosten der Elektrode bei weitem, und aufgrund der Haltbarkeit werden Elektroden mit hoher Dichte bevorzugt. Der Herstellungsprozess von Elektroden mit niedriger Dichte ist relativ einfach. Niedrigere Sinterdrücke und kürzere Verarbeitungszeiten können die Kosten senken, aber aufgrund der Leistungseinschränkungen eignen sich Elektroden eher für kostensensible Szenarien, die keine extremen Leistungen erfordern (wie das Schweißen von Low-End-Komponenten für Unterhaltungselektronik). Darüber hinaus haben bestimmte Branchen individuelle Anforderungen an die Dichte: Um das Gesamtgewicht zu reduzieren, werden in der Luft- und Raumfahrttechnik in den nicht zum Kern gehörenden Komponenten tendenziell Wolfram-Kupfer-Elektroden mit geringer Dichte verwendet, um durch strukturelles Design die erforderliche Festigkeit bei gleichzeitiger Gewichtsreduzierung zu erhalten. Die Elektroden von Kernkraftanlagen hingegen erfordern ein Design mit hoher Dichte, um Materialalterung und Korrosion in Strahlungsumgebungen zu widerstehen und einen langfristig stabilen Betrieb zu gewährleisten.

3.1.2 Thermische Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die thermischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden sind ein wichtiger Bestandteil ihrer physikalischen Eigenschaften. Sie umfassen Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizienten und Hochtemperaturbeständigkeit, die sich direkt auf die Leistung der Elektrode in Hochtemperaturumgebungen und Wärmezyklen auswirken. Die Wärmeleitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Kupferphase gewährleistet. Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer stellt sicher, dass Wärme schnell vom Verarbeitungs- oder Betriebsbereich nach außen abgeleitet wird, wodurch die lokalen Temperaturen gesenkt und Überhitzung, Verformung oder Beschädigung des Werkstücks verhindert werden. Die moderate Wärmeleitfähigkeit von Wolfram und der synergistische Effekt der Kupferphase bilden die umfassenden Wärmemanagementfähigkeiten des Verbundwerkstoffs, der sich für Szenarien mit hoher Wärmebelastung beim Funkenerosionsschweißen und Schweißen eignet. Zu den thermischen Eigenschaften zählt auch der Wärmeausdehnungskoeffizient. Die geringen Wärmeausdehnungseigenschaften von Wolfram und die hohen Wärmeausdehnungseigenschaften von Kupfer werden durch proportionale Anpassung ausgeglichen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verbundwerkstoffs entspricht dem einer Vielzahl von Substraten, um thermische Spannungen zu reduzieren.

Hohe Temperaturbeständigkeit ist der Kern der thermischen Leistung. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram verleiht der Elektrode Stabilität bei extrem hohen Temperaturen. Die Kupferphase füllt die Poren bei hohen Temperaturen in flüssiger Form, wodurch die thermische Stabilität verbessert und die Elektrode für Lichtbogenumgebungen geeignet wird. Die geringe Porosität und die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur optimieren den Wärmeleitpfad zusätzlich, und das heißisostatische Pressverfahren verbessert die Wärmeleitfähigkeit der Schnittstelle. Thermische Ermüdungstests zeigen, dass Wolfram-Kupfer-Elektroden ihre strukturelle Integrität über einen weiten Temperaturbereich behalten und sich daher für mikroelektronische Verpackungen und Sensoranwendungen eignen. Zukünftig können funktionale Gradientendesigns oder Oberflächenmodifikationen die thermische Leistung weiter verbessern, um noch höheren Temperaturunterschieden oder komplexen Anforderungen an das Wärmemanagement gerecht zu werden.

3.1.2.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist der wichtigste Indikator für die Wärmeleistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Sie spiegelt die Fähigkeit des Materials wider, Wärme zu übertragen, und wirkt sich direkt auf seine Leistung bei Anwendungen mit hoher Wärmebelastung aus. Die Wärmeleitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Kupferphase gewährleistet. Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer stellt sicher, dass Wärme schnell vom Verarbeitungsbereich oder Arbeitsbereich nach außen abgeleitet wird, wodurch Verformungen oder Werkstückschäden durch lokale Überhitzung vermieden werden. Die moderate Wärmeleitfähigkeit von Wolfram und der synergistische Effekt der Kupferphase bilden die allgemeine Wärmemanagementfähigkeit des Verbundwerkstoffs, der für die Wärmeableitungsanforderungen von Hochenergieentladungen bei der Funkenerosion geeignet ist. Während des Herstellungsprozesses wird der Wärmeleitungsweg durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationstechnologie optimiert, indem das Verhältnis von Wolfram und Kupfer sowie die Sinterbedingungen gesteuert werden. Die geringe Porosität und gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur verringern den Wärmewiderstand und verbessern die Wärmeleitfähigkeit.

Die Wärmeleitfähigkeit hängt auch eng mit der Mikrostruktur und dem Zusammensetzungsverhältnis der Elektrode zusammen. Ein hoher Kupfergehalt (z. B. WCu 70/30) führt im Allgemeinen zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit. Das durchgängige Netzwerk der Kupferphasen sorgt für einen effizienten Wärmeleitungs Kanal, während das Wolframskelett die strukturelle Stabilität bei hohen Temperaturen aufrechterhält. Bei Schweißanwendungen sorgt eine höhere Wärmeleitfähigkeit für eine gleichmäßige Wärmeverteilung, reduziert die Wärmeeinflusszone und verbessert die Verbindungsqualität. In mikroelektronischen Gehäusen unterstützt die Wärmeleitfähigkeit die Wärmeableitung der Chips, senkt die Betriebstemperaturen und verlängert die Lebensdauer. Das heißisostatische Pressverfahren (HIP) optimiert die Grenzflächenbindung durch omnidirektionalen Druck und verbessert so die Wärmeleitfähigkeit weiter. Die Wärmeleitfähigkeit wird auch durch Umweltfaktoren beeinflusst. Beispielsweise kann die Erweichung der Kupferphase bei hohen Temperaturen die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeübertragungskapazität leicht verringern, die unterstützende Rolle des Wolframs erhält jedoch die Gesamtstabilität. In praktischen Anwendungen hängt die Optimierung der Wärmeleitfähigkeit von spezifischen Szenarien ab. Beispielsweise erfordert die Hochleistungsverarbeitung Elektroden mit höherer Wärmeleitfähigkeit, während bei Leichtbaukonstruktionen die Wärmeleitfähigkeit zugunsten einer geringeren Dichte beeinträchtigt werden kann. Wärmeleitfähigkeitstests werden typischerweise mit Laserblitzen oder stationären Wärmeflussmethoden durchgeführt. Zukünftige Verbesserungen der Wärmeleitfähigkeit könnten durch die Einführung von Nanotechnologie oder funktionalem Gradientendesign (z. B. Erhöhung des Kupfergehalts von innen nach außen) erreicht werden, um höheren Wärmelasten gerecht zu werden, beispielsweise bei 5G-Geräten oder Hochtemperatursensoren.

3.1.2.2 Wärmeausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) ist ein entscheidender Faktor für die thermische Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Er spiegelt die Fähigkeit des Materials wider, bei Temperaturschwankungen sein Volumen zu ändern, und beeinflusst direkt seine Kompatibilität mit dem Substrat und seine Temperaturwechselbeständigkeit. Der CTE wird hauptsächlich durch die Eigenschaften von Wolfram und Kupfer bestimmt. Der niedrige CTE von Wolfram (ca. 4,5 ppm/°C) und der hohe CTE von Kupfer (ca. 17 ppm/°C) werden durch Anpassung des Verbundverhältnisses ausgeglichen. Der CTE von Wolfram-Kupfer-Elektroden wird normalerweise zwischen 6 und 8 ppm/°C geregelt. Dieser Wert liegt nahe an dem von Silizium- (ca. 2,6 ppm/°C) oder Aluminiumoxidkeramik-Substraten (ca. 7 ppm/°C). Dadurch wird die Spannungskonzentration während der Temperaturwechselbeanspruchung reduziert und ein Verziehen oder Brechen des Gehäuses verhindert. Daher eignen sich diese Elektroden besonders gut für mikroelektronische Gehäuse und Sensoranwendungen. Die Anpassung des CTE hängt vom W/Cu-Verhältnis und dem Herstellungsprozess ab. Beispielsweise zeigt ein WCu -Verhältnis von 85/15 eine hervorragende Leistung bei hohen Temperaturen. Thermische Simulationen haben seine geringen Spannungseigenschaften bestätigt, und die Wärmeausdehnungskompatibilität mit dem Siliziumsubstrat liegt innerhalb von 10 %. Die gleichmäßige Phasenverteilung und die geringe Porosität in der Mikrostruktur minimieren die unterschiedliche Wärmeausdehnung zusätzlich. Das heißstatische Pressverfahren verbessert die thermische Stabilität der Schnittstelle und verringert das Risiko von Mikrorissen während thermischer Zyklen. Beim EDM stellt ein moderater Wärmeausdehnungskoeffizient die Fähigkeit der Elektrode sicher, sich nach einer energiereichen Entladung zu erholen. Beim Schweißen reduziert die Anpassung der Wärmeausdehnung die Verbindungsspannung und verbessert die Haltbarkeit. Der Wärmeausdehnungskoeffizient wird auch von der Umgebungstemperatur und der Langzeitnutzung beeinflusst. Das Erweichen der Kupferphase bei hohen Temperaturen kann die Ausdehnung leicht erhöhen, aber die Unterstützung des Wolframskeletts erhält die Gesamtstabilität.

3.1.2.3 Hohe Temperaturbeständigkeit

Die Hochtemperaturbeständigkeit ist ein herausragendes Merkmal der thermischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Sie spiegelt die strukturelle Stabilität des Materials und seine Fähigkeit wider, seine Leistung in Umgebungen mit extrem hohen Temperaturen aufrechtzuerhalten, und bestimmt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

direkt seine Eignung für Anwendungen mit hoher Wärmebelastung. Diese Hochtemperaturbeständigkeit wird hauptsächlich durch Wolfram gewährleistet, dessen Schmelzpunkt mit 3422 °C der höchste aller Metalle ist. Dank dieser Eigenschaft behalten Wolfram-Kupfer-Elektroden ihre strukturelle Integrität bei Lichtbogenentladungen oder Hochtemperaturschweißen und widerstehen Schmelzen oder Verformungen. In der Verbundstruktur fungiert Wolfram als Skelettmaterial und bildet ein hochfestes, thermisch stabiles Netzwerk. Die Kupferphase füllt bei hohen Temperaturen in flüssiger Form die Poren, wodurch die allgemeine thermische Stabilität des Materials verbessert und es für die Funkenerosion von Materialien mit hoher Härte oder Trennvorgänge in Hochspannungsschaltern geeignet wird. Die Hochtemperaturbeständigkeit hängt auch von der Mikrostruktur und dem Herstellungsprozess ab. Geringe Porosität und gleichmäßige Phasenverteilung werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren erreicht, wodurch die thermische Spannungskonzentration bei hohen Temperaturen reduziert wird. Heißisostatisches Pressen (HIP) optimiert die Grenzflächenbindung zusätzlich und verbessert die Wärmeermüdungsbeständigkeit. Beim EDM reduziert die Hochtemperaturbeständigkeit die Ablation an der Elektrodenoberfläche unter energiereichen Entladungen und verlängert so die Lebensdauer. Die Hochtemperaturbeständigkeit wird auch von der Kupferphase beeinflusst. Kupfer hat einen niedrigen Schmelzpunkt (1083 °C) und kann bei extrem hohen Temperaturen weich werden, aber die Unterstützung des Wolframskeletts erhält die strukturelle Integrität. Oberflächenbehandlungen (wie Vernickeln) verbessern die Oxidationsbeständigkeit zusätzlich und verlängern die Lebensdauer in feuchten oder industriellen Umgebungen.

3.2 Funktionale Leistung der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Wolfram-Kupfer-Elektroden in praktischen Anwendungen liegt in ihrer elektrischen Leitfähigkeit, Lichtbogenerosionsbeständigkeit, mechanischen Haltbarkeit und ihren Wärmemanagementfähigkeiten. Diese Eigenschaften beruhen auf den zusammengesetzten Eigenschaften von Wolfram und Kupfer. Durch Optimierung des Herstellungsprozesses und der Mikrostruktur zeigen Wolfram-Kupfer-Elektroden Multifunktionalität in EDM, beim Schweißen und in der mikroelektronischen Verpackung. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch die Kupferphase bereitgestellt, wodurch eine effiziente Stromübertragung sichergestellt wird; die Lichtbogenerosionsbeständigkeit wird durch den hohen Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram unterstützt, wodurch Oberflächenverluste reduziert werden; die mechanische Haltbarkeit wird durch gleichmäßige Phasenverteilung und geringe Porosität erreicht, was den Betrieb bei hoher Belastung unterstützt; und das Wärmemanagement kombiniert die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer mit der Stabilität von Wolfram, um die Leistung in Hochtemperaturumgebungen zu optimieren.

3.2.1 Leitfähigkeitseigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden bilden die Grundlage ihres funktionalen Werts und bestimmen direkt ihre elektrische Effizienz und langfristige Zuverlässigkeit in Bereichen wie EDM, Schweißen und Mikroelektronik-Verpackung. Diese einzigartige Leistung beruht auf der synergetischen Wirkung von Wolfram und Kupfer: Kupfer, ein natürlich leitfähiges Metall, bildet innerhalb der Elektrode ein kontinuierliches Stromübertragungsnetzwerk und bietet einen Pfad mit geringem Widerstand für den

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ladungsfluss; während der hohe Schmelzpunkt und die hohe Festigkeit von Wolfram ein robustes Gerüst bilden, das die strukturelle Stabilität der Elektrode unter rauen Betriebsbedingungen wie hohen Temperaturen und mechanischer Belastung aufrechterhält und eine Überhitzung oder Verformung der Kupferphase verhindert, die zu einer Unterbrechung des leitfähigen Pfads führen könnte. Diese Kombination aus beiden behält die Leitfähigkeitsvorteile von Kupfer bei und behebt gleichzeitig die Nachteile von reinem Kupfer in Bezug auf Festigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit. Damit sind Wolfram-Kupfer-Elektroden die ideale Wahl für komplexe elektrische Umgebungen.

Mikrostrukturelle Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit

Wolfram-Kupfer-Elektroden hängen eng mit ihrer Mikrostruktur zusammen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Verteilung der Kupferphase und der Bindungsqualität der Wolfram-Kupfer-Grenzfläche. Durch Verfahren wie Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration lässt sich die Mikrostruktur präzise steuern. Bei der Pulvermetallurgie werden Wolfram- und Kupferpulver in einem bestimmten Verhältnis gemischt, gepresst und gesintert, sodass die Kupferphase die Lücken zwischen den Wolframpartikeln gleichmäßig füllt und eine dichte „Wolframskelett-Kupfer-Füllstruktur“ bildet. Bei der Vakuuminfiltration wird flüssiges Kupfer bei hohen Temperaturen in ein vorgesintertes Wolframskelett eingebracht. Dabei wird die Kapillarwirkung genutzt, um eine gleichmäßige Verteilung der Kupferphase zu erreichen. Beide Verfahren zielen darauf ab, innere Porosität und Grenzflächendefekte zu reduzieren. Porosität kann den Strompfad blockieren und zu einem plötzlichen Anstieg des lokalen Widerstands führen, während eine schlechte Grenzflächenbindung einen „Kontaktwiderstand“ bilden kann, der den Widerstand gegen Ladungsübertragung erhöht. Geringe Porosität und gleichmäßige Phasenverteilung sind daher Voraussetzungen für eine hohe Leitfähigkeit. Sie sorgen für eine gleichmäßige Stromleitung innerhalb der Elektrode und vermeiden so Wärmekonzentrationen oder Stromschwankungen durch lokale Widerstandsunterschiede.

Das Wolfram-Kupfer-Verhältnis ist ein wichtiger Parameter zur Regulierung der elektrischen Leitfähigkeit. Je höher der Kupfergehalt, desto besser ist theoretisch die elektrische Leitfähigkeit, da mehr Kupferphasen ein dichteres leitfähiges Netzwerk bilden können. Ein zu hoher Kupfergehalt schwächt jedoch die tragende Funktion des Wolframskeletts, wodurch die Elektrode bei hohen Temperaturen weicher wird und sich leicht verformt. In der Praxis muss das Verhältnis der beiden Werte je nach den Anforderungen des Szenarios ausgeglichen werden: Beispielsweise wird für Szenarien, bei denen die Leitfähigkeit im Vordergrund steht, ein höherer Kupfergehalt gewählt, während für Szenarien, bei denen die Hochtemperaturstabilität berücksichtigt werden muss, der Wolframanteil entsprechend erhöht wird. Diese Verhältnisregulierung dient im Wesentlichen dazu, ein Gleichgewicht zwischen „Leitfähigkeit“ und „struktureller Stabilität“ zu finden, um den Kernanforderungen verschiedener Arbeitsbedingungen gerecht zu werden.

Einfluss der Leitfähigkeitseigenschaften auf Anwendungsszenarien

Beim Funkenerosionsschneiden beeinflusst die elektrische Leitfähigkeit direkt die Bearbeitungsgenauigkeit und die Elektrodenlebensdauer. Während der Bearbeitung werden zwischen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektrode und Werkstück Hochfrequenzentladungen erzeugt, die eine Hochtemperaturschmelze erzeugen. Eine stabile Stromübertragung ist Voraussetzung für eine gleichmäßige Entladungsenergie. Wolfram-Kupfer-Elektroden mit hoher Leitfähigkeit ermöglichen eine gleichmäßige Stromverteilung und vermeiden so das Phänomen der „Überentladung“ durch übermäßigen lokalen Widerstand – d. h. ungewöhnlich hohe Temperaturen durch lokale Stromkonzentration, die zu Ablation der Elektrodenoberfläche oder Defekten wie Löchern und Rissen auf der Werkstückoberfläche führen können. Gleichzeitig kann eine hervorragende Leitfähigkeit den Energieverlust reduzieren, mehr elektrische Energie in die für die Bearbeitung benötigte Wärmeenergie umwandeln und die Bearbeitungseffizienz verbessern. Eine stabile Stromübertragung kann zudem die „elektrochemische Korrosion“ der Elektrode reduzieren, die Verlustrate verlangsamen und den Einwegzyklus verlängern.

Beim Schweißen bestimmt die Qualität der elektrischen Leitfähigkeit direkt die gleichbleibende Schweißqualität. Ob Widerstandspunktschweißen oder Nahtschweißen: Die Elektrode muss den Strom effizient an den Schweißbereich übertragen und die Kontaktfläche des Werkstücks durch Widerstandswärme zu einem geschmolzenen Kern verschmelzen. Wolframkupferelektroden mit hoher Leitfähigkeit gewährleisten eine stabile Stromabgabe an der Kontaktstelle zwischen Elektrode und Werkstück und vermeiden so ungleichmäßige Wärmeentwicklung durch Widerstandsschwankungen. Zu geringe Wärme führt zu Kaltschweißen, zu hohe Wärme kann in das Werkstück eindringen oder die Elektrode verkleben lassen. Während des Schweißvorgangs erwärmt sich die Elektrode durch Widerstandswärme. Bei schlechter Leitfähigkeit kann die hohe Temperatur der Elektrode zu Oberflächenoxidation oder -verformung führen, was die Leitfähigkeit weiter verschlechtert und einen Teufelskreis aus Leistungseinbuße und verstärkter Überhitzung bildet. Der niedrige Widerstand hochleitfähiger Elektroden reduziert die Selbsterhitzung und sorgt für langfristig stabile Schweißergebnisse.

Mikroelektronische Gehäuse stellen höhere Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit. Bei der Verbindung zwischen Chip und Substrat muss die Wolframkupferelektrode als leitfähige Verbindung einen niedrigen Widerstand und eine stabile Stromkreisleitung aufweisen, um die Integrität der Signalübertragung zu gewährleisten. Hochfrequente, schnelle elektronische Signale reagieren äußerst empfindlich auf Widerstandsänderungen. Selbst kleine Widerstandsschwankungen können zu Signalverzögerungen oder -dämpfungen führen. Daher müssen die in mikroelektronischen Gehäusen verwendeten Wolframkupferelektroden eine extrem hohe Leitfähigkeitskonsistenz aufweisen und dürfen im Inneren keine lokalen Bereiche mit hohem Widerstand aufweisen, da dies sonst zu einem „Flaschenhals“ bei der Signalübertragung führen kann. Gleichzeitig führt der Temperaturzyklus in der Gehäuseumgebung dazu, dass sich das Material ausdehnt und zusammenzieht. Wenn die Leitfähigkeit aufgrund struktureller Änderungen gedämpft wird, kann dies zu einem schlechten Stromkreiskontakt und sogar zu Geräteausfällen führen. Dies erfordert, dass die Leitfähigkeit der Elektrode bei langfristiger Verwendung stabil bleibt und nicht wesentlich durch Umwelteinflüsse beeinträchtigt wird.

Korrelation und Bedeutung der Kernleitfähigkeitsparameter

Leitfähigkeit, spezifischer Widerstand und Strombelastbarkeit sind die wichtigsten Parameter zur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Messung der Leitfähigkeit von Wolframkupferelektroden. Diese drei Parameter hängen eng zusammen und haben unterschiedliche Schwerpunkte. Die Leitfähigkeit gibt die Fähigkeit eines Materials an, Strom zu leiten. Je höher der Wert, desto besser die Leitfähigkeit; der spezifische Widerstand ist der Kehrwert der Leitfähigkeit, der wiederum den Widerstand gegen Stromübertragung direkt widerspiegelt. In der Praxis bestimmen diese beiden Parameter gemeinsam die Stromstärke der Elektrode bei einer bestimmten Spannung, was wiederum die Effizienz der Energieabgabe beeinflusst. Die Strombelastbarkeit beschreibt den maximalen Strom, der kontinuierlich durch die Elektrode fließen kann, ohne dass es zu Überhitzung oder strukturellen Schäden kommt. Sie hängt nicht nur mit der Leitfähigkeit zusammen, sondern auch eng mit der Wärmeableitungskapazität und der Hochtemperaturbeständigkeit des Materials – eine hohe Leitfähigkeit kann die Joule-Wärme beim Stromdurchgang reduzieren, und die Hochtemperaturbeständigkeit des Wolframskeletts bietet strukturelle Unterstützung für die Übertragung großer Ströme.

Die Balance dieser drei Parameter ist bei der Entwicklung von Wolfram-Kupfer-Elektroden entscheidend. Beispielsweise müssen bei Hochstromanwendungen sowohl eine hohe Leitfähigkeit (zur Minimierung der Wärmeentwicklung) als auch eine hohe Strombelastbarkeit (zur Vermeidung struktureller Ausfälle) gewährleistet sein. In der Präzisionsmikroelektronik hingegen wird mehr Wert auf Stabilität und Gleichmäßigkeit der Leitfähigkeit gelegt, um eine präzise Signalübertragung zu gewährleisten. Die eingehende Erforschung und Kontrolle dieser Parameter bildet die Grundlage für die Optimierung der Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden und die technische Garantie für ihre Anpassungsfähigkeit an verschiedene High-End-Anwendungen.

3.2.1.1 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit ist ein grundlegender Indikator für die Leitungseigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Sie spiegelt die Fähigkeit des Materials wider, Ladung zu übertragen und wirkt sich direkt auf seine Effizienz in elektrischen Anwendungen aus. Die Leitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Kupferphase gewährleistet, deren hohe Leitfähigkeit eine effiziente Stromübertragung innerhalb der Elektrode sicherstellt und ein kontinuierliches leitfähiges Netzwerk bildet. Die Leitfähigkeit von Wolfram ist geringer als die von Kupfer, aber durch optimierte Verbundprozesse (wie ein WCu - Verhältnis von 70/30) kann seine Leitfähigkeit an die von reinem Kupfer heranreichen und so den hohen Strombedarf der Funkenerosion und die niedrigen Widerstandsanforderungen des Schweißens erfüllen. Die gleichmäßige Verteilung der Kupferphase innerhalb der Mikrostruktur verringert Widerstandsschwankungen und verbessert die Entladungsstabilität. Dies gilt insbesondere für Präzisionsbearbeitungsanwendungen (wie Mikroformen), bei denen die Leitfähigkeit direkt die Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächenqualität bestimmt.

Das Erreichen einer hohen elektrischen Leitfähigkeit hängt vom Herstellungsprozess ab. Die Pulvermetallurgie steuert die Benetzung und Füllung des Kupfers durch Sintertemperatur und -druck. Die Vakuuminfiltration optimiert die Phasengrenzfläche durch das Eindringen von flüssigem Kupfer, reduziert die Porosität und minimiert Streueffekte. Heißisostatisches Pressen (HIP) verbessert die Grenzflächenbindung zusätzlich und verbessert die Leitfähigkeitskonsistenz. Die Leitfähigkeit wird auch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch das Zusammensetzungsverhältnis beeinflusst. Ein hoher Kupfergehalt (z. B. WCu 60/40) führt im Allgemeinen zu einer höheren Leitfähigkeit und eignet sich für eine hocheffiziente Verarbeitung, während ein hoher Wolframgehalt (z. B. WCu 90/10) gute Ergebnisse liefert, wenn die Verschleißfestigkeit im Vordergrund steht. In der Praxis unterstützt eine hohe elektrische Leitfähigkeit eine stabile Lichtbogenentladung, reduziert Energieverluste und verlängert die Lebensdauer der Elektroden. Zukünftig kann die Einführung von Nano-Kupferpulver oder Oberflächenmodifizierungen (z. B. Versilberung) die Leitfähigkeit weiter verbessern, um sie an Anwendungen mit höheren Strömen oder Hochfrequenzen wie 5G-Geräten und Stromübertragung anzupassen.

3.2.1.2 Spezifischer Widerstand

Der spezifische Widerstand ist ein weiterer wichtiger Indikator für die Leitfähigkeitseigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Er spiegelt den Widerstand des Materials gegen Stromfluss wider und wirkt sich direkt auf die Effizienz der elektrischen Energieübertragung und Wärmeerzeugung aus. Der spezifische Widerstand wird hauptsächlich durch die Verbundeigenschaften von Wolfram und Kupfer bestimmt. Der niedrige spezifische Widerstand von Kupfer sorgt für einen effizienten Strompfad, während der hohe spezifische Widerstand von Wolfram bei hohen Verhältnissen die Gesamtimpedanz erhöhen kann. Durch Optimierung des Verhältnisses wird der spezifische Widerstand von Wolfram-Kupfer-Elektroden effektiv auf nahezu das Niveau von reinem Kupfer reduziert, wodurch sie sich für Anwendungen eignen, bei denen ein geringer Energieverlust erforderlich ist. Die geringe Porosität und die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur verringern die Elektronenstreuung und verbessern die Widerstandskonstanz, was besonders bei der Stromübertragung über große Entfernungen von Bedeutung ist. Die Steuerung des spezifischen Widerstands hängt vom Herstellungsprozess ab. Die Pulvermetallurgie optimiert die Kontinuität der Kupferphase durch präzises Mischen und Sintern, während die Vakuuminfiltration den spezifischen Widerstand durch das Füllen der Poren mit flüssigem Kupfer weiter reduziert. Wärmebehandlung und druckunterstützte Verfahren (wie HIP) verbessern die Materialdichte und reduzieren den durch Korngrenzen und Defekte verursachten Widerstandsanstieg. Der spezifische Widerstand wird auch von Temperatur und Umgebung beeinflusst. Das Erweichen der Kupferphase bei hohen Temperaturen kann den Widerstand leicht erhöhen, die Unterstützung des Wolframskeletts erhält jedoch die Gesamtstabilität. Bei der Funkenerosion reduziert ein niedriger spezifischer Widerstand thermische Effekte und verbessert die Oberflächenqualität. Beim Schweißen reduziert er den Verbindungswiderstand und verbessert die Effizienz.

3.2.1.3 Strombelastbarkeit

Die Strombelastbarkeit ist ein wichtiger Indikator für die Leitfähigkeitseigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Sie spiegelt die Stabilität und Haltbarkeit der Elektrode unter Hochstrombedingungen wider und bestimmt direkt ihre Eignung für Hochlastanwendungen. Die Strombelastbarkeit wird hauptsächlich durch die hohe Leitfähigkeit der Kupferphase und den hohen Schmelzpunkt von Wolfram unterstützt. Kupfer bietet einen effizienten Stromübertragungspfad, während die Skelettstruktur von Wolfram die Stabilität bei Hochtemperaturlichtbögen aufrechterhält und Schmelzen oder Verformungen verhindert. Wolfram-Kupfer-Elektroden weisen durch optimierte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verhältnisse (wie WCu 80/20) eine außergewöhnlich gute Leistung bei hohen Strömen auf. Die geringe Porosität und die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur verringern das Risiko einer lokalen Überhitzung und verbessern die Strombelastbarkeit.

Das Erreichen der Strombelastbarkeit hängt vom Herstellungsprozess ab. Die Pulvermetallurgie optimiert die Phasenschnittstelle durch Kontrolle von Sinter Temperatur und -druck. Vakuuminfiltration verbessert die Dichte durch Infiltration von flüssigem Kupfer. Heißisostatisches Pressen erhöht die mechanische Festigkeit und Leitfähigkeit des Materials zusätzlich. Ein hoher Wolframgehalt (wie WCu 90/10) verbessert die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und macht es für Anwendungen mit energiereichen Entladungen geeignet, während ein hoher Kupfergehalt (wie WCu 60/40) die niederohmige Übertragung optimiert. Beim EDM unterstützt eine hohe Strombelastbarkeit den Materialabtrag großer Mengen; beim Schweißen gewährleistet sie die Qualität und Haltbarkeit der Verbindung unter hohen Stromstärken. In praktischen Anwendungen wird die Strombelastbarkeit auch von der Umgebungstemperatur und den Wärmeableitungsbedingungen beeinflusst. Ein gutes Wärmemanagement (wie Luft- oder Flüssigkeitskühlung) kann die Strombelastbarkeitsgrenze verbessern. Die Verbesserung der Strombelastbarkeit hängt auch vom Elektrodendesign ab. Komplexe Geometrien erfordern eine gleichmäßige Stromverteilung und eine Oberflächenbehandlung (z. B. Plattieren) kann die Korrosionsbeständigkeit verbessern und die Lebensdauer verlängern.

3.2.2 Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die Leistung einer Wolfram-Kupfer-Elektrode spiegelt ihre Haltbarkeit und Stabilität in Umgebungen mit energiereichen Lichtbogenentladungen wider. Diese Eigenschaft verschafft ihr erhebliche Vorteile in Bereichen wie Funkenerosion (EDM), Widerstandsschweißen und Hochspannungsschalten. Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit beruht hauptsächlich auf dem hohen Schmelzpunkt und der Härte von Wolfram in Kombination mit der Leitfähigkeit und den Fülleigenschaften von Kupfer. Eine Optimierung der Mikrostruktur durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren sowie eine geringe Porosität und gleichmäßige Phasenverteilung erhöhen die Erosionsbeständigkeit zusätzlich. Unter Einwirkung eines Lichtbogens kann es zu Materialverdampfung oder -schmelzen auf der Elektrodenoberfläche kommen. Die Lichtbogenerosionsbeständigkeit wirkt sich direkt auf Bearbeitungsgenauigkeit, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit aus.

3.2.2.1 Lichtbogenerosionsmechanismus

Der Mechanismus der Lichtbogenerosion ist von grundlegender Bedeutung für das Verständnis der Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Er beinhaltet die thermischen Effekte und den Materialverlust, die durch die Lichtbogenentladung auf der Materialoberfläche verursacht werden. Lichtbogenerosion beginnt mit einer Entladung unter Hochspannung oder Hochstrom, die ein Hochtemperaturplasma (bis zu Tausenden von °C) erzeugt. Diese schlagartige Erhitzung der Elektrodenoberfläche führt zu lokalem Schmelzen oder Verdampfen des Materials. Bei Wolfram-Kupfer-Elektroden beeinflusst die Lichtbogenwirkung zuerst die Kupferphase. Wegen seines niedrigen Schmelzpunkts (1083 °C) kann das flüssige Kupfer bei hohen Temperaturen verdampfen oder spritzen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wodurch das Wolframskelett freigelegt wird. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) gewährleistet die strukturelle Stabilität bei Lichtbogenbildung, es kann jedoch zu Oberflächenoxidation oder Mikroablation kommen, wodurch Löcher oder Risse entstehen. Der Erosionsprozess ist auch mit thermischer Spannung verbunden. Schnelles Erhitzen und Abkühlen führt zu Spannungskonzentrationen im Material, die die Ausbreitung von Mikrorissen auslösen können.

Der Lichtbogenablationsmechanismus wird auch von der Mikrostruktur beeinflusst. Geringe Porosität reduziert Wärmekonzentrationspunkte, und eine gleichmäßige Phasenverteilung (wie WCu 70/30) optimiert die Wärmeleitung und verringert das Risiko lokaler Überhitzung. Auch die Lichtbogenenergie und die Entladungsfrequenz beeinflussen den Ablationsgrad. Energiereiche Entladungen verstärken den Materialverlust, während niederfrequente Entladungen möglicherweise nur geringe Oberflächenschäden verursachen. Ablationsprodukte wie Metaldampf oder Oxide können sich auf der Werkstückoberfläche ablagern und die Bearbeitungsqualität beeinträchtigen. Vorbereitungsprozesse wie heißisostatisches Pressen (HIP) verbessern die Ablationsbeständigkeit durch Erhöhung der Dichte und Reduzierung von Verdampfungspunkten in den Poren. Durch die Untersuchung der Lichtbogenenergieverteilung und der Materialphasenumwandlungen kann der Ablationsmechanismus künftig weiter entschlüsselt und das Elektrodendesign optimiert werden.

3.2.2.2 Bewertung der Ablationsresistenz

Die Bewertung der Erosionsbeständigkeit ist eine wissenschaftliche Methode zur Beurteilung der Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Sie umfasst experimentelle Tests und Leistungsanalysen, um die Zuverlässigkeit der Elektroden in praktischen Anwendungen sicherzustellen. Diese Bewertung wird typischerweise durch Lichtbogenerosionstests durchgeführt, bei denen Hochenergieentladungsbedingungen simuliert und der Oberflächenmasseverlust, die Maßänderung und die Oberflächenmorphologie der Elektrode aufgezeichnet werden. Die Masseverlustrate ist ein wichtiger Indikator. Elektroden mit hoher Erosionsbeständigkeit weisen nach längeren Entladungen einen wesentlich geringeren Masseverlust auf als Elektroden aus reinem Kupfer oder Graphit. Ein WCu - Verhältnis von 80/20 zeigt bei 200 A eine außergewöhnlich gute Leistung. Die Maßänderung wird per 3D-Scan gemessen, um den Verschleißgrad entlang des Elektrodenprofils zu beurteilen. Eine niedrige Verschleißrate weist auf eine hohe Erosionsbeständigkeit hin. Bei der Analyse der Oberflächenmorphologie wird ein Rasterelektronenmikroskop (REM) verwendet, um die Mikrostruktur nach der Erosion zu beobachten und Lochtiefe, Rissdichte und Oxidschichtdicke zu beurteilen. Gleichmäßige Erosionsspuren spiegeln die mikrostrukturelle Stabilität wider. Die Erosionsbeständigkeit wird auch durch Lebensdauertests bewertet, bei denen der Leistungsabfall der Elektrode nach einer bestimmten Anzahl von Entladungen erfasst wird. Äußerst langlebige Elektroden behalten sowohl ihre Leitfähigkeit als auch ihre mechanische Festigkeit. Internationale Normen wie ISO 14132 und IEC 62271-102 bieten Prüfrichtlinien, darunter Lichtbogenfestigkeitstests und Bewertungen der thermischen Stabilität. Experimentelle Ergebnisse zeigen, dass Elektroden mit optimierten Herstellungsprozessen (wie Vakuuminfiltration) die Ablationsrate um etwa 30 % reduzieren können.

Bei der Bewertung der Ablationsbeständigkeit wird auch das Anwendungsszenario berücksichtigt. Bei

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Funkenerosion wirkt sich die Ablationsbeständigkeit direkt auf die Bearbeitungsgenauigkeit und die Oberflächenqualität des Werkstücks aus. Beim Schweißen reduziert sie die Häufigkeit des Elektrodenwechsels.

3.2.2.3 Faktoren, die die Ablationsresistenz beeinflussen

Faktoren, die den Ablationswiderstand beeinflussen, sind entscheidend für die Optimierung der Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Dazu gehören Aspekte wie Materialzusammensetzung, Mikrostruktur und Betriebsbedingungen. Das Zusammensetzungsverhältnis ist der wichtigste Faktor. Ein höherer Wolframgehalt (z. B. WCu 90/10) erhöht den Ablationswiderstand. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram schützen vor Lichtbogenschlägen. Während ein hoher Kupfergehalt (z. B. WCu 60/40) die Leitfähigkeit verbessert, verringert er auch den Ablationswiderstand. Es muss ein Gleichgewicht zwischen Haltbarkeit und Effizienz gefunden werden. Die Mikrostruktur hat einen erheblichen Einfluss. Geringe Porosität reduziert Wärmekonzentrationspunkte, während eine gleichmäßige Phasenverteilung die Wärmeübertragung optimiert. Das heißisostatische Pressverfahren (HIP) verbessert die Dichte und verringert die Ablationsraten um etwa 15 %.

Der Herstellungsprozess ist entscheidend für die Ablationsbeständigkeit. In der Pulvermetallurgie steuern Sintertemperatur und -druck die Benetzungswirkung von Kupfer. Bei der Vakuuminfiltration beeinflusst die Eindringtiefe die Grenzflächenstabilität. Hochtemperaturbehandlung reduziert Defekte. Oberflächenbehandlungen wie Vernickeln oder Beschichten erhöhen die Oxidationsbeständigkeit und reduzieren lichtbogenbedingte Oberflächenschäden. Zu den Betriebsbedingungen zählen Lichtbogenenergie und Entladungsfrequenz. Hochenergetische Entladungen (z. B. 500 A) verstärken die Ablation, während niederfrequente Entladungen Verluste reduzieren. Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit oder oxidierende Atmosphären können die Oberflächendegradation beschleunigen und erfordern optimierte Arbeitsbedingungen. Auch das Elektrodendesign beeinflusst die Ablationsbeständigkeit. Komplexe Geometrien erfordern eine gleichmäßige Stromverteilung, um lokale Überhitzung zu minimieren.

3.3 Weitere Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind Schlüsselfaktoren für ihre einzigartigen Vorteile in verschiedenen Anwendungsszenarien, darunter Härte, Festigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit sowie Schweiß- und Adhäsionsbeständigkeit. Diese Eigenschaften ergeben sich aus den Verbundeigenschaften von Wolfram und Kupfer. Die Mikrostruktur wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert, um ein Material mit geringer Porosität und hoher Gleichmäßigkeit zu bilden. Der hohe Schmelzpunkt, die Härte und die chemische Stabilität von Wolfram bilden die Grundlage für Hochtemperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit, während die hohe elektrische Leitfähigkeit, Duktilität und Wärmeleitfähigkeit von Kupfer die elektrischen Eigenschaften und die Zähigkeit verbessern. Die kombinierte Leistung anderer Eigenschaften wirkt sich direkt auf die Haltbarkeit, Effizienz und Zuverlässigkeit der Elektrode beim EDM, Schweißen und in der mikroelektronischen Verpackung aus.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3.1 Härte der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Die mechanischen Eigenschaften einer Wolfram-Kupfer-Elektrode sind entscheidend für ihre Haltbarkeit und Verformungsbeständigkeit unter hohen Belastungen und abrasiven Bedingungen. Diese Eigenschaft wird hauptsächlich durch Wolfram gewährleistet, dessen hohe Härte den Verbundwerkstoff dominiert. Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimieren in Kombination mit der Füllwirkung von Kupfer die Mikrostruktur, was zu einer gleichmäßigen Phasenverteilung und geringer Porosität führt. Die Härte wirkt sich direkt auf die Erosionsbeständigkeit der Elektrode beim Funkenerosionsschweißen, ihre Druckfestigkeit beim Schweißen und ihre Oberflächenstabilität in mikroelektronischen Gehäusen aus. Elektroden mit hoher Härte halten häufigen mechanischen Belastungen oder Lichtbogenschlägen stand, wodurch ihre Lebensdauer bei gleichbleibender Bearbeitungsgenauigkeit verlängert wird. Das Erreichen dieser Härte hängt vom Wolfram-Kupfer-Verhältnis und dem Herstellungsprozess ab. Ein höherer Wolframgehalt (wie WCu 80/20 oder WCu 90/10) führt zu einer höheren Härte. Die natürliche Härte von Wolfram bildet die Grundlage für die Verschleißfestigkeit, während die Duktilität von Kupfer die Poren beim Sintern füllt und so die Gesamtdichte des Materials erhöht. Die durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimierte Feinkörnigkeit der Mikrostruktur erhöht die Härte zusätzlich und reduziert den Oberflächenverschleiß. Zur Härteprüfung werden üblicherweise die Härteverfahren Vickers oder Rockwell verwendet. Die Ergebnisse spiegeln die Oberflächenbeständigkeit des Materials gegen Eindrücke wider. Aufbereitungsprozesse wie Hochtemperatursintern und Druckkontrolle beeinflussen die Gleichmäßigkeit der Härteverteilung direkt. In der Praxis schneiden Elektroden mit höherer Härte bei der Bearbeitung hochharter Materialien besser ab, da die Elektrodenverformung minimiert wird.

Die Härte wird auch durch Umwelt- und Nutzungsbedingungen beeinflusst. Während die Erweichung der Kupferphase bei hohen Temperaturen die Härte leicht verringern kann, erhält die Unterstützung durch das Wolframskelett die Gesamtstabilität. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Beschichten können die Oberflächenhärte und Korrosionsbeständigkeit weiter verbessern. In mikroelektronischen Gehäusen sorgt die Härte für einen engen Kontakt zwischen Elektroden und Substraten und verhindert so mechanische Schäden.

3.3.2 Festigkeit der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Die mechanischen Eigenschaften einer Wolfram-Kupfer-Elektrode sind ein wichtiger Indikator für ihre Bruch- und Verformungsbeständigkeit unter hohem Druck und mechanischer Belastung. Diese Eigenschaft wird durch die hohe Druckfestigkeit von Wolfram und die Zähigkeit von Kupfer unterstützt. Mikrostrukturelle Optimierung durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren führt zu einem Verbundwerkstoff mit geringer Porosität und hoher Dichte. Die Festigkeit wirkt sich direkt auf die Schlagfestigkeit der Elektrode beim Funkenerosionsschweißen, ihre Druckfestigkeit beim Schweißen und ihre strukturelle Stabilität in mikroelektronischen Gehäusen aus. Hochfeste Elektroden halten den Belastungen durch energiereiche Entladungen oder mechanische Klemmung stand, was ihre Lebensdauer verlängert und die Verarbeitungseffizienz verbessert.

Die erreichte Festigkeit hängt vom Wolfram-Kupfer-Verhältnis und dem Herstellungsprozess ab. Ein

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hoher Wolframgehalt (z. B. WCu 85/15) verbessert die Druckfestigkeit deutlich. Das Wolframskelett sorgt für hochfeste Strukturunterstützung, während die Kupferfüllung die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur optimiert und die Spannungskonzentration reduziert. Die geringe Porosität und die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur werden durch heißisostatisches Pressen (HIP) verbessert. Die feine Korngröße verbessert die Ermüdungsbeständigkeit des Materials, und Festigkeitsprüfungen zeigen, dass die Druckfestigkeit ein relativ hohes Niveau erreichen kann. Herstellungsprozesse wie Sintertemperatur und Druckkontrolle beeinflussen die Gleichmäßigkeit der Festigkeitsverteilung direkt. Vakuuminfiltration verbessert die Grenzflächenhaftung durch das Eindringen von flüssigem Kupfer.

Die Festigkeit wird auch von den Betriebsbedingungen beeinflusst. Das Erweichen der Kupferphase bei hohen Temperaturen kann die Festigkeit leicht verringern, die Unterstützung des Wolframskeletts erhält jedoch die Gesamtstabilität. Beim Funkenerosionsschweißen halten hochfeste Elektroden den Auswirkungen energiereicher Entladungen stand und reduzieren Verformungen. Beim Schweißen unterstützen sie die Verbindungsbildung unter hohem Druck. In der mikroelektronischen Verpackung sorgt die Festigkeit dafür, dass Elektroden bei Temperaturwechseln nicht brechen, was die Zuverlässigkeit erhöht. Oberflächenbehandlungen wie Plattieren können die Korrosionsbeständigkeit verbessern und so indirekt die Festigkeitsleistung steigern.

3.3.3 Zähigkeit der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Die mechanischen Eigenschaften einer Wolfram-Kupfer-Elektrode sind entscheidend für ihre Bruchfestigkeit und Energieabsorption bei Stößen oder Belastungen. Diese Eigenschaft wird hauptsächlich durch Kupfer gewährleistet, dessen hohe Duktilität und Zähigkeit eine Schlüsselrolle in Verbundwerkstoffen spielen. In Kombination mit der Härte des Wolframs wird die Mikrostruktur durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert, was zu einem Material mit geringer Porosität und hoher Gleichmäßigkeit führt. Die Zähigkeit wirkt sich direkt auf die Rissbeständigkeit der Elektrode beim Funkenerosionsschweißen, ihre Schlagfestigkeit beim Schweißen und ihre strukturelle Flexibilität in der mikroelektronischen Verpackung aus. Äußerst zähe Elektroden können mechanische oder thermische Belastungen absorbieren, Sprödbrüche reduzieren und die Lebensdauer verlängern. In diesem Abschnitt werden die Zähigkeitseigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden und ihre Rolle in praktischen Anwendungen detailliert untersucht.

Die erreichte Zähigkeit hängt vom Wolfram-Kupfer-Verhältnis und dem Herstellungsprozess ab. Ein höherer Kupfergehalt führt zu einer höheren Zähigkeit. Die Bruchdehnung von Kupfer sorgt für Energieabsorption, während das Wolframskelett die strukturelle Stabilität bei hohen Temperaturen aufrechterhält. Die geringe Porosität und die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur werden durch heißisostatisches Pressen optimiert. Die feine Korngröße verbessert die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Rissausbreitung. Zähigkeitsprüfungen zeigen, dass das Material unter Schlägeinwirkung eine gewisse plastische Verformung aufweist. Herstellungsprozesse wie Sintertemperatur und Druckkontrolle beeinflussen die Gleichmäßigkeit der Zähigkeitsverteilung direkt. Vakuuminfiltration durch das Eindringen von flüssigem Kupfer verbessert die Grenzflächenbindung und reduziert

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Spannungskonzentrationspunkte. Die Zähigkeit wird auch von den Betriebsbedingungen beeinflusst. Das Erweichen der Kupferphase bei hohen Temperaturen erhöht die Zähigkeit, zu hohe Temperaturen können jedoch zu einer Verringerung der Festigkeit führen. Die Unterstützung durch das Wolframskelett sorgt für ein ausgewogenes Gesamtbild. Bei der Funkenerosion können Elektroden mit hoher Zähigkeit den Auswirkungen energiereicher Entladungen standhalten und die Rissbildung reduzieren. Beim Schweißen absorbieren sie thermische Spannungen und verbessern die Haltbarkeit der Verbindung. In mikroelektronischen Gehäusen verhindert Zähigkeit Sprödbrüche bei Temperaturwechseln und erhöht so die Zuverlässigkeit. Oberflächenbehandlungen wie Polieren können Oberflächendefekte reduzieren und indirekt die Zähigkeit unterstützen.

3.3.4 Verschleißfestigkeit der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Die mechanischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden sind entscheidend für ihre Verschleißfestigkeit und Oberflächenstabilität bei wiederholter Reibung oder hoher Belastung. Diese Eigenschaft wird vor allem durch Wolfram erreicht, dessen hohe Härte und Verschleißfestigkeit den Verbundwerkstoff dominieren. In Kombination mit der Füllwirkung von Kupfer wird die Mikrostruktur durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert, was zu einem Material mit geringer Porosität und hoher Gleichmäßigkeit führt. Die Verschleißfestigkeit wirkt sich direkt auf die Lebensdauer der Elektrode beim Funkenerosionsschweißen, ihre Beständigkeit gegen Kontaktverschleiß beim Schweißen und ihre Oberflächenintegrität in der mikroelektronischen Verpackung aus. Hochverschleißfeste Elektroden halten mechanischer Reibung oder Lichtbogenschlägen stand, wodurch Materialverluste reduziert und die Bearbeitungsgenauigkeit erhalten bleiben.

Die Verschleißfestigkeit hängt vom Verhältnis von Wolfram zu Kupfer und vom Herstellungsprozess ab. Höhere Wolframgehalte (wie WCu 80/20 oder WCu 90/10) führen zu einer höheren Verschleißfestigkeit. Die natürliche Härte von Wolfram verleiht dem Material eine verschleißfeste Grundlage, während die Duktilität von Kupfer beim Sintern die Poren füllt und so die Dichte der Mikrostruktur erhöht. Die Feinkörner in der Mikrostruktur werden durch das heißisostatische Pressverfahren (HIP) optimiert, was die Verschleißfestigkeit weiter verbessert und Oberflächenverschleiß und -erosion reduziert. Bei der Prüfung der Verschleißfestigkeit werden typischerweise Reibungs- und Verschleißtests oder Lichtbogenablationstests verwendet, um Veränderungen der Oberflächenrauheit und Masseverlusten zu messen. Herstellungsprozesse wie Hochtemperatursintern und Druckkontrolle wirken sich direkt auf die Gleichmäßigkeit der Verschleißfestigkeitsverteilung aus. In der Praxis schneiden Elektroden mit hoher Verschleißfestigkeit bei der Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte (wie Wolframstahl) außergewöhnlich gut ab, da sie die Elektrodenverformung und die Häufigkeit des Elektrodenwechsels reduzieren.

Die Verschleißfestigkeit wird auch von den Betriebsbedingungen beeinflusst. Das Erweichen der Kupferphase bei hohen Temperaturen kann die Verschleißfestigkeit leicht verringern, der Wolframträger behält jedoch die Gesamtstabilität. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Beschichtungen (z. B. CrN) können die Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Oberfläche weiter verbessern. In mikroelektronischen Gehäusen sorgt die Verschleißfestigkeit dafür, dass die Elektroden bei wiederholter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Montage ihre Oberflächenqualität behalten und mechanische Schäden vermieden werden.

3.3.5 Korrosionsbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Ein wichtiges Leistungsmerkmal von Wolfram-Kupfer-Elektroden ist ihre Umweltverträglichkeit, die sich in ihrer Beständigkeit gegen chemische Angriffe und ihrer Langzeitstabilität in feuchten, sauren, alkalischen oder industriellen Umgebungen widerspiegelt. Diese Eigenschaft wird hauptsächlich durch die chemische Stabilität von Wolfram in Kombination mit dem Oberflächenschutz von Kupfer und der Optimierung der Mikrostruktur durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren gewährleistet, wodurch ein porenarmes und hochgradig gleichmäßiges Material entsteht. Die Korrosionsbeständigkeit wirkt sich direkt auf die Oberflächenqualität der Elektrode beim Funkenerosionsschweißen, ihre Oxidationsbeständigkeit beim Schweißen und ihre Zuverlässigkeit in der mikroelektronischen Verpackung aus. Elektroden mit hoher Korrosionsbeständigkeit sind widerstandsfähiger gegen Umwelterosion, reduzieren Oberflächenverschleiß und verlängern ihre Lebensdauer. In diesem Abschnitt werden die Korrosionsbeständigkeitseigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden und ihre Anwendungsleistung ausführlich erörtert.

Das Erreichen der Korrosionsbeständigkeit hängt vom Verhältnis von Wolfram zu Kupfer und vom Herstellungsprozess ab. Höhere Wolframgehalte (wie WCu 85/15) führen zu einer größeren Korrosionsbeständigkeit. Die natürliche chemische Stabilität von Wolfram verleiht dem Material eine Grundlage für Säure- und Laugenbeständigkeit, während die Duktilität von Kupfer beim Sintern Poren füllt und Korrosionspfade reduziert. Die geringe Porosität in der Mikrostruktur, die durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimiert wird, reduziert Kanäle, durch die korrosive Medien eindringen können, und die feine Korngröße verbessert die Rissbeständigkeit des Materials. Korrosionsbeständigkeitstests umfassen typischerweise Salzsprüh- oder Säureimmersionstests, bei denen die Oberflächenkorrosionsrate und der Masseverlust gemessen werden. Herstellungsverfahren wie Vakuuminfiltration verbessern die Grenzflächendichte durch Infiltration von flüssigem Kupfer und steigern so die Korrosionsbeständigkeit. In der Praxis zeichnen sich Elektroden mit hoher Korrosionsbeständigkeit durch die Verarbeitung chemisch aktiver Materialien (wie titanhaltiger Legierungen) aus, da sie die Kontamination des Werkstücks verringern.

Die Korrosionsbeständigkeit wird auch von den Betriebsbedingungen beeinflusst. Feuchte oder oxidierende Atmosphären können die Korrosion der Kupferphase beschleunigen, doch die Unterstützung des Wolframskeletts und Oberflächenbehandlungen (wie Vernickeln oder Vergolden) verbessern die Gesamtstabilität deutlich. In mikroelektronischen Gehäusen sorgt die Korrosionsbeständigkeit dafür, dass Elektroden in feuchter Umgebung nicht oxidieren, was die Zuverlässigkeit erhöht.

3.3.6 Antischweiß- und Antihafteigenschaften von Wolframkupferelektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind Schlüsseleigenschaften bei Schweißanwendungen. Sie spiegeln die Fähigkeit der Elektrode wider, der Anhaftung an den Verbindungsmaterialien unter hoher Hitze und hohem Druck zu widerstehen, sowie die Sauberkeit der Oberfläche nach dem Schweißen. Diese

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaft wird hauptsächlich durch die Hochtemperaturbeständigkeit von Wolfram und die Oberflächeneigenschaften von Kupfer unterstützt. Die Optimierung der Mikrostruktur durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren führt zu einem porenarmen und hochgradig gleichmäßigen Material. Schweiß- und Adhäsionsbeständigkeit beeinflussen die Effizienz der Elektrode beim Widerstandsschweißen, die Oberflächenqualität beim Punktschweißen und die Austauschhäufigkeit bei langfristiger Verwendung. Elektroden mit hoher Adhäsionsbeständigkeit können die Schlackenhaftung reduzieren, die Qualität der Schweißverbindung verbessern und die Lebensdauer der Schweißnaht verlängern.

Das Erreichen von Löt- und Haftfestigkeit hängt vom Verhältnis von Wolfram zu Kupfer und vom Herstellungsprozess ab. Höhere Wolframgehalte (z. B. WCu 80/20) führen zu einer stärkeren Haftfestigkeit. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram verringern die Haftung beim geschmolzenen Lot, während die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer das Wärmemanagement beim Sintern optimiert und Oberflächenrückstände reduziert. Die geringe Porosität in der Mikrostruktur, die durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimiert wird, reduziert Kanäle für das Eindringen von Schlacke, während die feine Korngröße die Verformungsbeständigkeit des Materials erhöht. Die Haftfestigkeit wird typischerweise mit einem Schweißzyklustest geprüft, bei dem die Schlackenhaftfläche und die Oberflächenreinheit gemessen werden. Vorbereitungsprozesse wie die Vakuuminfiltration verbessern die Grenzflächendichte durch Infiltration von flüssigem Kupfer und erhöhen so die Haftfestigkeit. In der Praxis eignen sich Elektroden mit hoher Haftfestigkeit hervorragend zum Punkt- oder Nahtschweißen, da sie die Reinigungshäufigkeit reduzieren.

Löt- und Adhäsionsbeständigkeit werden auch von den Betriebsbedingungen beeinflusst. Das Erweichen der Kupferphase bei hohen Temperaturen kann das Adhäsionsrisiko erhöhen, doch die Unterstützung und Oberflächenbehandlung des Wolframskeletts verbessern die Gesamtleistung deutlich. Beim Widerstandsschweißen sorgt die Adhäsionsbeständigkeit für eine reibungslose Trennung der Elektrode vom Werkstück und verbessert so die Verbindungsqualität. In der mikroelektronischen Verpackung ermöglicht die Lötbeständigkeit mehrere rückstandsfreie Lötvorgänge.

3.4 CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode MSDS

Die Wolfram-Kupfer-Elektrode ist ein Metallverbundwerkstoff mit Wolfram und Kupfer als Kernkomponenten. Sie wird durch Pulvermetallurgie, Vakuuminfiltration und andere Verfahren hergestellt. Sie verfügt über die hervorragenden Eigenschaften von Wolfram und Kupfer und findet breite Anwendung in der Industrie.

Aus Materialsicht verleihen der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3410 °C) und die hohe Festigkeit der Elektrode eine ausgezeichnete Hochtemperaturbeständigkeit und strukturelle Stabilität. Dadurch behält sie ihre Form und widersteht Verformungen in rauen Umgebungen wie hohen Temperaturen und hohem Druck. Die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit von Kupfer hingegen ermöglicht der Elektrode eine effiziente Wärmeübertragung und -ableitung. Die im Betrieb entstehende Wärme wird schnell abgeleitet und lokale Überhitzung sowie Leistungseinbußen werden vermieden. Diese Kombination aus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

„starkem Wolfram und hochwertigem Kupfer“ ermöglicht es der Wolfram-Kupfer-Elektrode, die Nachteile der schlechten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von reinem Wolfram zu überwinden und gleichzeitig die mangelnde Hochtemperaturfestigkeit von reinem Kupfer auszugleichen, was zu einzigartigen Leistungsvorteilen führt.

Wolfram-Kupfer-Elektroden lassen sich flexibel an den jeweiligen Anwendungsfall anpassen. Gängige Verhältnisse sind WCu70/30 und WCu80/20. Ein höherer Kupferanteil verbessert die elektrische und thermische Leitfähigkeit und eignet sich daher für Anwendungen mit hohen elektrischen Leistungsanforderungen. Ein höherer Wolframanteil verbessert die Hitzebeständigkeit und mechanische Festigkeit und eignet sich daher besser für Arbeitsumgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Belastung. Durch die Anpassung des Verhältnisses lässt sich die Leistung präzise anpassen.

Aus Sicht der Anwendungsfelder spielen Wolframkupferelektroden eine Schlüsselrolle in zahlreichen Szenarien der High-End-Industrie: Bei der Funkenerosion können sie als Entladungselektroden mit ihrer stabilen Leitfähigkeit und Ablationsbeständigkeit hochfeste Materialien wie Formstahl und Hartmetall präzise bearbeiten und so die Oberflächengenauigkeit des Werkstücks sicherstellen. Beim Schweißen, insbesondere beim Widerstandsschweißen und Lichtbogenschweißen, kann ihre effiziente elektrische und thermische Leitfähigkeit die stabile Übertragung des Schweißstroms sicherstellen, den Wärmeverlust verringern und die Qualität der Lötverbindungen verbessern. In der mikroelektronischen Verpackung können sie aufgrund ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit und ihres zum Substrat passenden Wärmeausdehnungskoeffizienten als Verbindungselektrode verwendet werden, um eine zuverlässige Verbindung zwischen Chip und Substrat sicherzustellen und die Stabilität elektronischer Geräte zu verbessern. Darüber hinaus werden sie in der Luft- und Raumfahrt, der Landesverteidigung und anderen Bereichen häufig in Hochtemperatur-Lichtbogenkontakten, Hochspannungsschaltern und anderen Komponenten verwendet, um die Leistungsanforderungen unter extremen Arbeitsbedingungen zu erfüllen.

Gefahrenübersicht: Dieses Produkt besteht aus einem massiven Metallverbundwerkstoff und ist von Natur aus ungiftig. Bei normaler Lagerung und Verwendung werden keine giftigen Substanzen freigesetzt. Da es nicht in Pulverform vorliegt, besteht keine Gefahr der Staubinhalation und es ist weder explosiv noch entflammbar. Bei extremen Temperaturen (z. B. über dem Schmelzpunkt von Kupfer, 1083 °C) kann die Kupferphase schmelzen, wobei jedoch keine giftigen Gase entstehen. Verbrennungen durch Kontakt mit hohen Temperaturen sind zu vermeiden.

Maßnahmen zur Brandbekämpfung: Dieses Produkt ist nicht entflammbar und nicht explosiv. Bei hohen Temperaturen verändert es sich lediglich physikalisch (z. B. schmilzt Kupfer) und setzt keine giftigen Gase frei. Im Brandfall sind für dieses Produkt keine besonderen Maßnahmen zur Brandbekämpfung erforderlich; die üblichen Maßnahmen zur Brandbekämpfung reichen aus. Beim Löschen ist darauf zu achten, den Kontakt mit heißen, geschmolzenen Materialien zu vermeiden, da dies zu Verbrennungen führen kann.

Notfallmaßnahmen bei Leckagen: Das Produkt ist fest und birgt kein Leckagerisiko. Bei Bruch oder

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschädigung durch äußere Einwirkungen können die Bruchstücke einfach eingesammelt werden; besondere Schutzmaßnahmen sind nicht erforderlich. Die Bruchstücke können recycelt oder als normaler Industrieabfall entsorgt werden, wodurch die Umweltverträglichkeit gewährleistet wird.

Handhabung und Lagerung: Bei der Handhabung ist keine besondere Schutzausrüstung erforderlich; das Tragen von Industriehandschuhen reicht aus, um Kratzer auf der Oberfläche zu vermeiden. Lagern Sie das Produkt in einer trockenen, gut belüfteten Umgebung, fern von korrosiven Substanzen wie starken Säuren und Basen, um Korrosion der Metalloberfläche zu vermeiden. Eine Versiegelung oder spezielle Isolierung ist nicht erforderlich; halten Sie das Produkt bei der Lagerung mit anderen Industriematerialien einfach trocken.

Expositionskontrollen und persönliche Schutzausrüstung: Es sind keine besonderen Atemschutz- oder Staubkontrollmaßnahmen erforderlich (aufgrund des fehlenden Pulvers). Es wird empfohlen, während des Betriebs normale Industriehandschuhe zu tragen, um Verletzungen durch Reibung mit harten Oberflächen zu vermeiden. Bei Arbeiten mit hohen Temperaturen sind wärmeisolierende Handschuhe erforderlich.

Entsorgung: Ausrangierte Elektroden können als Metallschrott recycelt und von professionellen Recyclingunternehmen verarbeitet werden, um Wolfram und Kupfer für die weitere Verarbeitung zu extrahieren. Nicht recycelbare Materialien werden als allgemeiner Industiemüll behandelt und belasten weder Boden noch Wasser.

Transportinformationen: Es gibt keine besonderen Einschränkungen beim Transport und es ist keine Gefahrgutkennzeichnung erforderlich. Achten Sie darauf, dass die Verpackung intakt bleibt und vermeiden Sie Verformungen durch schwere Kollisionen. Der Versand kann in derselben Charge wie andere nicht korrosive Industrieprodukte erfolgen.

Behördliche Informationen: Dieses Produkt entspricht dem Gesetz der Volksrepublik China zur Verhütung und Kontrolle der Umweltverschmutzung durch feste Abfälle, den Vorschriften zum Sicherheitsmanagement gefährlicher Chemikalien sowie anderen relevanten Gesetzen und Vorschriften. Es handelt sich nicht um eine gefährliche Chemikalie oder giftige Substanz, und seine Herstellung, sein Verkauf und sein Transport entsprechen den nationalen Industriematerialstandards.



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	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 alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 4: Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden können nach verschiedenen Standards klassifiziert werden. Gängige Methoden umfassen Zusammensetzungsverhältnis, Anwendungsszenarien und Formverfahren. Je nach Verhältnis von Wolfram zu Kupfergehalt können sie in Typen mit hohem Wolfram- und hohem Kupfergehalt unterteilt werden. Der Typ mit hohem Wolframgehalt hat einen hohen Wolframgehalt, eine bessere Hochtemperaturbeständigkeit und Härte und eignet sich für Szenarien mit hohen Temperaturen und hoher Belastung; der Typ mit hohem Kupfergehalt (wie WCu60/40, WCu70/30) hat einen hohen Kupfergehalt und eine bessere elektrische und thermische Leitfähigkeit und eignet sich für Arbeitsbedingungen mit hohen Anforderungen an die elektrische Effizienz. Je nach Anwendungsgebiet gibt es hauptsächlich EDM-Elektroden, Schweißelektroden, Elektroden für mikroelektronische Verpackungen usw. EDM-Elektroden müssen sowohl Ablationsbeständigkeit als auch Leitfähigkeit aufweisen, Schweißelektroden legen den Schwerpunkt auf Stromstabilität und an Elektroden für mikroelektronische Verpackungen werden strenge Anforderungen an Maßgenauigkeit und thermische Anpassung gestellt.

4.1 Zusammensetzungsverhältnis-dominierte Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden anhand des Zusammensetzungsverhältnisses ist eine Gruppierungsmethode für Elektroden basierend auf dem Verhältnis des Wolfram- zu dem Kupfergehalt. Diese Klassifizierungsmethode wirkt sich direkt auf die physikalischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Elektroden aus und wird den Anforderungen verschiedener Anwendungsszenarien gerecht. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Wolfram bietet einen hohen Schmelzpunkt, hohe Temperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit, und Kupfer trägt zu einer hohen elektrischen Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit bei. Die Anpassung des Verhältnisses bestimmt die Gesamtleistung der Elektrode. Der Unterschied im Zusammensetzungsverhältnis spiegelt sich hauptsächlich im Wolframgehalt wider. Es gibt drei Kategorien: hoher Wolframgehalt, mittlerer Wolframgehalt und niedriger Wolframgehalt. Jeder Elektrodentyp ist für bestimmte Zwecke optimiert, wie z. B. Funkenerosion, Widerstandsschweißen oder Mikroelektronik-Verpackung. Die Klassifizierungsgrundlage berücksichtigt auch den Einfluss der Mikrostruktur und des Herstellungsprozesses. Geringe Porosität und gleichmäßige Phasenverteilung sind gemeinsame Merkmale verschiedener Elektrodentypen.

4.1.1 Elektroden mit hohem Wolframgehalt (80 %–95 % Wolfram)

Wolfram-Kupfer-Elektroden bestehen hauptsächlich aus Wolfram, wobei der Kupfergehalt typischerweise zwischen 5 % und 20 % liegt. Diese Elektroden besitzen aufgrund des hohen Schmelzpunkts (3422 °C) und der Härte (ca. 3430 HV) von Wolfram eine außergewöhnliche Hochtemperaturbeständigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit. In einem pulvermetallurgischen Verfahren wird Wolframpulver mit einer kleinen Menge Kupferpulver vermischt und gepresst. Nach dem Sintern füllt das Kupfer die Poren in der flüssigen Phase und bildet eine dichte Wolframskelettstruktur.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die geringe Porosität erhöht die Materialstabilität. Ein Vakuuminfiltrationsprozess optimiert die Kupferdurchdringung weiter und verbessert die Grenzflächenbindung, sodass Elektroden mit hohem Wolframgehalt auch unter extremen Bedingungen ihre strukturelle Integrität bewahren.

Dank ihrer Eigenschaften eignen sich Elektroden mit hohem Wolframgehalt hervorragend für die Funkenerosion (EDM) und besonders für die Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte. Die hohe Verschleißfestigkeit von Wolfram reduziert den Oberflächenverlust der Elektroden und verlängert ihre Lebensdauer. Beim Widerstandsschweißen unterstützt ein hoher Wolframgehalt das Trennen bei hohen Strömen. Die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion ist deutlich besser als bei Elektroden mit niedrigem Wolframgehalt, wodurch die Schlackenanhftung reduziert wird. Die Feinkörnigkeit der Mikrostruktur wird durch das heißisostatische Pressverfahren optimiert, und die Druckfestigkeit kann ein bestimmtes hohes Niveau erreichen, wodurch sich die Elektroden für Hochenergieentladungen eignen. Elektroden mit hohem Wolframgehalt haben jedoch eine schwache elektrische und thermische Leitfähigkeit, und der niedrige Kupferanteil begrenzt die Stromübertragungseffizienz. Daher müssen sie in Verbindung mit einem Wärmeableitungsdesign verwendet werden.

Zu den Anwendungen zählen auch Luft- und Raumfahrtkomponenten und Hochspannungsschalter. Der hohe Wolframgehalt der Elektroden ermöglicht eine Temperaturbeständigkeit von über 3000 °C, und Oberflächenbehandlungen wie Vernickeln erhöhen die Oxidationsbeständigkeit zusätzlich. Während des Herstellungsprozesses muss die Reinheit des Wolframpulvers über 99,9 % liegen, mit einer Partikelgröße zwischen 5 und 15 Mikrometern, um eine gleichbleibende Leistung zu gewährleisten.

4.1.2 Elektroden mit mittlerem Wolframgehalt (50–80 % Wolfram)

Elektroden mit mittlerem Wolframgehalt sind ausgewogene Wolfram-Kupfer-Elektroden mit einem Kupfergehalt von 20 bis 50 %. Diese Elektroden bieten einen guten Kompromiss zwischen Hochtemperaturbeständigkeit und elektrischer Leitfähigkeit. Sie werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration hergestellt und weisen eine Mikrostruktur mit einem gleichmäßigen Wolframskelett und einem Kupferphasennetzwerk auf. Beim Sintern füllt flüssiges Kupfer die Poren zwischen den Wolframpartikeln. Die geringe Porosität und die feine Korngröße werden durch heißisostatisches Pressen optimiert, wodurch die mechanische Festigkeit und die elektrischen Eigenschaften des Materials verbessert werden. Der erhöhte Kupfergehalt verbessert sowohl die elektrische als auch die thermische Leitfähigkeit, wodurch Elektroden mit mittlerem Wolframgehalt vielseitig einsetzbar sind.

Mittelharte Wolframelektroden werden häufig in der Funkenerosion (EDM) eingesetzt und eignen sich für die Präzisionsbearbeitung mittelharter Materialien. Die Verschleißfestigkeit von Wolfram in Kombination mit der Leitfähigkeit von Kupfer reduziert den Elektrodenverlust und verbessert die Bearbeitungseffizienz. Beim Widerstandsschweißen unterstützen mittelharte Wolframelektroden den Betrieb bei mittlerer Stromstärke und bieten im Vergleich zu hochharten Wolframelektroden ein besseres Wärmemanagement. Dadurch wird die Wärmeinflusszone reduziert und die Verbindungsqualität verbessert. Eine weitere wichtige Anwendung ist die Verpackung von Mikroelektronik, bei der der Wärmeausdehnungskoeffizient dem von Silizium- oder Keramiksubstraten entspricht. Dies reduziert die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermische Wechselbelastung und erhöht die Zuverlässigkeit. Die Leistung von Elektroden mit mittlerem Wolframgehalt wird auch durch das Verhältnis und die Verarbeitung beeinflusst. Beispielsweise sorgt ein WCu -Verhältnis von 70/30 für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Haltbarkeit und Effizienz, während ein WCu -Verhältnis von 60/40 die Leitfähigkeit begünstigt. Bei hohen Temperaturen kann die Erweichung der Kupferphase die Stabilität leicht beeinträchtigen, das Wolframskelett bietet jedoch Halt. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Plattieren können die Korrosionsbeständigkeit verbessern und die Lebensdauer verlängern.

4.1.3 Elektroden mit niedrigem Wolframgehalt (20–50 % Wolfram)

Elektroden mit niedrigem Wolframgehalt (20–50 % Wolfram) sind hauptsächlich kupferbasierte Wolfram-Kupfer- Elektroden mit einem Kupfergehalt von 50 bis 80 %. Diese Elektroden weisen aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit ($5,8 \times 10^7$ S/m) und Wärmeleitfähigkeit (ca. 400 W/m·K) von Kupfer hervorragende elektrische und thermische Managementeigenschaften auf. In einem pulvermetallurgischen Verfahren wird Wolframpulver mit einem hohen Anteil Kupferpulver vermischt. Nach dem Sintern bildet das Kupfer ein kontinuierliches Netzwerk. Die geringe Porosität und die gleichmäßige Phasenverteilung werden durch heißisostatisches Pressen optimiert, wodurch die Gesamtleistung des Materials verbessert wird. Ein Vakuuminfiltrationsverfahren durch Infiltration von flüssigem Kupfer verbessert die Integrität des leitfähigen Pfads weiter, sodass Elektroden mit niedrigem Wolframgehalt eine herausragende hocheffiziente Leitung aufweisen.

Elektroden mit niedrigem Wolframgehalt werden hauptsächlich in Situationen eingesetzt, die eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit erfordern, wie z. B. beim Punktschweißen oder Nahtschweißen beim Widerstandsschweißen. Die hohe Leistungsfähigkeit von Kupfer reduziert den thermischen Widerstandseffekt und verbessert die Qualität der Verbindung. Bei der Funkenerosion eignen sich Elektroden mit niedrigem Wolframgehalt für die Grobbearbeitung von Materialien mit geringer Härte. Die Duktilität von Kupfer unterstützt eine schnelle Wärmeableitung und reduziert lokale Überhitzung. In mikroelektronischen Gehäusen entspricht der Wärmeausdehnungskoeffizient dem Substrat, und die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer unterstützt die Wärmeableitung des Chips und verlängert die Lebensdauer. Elektroden mit niedrigem Wolframgehalt weisen jedoch nur eine geringe Temperaturbeständigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit auf, und der niedrige Wolframanteil schränkt ihre Stabilität unter extremen Bedingungen ein. Sie müssen in Kombination mit Wärmeableitung oder energiearmer Entladung eingesetzt werden.

Während des Herstellungsprozesses muss die Reinheit des Kupferpulvers über 99,9 % liegen, die Partikelgröße muss zwischen 5 und 15 Mikrometern liegen. Die Partikelgröße des Wolframpulvers ist etwas größer, um die Füllkraft zu optimieren. Oberflächenbehandlungen wie Vergoldung können die Korrosionsbeständigkeit erhöhen und die Lebensdauer in feuchten Umgebungen verlängern.

4.2 Anwendungsszenarioorientierte Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die anwendungsszenarioorientierte Klassifizierung von Wolframkupferelektroden ist eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gruppierungsmethode für Elektroden basierend auf spezifischen Nutzungsumgebungen und funktionalen Anforderungen. Diese Klassifizierungsmethode betont das gezielte Design und die Leistungsoptimierung von Elektroden in verschiedenen Industriebereichen. Wolframkupferelektroden werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram werden mit der hohen elektrischen Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Kupfer kombiniert. Das Verhältnis und die Mikrostruktur werden entsprechend dem Anwendungsszenario angepasst, um ein Material mit geringer Porosität und hoher Gleichmäßigkeit zu bilden. Die Klassifizierungsgrundlage umfasst Funkenerosion, Hochspannungsgeräte und Schweißfelder. Jeder Elektrodentyp wird für spezifische Prozess- und Leistungsanforderungen optimiert, wie z. B. Lichtbogenerosionsbeständigkeit, elektrische Leitfähigkeitseffizienz oder Wärmemanagementfähigkeiten.

4.2.1 Elektroden für die Funkenerosion

Speziell für EDM (Electro-Discharge Machining) entwickelte Elektroden sind Wolfram-Kupfer-Elektroden, die speziell auf Lichtbogenerosionsbeständigkeit, mechanische Festigkeit und Bearbeitungspräzision ausgelegt sind. Diese Elektroden verwenden typischerweise einen hohen Wolframgehalt (wie WCu 80/20 oder WCu 90/10). Wolframpulver wird in einem pulvermetallurgischen Verfahren mit einer kleinen Menge Kupferpulver vermischt. Nach dem Sintern füllt das Kupfer die Poren in der flüssigen Phase und bildet eine dichte Wolframskelettstruktur. Die geringe Porosität erhöht die Beständigkeit gegen Hochtemperaturschocks. Ein Vakuuminfiltrationsprozess optimiert die Kupferdurchdringung weiter und verbessert die Grenzflächenbindung, wodurch die Elektrodenstabilität bei energiereichen Entladungen sichergestellt wird. Die feinen Körner in der Mikrostruktur werden durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimiert, wodurch Druckfestigkeit und Verschleißfestigkeit verbessert werden.

Der Hauptvorteil von Elektroden für die Funkenerosion liegt in ihrer Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Der hohe Schmelzpunkt (3422 °C) und die Härte (ca. 3430 HV) von Wolfram halten den Entladungstemperaturen von mehreren Tausend °C stand, reduzieren den Oberflächenverschleiß und eignen sich daher für die Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte wie Wolframkarbid und Titanlegierungen. Die Bearbeitungspräzision ist garantiert, da die Oberflächenrauheit im Mikrometerbereich kontrolliert wird. Die feinkörnige Struktur unterstützt die Bildung komplexer Geometrien. In der Praxis halten die Elektroden energiereichen Entladungen stand, was ihre Lebensdauer verlängert und die Austauschhäufigkeit reduziert. Ein niedriger Kupfergehalt kann jedoch die elektrische und thermische Leitfähigkeit beeinträchtigen. Daher ist eine Wärmeableitung erforderlich, um lokale Überhitzung zu vermeiden. Oberflächenbehandlungen wie Polieren können die Oberflächenqualität verbessern und sie für die Herstellung von Präzisionsformen geeignet machen.

4.2.2 Elektroden für Hochspannungsgeräte

Wolfram-Kupfer-Elektroden, die speziell für Hochspannungsschalter und elektrische Kontakte entwickelt wurden und bei denen Wert auf Hochtemperaturbeständigkeit,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lichtbogenerosionsbeständigkeit und Leitfähigkeitsstabilität gelegt wird. Diese Elektroden verwenden typischerweise ein mittleres bis hohes Wolframverhältnis (wie WCu 70/30 oder WCu 85/15) und werden durch ein pulvermetallurgisches Verfahren hergestellt. Wolframpulver wird mit Kupferpulver gemischt und gesintert, wobei das Kupfer die Poren in der flüssigen Phase füllt und ein gleichmäßiges Phasennetzwerk bildet. Die geringe Porosität verbessert die Lichtbogenbeständigkeit des Materials. Ein Vakuuminfiltrationsprozess optimiert die Kupferdurchdringung und heißisostatisches Pressen (HIP) verbessert die Grenzflächenbindung weiter und stellt sicher, dass die Elektrode während der Hochspannungstrennung zuverlässig bleibt. Die feinen Körner in der Mikrostruktur unterstützen eine hohe Druckfestigkeit und machen sie für häufige mechanische Beanspruchung geeignet.

Die Eigenschaften von Elektroden für Hochspannungsgeräte machen sie zu hervorragenden Leistungsträgern in Hochspannungsschaltern. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (3422 °C) schützt vor Lichtbogenhitze, und seine Lichtbogenerosionsbeständigkeit reduziert Oberflächenerosion und verlängert die Lebensdauer. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer sorgt für eine effiziente Stromübertragung und eignet sich daher für Hochstrom-Trennszenarien. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist auf den des Substrats abgestimmt, wodurch die thermische Wechselbelastung reduziert wird. Die optimierte Mikrostruktur reduziert Widerstandsschwankungen und unterstützt eine stabile elektrische Leistung. In der Praxis halten die Elektroden häufigen Schaltvorgängen stand, reduzieren Ausfallraten und finden breite Anwendung in Stromversorgungsgeräten und industriellen Steuerungssystemen.

Während des Herstellungsprozesses muss das Partikelgrößenverhältnis von Wolframpulver zu Kupferpulver zwischen 1:2 und 1:3 kontrolliert werden, um eine gleichmäßige Phasenverteilung zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen wie Vernickeln können die Oxidationsbeständigkeit und die Anpassungsfähigkeit an feuchte oder industrielle Umgebungen verbessern. Durch Anpassung des Zusammensetzungsverhältnisses oder die Einführung von Zwischenphasen (wie Molybdän) können Lichtbogenfestigkeit und elektrische Leitfähigkeit künftig weiter verbessert werden, um höhere Spannungen oder komplexe elektrische Anforderungen, wie beispielsweise in Smart-Grid-Geräten, zu erfüllen.

4.2.3 Elektroden im Schweißfeld

Wolfram-Kupfer-Elektroden wurden speziell für das Widerstandsschweißen entwickelt und zeichnen sich durch hohe elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Antihafteigenschaften aus. Diese Elektroden enthalten typischerweise einen niedrigen bis mittleren Wolframanteil (z. B. WCu 60/40 oder WCu 70/30). Wolframpulver wird in einem pulvermetallurgischen Verfahren mit einem hohen Anteil Kupferpulver vermischt. Nach dem Sintern bildet das Kupfer ein durchgehendes Netzwerk. Die geringe Porosität wird durch heißisostatisches Pressen optimiert, was das Wärmemanagement und die elektrische Leistung verbessert. Der Vakuuminfiltrationsprozess verbessert die Integrität des leitfähigen Pfades durch das Eindringen von flüssigem Kupfer. Die feine Körner in der Mikrostruktur unterstützen Druckfestigkeit und Zähigkeit und machen die Elektroden für Hochdruckschweißumgebungen geeignet. Die Hauptvorteile von Elektroden beim Schweißen liegen in ihrer elektrischen und thermischen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leitfähigkeit. Die hohe elektrische Leitfähigkeit ($5,8 \times 10^7$ S/m) und Wärmeleitfähigkeit (ca. $400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) von Kupfer reduzieren Widerstandserwärmungseffekte, verbessern die Verbindungsqualität und verteilen die Wärme gleichmäßig, wodurch die Wärmeeinflusszone (WEZ) verkleinert wird. Dadurch eignet sich Kupfer für Punkt- und Nahtschweißen. Die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram ($3422 \text{ }^\circ\text{C}$) bietet strukturellen Halt, und seine Antihafteigenschaften werden durch Oberflächenbehandlungen (z. B. Polieren) weiter optimiert, was die Schlackenhaftung reduziert und die Lebensdauer der Elektroden verlängert. In der Praxis halten die Elektroden mittleren Stromstärken stand, unterstützen effizientes Schweißen und finden breite Anwendung im Automobilbau und der Elektronikmontage.

Während des Herstellungsprozesses muss die Reinheit des Kupferpulvers 99,9 % übersteigen, die Partikelgröße muss zwischen 5 und 15 Mikrometer liegen. Wolframpulverpartikel sollten etwas größer sein, um die Füllung zu optimieren. Hohe Betriebstemperaturen, wie z. B. hohe Temperaturen, können zu einer Erweichung der Kupferphase führen, was eine integrierte Wärmeableitung erforderlich macht. Zukünftig könnte die Einführung von Nano-Kupferpulver oder Mehrphasendesigns die Leitfähigkeit und die Antihafteigenschaften weiter verbessern und Anwendungen ermöglichen, die eine höhere Effizienz oder komplexe Schweißarbeiten erfordern, wie z. B. leichte Strukturteile.

4.2.4 Spezialelektroden für Luft- und Raumfahrt sowie militärische Anwendungen

Wolfram-Kupfer-Elektroden, die speziell für die Luft- und Raumfahrt sowie den Militärsektor entwickelt wurden und bei denen Wert auf hohe Temperaturbeständigkeit, mechanische Festigkeit und Zuverlässigkeit in extremen Umgebungen gelegt wird. Diese Elektroden verwenden typischerweise einen hohen Wolframgehalt und werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration hergestellt. Wolframpulver wird mit einer kleinen Menge Kupferpulver vermischt und dann gesintert. Das Kupfer füllt die Poren in flüssiger Form und bildet eine robuste Wolfram-Skelettstruktur. Während des Herstellungsprozesses wird die Mikrostruktur durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimiert, was zu geringer Porosität und einer gleichmäßigen Phasenverteilung führt und so die Stabilität der Elektrode unter hohen Belastungen oder hohen Temperaturen sicherstellt. Die Zugabe von Kupfer optimiert die elektrische Leitfähigkeit und das Wärmemanagement und ermöglicht so die Anpassung an komplexe Betriebsumgebungen.

Zu den Hauptanwendungen von Spezialelektroden in der Luft- und Raumfahrt sowie der Rüstungsindustrie gehören Wärmeschutzsysteme für Raumfahrzeuge und elektrische Kontakte für militärische Ausrüstung. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram sorgt für eine ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit und macht es dadurch geeignet, energiereichen Stößen oder extremen thermischen Belastungen standzuhalten. Die mechanische Festigkeit der Elektrode ermöglicht eine hochpräzise Verarbeitung und einen langfristigen Einsatz, während die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur Spannungskonzentrationen reduziert und die Ermüdungsbeständigkeit erhöht. Im militärischen Bereich werden Elektroden häufig in Schlüsselkomponenten von Hochleistungsradar- oder Waffensystemen eingesetzt, die starken Vibrationen und korrosiven Umgebungen standhalten müssen. Oberflächenbehandlungen wie das Galvanisieren erhöhen die Witterungsbeständigkeit zusätzlich. Im

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Herstellungsprozess wird auf die Reinheit der Rohstoffe und die Kontrolle der Partikelgröße geachtet, um eine gleichbleibende Leistung zu gewährleisten. Das Anwendungsszenario erfordert außerdem eine ausgezeichnete Beständigkeit der Elektrode gegen Lichtbogenerosion und thermische Stabilität. Die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer trägt zur schnellen Wärmeableitung bei und reduziert das Risiko lokaler Überhitzung.

4.3 Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden nach morphologischen und strukturellen Merkmalen

Wolfram-Kupfer-Elektroden bilden die Grundlage für ihre Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Anwendungsszenarien und umfassen mehrere Dimensionen wie Geometrie, Mikrostruktur und Makromorphologie. Diese Eigenschaften wirken sich direkt auf die Installationsanpassungsfähigkeit, Leistungseffizienz und Verarbeitungscompatibilität der Elektrode aus. Daher ist die Klassifizierung nach morphologischen und strukturellen Merkmalen eine der intuitivsten Methoden für die industrielle Auswahl.

4.3.1 Blockelektrode

Blockelektroden sind Wolfram-Kupfer-Elektroden in blockartiger Form, die sich für Anwendungen eignen, die großflächigen Kontakt oder hochfeste Halterung erfordern. Diese Elektroden werden in einem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt, bei dem Wolfram- und Kupferpulver in einem bestimmten Verhältnis gemischt und anschließend in Form gepresst werden. Beim Sintern füllt das Kupfer die Poren in der flüssigen Phase und bildet eine dichte Mikrostruktur. Heißisostatisches Pressen optimiert die Gleichmäßigkeit und geringe Porosität der Blockelektroden zusätzlich und gewährleistet so die Stabilität des Materials bei mechanischer Belastung. Das Blockdesign erleichtert die Bearbeitung und ermöglicht das Zuschneiden oder Formen in verschiedene Größen nach Bedarf, um sich an unterschiedliche Anwendungsanforderungen anzupassen. Die Blockelektrode eignet sich aufgrund ihrer Eigenschaften hervorragend für die Funkenerosion und die Bearbeitung großer Werkstücke oder komplexer Geometrien. Die große Kontaktfläche sorgt für stabile Entladungsbedingungen. Die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur erhöht die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion, die Härte des Wolframs ermöglicht eine langfristige Nutzung und die Leitfähigkeit des Kupfers optimiert die Stromübertragung. Während des Herstellungsprozesses wirken sich die gleichmäßige Mischung der Rohstoffe und die Kontrolle der Sinterparameter direkt auf die Leistung der Blockelektrode aus. Oberflächenbehandlungen wie Polieren können die Bearbeitungsgenauigkeit verbessern. Beim Schweißen kann die Blockelektrode als Form oder Träger verwendet werden, um hohem Druck und thermischen Zyklen standzuhalten. Zukünftig können die mechanischen Eigenschaften und der Anwendungsbereich der Blockelektrode durch Anpassung des Pressprozesses oder Einführung eines mehrphasigen Designs weiter verbessert werden.

4.3.2 Stabelektrode

Stabelektroden sind Wolfram-Kupfer-Elektroden in Stabform, die sich für Anwendungen eignen, die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eine präzise Positionierung oder filigrane Bearbeitung erfordern. Diese Elektroden werden mithilfe von Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Wolfram- und Kupferpulver werden gemischt und zu einem Stab gepresst. Beim Sintern füllt das Kupfer die Poren und erzeugt eine schlanke, dichte Struktur. Heißisostatisches Pressen optimiert die Mikrostruktur der Stabelektrode, was zu geringer Porosität und gleichmäßiger Phasenverteilung führt und so die Materialstabilität bei hochpräzisen Operationen sicherstellt. Das Stabdesign erleichtert die Installation und Führung und eignet sich daher besonders für Anwendungen, die die Bearbeitung tiefer Löcher erfordern oder bei denen auf engstem Raum gearbeitet wird.

Stabelektroden eignen sich hervorragend für die elektroerosive Entladung (EDM) und für die Feinbearbeitung sowie die Herstellung von Mikrokomponenten. Ihre schlanke Form ermöglicht hochpräzise Entladung, während die Verschleißfestigkeit von Wolfram den Elektrodenverschleiß reduziert. Die Kupferphase in der Mikrostruktur sorgt für elektrische und thermische Leitfähigkeit und unterstützt so eine stabile Stromübertragung und ein optimales Wärmemanagement. In mikroelektronischen Gehäusen erleichtert die Form der Stabelektroden die Ausrichtung auf das Substrat, gleicht die Wärmeausdehnung aus und reduziert Spannungskonzentrationen. Während der Herstellung muss das Längen- und Durchmesser Verhältnis der Stabelektroden kontrolliert werden, um mechanische Festigkeit und Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen wie Schleifen können die Oberflächenqualität verbessern.

4.3.3 Blechelektrode

Blattelektroden sind Wolfram-Kupfer-Elektroden in Form dünner Blätter, die sich für Anwendungen eignen, die großflächigen Kontakt oder gleichmäßige Entladung erfordern. Diese Elektroden werden in einem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt, bei dem Wolfram- und Kupferpulver in einem bestimmten Verhältnis gemischt und zu einem dünnen Blatt gepresst werden. Beim Sintern füllt das Kupfer in flüssiger Form die Poren und bildet eine dichte Mikrostruktur. Heißisostatisches Pressen optimiert die Gleichmäßigkeit und geringe Porosität der Blattelektroden zusätzlich und gewährleistet so die Stabilität des Materials bei mechanischer Belastung und Temperaturwechselbeanspruchung. Das Blattdesign bietet eine große Oberfläche, erleichtert engen Kontakt mit dem Werkstück oder Substrat und eignet sich für Verarbeitungsanforderungen, die eine gleichmäßige Wärmeverteilung oder hohe Stromübertragung erfordern.

Blechelektroden eignen sich hervorragend für die Funkenerosion und die Bearbeitung flacher Werkstücke sowie für Anwendungen mit großflächigen Entladungen. Die dünne Blechstruktur unterstützt eine effiziente Lichtbogenverteilung. Die Verschleißfestigkeit und Erosionsbeständigkeit von Wolfram reduzieren Oberflächenverluste und verlängern die Lebensdauer. Die Kupferphase in der Mikrostruktur sorgt für elektrische und thermische Leitfähigkeit und gewährleistet so eine stabile Stromübertragung und Wärmeableitung. Dadurch wird das Risiko lokaler Überhitzung reduziert. Beim Schweißen können Blechelektroden als Elektrodenplatten oder Kühlkörper eingesetzt werden. Sie halten hohem Druck und thermischen Zyklen stand und verbessern die Qualität der Verbindung. Während des Herstellungsprozesses muss durch den Pressvorgang die Gleichmäßigkeit der Dicke kontrolliert werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Gleichmäßigkeit der Mischung der Rohstoffe und die Sinterparameter wirken sich direkt auf die Leistung der Blechelektrode aus. Oberflächenbehandlungen wie Schleifen oder Polieren können die Kontaktgenauigkeit verbessern. Zu den Anwendungen zählen auch die Verpackung von Mikroelektronik und das Wärmemanagement. Die dünne Bauweise der Folienelektrode erleichtert die Verbindung mit dem Chip oder Substrat, und die Anpassung der Wärmeausdehnung reduziert die Spannungskonzentration und erhöht die Zuverlässigkeit. Dank ihrer Flexibilität passt sich die Folienelektrode an komplexe Geometrien an. Bei der Herstellung muss jedoch darauf geachtet werden, Verformungen der Folie zu vermeiden.

4.3.4 Speziell geformte Elektroden

Elektroden mit Sonderform sind die komplexeste Art von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Ihre Form wird vollständig an die funktionalen Anforderungen bestimmter Anwendungsszenarien angepasst. Dabei werden die Beschränkungen regulärer Formen wie Blöcke und Stäbe durchbrochen und eine Vielzahl nicht standardmäßiger Strukturen wie speziell geformte Oberflächen, gestufte Formen, poröse Formen, Hohlgritter und Verbundoberflächen abgedeckt. Das Design dieses Elektrodentyps muss eng mit den Betriebsparametern, dem Montageraum und den Leistungszielen des Endprodukts integriert werden. Von der ersten Modellierung bis zur endgültigen Formgebung sind mehrere Runden der Simulationsüberprüfung erforderlich, und es ist eine extrem hohe Verarbeitungspräzision erforderlich. Jede geringfügige Abweichung kann die Stabilität nachgelagerter Prozesse oder die Leistungsindikatoren des Endprodukts direkt beeinträchtigen.

In Bezug auf das morphologische Design liegt der Kern von Elektroden mit Sonderform in der Funktionsorientierung. Beispielsweise müssen speziell geformte Wolframkupferelektroden für die komplexe Hohlräumbearbeitung von Autoabdeckungsformen die gekrümmten Oberflächenkonturen der Hohlräume vollständig nachbilden, einschließlich Details wie Rundungen, tiefen Rillen und Neigungen, und sogar den Entformungswinkel bei der Formung des Werkstücks simulieren. Dieses morphologische Design mit „spiegelbildlicher Nachbildung“ kann einen gleichmäßigen Entladungsspalt während der Funkenerosion gewährleisten und letztendlich die Oberflächengüte und Montagegenauigkeit von Autoabdeckungen sicherstellen. Bei der Bearbeitung des Flammrohrs der Brennkammer von Flugzeugtriebwerken werden Elektroden mit Sonderform häufig als gekrümmte Strukturen mit dichten Mikrorillen ausgeführt. Diese Mikrorillen entsprechen eins zu eins den Kühlkanälen des Flammrohrs. Die durch die Funkenerosion gebildeten Kanäle müssen eine strikte Maßhaltigkeit aufweisen, da es sonst zu ungleichmäßiger lokaler Kühlung und damit zu thermischem Ermüdungsbruch während des Motorbetriebs kommt.

Stufenelektroden mit spezieller Form werden häufig in Mehrstationen-Bearbeitungsszenarien eingesetzt, wobei ihre unterschiedlichen Stufenabschnitte unterschiedlichen Bearbeitungstiefen oder Präzisionsanforderungen entsprechen. Beispielsweise wird bei der integrierten Bearbeitung des Mittelrahmens eines Mobiltelefons der erste Abschnitt der Stufenelektrode für die Grobbearbeitung verwendet, um eine große Menge Material zu entfernen. Der zweite Abschnitt erzielt durch Reduzierung des Durchmessers das Feintrimmen und der dritte Abschnitt vervollständigt die Rundung durch den

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bogenübergang am Ende. Dieses Design „Einmaliges Spannen, mehrstufiges Formen“ kann die Anzahl der Werkzeugwechsel reduzieren, die Bearbeitungseffizienz verbessern und Positionierungsfehler durch Mehrfachspannen vermeiden. Die Höhen- und Durchmesserunterschiede der Stufen müssen basierend auf der Materialhärte und der Bearbeitungszugabe genau berechnet werden. Wenn es eine Abweichung in der Größe einer bestimmten Stufe gibt, kann dies dazu führen, dass der kumulative Fehler der Größe der nachfolgenden Bearbeitung den Standard überschreitet.

Bei der Konstruktion poröser, geformter Elektroden wird Wert auf die Balance zwischen effizienter Wärmeableitung und geringem Gewicht gelegt. Bei der Statorherstellung von Motoren für Fahrzeuge mit alternativer Energie benötigen die Elektroden wabenförmige Durchgangslöcher. Diese Löcher reduzieren nicht nur das Elektrodengewicht, sondern ermöglichen auch eine schnelle Ableitung der durch die Entladung entstehenden Wärme durch den internen Luftstrom. Dadurch werden thermische Verformungen vermieden, die die Bearbeitungsgenauigkeit beeinträchtigen könnten. Bei der Herstellung von Wärmetauscherkomponenten für Kernkraftwerke müssen die Durchgangslöcher poröser, geformter Elektroden perfekt mit den Rohrbündellöchern des Wärmetauschers übereinstimmen. Andernfalls entstehen bei der anschließenden Rohrmontage ungleichmäßige Abstände, was die Wärmeübertragungseffizienz beeinträchtigt.

Der Formungsprozess von Elektroden mit Sonderform spielt eine entscheidende Rolle für die morphologische Genauigkeit. Mit dem Drahtschneidverfahren lassen sich komplexe Konturen zweidimensional schneiden, was für flache Strukturen mit Sonderform geeignet ist. Mit dem Elektrofunktformungsverfahren lassen sich dreidimensional gekrümmte Oberflächen bearbeiten, komplexe Formen durch die synchrone Bewegung von Elektrode und Werkstück reproduzieren und die Oberflächengüte sicherstellen. Für poröse Elektroden mit Sonderform und internen Kanälen ist zudem eine Kombination aus Tieflochbohren, Laserbohren und anderen Verfahren erforderlich, um die Vertikalität und Durchdringung der Löcher sicherzustellen. Während der Bearbeitung müssen morphologische Fehler in Echtzeit durch Präzisionsmessgeräte erkannt werden. Sobald ein bestimmtes Merkmal außerhalb der Toleranz liegt, müssen die Bearbeitungsparameter sofort angepasst werden, andernfalls wird die gesamte Elektrode verschrottet. Dieses extreme Streben nach Präzision macht die Herstellungskosten von Elektroden mit Sonderform deutlich höher als die von Elektroden mit normaler Form, macht sie aber auch zu einem unverzichtbaren Schlüsselement in der High-End-Fertigung.

4.4 Leistungsindikatororientierte Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die leistungsorientierte Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden gruppiert Elektroden anhand spezifischer Leistungsanforderungen und legt dabei den Schwerpunkt auf die Optimierung wichtiger Indikatoren wie Leitfähigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit oder mechanischer Festigkeit. Diese Klassifizierungsmethode entwickelt spezielle Elektroden für unterschiedliche Leistungsanforderungen durch Anpassung der Wolfram-Kupfer-Verhältnisse und des Herstellungsprozesses. Die Mikrostruktur von Wolfram-Kupfer-Elektroden wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert und weist eine geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung auf. Heißisostatisches Pressen verbessert die Leistungskonsistenz zusätzlich. Zu den Klassifizierungskriterien gehören hohe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leitfähigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit oder hohe mechanische Festigkeit, wobei jeder Elektrodentyp für bestimmte Anwendungen hervorragend geeignet ist.

4.4.1 Hochleitfähige Elektroden

Elektroden mit hoher Leitfähigkeit sind Wolfram-Kupfer-Elektroden, die für eine effiziente Stromübertragung entwickelt wurden und Wert auf optimale Leitfähigkeit und Widerstandsfähigkeit legen. Diese Elektroden enthalten typischerweise einen niedrigen Wolframgehalt. Wolframpulver wird in einem pulvermetallurgischen Verfahren mit einem hohen Anteil Kupferpulver vermischt, und das Kupfer bildet beim Sintern ein durchgehendes leitfähiges Netzwerk. Die Mikrostruktur wird durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimiert, um eine geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung zu erreichen. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer (nahezu reines Kupfer) gewährleistet eine effiziente Stromübertragung. Ein Vakuuminfiltrationsprozess verbessert die Integrität des leitfähigen Pfades durch die Infiltration von flüssigem Kupfer weiter, wodurch Elektroden mit hoher Leitfähigkeit in elektrischen Anwendungen überzeugen. Zu den Hauptanwendungen hochleitfähiger Elektroden zählen Widerstandsschweißen und mikroelektronische Gehäuse. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer unterstützt eine stabile Stromübertragung, reduziert Widerstandserwärmungseffekte und verbessert die Verbindungsqualität sowie die Effizienz der Schaltungsverbindungen. Beim Widerstandsschweißen halten die Elektroden mittleren Stromstärken stand, verteilen die Wärme gleichmäßig und reduzieren die Wärmeeinflusszone, wodurch sie sich für Punktschweiß- oder Nahtschweißvorgänge eignen. In mikroelektronischen Gehäusen unterstützt der niedrige Widerstand hochleitfähiger Elektroden eine effiziente Signalübertragung, während die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer die Wärmeableitung der Chips unterstützt und die Zuverlässigkeit erhöht. Das gleichmäßige Kupferphasennetzwerk in der Mikrostruktur reduziert die Elektronenstreuung. Die Reinheit des Kupferpulvers im Herstellungsprozess muss hoch sein, und die Partikelgröße muss innerhalb eines bestimmten Bereichs kontrolliert werden, um eine gleichbleibende Leistung zu gewährleisten.

Betriebsbedingungen wie hohe Temperaturen können die Kupferphase erweichen und die Leitfähigkeit beeinträchtigen. Um die Leistung aufrechtzuerhalten, ist eine wärmeableitende Konstruktion oder eine Oberflächenbehandlung (z. B. Vergoldung) erforderlich. Eine Oberflächenbehandlung kann auch die Korrosionsbeständigkeit verbessern und die Lebensdauer in feuchten Umgebungen verlängern. Hochleitfähige Elektroden zeigen eine überlegene Leistung bei Hochfrequenz- oder Hochstrombelastung und werden häufig in der Elektronik- und Automobilindustrie eingesetzt.

4.4.2 Lichtbogenserosionsbeständige Elektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden wurden speziell für Hochenergielichtbogenumgebungen entwickelt und zeichnen sich durch hohe Lichtbogenserosionsbeständigkeit und Oberflächenstabilität aus. Diese Elektroden enthalten typischerweise einen hohen Wolframanteil. Wolframpulver wird in einem pulvermetallurgischen Verfahren mit einer kleinen Menge Kupferpulver vermischt. Nach dem Sintern füllt das Kupfer die Poren in der flüssigen Phase und bildet ein stabiles Wolframskelett. Die Mikrostruktur wird durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimiert, um eine geringe Porosität und eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gleichmäßige Phasenverteilung zu erzielen. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram sorgen für eine ausgezeichnete Lichtbogenbeständigkeit. Ein Vakuuminfiltrationsprozess durch Infiltration von flüssigem Kupfer verbessert die Grenzflächenbindung weiter und gewährleistet so die Haltbarkeit der Elektrode bei wiederholten Entladungen.

Zu den Hauptanwendungen lichtbogenerosionsbeständiger Elektroden zählen die Funkenerosion und Hochspannungsschalter. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram widersteht Hochtemperaturlichtbögen von mehreren Tausend Grad Celsius, reduziert Oberflächenschmelzen oder -verdampfung und verlängert die Lebensdauer. Bei der Funkenerosion kann die Elektrode Materialien mit hoher Härte bearbeiten, Erosionsverluste reduzieren und die Bearbeitungsgenauigkeit aufrechterhalten. In Hochspannungsschaltern unterstützt die Lichtbogenbeständigkeit der Elektrode häufige Stromunterbrechungen und reduziert Oberflächenschäden. Das gleichmäßige Wolframphasennetzwerk in der Mikrostruktur reduziert die thermische Spannungskonzentration. Oberflächenbehandlungen wie Polieren oder Plattieren können die Oxidationsbeständigkeit weiter verbessern und die Leistung an industrielle Umgebungen anpassen. Bei der Herstellung muss die Reinheit des Wolframpulvers hoch sein, und die Partikelgröße muss innerhalb eines bestimmten Bereichs kontrolliert werden, um eine gleichbleibende Leistung zu gewährleisten. Zu den Einsatzszenarien gehören auch Spezialanwendungen, die eine energiereiche Entladung erfordern. Die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer unterstützt die Wärmeableitung und verringert das Risiko lokaler Überhitzung.

4.4.3 Hochfeste Elektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden wurden speziell für Umgebungen mit hoher mechanischer Beanspruchung entwickelt, wobei Druckfestigkeit und Verformungsbeständigkeit im Vordergrund stehen. Diese Elektroden verwenden typischerweise einen mittleren bis hohen Wolframgehalt (wie WCu 85/15 oder WCu 70/30) und werden in einem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt. Wolfram- und Kupferpulver werden gemischt und verdichtet, und das Kupfer füllt beim Sintern die Poren, wodurch eine dichte Mikrostruktur entsteht. Heißisostatisches Pressen optimiert die Grenzflächenbindung, was zu einer Mikrostruktur mit geringer Porosität und gleichmäßiger Phasenverteilung führt. Das Wolframskelett bietet eine hohe Druckfestigkeit. Ein Vakuuminfiltrationsprozess durch Infiltration von flüssigem Kupfer verbessert die Gesamtfestigkeit des Materials weiter und macht es für den Betrieb mit hoher Belastung geeignet.

Zu den wichtigsten Anwendungen für hochfeste Elektroden gehören der Materialabtrag beim Funkenerosionsschweißen (EDM) und das Hochdruckschweißen. Die hohe Härte von Wolfram sorgt für mechanische Stoßfestigkeit, während die Duktilität von Kupfer die Spannungsverteilung optimiert und Rissbildung reduziert. In mikroelektronischen Gehäusen halten hochfeste Elektroden den Belastungen durch Temperaturwechsel und mechanische Einspannung stand und erhöhen so die Zuverlässigkeit. Die feine Körnigkeit ihrer Mikrostruktur verbessert die Ermüdungsbeständigkeit. Das Partikelgrößenverhältnis von Wolfram- und Kupferpulver muss während des Herstellungsprozesses angepasst werden, um eine gleichmäßige Phasenverteilung zu gewährleisten. Oberflächenbehandlungen wie Schleifen können die Verschleißfestigkeit erhöhen und die Lebensdauer verlängern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Betriebsbedingungen wie hohe Temperaturen können die Stabilität der Kupferphase beeinträchtigen. Um die Leistung aufrechtzuerhalten, ist ein Wärmeableitungsdesign erforderlich. Hochfeste Elektroden eignen sich hervorragend für Umgebungen mit hoher Belastung und werden häufig in Luft- und Raumfahrtkomponenten sowie in Industrieformen eingesetzt.

4.4.4 Hochhitzebeständige Elektroden

Umgebungen mit extrem hohen Temperaturen entwickelt wurden und bei denen der Schwerpunkt auf Hochtemperaturstabilität und Wärmemanagement liegt. Diese Elektroden verwenden typischerweise einen hohen Wolframgehalt (wie WCu 90/10 oder WCu 85/15) und werden in einem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt. Wolframpulver wird mit einer kleinen Menge Kupferpulver vermischt. Nach dem Sintern füllt das Kupfer die Poren in der flüssigen Phase und bildet eine starke Wolframskelettstruktur. Die Mikrostruktur wird durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimiert, um eine geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung zu erreichen. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram sorgt für ausgezeichnete thermische Stabilität. Ein Vakuuminfiltrationsprozess, bei dem flüssiges Kupfer infiltriert wird, verbessert die Integrität des Wärmeleitungs-pfads und stellt sicher, dass die Elektrode auch bei hohen Temperaturen ihre Leistung behält.

Zu den Hauptanwendungen hochhitzebeständiger Elektroden zählen Hochtemperatursensoren und Wärmeschutzsysteme in der Luft- und Raumfahrt. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram hält Temperaturen von mehreren Tausend Grad stand, und die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer unterstützt die Wärmeableitung und reduziert so das Risiko lokaler Überhitzung. In mikroelektronischen Gehäusen gewährleistet die thermische Stabilität der Elektrode die Zuverlässigkeit des Chips im Hochtemperaturbetrieb, und die Anpassung der Wärmeausdehnung reduziert die Spannungskonzentration. Das gleichmäßige Wolframphasennetzwerk in der Mikrostruktur reduziert die thermische Ermüdung, und Oberflächenbehandlungen wie Vernickeln können die Oxidationsbeständigkeit verbessern und die Elektroden an feuchte oder industrielle Umgebungen anpassen. Im Herstellungsprozess muss die Reinheit des Wolframpulvers hoch sein, und die Partikelgröße muss innerhalb eines bestimmten Bereichs kontrolliert werden, um eine gleichbleibende Wärmeleistung zu gewährleisten.

4.5 Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden nach Mikrostruktur

Die Mikrostruktur wird durch den Herstellungsprozess bestimmt und spiegelt den Verteilungszustand und die Bindungsart der beiden Wolfram-Kupfer-Phasen wider. Sie wird hauptsächlich in den Typ der gleichmäßigen Dispersion, den Typ der Skelettfüllung und den Typ der Gradientenverteilung unterteilt. Unterschiedliche Strukturen haben einen erheblichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften der Elektrode.

4.5.1 Gleichmäßig verteilte Elektroden

Gleichmäßig verteilte Elektroden sind der mikrostrukturell ausgewogenste Typ von Wolfram-Kupfer-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektroden. Ihr Hauptmerkmal ist die äußerst gleichmäßige Verteilung von Wolframpartikeln und Kupferphasen. Bei dieser Struktur sind winzige Wolframpartikel in diskreter Form gleichmäßig in die Kupfermatrix eingebettet. Es kommt weder zu einer lokalen Agglomeration von Wolframpartikeln noch zu einer Entmischung oder Aggregation von Kupferphasen. Die Grenzfläche zwischen den beiden Phasen wird durch Hochtemperatursintern in einem pulvermetallurgischen Verfahren fest verbunden und weist eine mikroskopische Morphologie nach dem Motto „Du in mir, ich in dir“ auf. Diese Struktur durchbricht die Beschränkungen der Eigenschaften eines einzelnen Metalls und ermöglicht es, die Hochtemperaturbeständigkeit von Wolfram mit der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Kupfer zu kombinieren, während gleichzeitig Leistungseinbußen durch eine ungleichmäßige Komponentenverteilung vermieden werden.

Der Schlüssel zum Erreichen dieser gleichmäßigen Dispersionsstruktur liegt in der präzisen Kontrolle des Herstellungsprozesses. Zunächst müssen Wolfram- und Kupferpulver in einer Kugelmühle gründlich vermischt werden, sodass die beiden Pulver vollständig in Kontakt kommen und unter mechanischer Kraftereinwirkung zu einem Mischpulver mit gleichmäßiger Zusammensetzung verfeinert werden. Anschließend wird das Mischpulver durch einen gleichmäßigen Pressvorgang zu einem Rohling gepresst, um sicherzustellen, dass der Druck gleichmäßig auf alle Teile des Rohlings übertragen wird und lokale Dichteunterschiede vermieden werden. Schließlich werden in der Sinterphase Temperatur und Haltezeit präzise kontrolliert, um die Diffusion und Verschmelzung von Wolfram und Kupfer an der Grenzfläche zu fördern und einen stabilen Bindungszustand zu bilden. Der gesamte Prozess muss die Einmischung von Verunreinigungen oder Schwankungen der Prozessparameter strikt vermeiden, da sonst die Gleichmäßigkeit zerstört werden kann. Beispielsweise führt eine unzureichende Kugelmahlzeit zu einer ungleichmäßigen Mischung der Pulver, und eine zu niedrige Sintertemperatur beeinträchtigt die Festigkeit der Grenzflächenbindung, was zu Defekten in der Mikrostruktur führt.

Der Hauptvorteil der Elektrode, der sich durch die gleichmäßige Dispersionsstruktur ergibt, ist die Leistungskonsistenz. Auf Makroebene bleiben Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte und andere Indikatoren der Elektrode in verschiedenen Bereichen stabil und schwanken nicht signifikant aufgrund von Positionsänderungen. Diese Eigenschaft macht sie hervorragend in Szenarien mit strengen Anforderungen an die Leistungskonsistenz, wie beispielsweise im Bereich der Präzisions-EDM: Wenn Elektrode und Werkstück eine Hochfrequenzentladung durchführen, kann die gleichmäßige Mikrostruktur sicherstellen, dass die Stromdichte gleichmäßig auf der Elektrodenoberfläche verteilt wird. Dadurch wird die Konzentration der Entladungsenergie aufgrund lokaler Widerstandsunterschiede vermieden, wodurch Unebenheiten oder Brandflecken auf der Werkstückoberfläche reduziert und die Konsistenz der Oberflächenbeschaffenheit der bearbeiteten Oberfläche sichergestellt wird. Selbst bei langfristiger kontinuierlicher Verarbeitung kann diese Gleichmäßigkeit die Stabilität der Entladungsparameter aufrechterhalten und Prozessabweichungen aufgrund von Schwankungen der Elektrodenleistung reduzieren.

Auch beim Hochfrequenzschweißen sind die Vorteile gleichmäßig verteilter Elektroden von Bedeutung. Während des Schweißvorgangs muss die Elektrode den Hochfrequenzstrom stabil an die Schweißstelle übertragen und durch Widerstandswärme eine Materialverschmelzung erreichen. Bei ungleichmäßiger

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektrodenmikrostruktur erzeugen lokal hochohmige Bereiche übermäßige Hitze, was zum Überbrennen oder sogar Festkleben der Schweißnaht führt. Niedrigohmige Bereiche hingegen können zu wenig Hitze entwickeln, was zu einer Kaltschweißung führt. Die gleichmäßig verteilte Struktur sorgt für eine gleichmäßige Stromverteilung während des Übertragungsvorgangs durch ein durchgehendes und gleichmäßiges Kupferphasen-Leitnetzwerk. Dadurch bleibt die Wärme an der Schweißnaht stabil und der Schmelzkern wird vollständig ausgebildet, ohne dass es zu Überhitzungsschäden kommt. Gleichzeitig bieten die gleichmäßig verteilten Wolframpartikel der Elektrode einen konstanten mechanischen Halt, verhindern lokale Verformungen bei wiederholtem Druckkontakt und verlängern so deren Lebensdauer. Die Vorteile dieser Struktur für das Wärmemanagement sind nicht zu vernachlässigen. In Hochleistungselektronikgeräten dienen Wolfram-Kupfer-Elektroden häufig als Kühlkörper. Das gleichmäßige Wärmeleitnetzwerk verteilt die Wärme von Hotspots schnell und gleichmäßig über die gesamte Elektrode und leitet sie über den Kühlkörper ab. So werden lokale Wärmestaus und Leistungseinbußen vermieden. Selbst in Umgebungen mit starken Temperaturschwankungen reduziert die gleichmäßige Mikrostruktur die durch unterschiedliche Wärmeausdehnung verursachten Spannungen und verringert so das Risiko von Elektrodenrissen.

4.5.2 Skelettgefüllte Elektroden

Die skelettgefüllte Elektrode ist ein Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoff, der durch ein einzigartiges Strukturdesign synergetische Leistung erzielt. Ihr Hauptmerkmal ist die Bildung einer sich gegenseitig durchdringenden Netzwerkstruktur aus „Wolframskelett-Kupfer-Füllung“. In dieser Struktur bildet Wolfram den Stützkörper der Elektrode in Form eines durchgehenden Skeletts, ähnlich dem Stahlrahmen eines Gebäudes, und bietet so eine solide strukturelle Grundlage für die gesamte Konstruktion; während die Kupferphase die Poren des Wolframskeletts vollständig ausfüllt und einen durchgehenden Leiterbahn bildet. Die beiden Komponenten behalten nicht nur ihre jeweiligen Leistungsvorteile, sondern erzielen durch ihre strukturelle Komplementarität auch eine funktionale Synergie. Dieses Design durchbricht die Leistungsbeschränkungen eines einzelnen Metallmaterials und ermöglicht es der Elektrode, gleichzeitig die Verbundeigenschaften hoher Festigkeit, hoher Temperaturbeständigkeit sowie hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit zu besitzen.

Der Schlüssel zur Herstellung skelettgefüllter Elektroden liegt in der präzisen Steuerung des Vakuuminfiltrationsprozesses, der in zwei Kernphasen unterteilt ist. Die erste ist die Vorfertigung des Wolframskeletts: Nachdem das Wolframpulver gemäß einer bestimmten Formel gemischt wurde, wird es durch eine Form gepresst und dann bei hoher Temperatur gesintert, um ein poröses Skelett mit einer bestimmten Porosität zu bilden. Während des Sinterprozesses werden die Wolframpartikel durch Diffusionsschweißen fest miteinander verbunden, wodurch ein kontinuierliches dreidimensionales Netzwerk entsteht. Die Poren im Skelett halten Raum für die anschließende Füllung mit der Kupferphase frei. Zu diesem Zeitpunkt verfügt das Wolframskelett bereits über eine hohe mechanische Festigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit, seine Leitfähigkeit ist jedoch schlecht, was in den nachfolgenden Schritten ausgeglichen werden muss.

Der zweite Schritt ist die Infiltration der Kupferphase: Das vorgefertigte Wolframskelett wird in ein

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vakuum gegeben, Kupfermaterial darum gelegt und über den Schmelzpunkt von Kupfer erhitzt. Durch die kombinierte Einwirkung von hoher Temperatur und Vakuum verflüssigt sich festes Kupfer und füllt mithilfe von Kapillarwirkung und Schwerkraft die Poren des Wolframskeletts gleichmäßig, bis alle Lücken gefüllt sind. Das Vakuum spielt dabei eine entscheidende Rolle. Es verhindert das Eindringen von Luft und die Bildung von Blasen und stellt sicher, dass die Kupferphase in den Poren ein kontinuierliches und ununterbrochenes leitfähiges Netzwerk bildet. Nach dem Abkühlen bilden das Wolframskelett und die Kupferphase eine eng integrierte, sich durchdringende Struktur – das Wolframskelett sorgt für Verformungsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit, während die Kupferphase für die Stromübertragung und Wärmeableitung zuständig ist. Beide ergänzen sich und verleihen der Elektrode eine hervorragende Gesamtleistung.

Die Leistungsvorteile skelettgefüllter Elektroden zeigen sich besonders bei Hochtemperatur- und Hochdruckanwendungen. Die durchgehende Struktur des Wolframskeletts verleiht ihnen eine mechanische Festigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit, die die von reinem Kupfer weit übertrifft. Selbst in Umgebungen mit extremen Temperaturen behält sie ihre strukturelle Stabilität und erweicht oder verformt sich nicht so leicht. Die Kupferphasenfüllung sorgt für eine hervorragende elektrische und thermische Leitfähigkeit, leitet Wärme schnell aus Hochtemperaturbereichen ab und verhindert Leistungseinbußen durch lokale Überhitzung. Diese Eigenschaft macht sie zur idealen Wahl für extreme Arbeitsbedingungen in der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie und anderen Bereichen.

Bei Düsenelektrodenanwendungen in Raketentriebwerken bieten skelettgefüllte Elektroden einzigartige Vorteile. Als Schlüsselkomponente des Raketenantriebssystems muss die Düse während des Betriebs der kontinuierlichen Erosion durch Hochtemperaturgas standhalten und gleichzeitig Zündung und Flammenkontrolle durch Elektroden erfordern. An dieser Stelle widersteht das Wolframskelett mit seinem extrem hohen Schmelzpunkt und seiner strukturellen Festigkeit der Hochtemperaturerosion des Gases und verhindert, dass die Elektrode aufgrund der hohen Temperaturen schmilzt oder sich verformt. Die in das Skelett eingefüllte Kupferphase leitet die große Wärmemenge, die durch die Gaserosion entsteht, schnell und kontinuierlich ab und verhindert so Strukturversagen durch lokale Überhitzung. Dieser synergetische Mechanismus „Wolfram widersteht Ablation und Kupfer leitet Wärme“ gewährleistet den langfristig stabilen Betrieb der Düsenelektrode in extremen Umgebungen.

Skelettgefüllte Elektroden spielen auch in Hochtemperatur-Elektrodenkomponenten von Kernenergieanlagen eine wichtige Rolle. Beim Betrieb eines Kernreaktors ist die Umgebung im Inneren nicht nur extrem heiß, sondern auch mit hohem Druck und Strahlung verbunden, was hohe Anforderungen an die Stabilität des Materials stellt. In solchen Szenarien dient das Wolframskelett als Hauptstrukturkörper, der Kriechen und Korrosion bei langandauernden hohen Temperaturen widersteht und die Dimensionsstabilität der Elektrode aufrechterhält. Die Kupferphase hingegen gewährleistet die Leitfähigkeit der Elektrode bei hohem Strom und leitet die Wärme im Reaktor rechtzeitig an das Kühlsystem ab, um Sicherheitsrisiken durch Wärmestau zu vermeiden. Da sowohl Wolfram als auch Kupfer eine gute Strahlungsstabilität aufweisen, können Elektroden mit dieser Struktur auch in einer Strahlungsumgebung eine stabile Leistung aufrechterhalten und Funktionseinbußen durch Materialalterung vermeiden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auch beim Einsatz von Elektroden in industriellen Lichtbogenöfen liegen die Vorteile von skelettgefüllten Elektroden klar auf der Hand. Beim Betrieb des Lichtbogenofens entsteht zwischen Elektrode und Charge ein extrem heißer Lichtbogen, der die Elektrode häufigen mechanischen und thermischen Stößen standhalten muss. Die hohe Festigkeit des Wolframskeletts verhindert dabei ein Brechen der Elektrode beim Aufprall, und die hohe Temperaturbeständigkeit widersteht dem direkten Brennen des Lichtbogens. Die hohe Leitfähigkeit der Kupferphase gewährleistet eine stabile Lichtbogenbildung und leitet die Lichtbogenwärme schnell ab, wodurch ein Verlust des Elektrodenendes durch Überhitzung vermieden wird. Im Vergleich zu anderen Elektrodentypen zeichnen sich skelettgefüllte Elektroden unter solchen hochfrequenten und hochintensiven Arbeitsbedingungen durch eine längere Lebensdauer und eine stabilere Arbeitsleistung aus .

Kurz gesagt: Die skelettgefüllte Elektrode erreicht durch das strukturelle Design der „Wolframskelett-Träger-Kupferphasenfunktion“ ein perfektes Gleichgewicht zwischen mechanischen und funktionellen Eigenschaften. Ihre Leistung ist insbesondere unter extremen Bedingungen wie hohen Temperaturen und hohem Druck herausragend, was sie zu einem unverzichtbaren Schlüsselmaterial im High-End-Industriebereich macht.

4.5.3 Gradientenverteilungselektrode

Die Gradientenverteilungselektrode ist ein hochgradig zielgerichtetes Strukturdesign in Wolfram-Kupfer- Verbundwerkstoffen. Ihr Kernmerkmal ist eine kontinuierlich variierende Verteilung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses über den Elektrodenquerschnitt. Von einem Ende der Elektrode zum anderen kann der Wolframgehalt allmählich ansteigen, während der Kupfergehalt abnimmt (oder umgekehrt), was zu einer Mikrostruktur mit einem sanften Leistungsübergang führt. Dieses Design bricht mit der gleichmäßigen Verteilung der Komponenten in herkömmlichen Verbundwerkstoffen. Durch die sorgfältige Steuerung des Zusammensetzungsgradienten priorisieren verschiedene Bereiche der Elektrode die Leistungsvorteile von Wolfram oder Kupfer, während die Pufferwirkung des Übergangsbereichs Grenzflächenspannungsprobleme durch plötzliche Leistungsänderungen verhindert.

In puncto Leistung weist die Gradientenverteilungselektrode signifikante regionale Funktionalisierungsmerkmale auf. Der Bereich mit hohem Wolframgehalt weist aufgrund des hohen Schmelzpunkts und der hohen Festigkeit von Wolfram eine ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit auf und behält auch bei extrem hohen Temperaturen seine strukturelle Stabilität. Der Bereich mit hohem Kupfergehalt hingegen nutzt die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit des Kupfers, um eine effiziente Stromübertragung und Wärmeableitung zu gewährleisten. Wichtiger noch: Die Zusammensetzung des Übergangsbereichs ändert sich langsam, sodass die beiden Eigenschaften an der Verbindungsstelle nahtlos ineinander übergehen. Es kommt weder zu einem sprunghaften Abfall der elektrischen Leitfähigkeit durch einen plötzlichen Anstieg des Wolframgehalts noch zu einem starken Abfall der Temperaturbeständigkeit durch einen plötzlichen Anstieg des Kupfergehalts. Diese allmähliche Leistungsänderung löst effektiv das häufige Problem der Spannungskonzentration beim Verbinden heterogener Materialien und verbessert die Zuverlässigkeit der Elektrode unter komplexen Arbeitsbedingungen erheblich.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Herstellung gradientenverteilter Elektroden ist technisch äußerst anspruchsvoll und erfordert eine präzise Kontrolle der Zusammensetzungsverteilung. Gängige Herstellungsverfahren sind die schichtweise Pulvermetallurgie und das Gradientensintern: Beim schichtweisen Pulvermetallurgieverfahren werden Pulvermischungen mit unterschiedlichen Wolfram-Kupfer-Verhältnissen entsprechend der geplanten Gradientenreihenfolge schichtweise aufgebracht und durch einmaliges Pressen und Sintern ein kontinuierlicher Übergang der Zusammensetzung erreicht. Der Zusammensetzungsunterschied jeder Pulverschicht muss präzise kontrolliert werden, um einen glatten Übergangsbereich zu gewährleisten. Beim Gradientensintern wird das Wolfram oder Kupfer durch Regulierung des Temperatur- oder Atmosphärenfelds während des Sinterprozesses gezielt im Material verteilt, wodurch ein natürlicher Zusammensetzungsgradient entsteht. Unabhängig vom verwendeten Verfahren ist der Einsatz fortschrittlicher Simulationstechnologie erforderlich, um die Zusammensetzungsverteilungskurve vorab zu entwerfen und durch präzise Kontrolle der Prozessparameter sicherzustellen, dass die tatsächliche Verteilung mit dem Entwurf übereinstimmt. Schon geringe Abweichungen können zu Leistungseinbußen im Übergangsbereich führen.

Thermische Strukturkomponenten in der Luft- und Raumfahrtindustrie . Wenn beispielsweise ein Raumfahrzeug aus dem Weltraum wieder in die Atmosphäre eintritt, erfährt die Oberfläche der Wiedereintrittskapsel starke Reibung mit der Atmosphäre, wodurch extrem hohe Temperaturen entstehen. Daher muss das Oberflächenmaterial der Kapsel eine ausgezeichnete Hochtemperatur- und Oxidationsbeständigkeit aufweisen. Gleichzeitig sind die Präzisionsinstrumente in der Kapsel äußerst temperaturempfindlich und benötigen ein effizientes Wärmeableitungssystem, um eine geeignete Betriebstemperatur aufrechtzuerhalten. In diesem Szenario dienen gradientenverteilte Elektroden als Schlüsselkomponente, die die Oberfläche der Kapsel mit dem internen Wärmeableitungssystem verbinden. Das äußere, der Kapsel zugewandte Ende ist mit einem hohen Wolframanteil konstruiert und bietet so eine hohe Temperaturbeständigkeit, um der intensiven Wiedereintrittshitze standzuhalten und ein Schmelzen oder Oxidieren der Oberfläche zu verhindern. Das innere, der Kapsel zugewandte Ende ist mit einem hohen Kupferanteil konstruiert und nutzt seine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit, um die von der Oberfläche absorbierte Wärme schnell an den internen Kühlkörper weiterzuleiten und so eine Wärmeableitung an die Instrumente im Inneren zu verhindern. Die Übergangszone sorgt für einen sanften Leistungsübergang, baut die erheblichen Spannungen ab, die durch die internen und externen Temperaturunterschiede und Unterschiede in den Materialeigenschaften verursacht werden, und verhindert so Risse oder Ablösungen der Elektrode bei wiederholten Temperaturzyklen.

Gradientenverteilte Elektroden spielen auch in den Brennkammerkomponenten von Hochgeschwindigkeitsflugzeugtriebwerken eine unverzichtbare Rolle. Das Innere der Brennkammer ist während des Betriebs hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt. Der durch die Kraftstoffverbrennung erzeugte heiße Luftstrom erzeugt einen starken Scheuereffekt an den Kammerwänden. Daher muss die der hohen Temperatur ausgesetzte Seite eine extrem hohe Hitzebeständigkeit und Scheuerfestigkeit aufweisen. Gleichzeitig muss die Außenseite der Brennkammer an das Kühlsystem angeschlossen werden, um die Wärme schnell abzuleiten und eine Überhitzung zu verhindern. Dies erfordert wiederum eine gute Wärmeleitfähigkeit des Außenmaterials. Die Gradientenverteilte Elektrode weist durch die rationale Gestaltung des Wolfram-Kupfer-Verhältnisses hohe Wolframanteile im Inneren der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Brennkammer auf, um der Scheuerwirkung bei hohen Temperaturen zu widerstehen, während die hohen Kupferanteile an der Außenseite eine effiziente Wärmeableitung gewährleisten. Der Übergangsbereich löst Leistungskonflikte und Spannungswidersprüche zwischen Innen- und Außenseite und gewährleistet so die strukturelle Integrität und stabile Leistung der Brennkammer im Langzeitbetrieb mit hoher Frequenz.

Darüber hinaus bieten Gradienten-verteilte Elektroden einzigartige Vorteile als Wärmeableitungselektroden für Hochleistungshalbleiterbauelemente. Beim Betrieb eines Halbleiterbauelements entsteht im Kernbereich des Chips große Wärmemengen, die eine effiziente Wärmeleitfähigkeit der Elektrode zur Wärmeableitung erfordern. Der mit dem externen Schaltkreis verbundene Teil der Elektrode benötigt eine gute elektrische Leitfähigkeit, um Signalübertragungsverluste zu reduzieren. Durch die Gestaltung einer graduellen Verteilung des Kupfergehalts vom Chipkontaktende bis zum Schaltkreisanschlusende kann die Elektrode die doppelte Anforderung einer effizienten Wärmeableitung und einer niederohmigen elektrischen Leitfähigkeit gleichzeitig erfüllen und gleichzeitig die Probleme unzureichender Wärmeableitung oder schlechter elektrischer Leitfähigkeit, die durch die Leistungseinschränkungen eines einzelnen Materials entstehen, vermeiden.

4.6 Klassifizierung von Wolfram-Kupfer-Elektroden nach makroskopischer physikalischer Form

Die makroskopische physikalische Morphologie konzentriert sich hauptsächlich auf den Oberflächenzustand, die Dichte und den Verbundmodus der Elektrode, die in dichten Typ, porösen Typ und Verbundbeschichtungstyp unterteilt ist, um unterschiedliche Funktionsanforderungen zu erfüllen.

4.6.1 Dichte Elektrode

Dichte Elektroden sind die am häufigsten verwendete Basiskategorie von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Ihr Hauptmerkmal ist die extrem geringe innere Porosität. Die Wolframpartikel und Kupferphasen sind eng miteinander verbunden und bilden eine durchgehende und dichte Mikrostruktur, die eine glatte und ebene Oberfläche erzeugt. Diese Struktur verleiht der Elektrode nicht nur eine hervorragende Gesamtleistung, sondern ermöglicht ihr auch einen stabilen und zuverlässigen Betrieb in einer Vielzahl von industriellen Szenarien, was sie zu einem grundlegenden Material der Wahl im Bereich der Präzisionsfertigung macht.

Der Schlüssel zum Erreichen dieser dichten Struktur liegt in fortschrittlichen Herstellungsverfahren, wobei Hochdrucksintern und heißisostatisches Pressen die am häufigsten verwendeten technischen Ansätze sind. Beim Hochdrucksintern wird bei hoher Temperatur kontinuierlich hoher Druck auf das Wolfram-Kupfer-Mischpulver ausgeübt, wodurch die Partikel gezwungen werden, vollständig in Kontakt zu treten, zu diffundieren und zu verschmelzen, wodurch die zwischen den Partikeln gebildeten Poren beseitigt werden. Das heißisostatische Pressen geht noch einen Schritt weiter und übt bei hoher Temperatur durch ein flüssiges Medium in alle Richtungen gleichmäßigen Druck auf den Rohling aus, wodurch die winzigen Poren im Material vollständig verdichtet werden und schließlich eine nahezu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fehlerfreie dichte Struktur entsteht. Die Kernziele beider Verfahren sind dieselben: Durch die synergetische Wirkung von Druck und Temperatur werden die physikalischen Barrieren zwischen den Partikeln aufgebrochen, wodurch eine enge Bindung zwischen den beiden Wolfram-Kupfer-Phasen erreicht und die strukturelle Grundlage für die hohe Leistung der Elektrode gelegt wird.

Der Leistungsvorteil dichter Elektroden beruht auf ihrer strukturellen Integrität. Die geringe Porosität sorgt dafür, dass die Kupferphase ein durchgehendes und ununterbrochenes leitfähiges Netzwerk bildet. Der Stromfluss führt nicht zu lokalen Widerstandsänderungen durch verstopfte Poren, und die Leitfähigkeit ist stabil und effizient. Gleichzeitig sorgt die eng integrierte Mikrostruktur für einen reibungslosen Wärmeableitungsprozess, sodass die bei der Verarbeitung oder beim Arbeiten entstehende Wärme schnell abgeleitet werden kann und Leistungseinbußen durch lokale Überhitzung vermieden werden. Die dichte Struktur verleiht der Elektrode außerdem eine höhere mechanische Festigkeit und Verformungsbeständigkeit. Bei mechanischem Druck oder thermischer Belastung reißt oder bricht sie nicht so leicht und behält ihre Form lange Zeit bei, was ihre Lebensdauer verlängert. Die glatte und ebene Oberfläche reduziert zudem Widerstandsschwankungen beim Kontakt mit dem Werkstück und verringert die Möglichkeit, dass sich während der Verarbeitung Verunreinigungen festsetzen, was die Prozessstabilität verbessert.

Im Bereich der Funkenerosion (EDM) sind die Vorteile dichter Elektroden besonders offensichtlich. EDM nutzt Hochfrequenzentladungen zwischen Elektrode und Werkstück, um Material abzutragen. Die Strukturdichte der Elektrode beeinflusst direkt die Gleichmäßigkeit der Entladungsenergieverteilung. Befinden sich Poren in der Elektrode, kann es während des Entladungsprozesses zu lokalen Energiekonzentrationen kommen, die zu unregelmäßigen Ablationsspuren auf der Werkstückoberfläche führen und die Bearbeitungsgenauigkeit beeinträchtigen. Die gleichmäßige Struktur der dichten Elektrode gewährleistet eine stabile Freisetzung der Entladungsenergie und hält die Oberflächenrauheit des Werkstücks konstant. Sie eignet sich besonders für Szenarien mit hohen Präzisionsanforderungen, wie beispielsweise im Formenbau. Bei der Bearbeitung von Präzisionszahnradformen beispielsweise können dichte Elektroden das Zahnprofil des Zahnrads durch eine stabile Entladungsleistung präzise nachbilden, die Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität der Form sicherstellen und zuverlässige Garantien für die anschließende Massenproduktion von Zahnrädern bieten.

Auch beim Widerstandsschweißen spielen dichte Elektroden eine unverzichtbare Rolle. Während des Schweißvorgangs muss die Elektrode durch engen Kontakt mit dem Werkstück Strom übertragen und gleichzeitig einem gewissen Druck standhalten. Die geringe Porosität der dichten Elektrode vermeidet den „Void-Effekt“ bei der Stromübertragung, d. h. die Unterbrechung des Strompfads oder den plötzlichen Anstieg des Widerstands durch Poren. Sie stellt sicher, dass der Strom gleichmäßig durch den Schweißbereich fließt, sodass die Wärme am Schweißpunkt stabil erzeugt und die Konsistenz der Schweißlinsenbildung gewährleistet ist. Beim Schweißen von Fahrzeuggetrieben ist diese Stabilität von entscheidender Bedeutung: Die Festigkeit der Zahnradschweißnaht wirkt sich direkt auf die Gesamtleistung des Getriebes aus. Die dichte Elektrode kann durch stabile Stromübertragung und Drucktoleranz die gleichmäßige Festigkeit jedes Schweißpunkts sicherstellen und so das Risiko eines Getriebeausfalls aufgrund lokaler Schweißfehler vermeiden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auch im Bereich der Mikroelektronik-Verpackungen finden dichte Elektroden breite Anwendung. Mikroelektronische Geräte stellen extrem hohe Anforderungen an die Maßgenauigkeit und Leistungsstabilität der Elektroden. Die glatte Oberfläche und gleichmäßige Struktur dichter Elektroden gewährleisten einen guten Kontakt mit dem Chip oder Substrat, reduzieren den Kontaktwiderstand und verbessern die Signalübertragungseffizienz. Gleichzeitig kann ihre hervorragende Wärmeleitfähigkeit die vom Chip im Betrieb erzeugte Wärme schnell ableiten und so Leistungseinbußen durch zu hohe Temperaturen verhindern. Beispielsweise dienen dichte Wolfram-Kupfer-Elektroden bei der Verpackung von Smartphone-Chips als duales Medium für Stromleitung und Wärmeableitung. Sie gewährleisten eine stabile Übertragung elektrischer Signale bei gleichzeitiger Kontrolle der Chiptemperatur und unterstützen so den Hochleistungsbetrieb des Geräts.

4.6.2 Poröse Elektroden

Poröse Elektroden sind Wolfram-Kupfer-Elektroden mit besonderen Strukturmerkmalen. Sie weisen eine große Anzahl regelmäßiger oder unregelmäßiger Poren auf. Diese Poren sind keine Materialfehler, sondern strukturelle Merkmale, die aktiv durch das Prozessdesign geformt werden. Anders als bei dichten Elektroden mit geringer Porosität sind Porenverteilung und -anteil bei porösen Elektroden zentrale Designparameter. Durch die Regulierung von Parametern wie Druck, Temperatur und Haltezeit während des Sinterprozesses lassen sich Morphologie und Dichte der Poren präzise steuern, wodurch letztendlich ein spezielles Material mit sowohl funktionellen als auch strukturellen Eigenschaften entsteht. Durch dieses Design behält die Elektrode die grundlegenden Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffen bei und bietet gleichzeitig einzigartige Vorteile wie geringes Gewicht und große spezifische Oberfläche, wodurch sie sich an die Anforderungen bestimmter Szenarien anpasst.

Der Schlüssel zum Verfahren der Herstellung poröser Elektroden liegt in der umgekehrten Regulierung des Sinterprozesses. Herkömmliche Verdichtungsverfahren fördern die Partikelverschmelzung durch hohen Druck und langfristige Wärmespeicherung, während die Bildung poröser Strukturen eine entsprechende Reduzierung des Sinterdrucks und eine Verkürzung der Wärmespeicherzeit erfordert, sodass das Wolframpulver und das Kupferpulver in einem unvollständig verdichteten Zustand eine Skelettstruktur bilden und die Lücken zwischen den Partikeln als Poren erhalten bleiben. Zusätzlich kann die Bildung regelmäßiger Poren durch die Zugabe von Porenbildnern unterstützt werden: Dem gemischten Pulver werden flüchtige oder lösliche Substanzen hinzugefügt. Während des Sinterprozesses verdampfen diese Substanzen oder werden anschließend aufgelöst und entfernt, wodurch Porenkanäle einer voreingestellten Form zurückbleiben. Unabhängig von der Methode ist eine präzise Kontrolle der Prozessparameter erforderlich, um eine gleichmäßige und den Konstruktionserwartungen entsprechende Porenverteilung sicherzustellen und Leistungseinbußen durch lokale Porenkonzentration zu vermeiden.

Der Hauptvorteil der porösen Struktur der Elektrode zeigt sich in der Balance zwischen geringem Gewicht und effizienter Wärmeableitung. Durch die große Anzahl an Poren wird die Gesamtdichte des Materials deutlich reduziert, und das Gewicht ist im Vergleich zu dichten Elektroden gleichen Volumens deutlich geringer, was in Anwendungsszenarien, in denen die Gerätelast kontrolliert werden muss, von entscheidender Bedeutung ist. Gleichzeitig vergrößert das komplexe Kanalnetzwerk der Poren die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

spezifische Oberfläche der Elektrode erheblich. Wenn Wärme durch das Material geleitet wird, kann die größere Oberfläche den Wärmeaustausch mit der Umgebung beschleunigen, und in Kombination mit der in den Poren entstehenden Luftzirkulation wird die Wärmeableitungseffizienz verbessert. Diese Kombination aus „geringem Gewicht + hoher Wärmeableitung“ macht poröse Elektroden in Anwendungsszenarien wie gewichtsempfindlichen Mobilgeräten und Luft- und Raumfahrtkomponenten mit hohen Anforderungen an die Wärmeableitung unverzichtbar.

Bei der Anwendung von Kommutierungselektroden für Drohnenmotoren kommen die Vorteile poröser Elektroden voll zum Tragen. Die Ausdauer von Drohnen hängt direkt vom Gewicht der Ausrüstung ab. Leichtbau ist der Schlüssel zur Verbesserung der Ausdauer. Da der Motor eine Kernkomponente ist, ist die Gewichtsoptimierung seiner Elektroden besonders wichtig. Die poröse Wolframkupferelektrode reduziert durch ihre innere Porenstruktur das Gewicht und gewährleistet gleichzeitig aufgrund der hohen Leitfähigkeit der Kupferphase eine stabile Stromübertragung während der Kommutierung. Noch wichtiger ist, dass Drohnenmotoren bei hohen Geschwindigkeiten viel Wärme erzeugen. Wenn die Wärme nicht rechtzeitig abgeführt wird, kann dies zur Überhitzung und zum Ausfall des Motors führen. Die große spezifische Oberfläche der porösen Struktur kann Wärme schnell an die Luft abgeben. In Kombination mit dem Wärmeableitungsdesign des Motorgehäuses bildet dies ein effizientes Wärmeableitungssystem, um sicherzustellen, dass der Motor während eines Langzeitflugs eine stabile Leistung beibehält. Im Bereich der elektrolytischen Bearbeitung spielt die Porenstruktur poröser Elektroden eine einzigartige Rolle bei der Medienspeicherung und -übertragung. Bei der elektrolytischen Bearbeitung wird die elektrochemische Auflösung von Materialien durch den Elektrolyten zwischen Elektrode und Werkstück erreicht. Herkömmliche Elektroden benötigen externe Rohre für den kontinuierlichen Elektrolyttransport, während die inneren Poren poröser Elektroden direkt als Elektrolytspeicher und -kanäle dienen und während des Bearbeitungsprozesses langsam Elektrolyt freisetzen, um sicherzustellen, dass der Bearbeitungsbereich stets feucht ist und eine kontinuierliche Kühlung und Schmierung gewährleistet ist. Dieses Design vereinfacht das Rohrleitungssystem der Bearbeitungsmaschine und eignet sich besonders für die elektrolytische Bearbeitung komplexer Oberflächen oder tiefer Hohlräume – wenn die Elektrode in einen engen Raum eindringt, kann der aus den Poren freigesetzte Elektrolyt präzise auf den Bearbeitungsbereich einwirken. Dadurch wird das Problem der ungleichmäßigen Elektrolytverteilung durch externen Transport vermieden und die Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächenqualität verbessert.

Unter den Elektrodenkomponenten von Brennstoffzellen sind poröse Wolfram-Kupfer-Elektroden besonders wertvoll. Brennstoffzellen benötigen Elektroden, um katalytische Reaktionen zwischen Brennstoff und Oxidationsmittel zu ermöglichen und gleichzeitig den erzeugten Strom zu leiten. Dazu müssen die Elektroden sowohl eine gute elektrische Leitfähigkeit als auch eine ausreichende Kontaktfläche für die Reaktion aufweisen. Die Porenstruktur der porösen Elektrode bietet Raum für Gasdiffusion und Reaktion, und die hohe Leitfähigkeit des Wolfram-Kupfer-Verbundmaterials gewährleistet eine schnelle Elektronenübertragung. Durch Optimierung der Porengröße und -verteilung können Reaktionseffizienz und Leitfähigkeit ausgeglichen werden, sodass die Brennstoffzelle stabil arbeitet und gleichzeitig hohe Leistung liefert. Darüber hinaus weist die poröse Struktur eine gute Zähigkeit auf, die Volumenänderungen während des Batteriebetriebs abfedern und die Lebensdauer der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektrode verlängern kann.

Es ist zu beachten, dass die Konstruktion poröser Elektroden eine Anpassung der Porenparameter an spezifische Anwendungsszenarien erfordert. Zu große Poren können die strukturelle Festigkeit verringern, während zu kleine Poren die Wärmeableitung oder die dielektrische Übertragungseffizienz beeinträchtigen können. Daher müssen Porenmorphologie, Verteilungsgleichmäßigkeit und Proportionen wiederholt durch Simulation und Experimente überprüft werden. Obwohl dieses maßgeschneiderte Strukturdesign die Herstellung erschwert, ermöglicht es porösen Elektroden auch, spezielle Anforderungen zu erfüllen, die herkömmliche Elektroden nicht erfüllen können, was sie zu einer der vielseitigsten Kategorien in der Familie der Wolfram-Kupfer-Elektroden macht.

4.6.3 Verbundbeschichtungselektroden

Verbundbeschichtungselektroden sind eine spezielle Kategorie von Wolfram-Kupfer-Elektroden, die durch Funktionsüberlagerung bahnbrechende Leistungsdurchbrüche erzielen. Das Kernkonzept besteht darin, eine oder mehrere Funktionsbeschichtungen auf der Oberfläche eines Wolfram-Kupfer-Substrats aufzubringen und die synergetische Leistung von Beschichtung und Substrat zu nutzen, um die Leistungsdefizite eines einzelnen Materials auszugleichen. Die Auswahl des Beschichtungsmaterials ist äußerst flexibel, und je nach Anwendungsanforderungen können verschiedene Materialien wie Silber, Nickel, Diamant und Keramik ausgewählt werden. Durch Galvanisieren, Aufdampfen, thermisches Spritzen und andere Verfahren wird eine enge Verbindung mit dem Substrat erreicht, wodurch letztendlich eine Verbundstruktur aus „Wolfram-Kupfer-Substrat als struktureller Träger + Oberflächenbeschichtung zur Optimierung spezifischer Funktionen“ entsteht. Dieses Design behält nicht nur die Kernvorteile von Wolfram-Kupfer-Materialien wie hohe Festigkeit und hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit bei, sondern verleiht der Elektrode durch die Beschichtung auch eine neue Leistungsdimension, wodurch ihre Anwendungsszenarien erheblich erweitert werden.

Der Schlüssel zur Herstellung von Elektroden mit Verbundbeschichtung liegt in der Qualität der Bindung zwischen Beschichtung und Substrat, und verschiedene Prozesspfade haben unterschiedliche Schwerpunkte. Das Galvanisierungsverfahren eignet sich zur Herstellung von Metallbeschichtungen. Durch Elektrolyse werden Metallionen gleichmäßig auf der Oberfläche des Wolfram-Kupfer-Substrats abgeschieden und bilden eine dichte Beschichtung. Seine Vorteile sind eine kontrollierbare Beschichtungsdicke und eine starke Bindung mit dem Substrat. Es eignet sich besonders zur Herstellung von leitfähigen Metallbeschichtungen wie Silber und Nickel. Beim Aufdampfverfahren wird das Beschichtungsmaterial in einer Vakuumumgebung verdampft und als Film auf der Substratoberfläche abgeschieden. Damit lassen sich dünne Schichten mit Nanometerpräzision herstellen. Es eignet sich für nichtmetallische Beschichtungen wie Diamant und Keramik und ermöglicht eine genaue Kontrolle der Zusammensetzung und Struktur der Beschichtung. Beim thermischen Spritzverfahren wird das Beschichtungsmaterial erhitzt, bis es geschmolzen oder halbgeschmolzen ist, und durch einen Hochgeschwindigkeitsluftstrom auf die Substratoberfläche gesprüht, um eine Beschichtung zu bilden. Es eignet sich für die Herstellung dicker Beschichtungen oder großflächiger Beschichtungen und wird häufig für verschleißfeste und hochtemperaturbeständige Beschichtungen verwendet. Unabhängig vom

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verwendeten Verfahren muss die Substratoberfläche vorbehandelt werden (z. B. durch Polieren, Reinigen und Aktivieren), um sicherzustellen, dass sich zwischen der Beschichtung und dem Substrat keine Verunreinigungen oder Oxidschichten befinden. Andernfalls kann die Beschichtung abfallen oder die Leistung kann nachlassen .

Der Leistungsvorteil von Elektroden mit Verbundbeschichtung liegt in ihren gezielten Funktionsverbesserungen. Die Wolfram-Kupfer- Matrix als Trägerkörper sorgt für stabile mechanische Festigkeit, elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie strukturelle Stabilität und stellt sicher, dass die Elektrode während des Gebrauchs ihre Form und Grundleistung beibehält. Die Oberflächenbeschichtung optimiert die Leistung für bestimmte Anforderungen, wie z. B. die Reduzierung des Kontaktwiderstands, die Erhöhung der Verschleißfestigkeit und die Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit. Dadurch kann die Elektrode in bestimmten Szenarien die Leistung reiner Wolfram-Kupfer-Materialien übertreffen. Dieses Modell „Grundgarantie + Funktionsverbesserung“ ermöglicht es der Elektrode, sich an die umfassenden Anforderungen komplexer Arbeitsbedingungen anzupassen und gleichzeitig das höchste Niveau bei den wichtigsten Leistungsindikatoren zu erreichen .

Bei Steckverbinderanwendungen für Hochfrequenzkommunikationsgeräte zeigen versilberte Verbundbeschichtungselektroden hervorragende Leistungen. Die Hochfrequenzsignalübertragung reagiert äußerst empfindlich auf den Kontaktwiderstand, und selbst geringe Widerstandsschwankungen können zu Signaldämpfung oder -verzerrung führen. Das Wolfram-Kupfer-Substrat weist eine gute Leitfähigkeit auf, und die oberflächliche Silberbeschichtung kann den Kontaktwiderstand weiter senken, da Silber eines der leitfähigsten Metalle ist, seine Oberfläche nicht leicht oxidiert und seinen niedrigen Widerstand lange Zeit beibehalten kann. Wenn die Elektrode als Steckverbinder verwendet wird, kann die Silberbeschichtung eine effiziente Signalübertragung an der Kontaktschnittstelle gewährleisten, Reflexionen und Verluste reduzieren und eignet sich besonders für Szenarien mit strengen Anforderungen an die Signalqualität, wie z. B. Satellitenkommunikation und 5G-Basisstationen. Gleichzeitig stellt die hohe Festigkeit des Wolfram-Kupfer-Substrats sicher, dass sich der Steckverbinder beim Ein- und Ausstecken nicht verformt, wodurch ein schlechter Kontakt aufgrund einer losen Struktur vermieden wird.

Verbundelektroden mit Diamantbeschichtungen auf der Oberfläche weisen einen einzigartigen Wert im Bereich der Verarbeitung von Materialien mit hoher Härte auf. Beim EDM von Materialien wie Formstahl und Hartmetall, Die Elektroden müssen häufig hohen Temperaturen und mechanischer Reibung standhalten. Bei längerem Gebrauch neigt die Oberfläche von Elektroden aus reinem Wolfram-Kupfer zu Verschleiß oder Ablation, was zu einer verringerten Verarbeitungsgenauigkeit führt. Dank ihrer extrem hohen Härte und Verschleißfestigkeit kann die Diamantbeschichtung eine Schutzbarriere auf der Elektrodenoberfläche bilden, die mechanischem Verschleiß und Erosion durch hohe Temperaturen während des Verarbeitungsprozesses widersteht und so die Lebensdauer der Elektrode deutlich verlängert. Gleichzeitig kann die hervorragende Wärmeleitfähigkeit von Diamant die Elektrode dabei unterstützen, Wärme schnell abzuleiten und Beschichtungsfehler durch lokale Überhitzung zu vermeiden. Dieser doppelte Vorteil von „Verschleißfestigkeit + Wärmeableitung“ macht diesen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektrotyp in Bereichen wie der Präzisionsformverarbeitung und der Herstellung von Flugzeugtriebwerksschaufeln sehr beliebt.

In Hochtemperatur-Antioxidationsszenarien spielen Verbundelektroden mit Nickel- oder Keramikbeschichtungen eine Schlüsselrolle. Beispielsweise müssen die Elektroden in Lichtbogenöfen der metallurgischen Industrie kontinuierlich in einer oxidierenden Umgebung mit hohen Temperaturen arbeiten. Auf der Oberfläche von reinem Wolfram-Kupfer-Material bildet sich leicht eine Oxidschicht, was zu einer Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit führt. Nickelbeschichtungen können bei hohen Temperaturen einen dichten Oxidfilm bilden, der verhindert, dass Sauerstoff das Substrat weiter korrodiert, und das leitfähige Netzwerk der Elektrode vor Zerstörung schützt; Keramikbeschichtungen (wie Aluminiumoxid und Zirkonoxid) weisen eine höhere Hochtemperatur- und Oxidationsbeständigkeit auf und sind für Arbeitsbedingungen mit höheren Temperaturen geeignet. Durch physikalische Isolierung verhindern sie, dass das Substrat mit korrosiven Medien in Kontakt kommt. Diese Art von Verbundelektrode erhält nicht nur die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit von Wolframkupfer, sondern verfügt auch über die Hochtemperatur- und Oxidationsbeständigkeit der Beschichtung, wodurch die Anwendungsgrenzen von Wolfram-Kupfer-Materialien in Hochtemperaturindustrien erheblich erweitert werden.

Darüber hinaus ermöglicht die Verbundbeschichtungstechnologie auch eine multifunktionale Integration. So können beispielsweise bei Präzisionselektroden medizinischer Geräte biokompatible Verbundbeschichtungen (wie Titanlegierungen) eingesetzt werden, um Wolframkupferelektroden eine hervorragende elektrische Leitfähigkeit zu verleihen und gleichzeitig unerwünschte Reaktionen bei Kontakt mit menschlichem Gewebe zu vermeiden. So werden die besonderen Anforderungen minimalinvasiver chirurgischer Instrumente erfüllt. Diese funktionale Anpassung durch Beschichtungen ermöglicht es Verbundbeschichtungselektroden, verschiedene unkonventionelle Anforderungen zu erfüllen und sie zur Kategorie mit dem größten Innovationspotenzial in der Familie der Wolframkupferelektroden zu machen.

Es ist zu beachten, dass Dicke und Gleichmäßigkeit der Beschichtung einen erheblichen Einfluss auf die Elektrodenleistung haben. Eine zu dicke Beschichtung kann zu übermäßigen inneren Spannungen führen, die zu Rissen oder Abblättern führen können; eine zu dünne Beschichtung bietet keinen wirksamen Schutz und keine Funktionsverbesserung. Daher müssen die Parameter des Beschichtungsprozesses entsprechend den Beschichtungsmaterial- und Substrateigenschaften präzise gesteuert werden. Um sicherzustellen, dass die Beschichtungsleistung den Standards entspricht, sind frühzeitige Simulationen und spätere Tests erforderlich. Diese verfeinerte Fertigungsanforderung erhöht zwar die Produktionskosten, ermöglicht aber auch, dass Verbundbeschichtungselektroden im Bereich der High-End-Fertigung einen unersetzlichen Wert schaffen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 5: Herstellungstechnologie der Wolfram-Kupfer-Elektrode

5.1 Infiltrationsprozess

Der Infiltrationsprozess ist die Kerntechnologie bei der Herstellung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Durch Infiltration von flüssigem Kupfer in ein poröses Wolframskelett wird ein Verbundwerkstoff mit hervorragender Leistung hergestellt. Dieser Prozess umfasst zwei Hauptphasen: die Vorfertigung des Wolframskeletts und die Infiltration des Kupfers, um eine geringe Porosität und gleichmäßige Phasenverteilung zu erreichen. Der Infiltrationsprozess basiert auf Pulvermetallurgie, kombiniert mit einem Vakuum oder einer inerten Atmosphäre, um die hohe Dichte und Stabilität des Materials sicherzustellen. Während des Herstellungsprozesses sind die Formung, das Sintern und die Porenkontrolle des Wolframpulvers wichtige Schritte, die sich direkt auf die mechanische Festigkeit, Leitfähigkeit und Haltbarkeit der endgültigen Elektrode auswirken. Die Optimierung von Prozessparametern wie Temperatur, Druck und Zeit bestimmt maßgeblich die Mikrostruktur und Leistung der Elektrode.

5.1.1 Wolframskelett-Vorfertigung

Die Vorfertigung des Wolframskeletts ist der erste Schritt im Infiltrationsprozess. Ziel ist die Schaffung einer porösen Wolframstruktur, die die Grundlage für die anschließende Kupferinfiltration bildet. In dieser Phase wird durch Formen, Sintern und Porositätskontrolle von Wolframpulver eine Skelettstruktur mit einer bestimmten Festigkeit aufgebaut. Die Qualität des Wolframskeletts wirkt sich direkt auf den Kupferfülleffekt und die Leistung der fertigen Elektrode aus. Der Herstellungsprozess erfordert eine präzise Kontrolle der Reinheit der Rohstoffe, der Partikelgröße und der Prozessparameter. Porosität und Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur sind entscheidend für eine erfolgreiche Vorfertigung. Heißisostatisches Pressen wird häufig verwendet, um Dichte und Stabilität des Skeletts zu optimieren. Die Vorfertigung des Wolframskeletts legt den Grundstein für den Infiltrationsprozess und stellt sicher, dass die Elektrode bei der anschließenden Verarbeitung gute mechanische Eigenschaften aufweist.

5.1.1.1 Wolframpulverformen

Das Formen von Wolframpulver ist ein grundlegender Schritt bei der Vorfertigung von Wolframskeletten. Durch das Pressen des Wolframpulvers in eine bestimmte Form wird der Körper für das anschließende Sintern und Infiltrieren vorbereitet. Bei diesem Verfahren werden typischerweise Kaltpress- oder isostatische Presstechniken eingesetzt. Dabei wird hochreines Wolframpulver in eine Form gegeben und mechanisch ein vorläufiger Grünkörper geformt. Während des Formprozesses müssen Partikelgröße und Morphologie des Wolframpulvers konsistent sein. Sphärische oder nahezu sphärische Pulver verbessern die Fülleffizienz und die Gleichmäßigkeit des Grünkörpers. Eine gleichmäßige Mischung wird durch Kugelmühlen oder V-Mischer erreicht, wodurch sichergestellt wird, dass die Pulververteilung frei von signifikanter Schichtung ist. Formdruck und Formdesign wirken sich direkt auf die Dichte und Porositätsverteilung des Grünkörpers aus. Angemessener Druck kann innere Defekte reduzieren. Der geformte Grünkörper muss eine gewisse mechanische Festigkeit aufweisen, um das anschließende

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturesintern zu überstehen. Oberflächenbehandlungen wie Vorpressen können die Stabilität des Grünkörpers weiter verbessern. Die Luftfeuchtigkeit muss während des Prozesses kontrolliert werden, um eine Feuchtigkeitsaufnahme des Pulvers zu verhindern, die zu einer Verschlechterung der Formqualität führen kann. Die Wolframpulverformung ist der Ausgangspunkt des gesamten Herstellungsprozesses, und ihre Qualität bestimmt den reibungslosen Ablauf der nachfolgenden Schritte.

5.1.1.2 Wolframskelettsintern

Das Sintern eines Wolframskeletts ist ein wichtiger Schritt bei der Umwandlung eines Wolframpulver-Grünkörpers in ein poröses Skelett. Die Hochtemperaturbehandlung erhöht die Festigkeit und Stabilität des Grünkörpers. Dieser Prozess wird typischerweise unter Vakuum oder Wasserstoffatmosphäre durchgeführt. Die Sintertemperatur ist auf die Eigenschaften des Wolframpulvers abgestimmt und fördert das Halswachstum und die Bindung zwischen den Partikeln. Zunächst bilden die Wolframpulverpartikel durch Diffusion und Rekristallisation erste Verbindungen. Mit steigender Temperatur verdichtet sich die Mikrostruktur allmählich, und es bildet sich eine poröse Struktur. Sinterzeit und Heizrate müssen präzise gesteuert werden, um eine übermäßige Erwärmung zu vermeiden, die zu Rissen oder Überhitzung führen kann. Der Sinterprozess beinhaltet auch eine Atmosphärenkontrolle. Eine reduzierende Wasserstoffumgebung entfernt die oberflächliche Oxidschicht und verbessert die Bindung zwischen den Partikeln. Heißisostatisches Pressen (HIP) kann das Sintern weiter optimieren und die Gleichmäßigkeit und Festigkeit des Skeletts durch omnidirektionalen Druck verbessern. Das gesinterte Wolframskelett sollte über ausreichende mechanische Festigkeit und eine angemessene Porosität verfügen, um Kanäle für die Kupferinfiltration zu bieten. Die Anpassung der Prozessparameter beeinflusst die Mikrostruktur des Skeletts. Zukünftige Anstrengungen, darunter dynamische Simulation und mehrstufige Sinterstechniken, werden die Sintereffizienz und die Skelettqualität verbessern, um den Anforderungen hochpräziser Elektroden gerecht zu werden.

5.1.1.3 Kontrolle der Wolframskelettporen

Die Porosität des Wolframskeletts ist entscheidend für eine erfolgreiche Infiltration. Ziel ist es, die Porosität und Porengrößenverteilung des Skeletts so anzupassen, dass optimale Bedingungen für die Kupferinfiltration geschaffen werden. Dieser Prozess wird durch Formdruck, Sinterbedingungen und den Einsatz von Additiven erreicht. Die Porosität wirkt sich direkt auf die Kupferfülleffizienz und die Leistung der fertigen Elektrode aus. Während der Formphase kann die Druckanpassung die anfängliche Dichte des Grünkörpers verändern. Niedrigere Drücke erhalten mehr Poren, während höhere Drücke die Porenanzahl reduzieren. Während des Sinterns beeinflusst die Kontrolle von Temperatur und Zeit den Porenverschluss und die Porenverbindung. Geeignete Sinterparameter erhalten eine offenporige Struktur. Additive wie organische Bindemittel oder Porenbildner können die Porenkontrolle unterstützen. Nach dem Sintern werden die Additive durch Pyrolyse entfernt, um ein gleichmäßiges Porennetzwerk zu bilden. Mikrostrukturanalysen zeigen, dass eine gleichmäßige Porengrößenverteilung der Schlüssel zur Porenkontrolle ist. Zu große oder ungleichmäßige Poren können zu einer unzureichenden Kupferpenetration führen. Das heißisostatische Pressverfahren optimiert die Porenstruktur durch omnidirektionalen Druck, reduziert den Anteil geschlossener Poren und verbessert die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Penetrationseffizienz. Bei der Porenkontrolle muss auch die spätere Benetzbarkeit des Kupfers berücksichtigt werden. Eine Oberflächenbehandlung kann die Grenzflächenbindung zwischen dem Wolframskelett und dem flüssigen Kupfer verbessern.

5.1.2 Infiltrationskontrolle

Die Infiltrationskontrolle ist die entscheidende Phase des Infiltrationsprozesses. Ihr Ziel ist die Herstellung leistungsstarker Wolfram-Kupfer-Elektroden durch präzise Steuerung des Kupferinfiltrationsprozesses. Diese Phase umfasst drei wichtige Schritte: Vorbereitung des Kupfermaterials, Kontrolle der Infiltrationstemperatur und Kontrolle der Infiltrationszeit. Dadurch wird sichergestellt, dass das flüssige Kupfer die Poren des Wolframskeletts vollständig ausfüllt und eine gleichmäßige Verbundstruktur bildet. Die Infiltrationskontrolle wirkt sich direkt auf die Porenfüllungsrate, die Grenzflächenbindungsstärke und die Dichte der endgültigen Elektrode aus. Geringe Porosität und gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur sind der Kern der Qualitätssicherung. Ein Vakuum oder eine inerte Atmosphäre optimieren den Infiltrationseffekt zusätzlich, und heißisostatisches Pressen kann zur Verbesserung der Materialstabilität beitragen. Eine optimierte Infiltrationskontrolle bietet zuverlässige Leistungsunterstützung für die Anwendung von Elektroden in der Funkenerosion, beim Schweißen und in der Mikroelektronikverpackung.

5.1.2.1 Kupfermaterialvorbereitung

Die Kupfermaterialaufbereitung ist ein grundlegender Schritt der Infiltrationskontrolle. Sie zielt darauf ab, hochwertige Kupferrohstoffe bereitzustellen und die Bedingungen für die Infiltration von flüssigem Kupfer zu schaffen. Dieser Prozess umfasst typischerweise die Auswahl, Reinigung und Vorbehandlung von Kupferpulver oder Kupferblöcken, um eine gute Fließfähigkeit und Benetzbarkeit bei hohen Temperaturen sicherzustellen. Die Reinheit des Kupfermaterials ist ein entscheidender Faktor. Hochreines Elektrolytkupfer oder zerstäubtes Kupfer wird ausgewählt, um den Gehalt an Verunreinigungen wie Sauerstoff und Schwefel zu reduzieren und so die Bildung von Poren oder Defekten während des Infiltrationsprozesses zu vermeiden. Das Kupfermaterial kann je nach Prozessanforderungen in Pulver- oder Klumpenform vorliegen. Die Pulverform erleichtert eine gleichmäßige Verteilung, während die Klumpenform für eine großflächige Infiltration geeignet ist. Die Partikelgröße bzw. Blockgröße muss der Porosität des Wolframskeletts entsprechen.

Die Vorbehandlung umfasst Trocknung und Oberflächenreinigung. Das Kupfermaterial wird im Vakuum oder in einer Inertgasumgebung getrocknet, um Oberflächenfeuchtigkeit und Oxidschichten zu entfernen und so die Grenzflächenhaftung mit dem Wolframgerüst zu verbessern. Mechanisches Rühren oder Kugelmahlen sorgt für eine gleichmäßige Durchmischung und gewährleistet so eine gleichmäßige Verteilung des Kupfermaterials während der Infiltration. Bei der Vorbereitung des Kupfermaterials muss auch dessen Schmelzpunkt berücksichtigt werden. Durch entsprechendes Vorwärmen kann die Infiltrationseffizienz verbessert werden. Während des Vorbereitungsprozesses wird eine Umweltkontrolle durchgeführt, um Oxidation zu verhindern und die Qualität des Kupfermaterials sicherzustellen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.2.2 Infiltrationstemperaturregelung

Die Kontrolle der Infiltrationstemperatur ist ein wichtiger Schritt bei der Infiltrationskontrolle. Sie stellt sicher, dass das Kupfer im flüssigen Zustand effektiv in das Wolframskelett eindringt und gleichzeitig Materialschäden durch übermäßige Hitze vermieden werden. Dieser Prozess wird typischerweise in einem Vakuumofen oder in einer inerten Atmosphäre durchgeführt. Die Temperatur wird über dem Schmelzpunkt von Kupfer eingestellt, um eine flüssige Phase zu erreichen, in der das Kupfer die Poren vollständig benetzen und ausfüllen kann. Eine präzise Temperaturkontrolle ist entscheidend. Eine zu niedrige Temperatur kann das vollständige Schmelzen des Kupfers verhindern, während eine zu hohe Temperatur ein lokales Schmelzen des Wolframskeletts oder Kornwachstum verursachen und so die Mikrostruktur beeinträchtigen kann. Die Heizrate muss schrittweise angepasst werden, um Risse durch konzentrierte thermische Spannung zu vermeiden.

Zur Temperaturregelung gehört auch die Steuerung der Atmosphäre. Eine Vakuumumgebung reduziert Oxidationsreaktionen, und Inertgase wie Argon schützen das Material zusätzlich. Heißisostatisches Pressen kann die Temperaturregelung unterstützen, indem es die Kupferdurchdringung verbessert und die Fülleffizienz durch omnidirektionalen Druck steigert. Die Stabilität der Infiltrationstemperatur wirkt sich direkt auf die Qualität der Grenzflächenverbindung aus. Übermäßige Temperaturschwankungen können zu Kupferüberlauf oder ungleichmäßiger Verteilung führen. Die Temperaturverteilung im Ofen muss während des Prozesses überwacht werden, um eine gleichbleibende Temperatur aller Teile zu gewährleisten. Zukünftig wird die Einführung intelligenter Temperaturregelsysteme oder mehrstufiger Heiztechnologien die Infiltrationstemperaturregelung weiter optimieren und so die Elektrodendichte und Leistungskonsistenz verbessern.

5.1.2.3 Infiltrationszeitsteuerung

Die Infiltrationszeit ist ein wichtiger Parameter der Infiltrationskontrolle. Sie stellt sicher, dass das flüssige Kupfer das Wolframskelett vollständig durchdringt und eine stabile Verbundstruktur bildet. Dieser Prozess wird durch die Porosität des Wolframskeletts, die Kupfermenge und die Temperatur bestimmt. Eine zu kurze Zeit kann zu einer unvollständigen Füllung führen, während eine zu lange Zeit zu übermäßigem Kupferfluss oder einer Skelettverformung führen kann. Während der anfänglichen Infiltrationsphase benötigt das Kupfer ausreichend Zeit, um die Wolframoberfläche zu benetzen und in tiefe Poren einzudringen. Anschließend konzentriert sich die Zeitkontrolle auf den Erstarrungsprozess, um Kupferüberlauf und Porenbildung zu vermeiden.

Die Zeitsteuerung muss ebenfalls mit Temperatur und Druck koordiniert werden. Heißisostatisches Pressen (HIP) kann die Infiltrationszeit verkürzen und den Kupferfluss durch omnidirektionalen Druck beschleunigen. Dabei wird die Infiltrationszeit typischerweise stufenweise festgelegt: eine Anfangsphase zur Sicherstellung der Infiltration, eine Stabilisierungsphase zur Förderung der Bindung und eine Abkühlphase zur Verfestigung der Struktur. Mikrostrukturanalysen zeigen, dass eine angemessene Infiltrationszeit ungefüllte Poren reduzieren und die Grenzflächenbindung verbessern kann. Umgebungsstabilität und Geräteleistung wirken sich direkt auf die Effektivität der Zeitsteuerung aus.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zukünftig werden Echtzeitüberwachung oder dynamische Anpassungstechnologien eingesetzt, um die Infiltrationszeit zu optimieren und die Gleichmäßigkeit und Haltbarkeit der Elektroden zu verbessern.

5.2 Nachbearbeitungstechnologie

Die Nachbearbeitung ist der letzte Schritt bei der Herstellung von Wolfram-Kupfer- Elektroden. Ziel ist es, Geometrie, Oberflächenqualität und Funktionsfähigkeit der Elektrode durch Schneiden, Schleifen, Oberflächenbehandlung und Kontrolle der Maßgenauigkeit zu optimieren. Dieser Schritt wird nach dem Infiltrationsprozess durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Elektrode die Anforderungen der jeweiligen Anwendung erfüllt. Bei der Nachbearbeitung von Wolfram-Kupfer-Elektroden werden die hohe Härte des Wolframs und die Duktilität des Kupfers ausgenutzt, um die Mikrostruktur anzupassen und die Haltbarkeit durch Bearbeitungs- und Oberflächenmodifizierungstechniken zu verbessern. Die präzise Kontrolle der Prozessparameter ist entscheidend und umfasst die Werkzeugauswahl, die Verarbeitungsumgebung und die Qualitätskontrolle. Diese wirken sich direkt auf die Leistung der Elektrode beim EDM, Schweißen oder bei der mikroelektronischen Verpackung aus.

5.2.1 Schneiden

Das Schneiden ist der erste Schritt der Nachbearbeitung, bei dem überschüssiges Material entfernt wird, um die Wolfram-Kupfer- Elektrode zu formen. Dieser Prozess umfasst typischerweise Drehen oder Fräsen mit Hartmetall- oder Diamantwerkzeugen, um den infiltrierten Rohling zu entfernen. Die hohe Härte von Wolfram erfordert Werkzeuge mit hoher Verschleißfestigkeit, während die Duktilität von Kupfer kontrollierte Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe erfordert, um ein Festkleben oder Reißen zu verhindern. Das Schneiden eignet sich für komplexe Elektrodenformen, wie Stäbe oder Blöcke. Während des Prozesses muss die Verwendung von Kühlmittel sichergestellt werden, um Wärmeentwicklung und Oberflächenschäden zu minimieren. Der Schneidprozess umfasst mehrere Schritte: Schruppen zum Entfernen überschüssigen Materials und Schlichten zum Erreichen der Konturgenauigkeit, wobei schrittweise die Entwurfsmaße erreicht werden. Die geringe Porosität in der Mikrostruktur unterstützt ein gleichmäßiges Schneiden des Materials, und durch das heißisostatische Pressverfahren optimierte Elektroden weisen eine gute mechanische Stabilität auf. Die Oberflächenrauheit muss nach dem Schneiden überprüft werden, um eine reibungslose Verarbeitung in den nachfolgenden Schritten zu gewährleisten. Umweltkontrollen, wie z. B. Staubkontrolle, können Staubkontamination verhindern. Zukünftige Fortschritte bei CNC-Werkzeugmaschinen oder beim laserunterstützten Schneiden könnten die Verarbeitungseffizienz und die Genauigkeit komplexer Formen verbessern und so den Anforderungen hochpräziser Elektroden gerecht werden.

5.2.2 Schleifen

Schleifen ist ein anspruchsvoller Nachbearbeitungsschritt, bei dem Schleifwerkzeuge eingesetzt werden, um Spanrückstände zu entfernen und die Oberflächengüte und geometrische Genauigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden zu verbessern. Bei diesem Verfahren kommen typischerweise Diamantschleifscheiben oder Siliziumkarbidwerkzeuge zum Einsatz, um die hohe Härte des Wolframs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

präzise zu schleifen. Die Duktilität von Kupfer erfordert Schmierung, um übermäßigen Verschleiß zu vermeiden. Schleifen eignet sich zur Verbesserung der Kontaktflächenqualität der Elektrode, insbesondere bei Anwendungen wie der Funkenerosion (EDM) oder der Mikroelektronik-Verpackung, bei denen eine hohe Ebenheit erforderlich ist. Die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur sorgt für stabile Schleifergebnisse. Der Schleifprozess besteht aus zwei Schritten: Grobschleifen zum Entfernen von Spanspuren und Feinschleifen für eine spiegelglatte Oberfläche. Schleifdruck und -geschwindigkeit müssen während des Prozesses angepasst werden, um thermische Risse oder Oberflächenverbrennungen zu vermeiden. Kühlmittel wird verwendet, um die Temperatur zu senken und die Materialeigenschaften zu schützen. Für das heißisostatische Pressen optimierte Elektroden weisen eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit auf. Oberflächendefekte wie Mikrorisse oder Vertiefungen werden nach dem Schleifen überprüft, um die Einhaltung der Qualitätsnormen zu gewährleisten.

5.2.3 Oberflächenbehandlung

Die Oberflächenbehandlung ist ein nachträglicher Optimierungsschritt, der die Oberflächeneigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden, wie Korrosionsbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Haftfestigkeit, durch chemische oder physikalische Methoden verbessert. Dieser Prozess umfasst Polier-, Plattierungs- oder Beschichtungstechniken, um die hohe Härte von Wolfram und die chemische Aktivität von Kupfer zu modifizieren. Durch Polieren werden mikroskopische Oberflächendefekte entfernt, Vernickelung oder Vergoldung verbessern die Witterungsbeständigkeit und Beschichtungen wie Titanitrid verbessern die Verschleißfestigkeit. Die geringe Porosität der Mikrostruktur unterstützt eine gleichmäßige Oberflächenbehandlung.

Die Oberflächenbehandlung sollte auf den Anwendungsfall abgestimmt sein. Bei EDM-Elektroden kann Polieren zur Verbesserung der Entladungsstabilität sinnvoll sein, während bei Schweißelektroden eine Beschichtung zur Reduzierung der Schlackenhaftung erforderlich sein kann. Temperatur und Zeit müssen kontrolliert werden, um die innere Struktur nicht zu beeinträchtigen. Optimierte Heißisostatische Pressverfahren (HIP) verbessern die Oberflächenhaftung der Elektroden. Umweltkontrollen, wie z. B. eine inerte Atmosphäre, können die Oxidation reduzieren. Oberflächenhaftung und Haltbarkeit sollten nach der Behandlung geprüft werden.

5.2.4 Maßhaltigkeitskontrolle

Die Kontrolle der Maßgenauigkeit ist der letzte Schritt der Nachbearbeitung. Durch Messung und Anpassung wird sichergestellt, dass die Wolfram-Kupfer-Elektrode den Konstruktionspezifikationen entspricht. Bei diesem Prozess werden Koordinatenmessgeräte oder optische Prüfgeräte eingesetzt, um Länge, Breite und geometrische Toleranzen der Elektrode zu prüfen und sie unter Berücksichtigung der hohen Härte von Wolfram und der Duktilität von Kupfer zu optimieren. Nach dem Schneiden und Schleifen wird die Elektrode nachbearbeitet. Dabei werden Maßabweichungen im Mikrometerbereich kontrolliert und die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur sichergestellt, um eine hochpräzise Bearbeitung zu ermöglichen. Die Kontrolle der Maßgenauigkeit umfasst mehrere Prüfungen und Korrekturen. Sobald erste Prüfungen Abweichungen aufzeigen, werden diese durch Feinschleifen oder lokales Schneiden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

korrigiert. Für das heißisostatische Pressen optimierte Elektroden weisen eine ausgezeichnete Maßstabilität auf. Umgebungsfaktoren wie Temperaturschwankungen müssen berücksichtigt werden, da sie die Wärmeausdehnung des Materials beeinflussen und einen Betrieb bei konstanter Temperatur erfordern. Die Prüfdaten werden aufgezeichnet, um die Chargenkonsistenz sicherzustellen. Intelligente Prüfsysteme oder 3D-Scantechnologie ermöglichen künftig eine Präzisionskontrolle in Echtzeit, um den Anforderungen hochpräziser Elektroden oder komplexer Strukturkomponenten gerecht zu werden.



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	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 alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 6: Anwendungsszenarien von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden finden aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit, Lichtbogenerosionsbeständigkeit und guten Bearbeitbarkeit breite Anwendung in der Funkenerosion (EDM). Im Präzisionsformenbau werden sie aufgrund ihrer geringen Verluste und hohen Bearbeitungsgenauigkeit zur Herstellung komplexer Hohlräume und feiner Strukturen eingesetzt und eignen sich daher besonders für die Bearbeitung von Hartmetallformen. Bei schwer zerspanbaren Materialien wie Titanlegierungen und Hochtemperaturlegierungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie halten sie den durch Hochfrequenzentladungen erzeugten hohen Temperaturen stand und gewährleisten so die Oberflächenqualität und Maßgenauigkeit von Präzisionsteilen.

Wolfram-Kupfer-Elektroden spielen auch beim Schweißen, Schneiden und elektrischen Schalten eine Schlüsselrolle. Beim Widerstandsschweißen reduzieren sie den Elektrodenverschleiß und sorgen für eine stabile Schweißnahtfestigkeit, wodurch sie sich für Branchen wie die Automobil- und Haushaltsgeräteproduktion eignen. Beim Plasmaschneiden widerstehen sie der Erosion durch hohe Temperaturen und verbessern so die Schneideffizienz und Schnittqualität. Darüber hinaus gewährleistet ihre Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und Schmelzschweißen als Kontaktkomponenten in Hochspannungs-Leistungsschaltern, Relais und anderen Geräten den sicheren und stabilen Betrieb von Stromversorgungssystemen und elektrischen Steuergeräten.

Wolfram-Kupfer-Elektroden finden auch in der Verteidigung, der Luft- und Raumfahrt und in Spezialgebieten wichtige Anwendung. In Raketenleitsystemen gewährleistet ihre Stabilität die einwandfreie Funktion unter extremen Bedingungen. In Raumfahrzeug-Energiesystemen trotzen sie den rauen Bedingungen des Weltraums und gewährleisten eine effiziente und sichere Energieübertragung. In nuklearen Testgeräten und medizinischen Geräten tragen ihre Strahlungsresistenz, elektrische Leitfähigkeit und Biokompatibilität dazu bei, die Genauigkeit der Testdaten bzw. die Sicherheit von Behandlungsprozessen zu verbessern. Mit dem technologischen Fortschritt werden sich ihre potenziellen Anwendungen weiter erweitern.

6.1 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in der Funkenerosion

gehören zu den wichtigsten Anwendungen der Funkenerosion (EDM). Dank ihrer einzigartigen Materialeigenschaften findet diese Technologie breite Anwendung in der Präzisionsfertigung. Beim Funkenerosionsbearbeiten (EDM) wird Material durch Lichtbogenentladung abgetragen, und Wolfram-Kupfer-Elektroden sind aufgrund des hohen Schmelzpunkts und der Härte von Wolfram in Kombination mit der hohen Leitfähigkeit von Kupfer ideale Werkzeuge. Fertigungsverfahren wie Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration sorgen für geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung in den Elektroden, während heißisostatisches Pressen ihre Mikrostruktur weiter optimiert und so Haltbarkeit und Stabilität erhöht. Die Vorteile von Wolfram-Kupfer-Elektroden im Formenbau, bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Materialien und in der Funkenerosion zeigen ihre entscheidende Rolle bei der Herstellung hochpräziser und komplexer Teile.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.1 Anwendung in der Formenbearbeitung

Wolfram-Kupfer-Elektroden in der Formenbearbeitung beweisen ihre Bedeutung in der hochpräzisen Fertigung, insbesondere bei der elektroerosiven Bearbeitung komplexer Formen. Die Formenherstellung erfordert präzise Geometrie und glatte Oberflächen. Wolfram-Kupfer-Elektroden erfüllen diese Anforderung durch ihre hohe Härte und Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion. Bei der Herstellung werden Elektroden typischerweise mit einem mittleren bis hohen Wolframgehalt verwendet (z. B. WCu 70/30 oder WCu 80/20). Pulvermetallurgie erzeugt eine dichte Mikrostruktur, und heißisostatisches Pressen optimiert ihre Druckfestigkeit und Oberflächenstabilität. Die geringe Porosität der Elektrode sorgt für eine stabile Entladungsleistung, während die hohe Leitfähigkeit des Kupfers eine effiziente Stromübertragung unterstützt und so die Verarbeitungszeit verkürzt.

In der Formenbearbeitung eignen sich Wolframkupferelektroden besonders für die Feinbearbeitung von Stanzformen, Kunststoffformen und Schmiedeformen. Dank ihrer Verschleißfestigkeit behält die Elektrode auch bei wiederholten Entladungen ihre Form und reduziert Verluste. Die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur unterstützt die Bildung komplexer Konturen wie tiefer Rippen oder kleiner Löcher, wobei die Bearbeitungsgenauigkeit im Mikrometerbereich liegt. Oberflächenbehandlungen wie Polieren verbessern die Kontaktqualität der Elektrode zusätzlich und verbessern die Oberflächenbeschaffenheit der Form. In der Produktion kann die Elektrode hochharten Stahl oder legierten Stahl verarbeiten, um den Anforderungen der Fertigung von Formen für Automobilteile und elektronische Komponenten gerecht zu werden. Einsatzszenarien umfassen auch die kollaborative Mehrelektrodenbearbeitung, und die Robustheit der Wolframkupferelektrode ermöglicht vielfältige Anpassungen und Installationen.

Umweltkontrollen, wie beispielsweise die Verwendung von Kühlmitteln, reduzieren thermische Effekte und verlängern die Lebensdauer der Elektroden, während Nachbearbeitungsprozesse wie Schleifen die Maßgenauigkeit gewährleisten. Zukünftig kann die Einführung von funktionalem Gradientendesign oder Nanotechnologie die Haltbarkeit und Verarbeitungseffizienz von Wolframkupferelektroden in der Formenverarbeitung weiter verbessern und so den Anforderungen komplexerer oder anspruchsvollerer Formenherstellungen, beispielsweise für Luft- und Raumfahrtkomponenten, gerecht werden.

6.1.2 Anwendung bei der Bearbeitung schwer bearbeitbarer Werkstoffe

haben bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Materialien ihre überlegene Leistung unter extremen Bedingungen bewiesen und eignen sich daher besonders für die Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte oder hohem Schmelzpunkt. Schwer zerspanbare Materialien wie Wolframstahl, Titanlegierungen und Keramik lassen sich aufgrund ihrer starken mechanischen Eigenschaften mit herkömmlichen Methoden nur schwer schneiden, weshalb die Funkenerosion (EDM) die bevorzugte Technologie ist. Wolfram-Kupfer-Elektroden sind aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit und Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion zu einem zentralen Werkzeug geworden. Während des Herstellungsprozesses werden die Elektroden aus einem hohen Wolframanteil (z. B. WCu 90/10) hergestellt, wobei durch einen Vakuuminfiltrationsprozess ein starkes Wolframskelett gebildet wird. Heißisostatisches Pressen (HIP)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimiert die Mikrostruktur, was zu geringer Porosität und einer gleichmäßigen Phasenverteilung führt. Die hohe elektrische Leitfähigkeit von Kupfer unterstützt eine effiziente Entladung.

Bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Materialien halten Wolfram-Kupfer-Elektroden energiereichen Entladungen stand. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram (über 3000 °C) schützt vor Lichtbogentemperaturen und reduziert den Oberflächenverschleiß. Dadurch eignen sich Wolfram-Kupfer-Elektroden für die Bearbeitung von Materialien wie Wolframkarbid und Titanlegierungen. Die feine Körnung ihrer Mikrostruktur ermöglicht eine hochpräzise Bearbeitung, während die Verschleißfestigkeit der Elektroden eine langfristige Formstabilität gewährleistet. Dadurch eignen sie sich für die Herstellung komplexer Geometrien wie Turbinenschaufeln oder medizinischer Implantate. Oberflächenbehandlungen wie Beschichtungen erhöhen die Oxidationsbeständigkeit und verbessern die Leistung in feuchten Umgebungen, während Nachbearbeitungsprozesse wie Schneiden und Schleifen die geometrische Genauigkeit optimieren.

Zu den Anwendungsszenarien zählen auch die Luft- und Raumfahrt- sowie die Verteidigungsindustrie. Die mechanische Festigkeit von Wolframkupferelektroden unterstützt die Verarbeitung bei hohen Belastungen, und die Verwendung von Kühlmittel verringert das Risiko thermischer Risse und verlängert die Lebensdauer der Elektrode.

6.1.3 Vorteile der Anwendung in der Funkenerosion

Wolfram-Kupfer-Elektroden für die Funkenerosion (EDM) zeichnen sich durch ihre Verbundeigenschaften und einen optimierten Herstellungsprozess aus und ermöglichen so eine hochpräzise und effiziente Produktion. Die Funkenerosion basiert auf der Erosionsbeständigkeit, der elektrischen Leitfähigkeit und dem Wärmemanagement der Elektrode. Wolfram-Kupfer-Elektroden mit ihrem hohen Wolframgehalt (z. B. WCu 80/20) bieten hohe Temperaturbeständigkeit. Die Härte von Wolfram schützt vor Entladungsschlägen, während die hohe elektrische Leitfähigkeit von Kupfer (nahezu reinem Kupfer) eine stabile Stromübertragung gewährleistet. Pulvermetallurgie erzeugt eine porenarme Mikrostruktur, während heißisostatisches Pressen die Grenzflächenbindung verbessert. Oberflächenbehandlungen wie Polieren verbessern die Entladungskonsistenz.

Die Anwendungsvorteile zeigen sich vor allem in der Langlebigkeit. Die Abbrandfestigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden reduziert Oberflächenverluste, verlängert die Lebensdauer und senkt die Produktionskosten, insbesondere bei energiereichen Entladungen. Zweitens optimiert die Kombination aus elektrischer und thermischer Leitfähigkeit die Verarbeitungseffizienz. Die Wärmeableitung in der Kupferphase reduziert lokale Überhitzungen, verbessert die Oberflächenqualität des Werkstücks und macht es für die Herstellung von Präzisionsformen und Mikrokomponenten geeignet. Drittens unterstützen die mechanische Festigkeit und Zähigkeit die Bearbeitung komplexer Formen, und die geringe Porosität der Elektroden reduziert das Rissrisiko, sodass sie sich für die Herstellung tiefer Löcher oder feiner Strukturen eignen.

Anwendungsszenarien umfassen die Automobilindustrie und die Elektronikfertigung. Die Anpassung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeausdehnung an Wolframkupferelektroden reduziert die Spannung zwischen Werkstück und Werkstück, und Kühlmittel- und Umgebungskontrolle erhöhen die Stabilität zusätzlich.

6.2 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in Hochspannungsgeräten

Wolfram-Kupfer-Elektroden in Hochspannungsgeräten beweisen ihre überlegene Leistung unter extremen elektrischen Bedingungen und werden in Szenarien eingesetzt, die hohe Haltbarkeit und Stabilität erfordern. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram, kombiniert mit der hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Kupfer, machen es zu einem idealen Material für Geräte wie Hochspannungsschalter und Blitzableiter. Herstellungsverfahren wie Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration gewährleisten die geringe Porosität und gleichmäßige Mikrostruktur der Elektrode, während heißisostatisches Pressen ihre Lichtbogenbeständigkeit und mechanische Festigkeit weiter optimiert. Der Einsatz von Wolfram-Kupfer-Elektroden in Hochspannungsgeräten erfüllt die Anforderungen der Stromübertragung, der industriellen Steuerung und der Verteidigungsausrüstung, und ihre Leistungsvorteile kommen insbesondere in Hochspannungs- und Hochstromumgebungen zum Tragen.

6.2.1 Anwendung in Hochspannungsschaltern

Wolfram-Kupfer-Elektroden in Hochspannungsschaltanlagen sind ein Schlüsselement ihrer Anwendung in elektrischen Hochspannungsgeräten und eignen sich besonders für Anwendungen, bei denen häufig hohe Ströme abgeschaltet werden müssen. Hochspannungsschaltanlagen werden zur Stromkreissteuerung und zum Schutz in Stromversorgungssystemen eingesetzt. Wolfram-Kupfer-Elektroden verwenden einen mittleren bis hohen Wolframgehalt (z. B. WCu 70/30 oder WCu 85/15). Wolframpulver wird in einem pulvermetallurgischen Verfahren mit Kupferpulver vermischt. Nach dem Sintern füllt das Kupfer die Poren in der flüssigen Phase und bildet eine dichte Mikrostruktur. Heißisostatisches Pressen optimiert die Grenzflächenbindung, während die geringe Porosität in der Mikrostruktur die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion erhöht. Die hohe elektrische Leitfähigkeit von Kupfer unterstützt eine effiziente Stromübertragung.

In Hochspannungsschaltanlagen ist die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden ein entscheidender Vorteil. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram hält Lichtbogentemperaturen von Tausenden von Grad Celsius stand, reduziert Oberflächenschmelzen oder Verschleiß und verlängert die Lebensdauer. Die Lichtbogenbeständigkeit der Elektroden unterstützt häufige Schaltvorgänge, während die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer die Wärmeableitung unterstützt, das Risiko lokaler Überhitzung verringert und die elektrische Stabilität verbessert. Die gleichmäßige Phasenverteilung in der Mikrostruktur reduziert die Spannungskonzentration, und Oberflächenbehandlungen wie Vernickeln erhöhen die Oxidationsbeständigkeit und machen die Elektroden für feuchte oder industrielle Umgebungen geeignet. Während des Herstellungsprozesses muss das Wolframpulver eine hohe Reinheit und kontrollierte Partikelgröße aufweisen, um eine gleichbleibende Leistung zu gewährleisten.

Zu den Anwendungen gehören Umspannwerke und industrielle Stromverteilungssysteme. Wolfram-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kupfer-Elektroden halten Hochspannungsabschaltungen stand und reduzieren so die Ausfallraten. Nachbearbeitungsprozesse wie Schleifen können die Qualität der Kontaktfläche optimieren.

6.2.2 Anwendung in Blitzableitern

Wolfram-Kupfer-Elektroden in Blitzableitern beweisen ihren einzigartigen Wert im Blitzschutz und eignen sich besonders zur Absorption und Ableitung energiereicher Blitzeinschläge. Ableiterelektroden, die zum Schutz elektrischer Geräte vor Überspannungsschäden eingesetzt werden, verwenden einen hohen Wolframanteil (z. B. WCu 80/20) und werden im Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Wolframpulver bildet ein festes Gerüst, während Kupfer das Material durch Flüssigkeitsinfiltration infiltrierte, was zu einer porenarmen und gleichmäßigen Mikrostruktur führt. Heißisostatisches Pressen erhöht die Schlagfestigkeit und Stabilität des Materials, während die hohe Leitfähigkeit von Kupfer eine schnelle Stromableitung unterstützt.

Bei Blitzableitern ist die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden ein entscheidender Vorteil. Der hohe Schmelzpunkt von Wolfram schützt vor dem Hochtemperaturlichtbogen bei Blitzeinschlag, reduziert Materialverluste und verlängert die Lebensdauer. Die Beständigkeit der Elektroden gegen Lichtbogenerosion gewährleistet ihre Leistung auch nach mehreren Blitzeinschlägen, während die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer Wärme schnell ableitet und so Geräteschäden durch Überhitzung verhindert. Die feine Körnigkeit ihrer Mikrostruktur sorgt für hohe mechanische Festigkeit, während Oberflächenbehandlungen wie Plattierungen die Korrosionsbeständigkeit und die Anpassungsfähigkeit an Außenumgebungen verbessern. Während des Herstellungsprozesses wirken sich die gleichmäßige Mischung der Rohstoffe und die kontrollierte Porengröße direkt auf die Durchdringungseffizienz aus. Zu den Anwendungsszenarien zählen Hochspannungsleitungen und Kommunikationsbasisstationen. Wolfram-Kupfer-Elektroden können Blitzströme effektiv absorbieren und Nachbearbeitungsprozesse wie Schneiden und Polieren optimieren die geometrische Genauigkeit.

6.2.3 Anwendungsvorteile in elektrischen Hochspannungsgeräten

Wolfram-Kupfer-Elektroden in Hochspannungsgeräten verdanken ihren Einsatz den Verbundeigenschaften ihres Materials und einem optimierten Herstellungsprozess, wodurch sie in Hochspannungs- und Hochstromumgebungen außergewöhnlich gut funktionieren. Hochspannungsgeräte erfordern Elektroden mit Lichtbogenerosionsbeständigkeit, elektrischer Leitfähigkeit und thermischer Stabilität. Wolfram-Kupfer-Elektroden mit ihrem hohen Wolframgehalt bieten Hochtemperaturbeständigkeit, während die Härte des Wolframs Widerstandsfähigkeit gegen Lichtbogenschläge bietet und die hohe elektrische Leitfähigkeit von Kupfer (nahezu der von reinem Kupfer) eine effiziente Stromübertragung gewährleistet. Pulvermetallurgie erzeugt eine Mikrostruktur mit geringer Porosität, während heißisostatisches Pressen die Grenzflächenbindung stärkt. Oberflächenbehandlungen wie Plattieren verbessern die Witterungsbeständigkeit. Die Vorteile von Wolfram-Kupfer-Elektroden liegen hauptsächlich in ihrer Lichtbogenerosionsbeständigkeit. Die Lichtbogenbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden verringert den Oberflächenverschleiß und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verlängert die Lebensdauer, insbesondere beim häufigen Betrieb von Hochspannungsschaltern und Blitzableitern. Zweitens optimiert ihre kombinierte elektrische und thermische Leitfähigkeit die elektrische Leistung. Die Wärmeableitung innerhalb der Kupferphase reduziert lokale Überhitzung, verbessert die Gerätestabilität und macht sie für Hochstromabschaltungen oder Blitzschutz geeignet. Drittens unterstützen ihre mechanische Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit den Betrieb in anspruchsvollen Umgebungen. Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur reduziert das Risiko von Rissbildung, und die Oberflächenbehandlung erhöht die Haltbarkeit. Anwendungsszenarien umfassen Energiesysteme und Industrieanlagen. Die Anpassung der Wärmeausdehnung von Wolframkupferelektroden reduziert die Spannung mit dem Substrat, und Kühlsysteme und Umweltkontrolle steigern die Leistung zusätzlich.

6.3 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden beim Schweißen und Löten

Wolfram-Kupfer-Elektroden beweisen beim Schweißen und Löten ihre einzigartige Leistungsfähigkeit in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohen Strömen und finden breite Anwendung in industriellen Szenarien, in denen effiziente Verbindungen und zuverlässige Verbindungen erforderlich sind. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram in Kombination mit der hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Kupfer machen es zu einem idealen Werkzeug für Widerstandsschweißen und -löten. Herstellungsverfahren wie Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration gewährleisten die geringe Porosität und gleichmäßige Mikrostruktur der Elektrode, und das heißisostatische Pressverfahren optimiert ihre thermische Ermüdungsbeständigkeit und Oberflächenstabilität zusätzlich. Der Einsatz von Wolfram-Kupfer-Elektroden im Schweißbereich erfüllt die Anforderungen von Branchen wie der Automobilherstellung, der Elektronikmontage und der Metallverarbeitung. Ihre Leistungsvorteile kommen insbesondere bei hochfesten Verbindungen und komplexen Arbeitsbedingungen zum Tragen.

6.3.1 Anwendung beim Widerstandsschweißen

Wolfram-Kupfer-Elektroden spielen beim Widerstandsschweißen eine entscheidende Rolle beim effizienten Verbinden von Metallteilen und eignen sich daher besonders für Verfahren wie Punktschweißen und Rollnahtschweißen. Beim Widerstandsschweißen wird die Metallverschmelzung durch elektrischen Strom und Druck erreicht. Wolfram-Kupfer-Elektroden verwenden einen niedrigen bis mittleren Wolframanteil. Wolframpulver wird in einem pulvermetallurgischen Verfahren mit einem hohen Anteil Kupferpulver vermischt. Nach dem Sintern bildet das Kupfer ein durchgehend leitfähiges Netzwerk. Heißisostatisches Pressen optimiert die Mikrostruktur und sorgt für geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer sorgt für einen stabilen Strompfad, während die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram die Elektrodenstabilität bei hohen Temperaturen unterstützt. Oberflächenbehandlungen wie Polieren reduzieren die Schweißschlackenhaftung.

Beim Widerstandsschweißen werden Wolfram-Kupfer-Elektroden hauptsächlich zum Punktschweißen von Karosserieteilen oder elektronischen Bauteilen eingesetzt. Die Wärmeleitfähigkeit der Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sorgt für eine schnelle Wärmeableitung, reduziert die Wärmeeinflusszone und verbessert die Qualität der Verbindung. Die Beständigkeit von Wolfram gegen Lichtbogenerosion gewährleistet, dass die Elektrode auch bei wiederholtem Schweißen ihre Form behält, was ihre Lebensdauer verlängert und sie besonders für den Hochfrequenzbetrieb geeignet macht. Das gleichmäßige Kupferphasennetzwerk in der Mikrostruktur unterstützt eine effiziente Stromübertragung, und die Zähigkeit der Elektrode ermöglicht vielfältige Anpassungen und Installationen an Werkstücke unterschiedlicher Dicke. Im Herstellungsprozess wirken sich die gleichmäßige Mischung der Rohstoffe und die Sinterparameter direkt auf die Leistung der Elektrode aus, und Nachbearbeitungsprozesse wie Schleifen optimieren die Kontaktfläche. Anwendungsszenarien umfassen die Automobilherstellung und die Haushaltsgeräteproduktion. Die Antihafteigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden reduzieren die Reinigungshäufigkeit, und das Kühlsystem verbessert das Wärmemanagement.

6.3.2 Anwendung beim Löten

Wolfram-Kupfer-Elektroden überzeugen beim Löten durch ihre einzigartige Eignung für Fügevorgänge mit geringer Wärmezufuhr und eignen sich daher besonders für das Fügen von Präzisionsmetallen und Keramiken. Beim Löten wird ein Füllmaterial geschmolzen. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden in einem Vakuuminfiltrationsverfahren mit mittlerem Wolframgehalt hergestellt. Wolframpulver bildet das Grundgerüst, während Kupfer das Füllmaterial durch Flüssigphaseninfiltration infiltriert. Heißisostatisches Pressen optimiert die Mikrostruktur und sorgt für geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung. Die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit von Kupfer unterstützt eine stabile Erwärmung, während die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram eine Verformung der Elektrode verhindert. Oberflächenbehandlungen wie Plattieren erhöhen die Korrosionsbeständigkeit.

Beim Hartlöten werden Wolfram-Kupfer-Elektroden zum Verbinden elektronischer Komponenten oder von Teilen aus der Luft- und Raumfahrt verwendet. Das Wärmemanagement der Elektrode sorgt für eine gleichmäßige Wärmeverteilung, reduziert die thermische Spannung in der Verbindung und verbessert die Festigkeit der Verbindung. Dank der Härte von Wolfram behält die Elektrode auch bei hohen Temperaturen ihre Form, und ihre Gleichmäßigkeit in der Mikrostruktur gewährleistet eine gleichmäßige Erwärmung. Dadurch eignet sie sich besonders für Mikroschweißen oder Mehrschichtstrukturen. Während des Herstellungsprozesses beeinflussen Porenkontrolle und Kupferbenetzbarkeit die Effektivität des Eindringvorgangs direkt, während Nachbearbeitungsschritte wie Schneiden und Polieren die Elektrodengeometrie optimieren. Zu den Anwendungen gehören die Verpackung von Mikroelektronik und die Luft- und Raumfahrtfertigung. Die Anpassung der Wärmeausdehnung von Wolfram-Kupfer-Elektroden reduziert die Spannung mit dem Substrat, und Umgebungskontrollen wie eine inerte Atmosphäre verhindern Oxidation.

6.3.3 Anwendungsvorteile im Schweißbereich

Wolfram-Kupfer-Elektroden eignen sich aufgrund ihrer Verbundwerkstoffeigenschaften und des optimierten Herstellungsprozesses hervorragend für Schweißanwendungen mit hohen Temperaturen und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hohen Strömen. Schweißelektroden müssen elektrisch und thermisch leitfähig sowie langlebig sein. Wolfram-Kupfer-Elektroden bieten diese elektrische Leitfähigkeit durch einen niedrigen bis mittleren Wolframgehalt. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer sorgt für eine effiziente Stromübertragung, während der hohe Schmelzpunkt von Wolfram für Beständigkeit gegen Hochtemperaturschocks sorgt. Pulvermetallurgie erzeugt eine porenarme Mikrostruktur, während heißisostatisches Pressen die Grenzflächenhaftung verbessert. Oberflächenbehandlungen wie Plattieren erhöhen die Witterungsbeständigkeit.

Die Anwendungsvorteile zeigen sich zunächst in der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit. Das Kupferphasennetzwerk der Wolfram-Kupfer-Elektrode reduziert den Effekt der Widerstandserwärmung, verbessert die Verbindungsqualität und verteilt die Wärme gleichmäßig, wodurch die Wärmeeinflusszone verkleinert wird. Dadurch eignet sie sich besonders für das Hochfrequenzschweißen. Zweitens verlängern die hohe Temperaturbeständigkeit und die Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion die Lebensdauer. Die Härte von Wolfram ermöglicht wiederholten Einsatz, reduziert Oberflächenverlust und passt sich komplexen Arbeitsbedingungen an. Drittens unterstützen Antihalt- und mechanische Festigkeit den Einsatz in verschiedenen Szenarien. Die Zähigkeit der Mikrostruktur verringert das Rissrisiko, und die Oberflächenbehandlung verringert die Anhaftung von Schweißschlacke.

Zu den Anwendungsszenarien zählen die Automobilindustrie und die Elektronikfertigung. Die Wärmemanagementfähigkeiten von Wolfram-Kupfer-Elektroden steigern die Schweißeffizienz, und Kühlsysteme und Umweltkontrollen optimieren die Leistung zusätzlich.

6.4 Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in der Luft- und Raumfahrt sowie der Militärindustrie

Wolfram-Kupfer-Elektroden beweisen in der Luft- und Raumfahrt sowie im Militärbereich ihre überlegene Leistung unter extremen Bedingungen und werden häufig in kritischen Komponenten eingesetzt, die eine hohe Haltbarkeit und Zuverlässigkeit erfordern. Der hohe Schmelzpunkt und die Härte von Wolfram, kombiniert mit der hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Kupfer, machen es zu einem idealen Material für Raketentriebwerke und Lenkkomponenten. Herstellungsverfahren wie Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration gewährleisten die geringe Porosität und gleichmäßige Mikrostruktur der Elektroden, während heißisostatisches Pressen ihre thermische Ermüdungsbeständigkeit und mechanische Festigkeit weiter optimiert. Der Einsatz von Wolfram-Kupfer-Elektroden in der Luft- und Raumfahrt sowie im Militärbereich erfüllt die Anforderungen der Weltraumforschung, der Raketentechnologie und der Verteidigungsausrüstung. Ihre Leistungsvorteile kommen insbesondere bei großer Hitze und hoher Belastung zum Tragen.

6.4.1 Anwendung in Raketentriebwerkskomponenten

Wolfram-Kupfer-Elektroden in Raketentriebwerkskomponenten beweisen ihren einzigartigen Wert in Hochtemperatur- und Hochdruckumgebungen und eignen sich daher besonders für die Herstellung von Antriebssystemen und Brennkammern. Raketentriebwerke müssen unter extremen thermischen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Belastungen stabil bleiben. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden mit einem hohen Wolframanteil durch ein Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Wolframpulver bildet ein festes Skelett, während Kupfer das Material durch Flüssiginfiltration infiltriert. Heißisostatisches Pressen optimiert die Mikrostruktur und sorgt für geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung. Die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit von Kupfer unterstützt ein effizientes Wärmemanagement, während die hohe Temperaturbeständigkeit von Wolfram ein Schmelzen verhindert. Oberflächenbehandlungen wie Plattieren erhöhen die Korrosionsbeständigkeit.

In Raketentriebwerken werden Wolfram-Kupfer-Elektroden in Düsen oder Brennkammerauskleidungen eingesetzt. Ihre hohe Temperaturbeständigkeit schützt vor heißen Gasströmen und erhält die strukturelle Integrität. Ihre Gleichmäßigkeit in der Mikrostruktur sorgt für eine gleichmäßige Wärmeverteilung und reduziert thermische Spannungen. Die Härte von Wolfram ermöglicht einen langfristigen Einsatz, während die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer die Wärmeableitung unterstützt, die Lebensdauer der Komponenten verlängert und sie besonders für Triebwerke mit hohem Schub geeignet macht. Während des Herstellungsprozesses beeinflussen Porositätskontrolle und Rohstoffreinheit die Penetrationseffizienz direkt. Nachbearbeitungstechniken wie Schneiden und Schleifen optimieren die geometrische Genauigkeit und ermöglichen komplexe Formen. Zu den Anwendungsszenarien zählen Weltraumstarts und die Erforschung des Weltraums. Die mechanische Festigkeit von Wolframkupferelektroden hält Hochdruckumgebungen stand, und Umweltkontrollen wie inerte Atmosphären verhindern Oxidation.

6.4.2 Anwendung in Leitkomponenten

Wolfram-Kupfer-Elektroden in Führungskomponenten spielen eine entscheidende Rolle bei der Präzisionssteuerung und Vibrationsbeständigkeit und eignen sich daher besonders für die Herstellung von Radarantennen und Navigationssystemen. Führungskomponenten erfordern hohe Präzision und Zuverlässigkeit. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden in einem pulvermetallurgischen Verfahren mit mittlerem Wolframgehalt hergestellt. Wolframpulver wird mit Kupferpulver vermischt und zu einem leitfähigen Netzwerk gesintert. Heißisostatisches Pressen optimiert die Mikrostruktur und sorgt für geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung. Die hohe Leitfähigkeit von Kupfer unterstützt die Signalübertragung, während die Härte von Wolfram die Vibrationsbeständigkeit erhöht. Oberflächenbehandlungen wie Polieren verbessern die Kontaktqualität.

In Führungskomponenten dienen Wolfram-Kupfer-Elektroden als elektrische Kontakte oder Kühlkörper. Die Wärmeleitfähigkeit der Elektroden sorgt für eine gleichmäßige Wärmeverteilung und reduziert so die Überhitzung elektronischer Bauteile. Ihre Zähigkeit in der Mikrostruktur sorgt für Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Stöße und macht sie daher besonders für Hochgeschwindigkeitsflugzeuge geeignet. Die Verschleißfestigkeit von Wolfram sorgt für Langzeitstabilität, während die Leitfähigkeit von Kupfer die Signalqualität optimiert und sich an komplexe elektromagnetische Umgebungen anpasst. Während des Herstellungsprozesses beeinflussen die Parameter der Rohstoffmischung und des Sinterns die Elektrodenleistung direkt, während Nachbearbeitungsschritte wie Schleifen die Maßgenauigkeit gewährleisten. Zu den

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendungsszenarien zählen die Raketenlenkung und die Satellitennavigation. Die Anpassung der Wärmeausdehnung an Wolframkupferelektroden reduziert die Spannung im Substrat, und Umweltkontrollen wie eine Staubschutzbehandlung erhöhen die Zuverlässigkeit.

6.4.3 Anwendungsvorteile in der Luft- und Raumfahrt sowie der Militärindustrie

Wolfram-Kupfer-Elektroden werden in der Luft- und Raumfahrt sowie im militärischen Bereich aufgrund ihrer Verbundeigenschaften und des optimierten Herstellungsprozesses eingesetzt. Dadurch eignen sie sich hervorragend für Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohen Belastungen. Luft- und Raumfahrt sowie militärische Anwendungen erfordern Elektroden mit hoher Temperaturbeständigkeit, elektrischer Leitfähigkeit und mechanischer Festigkeit. Wolfram-Kupfer-Elektroden nutzen einen hohen Wolframgehalt für Hitzebeständigkeit, während die Härte des Wolframs für Widerstandsfähigkeit gegen extreme Bedingungen sorgt und die hohe elektrische Leitfähigkeit des Kupfers eine effiziente Strom- bzw. Signalübertragung gewährleistet. Pulvermetallurgie erzeugt eine Mikrostruktur mit geringer Porosität, während heißisostatisches Pressen die Grenzflächenbindung verbessert. Oberflächenbehandlungen wie Plattieren erhöhen die Witterungsbeständigkeit.

Die Anwendungsvorteile zeigen sich zunächst in der hohen Temperaturbeständigkeit. Die Hitzebeständigkeit von Wolframkupferelektroden unterstützt den stabilen Betrieb von Raketentriebwerken und Leitkomponenten in Hochtemperaturumgebungen, reduziert Materialverluste und verlängert die Lebensdauer. Zweitens optimiert die Kombination aus elektrischer und thermischer Leitfähigkeit die Leistung. Die Wärmeableitung der Kupferphase reduziert lokale Überhitzung, verbessert die Effizienz elektronischer Komponenten oder die Signalübertragung und eignet sich besonders für hochpräzise Anwendungen. Drittens unterstützen mechanische Festigkeit und Vibrationsbeständigkeit komplexe Arbeitsbedingungen, die Zähigkeit der Mikrostruktur reduziert das Rissrisiko und die Oberflächenbehandlung erhöht die Haltbarkeit. Zu den Anwendungsszenarien gehören Weltraumstarts und Verteidigungsausrüstung. Die Wärmemanagementfähigkeiten von Wolframkupferelektroden erhöhen die Komponentenzuverlässigkeit, und Umweltkontroll- und Kühlsysteme optimieren die Leistung zusätzlich.



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 7: Qualitätskontroll- und Prüfnormen für Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die Herstellung von Wolfram-Kupfer-Elektroden ist ein anspruchsvoller Prozess, der sich über den gesamten Produktionsprozess erstreckt – von der Rohstoffprüfung bis zur Verarbeitung des fertigen Produkts. Reinheit, Partikelgröße und Gleichmäßigkeit der Wolfram- und Kupferpulver müssen während der Rohstoffgewinnung überprüft werden, um zu verhindern, dass übermäßige Verunreinigungen die elektrische Leitfähigkeit und die Hochtemperaturbeständigkeit der Elektrode beeinträchtigen. Während des Formungs- und Sinterprozesses müssen Pressdichte, Sintertemperatur und Haltezeit kontrolliert werden, um eine dichte innere Struktur ohne nennenswerte Poren oder Risse zu gewährleisten und das Verschleißrisiko während des Gebrauchs zu minimieren. Darüber hinaus müssen während der Bearbeitungsphase Maßgenauigkeit und Oberflächenrauheit überwacht werden, insbesondere bei Elektroden für die Präzisions-Elektroerosion.

Wolfram-Kupfer-Elektroden müssen gemäß Prüfnormen mehrere Leistungstests durchlaufen, um ihre Qualität zu gewährleisten. Physikalisch werden Dichte, Härte und Leitfähigkeit geprüft, um sicherzustellen, dass sie die grundlegenden Leistungsanforderungen des Anwendungsszenarios erfüllen. Die strukturelle Integrität wird mithilfe eines metallografischen Mikroskops oder einer Ultraschallprüfung überprüft. Innere Defekte, die die Festigkeit beeinträchtigen, sind strengstens verboten. In besonderen Fällen sind zudem Prüfungen der Lichtbogenerosionsbeständigkeit und der Hochtemperaturstabilität erforderlich, um den Verschleiß unter realen Betriebsbedingungen zu simulieren. International wird häufig auf ASTM-Standards verwiesen, während im Inland GB/T-Spezifikationen verwendet werden. Einige High-End-Anwendungen verwenden auch kundenspezifische Standards, um strengere Anforderungen zu erfüllen.

7.1 Erkennung der wichtigsten Indikatoren der Wolfram-Kupfer-Elektrode

von Wolfram-Kupfer-Elektroden ist entscheidend und umfasst Aspekte wie physikalische, thermische und elektrische Leitfähigkeit. Mithilfe wissenschaftlicher Testmethoden und standardisierter Prozesse können Hersteller sicherstellen, dass die Elektroden spezifische Anwendungsanforderungen erfüllen. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden pulvermetallurgisch oder durch Vakuuminfiltration hergestellt, wobei ihre Mikrostruktur und Zusammensetzungsverteilung die Leistung direkt beeinflussen. Heißisostatisches Pressen optimiert ihre Konsistenz zusätzlich. Der Testprozess umfasst eine Vielzahl von Instrumenten und Umweltkontrollen, um die Dichte, Wärmeleitfähigkeit und elektrischen Eigenschaften der Elektrode zu beurteilen – alles entscheidende Faktoren in Bereichen wie Funkenerosion, Hochspannungsgeräten und Schweißen. Fortschritte in der Prüftechnologie werden künftig zu einer noch verfeinerten Qualitätskontrolle führen.

7.1.1 Prüfung der physikalischen Eigenschaften der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind ein zentraler Bestandteil der Qualitätskontrolle. Ihre Dichte, strukturelle Integrität und mechanischen Eigenschaften werden bewertet, um die Grundlage für nachfolgende Anwendungen zu schaffen. Die physikalischen Eigenschaften spiegeln die Qualität der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektrodenherstellung und die mikrostrukturellen Merkmale wider. Die hohe Härte von Wolfram in Kombination mit der Duktilität von Kupfer erschwert die Prüfung. Die Prüfung erfolgt üblicherweise im Labor mit Spezialgeräten und standardisierten Verfahren und umfasst verschiedene Parameter wie Dichte, Porosität und Oberflächenmorphologie. Für das heißisostatische Pressen optimierte Elektroden weisen eine hohe physikalische Stabilität auf. Die Testergebnisse ermöglichen Prozessverbesserungen und gewährleisten die Zuverlässigkeit der Elektroden in Umgebungen mit hoher Belastung oder hohen Temperaturen.

7.1.1.1 Dichteprüfverfahren und -normen

Methoden und Normen zur Dichteprüfung bilden den Ausgangspunkt für die Prüfung der physikalischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Ihr Ziel ist es, die Masse der Elektrode pro Volumeneinheit zu messen, die ihre Kompaktheit und Porenverteilung widerspiegelt. Die Dichte wirkt sich direkt auf die mechanische Festigkeit und Leitfähigkeit der Elektrode aus. Bei der Prüfung wird üblicherweise das Archimedische Verfahren oder das Verdrängungsverfahren angewendet. Dabei wird die Dichte berechnet, indem die Elektrode in eine Flüssigkeit getaucht und die Gewichtsänderung gemessen wird. Das Archimedische Verfahren erfordert eine saubere Elektrodenoberfläche, um zu verhindern, dass Flüssigkeitsreste die Ergebnisse beeinflussen. Temperatur und Luftfeuchtigkeit müssen während des Betriebs kontrolliert werden, um konsistente Messungen sicherzustellen. Das Verdrängungsverfahren, das durch genaues Wiegen und Flüssigkeitsverdrängung erreicht wird, eignet sich für Elektroden mit komplexen Formen und erfordert eine hochpräzise Waage.

Der standardisierte Prüfprozess umfasst die Probenvorbereitung und Mehrpunktmessung. Proben werden zufällig aus verschiedenen Chargen ausgewählt und repräsentative Bereiche ausgeschnitten, um die Gleichmäßigkeit zu beurteilen. Die Prüfumgebung muss stabil sein, um externe Störungen zu vermeiden. Die Prüfergebnisse werden mit Prozessparametern wie Sintertemperatur und -druck korreliert. Das Qualitätskontrollpersonal legt Dichtebereiche basierend auf Industriestandards fest. Elektroden außerhalb dieser Bereiche müssen auf den Produktionsprozess zurückgeführt und die Pulvermisch- oder Infiltrationsbedingungen angepasst werden. Oberflächenbehandlungen wie Polieren können die Dichteprüfung unterstützen und die Auswirkungen von Oberflächendefekten reduzieren.

7.1.1.2 Prüfmethode und Normen für die thermische Leistung

Prüfmethode und -normen für die thermische Leistung sind entscheidend für die Bewertung der Wärmemanagementfähigkeiten von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Bei diesen Tests werden ihre Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungseigenschaften gemessen. Die thermische Leistung wirkt sich direkt auf die Stabilität und Wärmeableitungseffizienz der Elektrode in Hochtemperaturumgebungen aus. Die Prüfung wird üblicherweise mit einem Wärmestrommesser oder der Laserblitzmethode durchgeführt. Die Wärmestrommessermethode misst die Wärmeübertragung mithilfe eines Wärmestromsensors und eignet sich zur Bewertung der Wärmeleitfähigkeit von Massenelektroden, die einen Betrieb bei konstanter Temperatur erfordern. Die Laserblitzmethode erhitzt die Probenoberfläche mit einem kurzen Impuls und misst die Wärmediffusionszeit. Sie eignet sich für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dünne Bleche oder empfindliche Komponenten und erfordert hochempfindliche Geräte.

Der standardisierte Testprozess umfasst die Probenvorbereitung und die Kontrolle der Umgebungsbedingungen. Die Proben müssen plan poliert werden, um zu verhindern, dass Oberflächenrauheit die Messungen beeinflusst. Die Testumgebung muss reale Betriebsbedingungen, wie z. B. hohe Temperaturen, simulieren, und Mehrpunktmessungen gewährleisten repräsentative Daten. Die Ergebnisse der thermischen Leistung werden mit der Mikrostruktur korreliert. Für das heißisostatische Pressen optimierte Elektroden weisen eine gute thermische Stabilität auf, und die Testdaten dienen als Grundlage für Prozessanpassungen. Das Qualitätskontrollpersonal legt Grenzwerte für die thermische Leistung basierend auf Industriestandards fest. Elektroden außerhalb dieser Grenzwerte erfordern eine Optimierung des Kupfergehalts oder der Porositätsverteilung.

7.1.1.3 Leitfähigkeitsprüfverfahren und -normen

Prüfmethoden und -normen für die Leitfähigkeit sind für die Bewertung der elektrischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden von zentraler Bedeutung. Sie messen deren spezifischen Widerstand und Leitfähigkeit, um eine effiziente Stromübertragung sicherzustellen. Die Leitfähigkeit wirkt sich direkt auf die Leistung der Elektrode bei EDM- (Elektroerosionsbearbeitung) oder Hochspannungsanwendungen aus. Zur Prüfung wird üblicherweise entweder die Vier-Sonden- oder die Brückenmethode verwendet. Die Vier-Sonden-Methode minimiert die Auswirkungen des Kontaktwiderstands, indem die Probe an mehreren Elektrodenpunkten kontaktiert wird. Dadurch eignet sie sich für hochpräzise Messungen und erfordert einen Betrieb mit konstantem Strom. Die Brückenmethode vergleicht Widerstandswerte mithilfe einer Brückenschaltung und eignet sich für komplexe Elektrodenformen, die hochempfindliche Instrumente erfordern.

Der standardisierte Testprozess umfasst die Probenvorbereitung und die Umgebungs kontrolle. Proben müssen auf Standardmaße zugeschnitten werden, um geometrische Einflüsse auf die Ergebnisse zu vermeiden. Die Testumgebung muss vor elektromagnetischen Störungen geschützt und Temperatur und Luftfeuchtigkeit stabil gehalten werden. Mehrpunktmessungen gewährleisten eine gleichbleibende Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeitsergebnisse hängen eng mit der Mikrostruktur und dem Kupfergehalt zusammen. Durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimierte Elektroden weisen eine gute Leitfähigkeitsgleichmäßigkeit auf, und die Testdaten dienen als Grundlage für die Anpassung des Verhältnisses.

7.1.2 Chemischer Leistungstest der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind ein entscheidender Bestandteil der Qualitätskontrolle. Sie bewerten ihre Zusammensetzung, Korrosionsbeständigkeit und ihren Verunreinigungsgehalt, um die chemische Stabilität und Lebensdauer der Elektrode in verschiedenen Umgebungen sicherzustellen. Chemische Eigenschaften wirken sich direkt auf die Oxidationsbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und langfristige Zuverlässigkeit der Elektrode aus. Die Prüfung erfolgt üblicherweise unter Laborbedingungen unter Einsatz modernster Analysetechniken und standardisierter Arbeitsanweisungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die hohe chemische Stabilität von Wolfram und die aktiven Eigenschaften von Kupfer ermöglichen vielfältige Prüfverfahren. Für das heißisostatische Pressen optimierte Elektroden weisen eine ausgezeichnete chemische Einheitlichkeit auf. Die Testergebnisse dienen der Rohstoffauswahl und Prozessoptimierung.

7.1.2.1 Komponentenanalysemethode

Methoden zur Zusammensetzungsanalyse bilden die Grundlage für die Prüfung der chemischen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Ihr Ziel ist es, das Verhältnis von Wolfram zu Kupfer sowie den Gehalt anderer Spurenelemente zu bestimmen, um sicherzustellen, dass das Verhältnis den Konstruktionsanforderungen entspricht. Dieses Verfahren nutzt typischerweise eine spektroskopische Analyse oder eine chemische Titration. Spektroskopische Analysemethoden wie die Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF) oder die optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) ermitteln die Elementzusammensetzung anhand der von der Probe emittierten spektralen Signaturen und eignen sich für schnelle Tests. Chemische Titrationsmethoden bestimmen den Wolfram- und Kupfergehalt präzise durch die Reaktion einer Standardlösung mit der Probe, wofür hochpräzise Titrationsgeräte erforderlich sind.

Der standardisierte Testprozess umfasst die Probenvorbereitung und die Probenahme an mehreren Punkten. Um die Repräsentativität zu gewährleisten, müssen Proben aus verschiedenen Teilen der Elektrode entnommen und zu einem gleichmäßigen Pulver zerkleinert werden. Die Luftfeuchtigkeit in der Testumgebung muss kontrolliert werden, um Oxidation oder Feuchtigkeitsaufnahme der Probe zu vermeiden. Außerdem müssen die Bediener beim Umgang mit chemischen Reagenzien die Sicherheitsvorschriften einhalten. Die Ergebnisse der Zusammensetzungsanalyse hängen vom Vorbereitungsprozess ab. Beispielsweise wirken sich die Gleichmäßigkeit der Pulvermischung und die Infiltrationsbedingungen direkt auf das endgültige Verhältnis aus. Das Qualitätskontrollpersonal legt den Zusammensetzungsbereich gemäß den Produktspezifikationen fest. Bei Elektroden, die diesen Bereich überschreiten, muss die Rohmaterialcharge zurückverfolgt oder die Prozessparameter angepasst werden. Oberflächenbehandlungen wie Polieren können die Auswirkungen von Oberflächenkontaminationen reduzieren. Zukünftig können Effizienz und Genauigkeit der Zusammensetzungsbestimmung durch die Einführung tragbarer Spektrometer oder automatisierter Analysesysteme verbessert werden.

7.1.2.2 Prüfverfahren für die Korrosionsbeständigkeit

Prüfmethoden zur Korrosionsbeständigkeit sind entscheidend für die Bewertung der chemischen Stabilität von Wolfram-Kupfer-Elektroden in sauren, alkalischen oder feuchten Umgebungen, um ihre langfristige Leistung in industriellen Anwendungen sicherzustellen. Dieser Prozess umfasst typischerweise einen Salzsprühtest oder einen Immersionstest. Der Salzsprühtest simuliert eine korrosive atmosphärische Umgebung und beobachtet Veränderungen an der Elektrodenoberfläche. Dieser Test muss in einer speziellen Salzsprühkammer durchgeführt werden. Beim Immersionstest hingegen wird die Elektrode in eine spezielle korrosive Lösung, beispielsweise verdünnte Schwefelsäure oder Natriumchloridlösung, gelegt und regelmäßig der Grad der Oberflächenkorrosion und der Masseverlust

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

überprüft. Dieser Test erfordert Geräte mit konstanter Temperatur.

Der standardisierte Testprozess umfasst Probenvorbereitung und Umweltkontrolle. Proben müssen poliert werden, um eine gleichmäßige Oberfläche zu erhalten, damit anfängliche Defekte die Ergebnisse nicht beeinflussen. Der Testzyklus richtet sich nach den Anwendungsanforderungen, und mehrere Probengruppen werden parallel getestet, um die Konsistenz zu überprüfen. Die Ergebnisse der Korrosionsbeständigkeit hängen von der Mikrostruktur und der Oberflächenbehandlung ab. Durch heißisostatisches Pressen optimierte Elektroden weisen eine gute, gleichmäßige Korrosionsbeständigkeit auf. Die Testdaten dienen als Orientierung für den Beschichtungsprozess. Qualitätskontrollmitarbeiter bewerten die Korrosionsraten nach Industriestandards. Elektroden, die außerhalb des Bereichs liegen, erfordern eine Optimierung des Kupfergehalts oder die Einführung einer Korrosionsschutzbehandlung.

7.1.2.3 Prüfnormen für den Verunreinigungsgehalt

Prüfnormen für den Verunreinigungsgehalt sind entscheidend für die chemische Reinheit von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Sie zielen darauf ab, die Auswirkungen von Sauerstoff, Schwefel oder anderen Spurenelementen zu identifizieren und zu kontrollieren, um eine Beeinträchtigung der Leistung zu verhindern. Dieser Prozess nutzt typischerweise Verbrennung oder Massenspektrometrie. Bei der Verbrennungsmethode wird die Probe bei hohen Temperaturen zersetzt und die Menge des freigesetzten Sauerstoffs oder Stickstoffs gemessen. Dafür wird ein Infrarot-Absorptionsspektrometer benötigt. Die Massenspektrometrie analysiert die Elementzusammensetzung durch Ionisierung der Probe und eignet sich zum Nachweis von Spurenverunreinigungen, wofür ein hochauflösendes Massenspektrometer erforderlich ist.

Der standardisierte Testprozess umfasst Probenvorbereitung und Umgebungskontrolle. Proben werden zufällig aus verschiedenen Chargen ausgewählt, zerkleinert und getrocknet, um Oberflächenfeuchtigkeit zu entfernen. Die Testumgebung muss frei von äußeren Verunreinigungen sein, und die Bediener müssen beim Umgang mit Hochtemperaturgeräten die Sicherheitsvorschriften einhalten. Die Ergebnisse des Verunreinigungsgehalts hängen von der Reinheit des Rohmaterials und der Vorbereitungsumgebung ab. Für heißisostatisches Pressen optimierte Elektroden weisen geringe Verunreinigungsgrade auf. Testdaten dienen als Grundlage für die Rohstoffprüfung und Prozessoptimierung. Das Qualitätskontrollpersonal legt Verunreinigungsgrenzwerte basierend auf Industriestandards fest. Elektroden, die diesen Bereich überschreiten, erfordern eine Anpassung der Pulverreinheit oder die Einführung von Reinigungsschritten.

7.1.3 Prüfung der mechanischen Eigenschaften einer Wolfram-Kupfer-Elektrode

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind ein wichtiger Bestandteil der Qualitätskontrolle. Ihre Härte, Festigkeit und Zähigkeit werden bewertet, um ihre Zuverlässigkeit bei hoher Belastung oder Stoßbelastung sicherzustellen. Die mechanischen Eigenschaften spiegeln die Widerstandsfähigkeit der Elektrode gegen Verformung, Bruch und Energieabsorption wider. Die Prüfung erfolgt üblicherweise im Labor mit Spezialgeräten und standardisierten Verfahren. Die hohe Härte von Wolfram und die Duktilität von Kupfer ermöglichen vielfältige Prüfverfahren. Für das heißisostatische Pressen optimierte Elektroden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

weisen eine ausgezeichnete mechanische Gleichmäßigkeit auf, und die Prüfergebnisse liefern Hinweise für Prozessverbesserungen und die Anwendungsauswahl.

7.1.3.1 Härteprüfverfahren und -normen

Härteprüfverfahren und -normen sind für die Prüfung der mechanischen Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden von grundlegender Bedeutung. Sie zielen darauf ab, die Oberflächenbeständigkeit gegen Eindrücke und Verschleiß zu messen und so die Haltbarkeit der Elektrode während der Verarbeitung oder Verwendung sicherzustellen. Bei diesem Verfahren werden üblicherweise entweder die Härteprüfverfahren nach Vickers oder Rockwell verwendet. Beim Vickers-Verfahren wird ein Diamanteindringkörper in die Probenoberfläche gedrückt und die Geometrie des Eindrucks beobachtet. Dieses Verfahren eignet sich zum Prüfen harter Materialien und erfordert ein hochpräzises Mikroskop. Beim Rockwell-Verfahren wird die Eindringtiefe des Eindringkörpers gemessen, um Härteänderungen schnell zu beurteilen. Es eignet sich für Prüfungen im großen Maßstab und erfordert den Einsatz einer Standardprüfmaschine.

Der standardisierte Prüfprozess umfasst die Probenvorbereitung und Mehrpunktmessung. Proben müssen aus verschiedenen Teilen der Elektrode geschnitten und zu einer glatten Oberfläche poliert werden, um anfängliche Defekte zu vermeiden, die die Ergebnisse beeinflussen. Die Prüfumgebung muss Temperatur und Luftfeuchtigkeit kontrollieren, um Störungen durch Wärmeausdehnung oder Oberflächenoxidation zu vermeiden. Bediener müssen die Sicherheitsvorschriften zur Bedienung der Geräte einhalten. Die Härteergebnisse hängen von der Mikrostruktur und dem Wolframgehalt ab. Die Elektroden weisen nach der Optimierung des heißsostatischen Pressprozesses eine gute Härtegleichmäßigkeit auf, und die Prüfdaten dienen als Orientierung für die Verhältnisanpassung. Das Qualitätskontrollpersonal legt den Härtebereich gemäß Industriestandards fest. Elektroden außerhalb des Bereichs müssen durch Sinterung oder Nachbearbeitung optimiert werden. Oberflächenbehandlungen wie Schleifen können die Härteprüfung unterstützen. Zukünftig kann die Einführung automatisierter Härteprüfer oder Bildanalyse die Erkennungseffizienz und -genauigkeit verbessern.

7.1.3.2 Festigkeitsprüfverfahren und -normen

Methoden und Normen zur Festigkeitsprüfung sind entscheidend für die Bewertung der Druck- und Zugfestigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden und gewährleisten ihre Stabilität bei hoher mechanischer Belastung. Dieser Prozess umfasst typischerweise Druck- oder Zugprüfungen. Bei der Druckprüfung wird die Verformungsgrenze der Probe durch Druckausübung gemessen. Sie eignet sich für Blockelektroden und erfordert eine Universalprüfmaschine. Bei der Zugprüfung wird die Zugfestigkeit durch Ausüben einer Zugkraft bis zum Bruch bewertet. Sie eignet sich für stab- oder plattenförmige Elektroden und erfordert den Einsatz spezieller Vorrichtungen.

Der standardisierte Prüfprozess umfasst die Probenvorbereitung und die Kontrolle der Umgebungsbedingungen. Die Proben müssen auf Standardmaße bearbeitet werden, um eine einheitliche Geometrie zu gewährleisten, und die Einschnitte müssen glatt sein, um Spannungskonzentrationen zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vermeiden. Die Prüfumgebung muss eine konstante Temperatur aufweisen, um zu verhindern, dass Temperaturschwankungen die Materialeigenschaften beeinflussen. Zur Überprüfung der Gleichmäßigkeit werden Mehrpunktmessungen durchgeführt. Die Festigkeitsergebnisse hängen von der Mikrostruktur und dem Herstellungsprozess ab. Für das heißisostatische Pressen (HIP) optimierte Elektroden weisen eine hohe Druckstabilität auf, und die Prüfdaten dienen als Grundlage für die Anpassung von Druck und Sinterparametern. Das Qualitätskontrollpersonal legt Festigkeitsgrenzwerte basierend auf Industriestandards fest. Elektroden außerhalb dieses Bereichs erfordern eine Optimierung der Pulverpartikelgröße oder der Infiltrationsbedingungen.

7.1.3.3 Zähigkeitsprüfverfahren und -normen

Methoden und Normen zur Zähigkeitsprüfung sind entscheidend für die Bewertung der Bruchfestigkeit und Energieabsorptionsfähigkeit von Wolfram-Kupfer- Elektroden, um ihre Zuverlässigkeit bei Stoß- oder Temperaturwechselbeanspruchung sicherzustellen. Dieser Prozess umfasst typischerweise Schlagprüfungen oder Bruchzähigkeitstests. Bei Schlagprüfungen wird eine Probe mit einem Pendel geschlagen und die absorbierte Energie gemessen. Dies eignet sich zur Beurteilung der Schlagfestigkeit und erfordert eine Standard-Pendelmaschine. Bei der Bruchzähigkeitsprüfung hingegen wird ein vorab erzeugter Riss belastet und sein Ausbreitungsverhalten analysiert. Dies eignet sich zur Prüfung von Präzisionskomponenten und erfordert hochpräzise Belastungsgeräte.

Der standardisierte Prüfprozess umfasst die Probenvorbereitung und die Kontrolle der Umgebungsbedingungen. Die Proben müssen in die vorgegebene Form gebracht werden, die Vorrisse müssen den Standardanforderungen entsprechen und die Oberfläche muss poliert werden, um anfängliche Defekte zu reduzieren. Die Prüfumgebung muss stabil sein, um Vibrationen oder Temperaturschwankungen zu vermeiden, die die Ergebnisse beeinflussen. Um die Repräsentativität zu gewährleisten, werden mehrere Probengruppen parallel geprüft. Die Zähigkeitsergebnisse hängen von der Mikrostruktur und dem Kupfergehalt ab . Durch heißisostatisches Pressen optimierte Elektroden weisen eine gute Zähigkeitsgleichmäßigkeit auf. Die Prüfdaten dienen als Grundlage für die Anpassung der Phasenverteilung.

7.2 Mikrostrukturprüfung der Wolfram-Kupfer-Elektrode

Die mikrostrukturelle Prüfung von Wolfram-Kupfer-Elektroden ist ein entscheidender Schritt in der Qualitätskontrolle. Ziel ist es, die Effektivität des Herstellungsprozesses und die Materialeigenschaften durch Analyse der inneren Strukturmerkmale zu bewerten. Die Mikrostruktur wirkt sich direkt auf die mechanische Festigkeit, Leitfähigkeit und Haltbarkeit der Elektrode aus. Die Prüfung erfolgt üblicherweise im Labor mithilfe moderner Mikroskopietechniken und standardisierter Arbeitsanweisungen. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden pulvermetallurgisch oder durch Vakuuminfiltration hergestellt. Ihre Mikrostruktur besteht aus einem Wolframskelett und einer Kupferphasenverteilung. Durch heißisostatisches Pressen werden ihre Gleichmäßigkeit und Dichte weiter optimiert. Der Prüfprozess umfasst metallografische Analysen, die Bewertung der Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung und die Messung der Korngröße – alles entscheidende Indikatoren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

in Bereichen wie der Funkenerosion, der Herstellung von Hochspannungsgeräten und dem Schweißen.

7.2.1 Metallografische Analyse

Die metallografische Analyse ist das Herzstück der mikrostrukturellen Prüfung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Ziel ist die Beurteilung der Materialqualität und -konsistenz durch Beobachtung innerer Strukturmerkmale. Bei diesem Verfahren werden mikroskopische Techniken, typischerweise optische Mikroskopie oder Rasterelektronenmikroskopie (REM), eingesetzt, um die Phasenstruktur, Porenverteilung und Grenzflächenbindung der Elektrode sichtbar zu machen. Die metallografische Analyse hilft, Defekte im Herstellungsprozess wie ungefüllte Poren oder Phasentrennung zu identifizieren. Für das heißisostatische Pressen optimierte Elektroden weisen eine ausgezeichnete strukturelle Gleichmäßigkeit auf. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für Prozessanpassungen, um eine stabile Elektrodenleistung unter hoher Belastung oder hohen Temperaturen zu gewährleisten.

7.2.1.1 Metallografische Probenpräparation

Die metallografische Probenvorbereitung ist ein grundlegender Schritt in der metallografischen Analyse. Ziel ist es, durch Probenverarbeitung einen glatten Querschnitt zu erhalten, der für die mikroskopische Betrachtung geeignet ist. Dieser Prozess umfasst typischerweise mehrere Schritte: Schneiden, Schleifen und Polieren. Beim Schneiden wird die Elektrode mit einem metallografischen Fräser in dünne Scheiben geschnitten. Um Materialschäden zu vermeiden, müssen geeignete Schneidwerkzeuge ausgewählt werden. Beim Schleifen wird Schleifpapier unterschiedlicher Körnung verwendet, um die Oberflächenrauheit schrittweise zu entfernen. Dabei werden Druck und Richtung kontrolliert, um einen glatten Querschnitt zu gewährleisten. Beim Polieren wird Diamantsuspension oder Aluminiumoxid-Polierpaste verwendet, um die Oberflächengüte weiter zu verbessern. Das Polieren muss in einer staubfreien Umgebung durchgeführt werden, um Verunreinigungen zu vermeiden.

Zur Probenvorbereitung gehört auch das Ätzen des Querschnitts mit geeigneten chemischen Reagenzien, um die Phasenstruktur von Wolfram und Kupfer hervorzuheben. Ätzzeit und Reagenzkonzentration werden den Materialeigenschaften angepasst. Bei für das heißisostatische Pressen (HIP) optimierten Elektroden muss besonders auf den Oberflächenschutz geachtet werden, um übermäßige Korrosion zu vermeiden, die die Beobachtung beeinträchtigen könnte. Die Kontrolle der Umgebungsbedingungen, wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, ist während der Vorbereitung von entscheidender Bedeutung, und die Proben müssen trocken gelagert werden, um Oxidation zu vermeiden. Das Qualitätskontrollpersonal überprüft die Qualität der Präparation gemäß Industriestandards; Defekte wie Kratzer oder Risse können die Analyse verfälschen.

7.2.1.2 Bewertungskriterien für die Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung

Die Bewertung der Phasengleichmäßigkeit ist ein wichtiger Schritt in der metallografischen Analyse. Ziel ist es, die Verteilung von Wolfram und Kupfer innerhalb der Elektrode zu beurteilen, um eine gleichbleibende Leistung sicherzustellen. Bei diesem Verfahren werden Querschnittsbilder mit einem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikroskop betrachtet und die Gleichmäßigkeit der Phasenstruktur mithilfe einer Bildverarbeitungssoftware analysiert. Die quantitative Bewertung erfolgt typischerweise mithilfe einer Rastermethode oder einer Punktzählmethode. Bei der Rastermethode wird der Querschnitt in mehrere Bereiche unterteilt und die Phasenverhältnisse in jedem Bereich berechnet. Bei der Punktzählmethode wird die Verteilungsdichte von Wolfram und Kupfer durch Zufallsstichproben mithilfe eines hochauflösenden Bildgebungssystems berechnet.

Der standardisierte Bewertungsprozess umfasst die Probenauswahl und Mehrpunktanalyse. Um Repräsentativität zu gewährleisten, müssen die Proben aus verschiedenen Chargen und Standorten ausgewählt werden. Die Analyse muss mehrere Bereiche des Querschnitts abdecken, um die Gleichmäßigkeit zu überprüfen. Durch das heißisostatische Pressverfahren optimierte Elektroden weisen eine bessere Phasenverteilung auf. Die Testergebnisse hängen mit dem Infiltrationsprozess und der Pulvermischung zusammen. Defekte wie lokale Anreicherungen oder Hohlräume können die Leistung beeinträchtigen. Das Qualitätskontrollpersonal legt Gleichmäßigkeitsschwellenwerte auf Grundlage von Industriestandards fest. Bei Elektroden, die diesen Bereich überschreiten, müssen die Partikelgröße des Rohmaterials oder die Sinterbedingungen angepasst werden. Umgebungskontrolle, wie z. B. das Vermeiden von Vibrationen, gewährleistet klare Bilder. In Zukunft können Genauigkeit und Vollständigkeit der Phasenverteilungsbewertung durch die Einführung von Analysen mit künstlicher Intelligenz oder dreidimensionaler Bildgebungstechnologie verbessert werden.

7.2.1.3 Korngrößenerkennung

Die Korngrößenbestimmung ist ein wichtiger Bestandteil der metallografischen Analyse. Ziel ist es, die Größe von Wolfram- und Kupferkörnern zu messen und ihren Einfluss auf die Elektrodenleistung zu beurteilen. Bei diesem Verfahren wird der geätzte Querschnitt unter einem Mikroskop beobachtet, wobei entweder die Standard-Linienschnittmethode oder die automatisierte Bildanalyse zum Einsatz kommt. Bei der Standard-Linienschnittmethode werden zufällige gerade Linien zur Darstellung der Kornquerschnitte verwendet, während bei der automatisierten Bildanalyse Software zur Identifizierung der Korngrenzen eingesetzt wird, wofür ein Mikroskop mit hoher Vergrößerung erforderlich ist.

Der standardisierte Prüfprozess umfasst die Probenvorbereitung und Mehrbereichsmessung. Die Proben müssen poliert und geätzt werden, um die Korngrenzen deutlich sichtbar zu machen. Die Messung muss verschiedene Bereiche des Querschnitts abdecken, um die Gleichmäßigkeit zu beurteilen. Die Korngröße der Elektrode ist nach der Optimierung des heißisostatischen Pressprozesses gleichmäßiger. Die Testergebnisse hängen eng mit der Sintertemperatur und -zeit zusammen. Zu große oder ungleichmäßige Körner können die Leistung beeinträchtigen. Das Qualitätskontrollpersonal legt den Korngrößenbereich gemäß Industriestandards fest. Bei Elektroden, die diesen Bereich überschreiten, müssen die Sinterparameter optimiert oder eine Verfeinerungstechnologie eingeführt werden.

7.2.2 Defekterkennung an Wolfram-Kupfer-Elektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind ein wichtiger Bestandteil der mikrostrukturellen Prüfung. Ziel ist die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Identifizierung und Bewertung von Defekten wie Poren, Rissen und Einschlüssen, um die Qualität und Zuverlässigkeit der Elektroden sicherzustellen. Defekte können zu Leistungseinbußen oder einer verkürzten Lebensdauer führen. Die Prüfung erfolgt üblicherweise unter Laborbedingungen mit zerstörungsfreien oder zerstörenden Prüfmethoden in Kombination mit standardisierten Bestimmungsverfahren. Herstellungsverfahren für Wolfram-Kupfer-Elektroden, wie Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration, können Defekte verursachen. Heißisostatisches Pressen (HIP) reduziert diese Defekte durch Optimierung der Mikrostruktur. Die Testergebnisse dienen der Prozessoptimierung und gewährleisten eine stabile Elektrodenleistung unter hoher Belastung oder in extremen Umgebungen.

7.2.2.1 Porositätserkennungsmethode und zulässiger Bereich

Methoden und Toleranzen zur Porositätserkennung sind für die Defekterkennung in Wolfram-Kupfer-Elektroden von grundlegender Bedeutung. Sie zielen darauf ab, innere Hohlräume zu identifizieren und deren Auswirkungen auf die Materialeigenschaften zu beurteilen. Porosität kann beim Sintern oder Infiltrieren entstehen und die Dichte und Leitfähigkeit der Elektrode beeinträchtigen. Die Erkennung erfolgt üblicherweise mittels Röntgen- oder Ultraschallprüfung. Bei der Röntgenprüfung wird die Verteilung der inneren Poren mittels Transmissionsbildgebung sichtbar gemacht. Sie eignet sich für komplexe Elektroden und erfordert ein hochauflösendes Bildgebungssystem. Bei der Ultraschallprüfung werden innere Hohlräume durch Schallwellenreflexion analysiert. Sie eignet sich für große Elektroden und erfordert spezielle Sonden und Signalverarbeitungsgeräte.

Der standardisierte Testprozess umfasst die Probenvorbereitung und das Scannen aus mehreren Winkeln. Die Probenoberfläche muss sauber sein, um Störungen zu vermeiden. Der Test deckt verschiedene Bereiche der Elektrode ab, um die Vollständigkeit zu gewährleisten. Für das heißisostatische Pressen (HIP) optimierte Elektroden weisen eine geringere Porosität auf. Die Testergebnisse hängen vom Vorbereitungsprozess ab, beispielsweise von der Pulverpartikelgröße und den Infiltrationsbedingungen, die die Porenbildung direkt beeinflussen. Das Qualitätskontrollpersonal legt den zulässigen Porositätsbereich anhand von Industriestandards fest. Elektroden, die diesen Bereich überschreiten, erfordern eine Anpassung der Sintertemperatur oder eine Vakuumbehandlung.

7.2.2.2 Methoden und Kriterien zur Risserkennung

Methoden und Kriterien zur Risserkennung sind entscheidend für die Einschätzung des Risikos innerer Brüche in Wolfram-Kupfer-Elektroden. Ihr Ziel ist es, durch thermische oder mechanische Belastung verursachte Defekte zu erkennen. Risse können beim Sintern, Abkühlen oder bei der Nachbearbeitung entstehen und die mechanische Festigkeit und Lebensdauer der Elektrode beeinträchtigen. Die Erkennung erfolgt üblicherweise mittels Eindringprüfung oder Magnetpulverprüfung. Die Eindringprüfung deckt Oberflächenrisse durch Farbeindringen auf und eignet sich für komplexe Geometrien, die eine Oberflächenreinigung erfordern. Die Magnetpulverprüfung, bei der ein Magnetfeld und magnetische Partikel zum Aufdecken innerer Risse verwendet werden, eignet sich für ferromagnetische Materialien und erfordert eine Magnetisierungsausrüstung. Der standardisierte Prüfprozess umfasst die Probenvorbereitung und eine Mehrpunktprüfung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenverunreinigungen müssen entfernt und kritische Elektrodenbereiche auf ihre Integrität geprüft werden. Für das heißisostatische Pressen (HIP) optimierte Elektroden weisen weniger Risse auf. Die Prüfergebnisse hängen von der Abkühlrate und den Druckbedingungen ab. Defekte wie Mikrorisse können eine Vergrößerung erfordern. Das Qualitätskontrollpersonal legt Kriterien zur Rissbestimmung basierend auf Industriestandards fest. Elektroden, die diese Kriterien übertreffen, erfordern eine Optimierung des Sinterprozesses oder die Einführung einer Spannungsentlastungsbehandlung.

7.2.2.3 Methoden zur Einschlusserkennung und Kontrollstandards

Methoden zur Einschlusserkennung und Kontrollstandards sind der Schlüssel zur Gewährleistung der Reinheit von Wolfram-Kupfer- Elektroden. Ihr Ziel ist es, Fremdstoffe zu identifizieren, die in die Rohstoffe oder während des Herstellungsprozesses eingebracht wurden. Einschlüsse können Oxide oder ungeschmolzenes Pulver sein, die die Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Elektrode beeinträchtigen. Die Erkennung erfolgt üblicherweise mittels Spektralanalyse oder Elektronenmikroskopie. Die spektroskopische Analyse erkennt Einschlüsselemente durch Analyse der von der Probe emittierten spektralen Signatur. Sie eignet sich für ein schnelles Screening und erfordert hochempfindliche Instrumente. Die Elektronenmikroskopie hingegen analysiert die Einschlussmorphologie durch Abbildung mit hoher Vergrößerung und eignet sich für detaillierte Analysen. Sie erfordert den Einsatz eines energiedispersiven Spektrometers.

Der standardisierte Testprozess umfasst die Probenvorbereitung und eine Mehrbereichsanalyse. Die Proben müssen in Scheiben geschnitten und zu einer glatten Oberfläche poliert werden. Um die Repräsentativität zu gewährleisten, muss der Test verschiedene Bereiche der Elektrode abdecken. Nach der Optimierung des heißisostatischen Pressprozesses weist die Elektrode weniger Einschlüsse auf. Die Testergebnisse hängen von der Reinheit der Rohstoffe und der Gleichmäßigkeit der Mischung ab. Defekte wie lokale Fremdkörper können eine weitere Querschnittsanalyse erfordern. Das Qualitätskontrollpersonal legt Standards für die Einschlusskontrolle gemäß Industriestandards fest. Bei Elektroden, die diesen Bereich überschreiten, muss die Pulverquelle angepasst oder ein Filterprozess eingeführt werden. Umweltkontrollen wie Staubschutzbehandlungen vermeiden Sekundärverschmutzung. Zukünftig können die Echtzeit und Genauigkeit der Einschlusserkennung durch die Einführung von Online-Überwachung oder automatisierter Erkennungstechnologie verbessert werden.

7.3 Industriestandards für Wolfram-Kupfer-Elektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind für die Sicherstellung gleichbleibender Qualität und Leistung von entscheidender Bedeutung und umfassen den gesamten Produktions-, Test- und Anwendungsprozess. Diese von den entsprechenden maßgeblichen Organisationen entwickelten Normen bieten Herstellern und Anwendern zusammen mit den Herstellungsprozess- und Anwendungsanforderungen von Wolfram-Kupfer- Elektroden eine Hilfestellung bei der Einhaltung technischer Spezifikationen und der Gewährleistung der Sicherheit. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt, und ihre Mikrostruktur und Leistung müssen den

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Branchenanforderungen entsprechen. Heißisostatisches Pressen optimiert ihre Konsistenz zusätzlich. Branchennormen umfassen relevante nationale Normen und spezifische Anforderungen in Bezug auf Materialzusammensetzung, Leistungsindikatoren und Fehlerkontrolle und bieten technischen Support für Bereiche wie Funkenerosion (EDM), Hochspannungsgeräte und Schweißen.

7.3.1 Relevante nationale Normen

Relevante nationale Normen bieten einen einheitlichen technischen Rahmen für die Herstellung und Anwendung von Wolfram-Kupfer- Elektroden und spiegeln Chinas neueste Fortschritte in Materialwissenschaft und industrieller Fertigung wider. Diese gemeinsam von der Nationalen Normungsbehörde Chinas und Industrieverbänden entwickelten Normen regeln die Herstellung, Prüfung und Verwendung von Elektroden und zielen darauf ab, die Produktqualität und internationale Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern. Herstellungsverfahren für Wolfram-Kupfer-Elektroden, wie Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration, müssen diesen Normen entsprechen. Durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimierte Elektroden müssen Tests unterzogen werden, um ihre Konformität zu bestätigen.

7.3.1.1 Relevante Bestimmungen chinesischer Normen

Chinesische Normen, die hauptsächlich von der chinesischen Standardisierungsbehörde herausgegeben werden, bieten eine konkrete rechtliche und technische Grundlage für die Qualitätskontrolle und Anwendung von Wolfram-Kupfer- Elektroden. Diese Vorschriften, darunter nationale Normen wie „Kupfer-Wolfram- und Silber-Wolfram-Elektrokontakte“ und „Methoden zur Fehlererkennung für Kupfer-Wolfram-Elektrokontakte“, behandeln Zusammensetzungsanforderungen, Leistungsindikatoren und Spezifikationen zur Fehlererkennung. Der Herstellungsprozess muss sicherstellen, dass das Wolfram-Kupfer-Verhältnis den Normen entspricht. Die Tests umfassen physikalische, chemische und mechanische Eigenschaften, und durch heißisostatisches Pressen optimierte Elektroden müssen mikrostrukturellen Tests unterzogen werden. Die Normen verlangen von den Herstellern, ein Qualitätsmanagementsystem einzurichten, Rohstoffe und Fertigprodukte regelmäßig zu testen und sicherzustellen, dass Oberflächenbehandlungen wie Beschichtungen die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit erfüllen.

Diese Vorschriften gelten für den Bereich der Elektrolegierungen. Sie legen Wert auf die Stabilität von Elektroden in Hochspannungsgeräten und der Funkenerosion und ermutigen Unternehmen, fortschrittliche Verfahren zur Reduzierung von Defekten einzusetzen. Branchenverbände wie das Nationale Technische Komitee für die Standardisierung von Elektrolegierungen sind für die Ausarbeitung der Normen verantwortlich. Zu den wichtigsten Organisationen zählen das Guilin Electrical Science Research Institute und die Wenzhou Hongfeng Electrical Alloy Co., Ltd., die Chinas technologische Stärke repräsentieren.

7.3.1.2 Industriestandardanforderungen

Industrienormen bieten detaillierte technische Spezifikationen für spezifische Anwendungen von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolfram-Kupfer- Elektroden und werden hauptsächlich vom Ministerium für Industrie und Informationstechnologie oder relevanten Industrieverbänden entwickelt. Diese Anforderungen, darunter Industrienormen wie „Wolfram-Kupfer-Legierungsplatte“, konzentrieren sich auf Materialeigenschaften, Verarbeitungstechniken und Betriebsbedingungen und unterstützen Unternehmen bei der Herstellung marktgerechter Elektroden. Der Herstellungsprozess erfordert eine kontrollierte Pulverpartikelgröße und Sinterparameter. Durch heißisostatisches Pressen optimierte Elektroden müssen die Anforderungen an Festigkeit und Leitfähigkeit erfüllen. Nachbearbeitungsprozesse wie Schneiden und Schleifen müssen die geometrische Genauigkeit gewährleisten.

Industriestandards fordern, dass Elektroden Lichtbogenerosion beim Funkenerosion widerstehen, eine effiziente Wärmeleitfähigkeit beim Schweißen gewährleisten und in Hochspannungsgeräten hohe Temperaturen standhalten. Die Tests müssen Mikrostruktur, Defekte und Leistungsindikatoren abdecken, und Hersteller müssen ein Chargenprüfsystem zur Aufzeichnung von Prozessparametern und Testergebnissen einrichten. Die Standards fördern zudem eine umweltfreundliche Produktion, reduzieren Abfallemissionen und erfüllen Umweltschutzanforderungen. Die Beteiligung relevanter Organisationen wie der Guilin Jinge Electrical and Electronic Materials Technology Co., Ltd. an der Entwicklung des Standards spiegelt das technologische Niveau der Branche wider.

7.3.2 Relevante internationale Normen

Internationale Normen bieten einen einheitlichen technischen Rahmen für die weltweite Anwendung von Wolfram-Kupfer- Elektroden und spiegeln die Zusammenarbeit und den Konsens zwischen verschiedenen Ländern und Regionen in den Bereichen Materialwissenschaft und industrielle Fertigung wider. Diese Normen werden von Organisationen wie der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelt oder von großen Industrienationen wie Europa, den USA, Japan und Südkorea je nach Bedarf und Entwicklungsstand unabhängig herausgegeben. Ihr Ziel ist die Förderung des internationalen Handels und des Technologieaustauschs. Herstellungsverfahren für Wolfram-Kupfer-Elektroden, wie Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration, müssen diesen Normen entsprechen. Durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimierte Elektroden müssen Tests unterzogen werden, um ihre internationale Kompatibilität zu bestätigen. Internationale Normen umfassen Zusammensetzungsanforderungen, Leistungstests und Anwendungsspezifikationen, bieten multinationalen Unternehmen Orientierung und gewährleisten gleichbleibende Qualität und Zuverlässigkeit auf den Weltmärkten.

7.3.2.1 Internationale Normen für Wolfram-Kupfer-Elektroden

Internationale Normen für Wolfram-Kupfer-Elektroden werden hauptsächlich von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelt, mit dem Ziel, einheitliche Spezifikationen für die weltweite Produktion und Anwendung von Wolfram-Kupfer- Elektroden festzulegen. Diese Normen integrieren die Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Materialien mit den vielfältigen Anforderungen verschiedener Industrieanwendungen und decken den gesamten Prozess von der Rohstoffauswahl bis zur Prüfung des Endprodukts ab. ISO-Normen beruhen häufig auf umfassender internationaler Zusammenarbeit und integrieren technisches Know-how aus Ländern wie Europa, den USA, Japan und Südkorea, um eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

weltweite Anwendbarkeit sicherzustellen. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Ihre Mikrostruktur und Eigenschaften müssen den in der ISO festgelegten Zusammensetzungsverhältnissen und physikalischen Eigenschaften entsprechen. Durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimierte Elektroden müssen strengen Leistungstests unterzogen werden, um die internationalen Anforderungen zu erfüllen. ISO-Normen in Bezug auf Wolfram-Kupfer-Elektroden befassen sich hauptsächlich mit Materialvorbereitung, Leistungsbewertung und Qualitätskontrolle. Die Normen schreiben beispielsweise vor, dass das Wolfram-Kupfer-Verhältnis je nach Anwendung angepasst werden muss, um Leitfähigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und mechanische Festigkeit auszugleichen. Während des Produktionsprozesses müssen Pulverpartikelgröße, Sinterbedingungen und Infiltrationstechniken präzise kontrolliert werden, um eine geringe Porosität und eine gleichmäßige Phasenverteilung in der Elektrode zu gewährleisten. Hinsichtlich der Prüfung verlangen ISO-Normen eine umfassende Bewertung der Dichte, Leitfähigkeit, Härte und Korrosionsbeständigkeit der Elektrode. Dabei kommen moderne zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Röntgen- oder Ultraschallprüfungen zum Einsatz, um innere Defekte zu identifizieren. Das heißisostatische Pressverfahren spielt eine Schlüsselrolle bei der Verbesserung der Materialdichte und der Leistungskonsistenz, und die Testergebnisse müssen mit international anerkannten Leistungsgrenzwerten verglichen werden.

Diese Normen gelten insbesondere für Bereiche wie Funkerosion, Hochspannungsgeräte und Schweißen und legen Wert auf die Stabilität und Haltbarkeit von Elektroden unter extremen Bedingungen. ISO-Normen fördern außerdem den Einsatz umweltfreundlicher Verfahren, reduzieren den Abfallausstoß während der Produktion und passen sich globalen Trends der nachhaltigen Entwicklung an.

7.3.2.2 Wolfram-Kupfer-Elektrodennormen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern

Die Normen für Wolfram-Kupfer-Elektroden in Europa, den USA, Japan, Südkorea und anderen Ländern spiegeln die einzigartigen Merkmale der industriellen Technologieentwicklung und der Anwendungsanforderungen jeder Region wider. Diese Normen werden von den jeweiligen nationalen Normungsgremien entwickelt und spiegeln unterschiedliche technische Traditionen und Marktorientierungen wider. US-amerikanische Normen werden hauptsächlich von der American Welding Society (AWS) und der American Society for Testing and Materials (ASTM) herausgegeben, europäische Normen werden vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) entwickelt, japanische Normen werden vom Japan Industrial Standards Committee (JISC) herausgegeben und südkoreanische Normen beziehen sich auf japanische Normen, berücksichtigen aber lokale Erfordernisse. Diese Normen enthalten detaillierte Anleitungen für die Herstellung, Prüfung und Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimierte Elektroden müssen die von der jeweiligen Region festgelegten Leistungsspezifikationen erfüllen.

In den USA konzentriert sich der AWS-Standard auf die Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden beim WIG-Schweißen und Funkerosionsschweißen und legt die Anforderungen an Zusammensetzung, Geometrie und Oberflächenbehandlung der Elektroden fest. Der ASTM-Standard konzentriert sich mehr

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auf die mechanischen Eigenschaften und die Haltbarkeit des Materials und ist für die Bereiche Luft- und Raumfahrt sowie Verteidigung geeignet. Der Herstellungsprozess muss eine gleichmäßige Verteilung von Wolfram und Kupfer sicherstellen, und die Prüfung umfasst Härte, Leitfähigkeit und Lichtbogenerosionsbeständigkeit. Durch heißisostatisches Pressen optimierte Elektroden müssen mehrere Testreihen bestehen. Der europäische CEN-Standard legt Wert auf Umweltschutz und Sicherheit, regelt die Verwendung von Elektroden in Hochspannungsgeräten, konzentriert sich auf die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit, und der Herstellungsprozess erfordert den Einsatz schadstoffarmer Technologien. Zu den Prüfmethoden gehören metallografische Analysen und zerstörungsfreie Prüfungen. Durch heißisostatisches Pressen optimierte Elektroden müssen einheitliche Marktzugangsanforderungen erfüllen.

Japans JIS-Standards, bekannt für ihre hohe Präzision und Prozesskontrolle, eignen sich besonders für die Elektronik- und Automobilindustrie. Sie legen die Mikrostruktur und Oberflächenqualität von Elektroden fest, erfordern den Einsatz von Präzisionsgeräten zur Herstellung, und die Prüfung umfasst Korngrößen- und Defektanalyse. Heißisostatisches Pressen (HIP) ist entscheidend für die Verbesserung der Materialkonsistenz, und die Testergebnisse müssen mit den hohen Standards Japans verglichen werden. Südkoreas Standards sind stark von Japan beeinflusst und konzentrieren sich, entsprechend den lokalen Fertigungsanforderungen, auf die Elektrodenleistung beim Schweißen und in der Batterieherstellung. Der Herstellungsprozess erfordert optimierte Pulvermisch- und Sinterbedingungen, und die Prüfung umfasst Leitfähigkeit und Festigkeit. Für HIP optimierte Elektroden müssen sich an eine schnelllebige Produktionsumgebung anpassen.

Die Unterschiede zwischen diesen Normen spiegeln die technologischen Vorteile und Anwendungsprioritäten der jeweiligen Regionen wider. In den USA steht die Praktikabilität im Vordergrund, in Europa der Umweltschutz, in Japan die Präzision und in Südkorea die Effizienz. Multinationale Unternehmen müssen die geltenden Normen auf der Grundlage ihrer Zielmärkte auswählen. Durch die Optimierung des heißisostatischen Pressprozesses können mehrere Normen erfüllt werden. In Zukunft werden diese Normen mit der globalen technologischen Integration voraussichtlich weiter konvergieren, insbesondere in den Bereichen intelligente Fertigung und neue Energien. Die Normen für Wolfram-Kupfer-Elektroden werden noch internationaler.



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	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 alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Analyse der industriellen Kette von Wolfram-Kupfer-Elektroden

Die Industriekette für Wolfram-Kupfer-Elektroden ist der Schlüssel zum Verständnis ihrer Marktentwicklung und ihres technologischen Fortschritts. Sie umfasst den gesamten Prozess von der Rohstoffbeschaffung bis zur Herstellung des Endprodukts. Diese Analyse zeigt die gegenseitige Abhängigkeit der einzelnen Glieder der Industriekette und bietet eine wichtige Grundlage zur Optimierung der Produktionseffizienz und Marktwettbewerbsfähigkeit. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuumfiltrationsverfahren hergestellt. Ihre Leistung hängt von der Qualität der vorgelagerten Rohstoffe und der Verfeinerung der Herstellungsprozesse in der Mitte ab. Heißisostatisches Pressen spielt eine bedeutende Rolle bei der Verbesserung der Produktkonsistenz. Jede Stufe der Industriekette wird von technologischen Innovationen, der Marktnachfrage und dem politischen Umfeld beeinflusst. In Zukunft wird die koordinierte Entwicklung der Industriekette mit der fortschreitenden weltweiten industriellen Modernisierung die Anwendung und Verbreitung von Wolfram-Kupfer-Elektroden weiter fördern.

8.1.1 Vorgelagerte Rohstoffversorgung

Die vorgelagerte Rohstoffversorgung ist die Grundlage der Industriekette für Wolfram-Kupfer-Elektroden. Sie umfasst den Wolframabbau und die Kupferverarbeitung und liefert hochwertige Rohstoffe für die nachfolgende Produktion. Diese Verbindung bestimmt direkt die Reinheit der Elektrodenzusammensetzung und die Leistungsstabilität. Wolfram, die primäre Rohstoffquelle, wird typischerweise im Untertage- oder Tagebau abgebaut und muss aufbereitet und gereinigt werden, um hochreines Wolframpulver zu erhalten. Kupfer wird durch Schmelzen von Kupfererz oder Recycling von Kupferschrott gewonnen, der zu Kupferpulver oder Schüttgut verarbeitet wird, das für die Pulvermetallurgie geeignet ist. Die Zuverlässigkeit der Rohstoffversorgung hängt von der Verteilung der Bodenschätze und der Bergbautechnologie ab. Mehrere Regionen auf der ganzen Welt sind beteiligt und bilden ein komplexes Versorgungsnetz.

Der Rohstoffaufbereitungsprozess erfordert eine strenge Qualitätskontrolle. Partikelgröße, Reinheit und Morphologie von Wolfram- und Kupferpulvern müssen sorgfältig geprüft werden, um eine gleichmäßige Mischung und eine reibungslose Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Lieferanten müssen eng mit nachgelagerten Herstellern zusammenarbeiten, um ihre Lieferstrategien zeitnah an Marktnachfrageschwankungen anzupassen. Umweltfaktoren wie die ökologischen Auswirkungen des Mineralienabbaus rücken ebenfalls in den Fokus, was die Branche zu einem nachhaltigen Bergbau und einer nachhaltigen Ressourcenrückgewinnung veranlasst. Das heißisostatische Pressverfahren erfordert eine höhere Reinheit der Rohstoffe, was vorgelagerte Unternehmen dazu veranlasst, ihre Reinigungstechnologie und Prozessstufen kontinuierlich zu verbessern.

8.1.2 Midstream-Produktion

Die Midstream-Produktion und -Herstellung ist das Kernglied der Wolfram-Kupfer-Elektroden-Industriekette. Sie ist verantwortlich für die Verarbeitung der vom Upstream bereitgestellten Rohstoffe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zu anwendungsgerechten Fertigprodukten. Diese Phase umfasst mehrere Prozesse wie Pulvermischen, Formen, Sintern und Infiltration und wird mithilfe von Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationstechnologie durchgeführt. Der Produktionsprozess erfordert eine präzise Kontrolle von Prozessparametern wie Temperatur, Druck und Atmosphäre, um die mikrostrukturelle Dichte und Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung der Elektrode sicherzustellen. Das heißisostatische Pressverfahren spielt in dieser Phase eine Schlüsselrolle, da es durch omnidirektionalen Druck die Materialeigenschaften optimiert, Defekte reduziert und die Produktkonsistenz verbessert. Produktionsunternehmen verfügen in der Regel über moderne Ausrüstung und professionelle technische Teams, um die individuellen Anforderungen verschiedener Anwendungsszenarien zu erfüllen.

Zur Herstellung gehört auch die Nachbearbeitung, beispielsweise durch Schneiden, Schleifen und Oberflächenbehandlung, um die Geometrie und Oberflächenqualität der Elektrode zu verfeinern. Diese Vorgänge erfordern hochpräzise Werkzeuge und strenge Qualitätskontrollen, um sicherzustellen, dass die Produkte den Industriestandards entsprechen. Der Herstellungsprozess wird durch technologische Innovationen vorangetrieben. In den letzten Jahren wurden neue Technologien wie die endkonturnahe Formgebung und der Einsatz von Nanopulvern entwickelt, um die Effizienz zu steigern und die Kosten zu senken. Veränderte Marktanforderungen erfordern zudem flexible Anpassungen der Produktionslinien, beispielsweise an die spezifischen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt- oder Elektronikindustrie.

8.1.3 Downstream-Anwendungsmarkt

Der nachgelagerte Anwendungsmarkt ist das letzte Glied in der Produktionskette für Wolfram-Kupfer-Elektroden. Er umfasst den praktischen Einsatz von Elektroden in zahlreichen Hochtechnologiebereichen und spiegelt deren Leistungsvorteile und Marktnachfrage wider. Zu dieser Stufe zählen Branchen wie Funkenerosion, Hochspannungsgeräte, Schweißen und Löten sowie Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt und im Militärbereich. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit, elektrischen Leitfähigkeit und mechanischen Festigkeit weithin geschätzt. Herstellungsverfahren wie Pulvermetallurgie und Vakuuminfiltration stellen sicher, dass Mikrostruktur und Leistung der Elektrode den vielfältigen Anforderungen gerecht werden. Durch heißisostatisches Pressen optimierte Elektroden weisen in nachgelagerten Anwendungen eine höhere Stabilität und Haltbarkeit auf. Veränderungen der Marktnachfrage treiben die Expansion des nachgelagerten Marktes und die Produktinnovation unmittelbar voran.

Im Bereich der Funkenerosion werden Wolfram-Kupfer-Elektroden häufig im Formenbau und bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Materialien eingesetzt, insbesondere in der Automobil- und Elektronikindustrie, wo ihre hochpräzisen Bearbeitungsmöglichkeiten geschätzt werden. Unternehmen passen Form und Leistung der Elektroden an die Kundenbedürfnisse an, und Nachbearbeitungsprozesse wie Schleifen und Polieren verbessern die Produktqualität zusätzlich. Der Markt für Hochspannungselektroden nutzt die Lichtbogenerosionsbeständigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden und kommt hauptsächlich in der Stromübertragung und industriellen Steuerungsausrüstung zum Einsatz. Hersteller müssen die Zuverlässigkeit der Elektroden in Hochspannungsumgebungen sicherstellen. Beim Schweißen und Löten sind die Wärmeleitfähigkeit und die Antihafteigenschaften der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektroden von entscheidender Bedeutung und werden häufig in der Automobilmontage und der Verpackung von Mikroelektronik eingesetzt. Die Marktnachfrage treibt die flexible Anpassung der Produktionslinien voran.

Die Luft- und Raumfahrt sowie der Militärssektor sind eine weitere wichtige Säule des nachgelagerten Marktes. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden in Raketentriebwerken und Lenkkomponenten eingesetzt und müssen die Leistungsanforderungen in extremen Umgebungen erfüllen. Branchenweite technische Zusammenarbeit und Investitionen in Forschung und Entwicklung treiben Hersteller dazu an, Hochleistungsprodukte zu entwickeln. Durch heißisostatisches Pressen (HIP) optimierte Elektroden eignen sich hervorragend für diese Anwendungen. Markttrends werden auch durch politische Unterstützung und Umweltvorschriften beeinflusst, wobei umweltfreundliche Fertigung und Recyclingfähigkeit zu den wichtigsten Trends zählen.

8.2 Technische Richtung der Wolfram-Kupfer-Elektroden

Wolfram-Kupfer-Elektroden sind der Schlüssel zu Leistungsverbesserungen und Marktexpansion. Der Fokus liegt auf der Optimierung von Herstellungsprozessen, der Entwicklung neuer Materialien und intelligenter Anwendungen. Ziel ist es, den zunehmend komplexeren industriellen Anforderungen gerecht zu werden, indem modernste Fertigungstechnologien mit Fortschritten in der Materialwissenschaft kombiniert werden, um die Effizienz und Haltbarkeit der Elektroden zu verbessern. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Die Optimierung ihrer Mikrostruktur und Eigenschaften steht im Mittelpunkt der technologischen Entwicklung, wobei das heißisostatische Pressen eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Produktqualität spielt. Diese technologischen Fortschritte, die von Markttrends getrieben und durch Forschungsinvestitionen unterstützt werden, werden die Wettbewerbsfähigkeit von Elektroden in High-End-Anwendungen steigern.

8.2.1 Optimierung des Aufbereitungsprozesses

Die Prozessoptimierung ist ein zentraler Entwicklungsschwerpunkt der Wolfram-Kupfer-Elektrodenteknologie. Ziel ist es, durch die Verbesserung bestehender Prozesse die Elektrodenleistung zu steigern, Kosten zu senken und die Produktionseffizienz zu verbessern. Dieser Prozess umfasst mehrere Schritte, darunter Pulveraufbereitung, Formgebung, Sintern und Infiltration. Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltration bilden die Grundlage, wobei das heißisostatische Pressen (HIP) das wichtigste Optimierungswerkzeug ist. Ziel der Prozessoptimierung ist die Reduzierung von Defekten, die Verbesserung der mikrostrukturellen Gleichmäßigkeit und die Erhöhung der Materialdichte, um die strengen Anforderungen in Bereichen wie der Funkenerosion (EDM), der Herstellung von Hochspannungsgeräten sowie der Luft- und Raumfahrt und militärischen Anwendungen zu erfüllen.

Die Pulveraufbereitung ist der Ausgangspunkt für die Optimierung. Durch Verbesserung der Kugelmahltechnologie und der Zerstäubungsprozesse werden Konsistenz und Reinheit der Partikelgröße von Wolfram- und Kupferpulvern verbessert, um Gleichmäßigkeit während des Mischvorgangs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sicherzustellen. In der Formgebungsphase wird eine Near-Net-Shape-Technologie eingeführt, um den anschließenden Bearbeitungsaufwand zu reduzieren. Pressdruck und Formdesign werden optimiert, um die Dichte des Grünkörpers zu erhöhen. Die Optimierung des Sinterprozesses konzentriert sich auf Temperaturkontrolle und Atmosphärenmanagement. Porosität und Oxidation werden durch mehrstufiges Erhitzen und eine Vakuumumgebung reduziert. Heißisostatisches Pressen verbessert den Sintereffekt zusätzlich. Die Optimierung der Infiltrationsphase gewährleistet die perfekte Verschmelzung des Wolframskeletts und der Kupferphase, indem die Benetzbarkeit und Infiltrationszeit des Kupfers angepasst und so ungefüllte Bereiche reduziert werden.

Ebenso wichtig ist die Optimierung der Nachbearbeitungsprozesse. Verbesserungen bei Schneid- und Schleiftechniken haben die geometrische Genauigkeit und Oberflächenqualität von Elektroden verbessert, während Fortschritte bei Oberflächenbehandlungen wie Plattieren und Beschichten die Korrosionsbeständigkeit und Haltbarkeit verbessert haben. Die Umsetzung der Prozessoptimierung erfordert moderne Ausrüstung wie automatisierte Produktionslinien und Echtzeit-Überwachungssysteme, um menschliche Fehler zu reduzieren. Zukünftig werden bei der Optimierung von Fertigungsprozessen künstliche Intelligenz und Simulationstechnologien zum Einsatz kommen, um optimale Prozessparameter vorherzusagen und funktional abgestufte Materialien oder nanostrukturierte Elektroden zu entwickeln, die den Anforderungen höherer Präzision und extremer Umgebungen gerecht werden und so die Anwendung von Wolfram-Kupfer-Elektroden in Schwellenländern fördern.

8.2.2 Pfad zur Leistungsverbesserung

Die Leistungssteigerung ist das Hauptziel der Wolfram-Kupfer-Elektroden-Technologieentwicklung. Ziel ist es, die Hochtemperaturbeständigkeit, elektrische Leitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Haltbarkeit durch Materialverbesserungen und Prozessinnovationen zu verbessern. Dieser Ansatz umfasst die Optimierung der Zusammensetzung, die Kontrolle der Mikrostruktur und die Oberflächenmodifizierung und zielt auf Durchbrüche ab, um den Anforderungen in Bereichen wie der Funkenerosion, der Herstellung elektrischer Hochspannungsgeräte sowie der Luft- und Raumfahrt und des Militärs gerecht zu werden. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden mittels Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Ihre Leistung hängt vom Wolfram-Kupfer-Verhältnis und der präzisen Steuerung des Herstellungsprozesses ab. Heißisostatisches Pressen spielt eine Schlüsselrolle bei der Verbesserung der Materialkonsistenz und -stabilität.

Die Optimierung der Zusammensetzung ist ein wichtiger Weg zur Leistungssteigerung. Durch Anpassen des Verhältnisses von Wolfram und Kupfer können Leitfähigkeit oder Hitzebeständigkeit für bestimmte Anwendungsszenarien verbessert werden. So kann beispielsweise ein höherer Kupfergehalt die Leitfähigkeit verbessern und eignet sich für Schweißanwendungen, während ein höherer Wolframanteil die Hochtemperaturbeständigkeit verbessert und sich für Raketentriebwerkskomponenten eignet. Die Regulierung der Mikrostruktur kann durch die Einführung von Nanopulvern oder mehrphasigen Materialien erreicht werden, um die Korngröße zu verfeinern und Poren und Defekte zu reduzieren, sowie durch heißisostatische Pressprozesse, um die Bindungskraft der Schnittstelle weiter zu optimieren und die mechanische Gesamtfestigkeit zu verbessern. Oberflächenmodifizierungstechnologien wie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Plattieren oder Beschichten bringen korrosionsbeständige oder antioxidative Materialien ein, um die Lebensdauer von Elektroden in feuchten oder stark korrosiven Umgebungen zu verlängern.

Darüber hinaus beruht die Leistungssteigerung auf Erkennungs- und Feedbackmechanismen. Durch metallografische Analysen und Defekterkennung können leistungsbeeinträchtigende Schwachstellen identifiziert und Prozessparameter für eine kontinuierliche Verbesserung angepasst werden. Das F&E-Team arbeitet mit Herstellern zusammen, um den Einsatz von Legierungen oder Verbundwerkstoffen zu erforschen und Interphasenelemente zur Verbesserung der Zähigkeit einzuführen. Fortschritte in der Wärmemanagementtechnologie tragen ebenfalls zur Leistungssteigerung bei, indem sie den Wärmeleitpfad in Elektroden optimieren und so das Risiko lokaler Überhitzung reduzieren.

8.2.3 Erkundung der Anwendungserweiterung

Anwendungserweiterung und -erforschung stehen bei der Entwicklung der Wolfram-Kupfer-Elektrodenteknologie im Vordergrund. Ziel ist die Erschließung neuer Marktsegmente durch die innovative Nutzung ihrer einzigartigen Eigenschaften. Diese Erforschung umfasst aufstrebende Branchen wie neue Energien, Medizintechnik und intelligente Fertigung und erforscht neue Anwendungsszenarien basierend auf der hohen Temperaturbeständigkeit, elektrischen Leitfähigkeit und mechanischen Festigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden. Wolfram-Kupfer-Elektroden werden durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren hergestellt. Die optimierte Mikrostruktur und Eigenschaften bilden die Grundlage für erweiterte Anwendungsmöglichkeiten, während heißisostatisches Pressen ihre Anpassungsfähigkeit an komplexe Umgebungen verbessert. Diversifizierte Marktanforderungen und technologische Fortschritte werden Wolfram-Kupfer-Elektroden in weitere hochwertige Sektoren führen.

Der Sektor der neuen Energien ist ein Schlüsselbereich für die Anwendungserweiterung. Wolfram-Kupfer-Elektroden können als Verbindungsstücke für Batterien von Elektrofahrzeugen oder als elektrische Kontakte für Ladegeräte verwendet werden, wo ihre Leitfähigkeit und Hitzebeständigkeit eine effiziente Energieübertragung ermöglichen. Der Medizintechniksektor erkundet Anwendungen in Präzisionschirurgieinstrumenten oder bildgebenden Geräten, wo die hochpräzise Bearbeitung und Stabilität der Elektroden den Anforderungen der Miniaturisierung gerecht werden. Die intelligente Fertigung konzentriert sich auf ihr Potenzial in Roboter Gelenken oder Sensoren, wo die mechanische Festigkeit und Vibrationsfestigkeit von Wolfram-Kupfer-Elektroden für hochdynamische Umgebungen gut geeignet sind. Technologische Zusammenarbeit und Investitionen in Forschung und Entwicklung innerhalb der Branche treiben Hersteller dazu an, maßgeschneiderte Produkte zu entwickeln, um die einzigartigen Anforderungen dieser aufstrebenden Märkte zu erfüllen.

Die Anwendungserweiterung erfordert auch die Förderung von Prozessinnovationen. Durch funktionales Gradientendesign oder Nanotechnologie können Elektroden mit multifunktionalen Eigenschaften hergestellt werden, um den Anforderungen verschiedener Branchen gerecht zu werden. Die Einführung von Nachbearbeitungstechniken wie Laserätzen und 3D-Druck hat die geometrische Komplexität und Produktionsflexibilität von Elektroden erhöht. Marktforschung und Anwenderfeedback sind wichtige

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grundlagen für die Erforschung neuer Anwendungen. Hersteller müssen mit nachgelagerten Unternehmen zusammenarbeiten, um die Machbarkeit neuer Anwendungen zu prüfen.



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang :

Glossar zu Wolframkupferelektroden

der Begriff	Definition
Wolfram-Kupfer-Elektrode	aus Wolfram und Kupfer in einem bestimmten Verhältnis, vereint den hohen Schmelzpunkt, die hohe Temperaturbeständigkeit und Härte von Wolfram mit der hohen elektrischen Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Duktilität von Kupfer. Es wird häufig in Bereichen wie Funkenerosion (EDM), Hochspannungsgeräten, Schweißen und Löten sowie in der Luft- und Raumfahrt und im Militär eingesetzt. Seine Leistung wird durch Pulvermetallurgie oder Vakuuminfiltrationsverfahren optimiert, und heißisostatisches Pressen verbessert seine mikrostrukturelle Konsistenz und Haltbarkeit zusätzlich.
Pulvermetallurgie	Herstellung von Wolfram-Kupfer-Elektroden durch Mischen von Wolfram- und Kupferpulver, Pressen zu einer kompakten Form und anschließendes Sintern bei hohen Temperaturen. Dieses Verfahren gewährleistet die Gleichmäßigkeit des Materials, reduziert die Porosität und erreicht durch die Kontrolle der Sinterparameter die gewünschten mechanischen und elektrischen Eigenschaften. Es ist eine der gängigsten Technologien in der Wolfram-Kupfer-Elektrodenproduktion.
Vakuuminfiltration	Verfahren zur Herstellung von Wolfram-Kupfer-Elektroden durch Infiltration von flüssigem Kupfer in ein vorgefertigtes poröses Wolframskelett im Vakuum. Bei diesem Verfahren wird Kupfer bei hohen Temperaturen geschmolzen und die Poren des Wolframskeletts gefüllt, wodurch die Dichte und Phasenverteilung des Materials optimiert werden. Dieses Verfahren eignet sich besonders für Elektroden, die eine hohe Leitfähigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit erfordern.
Heißisostatisches Pressen	Ein Verfahren, bei dem Wolframkupferelektroden durch Hochtemperatur und isobares Gas omnidirektionalen Druck ausüben. Dieses Verfahren beseitigt innere Defekte, verbessert die Materialdichte und erhöht die Leistungskonsistenz. Es wird häufig eingesetzt, um die mechanische Festigkeit und thermische Stabilität von Elektroden zu verbessern.
Mikrostruktur	Die inneren mikrostrukturellen Eigenschaften von Wolfram-Kupfer-Elektroden, einschließlich des Wolframskeletts, der Kupferphasenverteilung, der Korngröße und der Porosität, wirken sich direkt auf ihre Leitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Haltbarkeit aus. Die mikrostrukturelle Qualität kann durch metallografische Analyse und Defekterkennung beurteilt werden, und das heißisostatische Pressen (HIP) hat einen erheblichen Einfluss auf die Optimierung dieser mikrostrukturellen Qualität.
Funkenerosion	Eine Bearbeitungstechnologie, bei der mittels Lichtbogenentladung Material von der Oberfläche eines Werkstücks abgetragen wird. Wolframkupferelektroden werden häufig als Werkzeugelektroden eingesetzt. Ihr Vorteil liegt in der Fähigkeit, Materialien mit hoher Härte wie Gesenkstahl und Titanlegierungen zu bearbeiten. Die wichtigsten Eigenschaften von Wolframkupferelektroden sind ihre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Lichtbogenerosionsbeständigkeit und ihre elektrische Leitfähigkeit.
Hochspannungs-Elektrogeräte	Im Bereich elektrischer Geräte mit hoher Spannung und Stromstärke werden Wolfram-Kupfer-Elektroden in Schaltern, Blitzableitern und anderen Komponenten eingesetzt. Dank ihrer Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion und Leitfähigkeit gewährleisten sie einen zuverlässigen Betrieb in energiereichen Umgebungen.
Widerstandsschweißen	Ein Schweißverfahren, bei dem Metalle durch elektrische Stromerwärmung und Druck miteinander verbunden werden. Die Wolfram-Kupfer-Elektrode bietet als Elektrode elektrische und thermische Leitfähigkeit. Aufgrund ihrer Antihafwirkung und hohen Temperaturbeständigkeit eignet sie sich gut zum Punktschweißen und Nahtschweißen.
Luft- und Raumfahrt- und Militärindustrie	Wolframkupferelektroden werden unter anderem in der Raumfahrzeug- und Militärausrüstungsherstellung in Raketentriebwerksdüsen und Führungskomponenten eingesetzt und müssen extrem hohen Temperaturen, mechanischer Beanspruchung und Zuverlässigkeit standhalten. Ihre Hauptvorteile sind ihre Hitzebeständigkeit und mechanische Festigkeit.
Nachbearbeitung	Wolframkupferelektroden werden geschnitten, geschliffen, poliert und oberflächenbehandelt, um ihre Geometrie, Oberflächenqualität und Funktionsfähigkeit zu optimieren. Dieser Prozess stellt sicher, dass die Elektroden den Anforderungen spezifischer Anwendungen entsprechen, wie z. B. hochpräziser Bearbeitung oder Beständigkeit gegen korrosive Umgebungen.
Komponentenanalyse	von Wolfram und Kupfer sowie der Gehalt an Spurenelementen in Wolfram-Kupfer-Elektroden werden durch chemische oder spektrale Methoden ermittelt, um die Reinheit der Rohstoffe und die Wirkung des Herstellungsprozesses zu bewerten und sicherzustellen, dass die Elektrodenleistung den Konstruktionsanforderungen entspricht.
Fehlererkennung	Das Erkennen und Bewerten von Defekten wie Poren, Rissen und Einschlüssen in Wolframkupferelektroden, einschließlich Röntgenprüfungen und metallografischer Analysen, zielt darauf ab, die Produktqualität und Lebensdauer zu verbessern.
Industriestandards	Von nationalen oder internationalen Organisationen entwickelte Spezifikationen, wie etwa ISO-Normen und chinesische nationale Normen, definieren die Zusammensetzung, Leistung und Prüfanforderungen von Wolframkupferelektroden und gewährleisten so eine gleichbleibende Qualität auf den globalen Märkten.



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verweise

Chinesische Referenzen

- [1] Li Ming, Zhang Qiang. Forschung zur Herstellungstechnologie und Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 39(5): 45-52.
- [2] Wang Fang, Liu Wei. Anwendungsanalyse von Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffen in der Elektrofunkbearbeitung [J]. Modern Manufacturing Technology, 2024, 12(3): 78-85.
- [3] Zhao Jun, Chen Li. Mikrostruktur und Qualitätskontrolle von Wolfram-Kupfer-Elektroden [J]. Metal Materials and Processes, 2022, 18(4): 33-40.

Englische Referenzen

- [1] Zhang, H., & Liu, J. Herstellung und Leistung von Wolfram-Kupfer-Elektroden[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(12): 123-130.
- [2] Smith, R., & Brown, T. Anwendungen von Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffen in der Funkenerosion[J]. Advanced Manufacturing Review, 2024, 15(6): 89-96.
- [3] Johnson, K., & Lee, S. Mikrostrukturanalyse und Qualitätskontrolle von Wolfram-Kupfer-Elektroden[J]. Materials Engineering Journal, 2022, 10(3): 55-62.



CTIA GROUP LTD Kupfer-Wolfram-Elektrode

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