

Enzyklopädie des schnittfesten Wolframdrahts

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Global Leader in Intelligent Manufacturing for Tungsten, Molybdenum, and Rare Earth Industries

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 des intelligenten, integrierten und flexiblen Designs und der Herstellung von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets. CHINATUNGSTEN ONLINE, gegründet 1997 mit www.chinatungsten.com als Ausgangspunkt – Chinas erste erstklassige Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes, das sich auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltenerdmetallindustrie konzentriert. Mit fast drei Jahrzehnten umfassender Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän erbt die CTIA GROUP die außergewöhnlichen Design- und Fertigungskapazitäten, die hervorragenden Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihrer Muttergesellschaft und wird zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, Legierungen mit hoher Dichte, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE mehr als 200 mehrsprachige professionelle Websites für Wolfram und Molybdän eingerichtet, die mehr als 20 Sprachen abdecken und über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden enthalten. Seit 2013 hat der offizielle WeChat-Account "CHINATUNGSTEN ONLINE" über 40.000 Informationen veröffentlicht, fast 100.000 Follower bedient und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen zur Verfügung gestellt. Mit kumulativen Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto, die Milliarden von Malen erreichen, hat es sich zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltenerdmetallindustrie entwickelt, die 24/7 mehrsprachige Nachrichten, Produktleistungen, Marktpreise und Markttrenddienste bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die personalisierten Bedürfnisse der Kunden zu erfüllen. Unter Verwendung der KI-Technologie entwirft und produziert das Unternehmen gemeinsam mit Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Unternehmen bietet integrierte Dienstleistungen rund um den Prozess, die von der Werkzeugöffnung über die Probeproduktion bis hin zur Endbearbeitung, Verpackung und Logistik reichen. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE mehr als 130.000 Kunden weltweit F&E-, Design- und Produktionsdienstleistungen für über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten erbracht und damit 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.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer mehr als 30-jährigen Branchenerfahrung auch Wissens-, Technologie-, Wolframpreis- und Markttrendanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und diese frei mit der Wolframindustrie geteilt. Dr. Han verfügt seit den 1990er Jahren über mehr als 30 Jahre Erfahrung im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen und ist ein anerkannter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte im In- und Ausland. Das Team der CTIA GROUP hält sich an das Prinzip, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zur Verfügung zu stellen, und verfasst kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte, die auf der Produktionspraxis und den Bedürfnissen der Marktkunden basieren und in der Branche weithin gelobt werden. Diese Erfolge sind eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP und machen sie zu einem führenden Unternehmen bei der Herstellung und Information von Wolfram- und Molybdänprodukten.



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

INHALT

Kapitel 1: Einführung und Überblick

- 1.1 Einleitung
 - 1.1.1 Definition und Bedeutung von schnittfestem Wolframdraht
 - 1.1.2 Zweck des Schreibens dieses Buches und Zielgruppe
- 1.2 Historische Entwicklung des schnittfesten Wolframdrahtes
 - 1.2.1 Entdeckung und frühe Anwendungen von Wolframdraht
 - 1.2.2 Entwicklung der schnittfesten Wolframdrahttechnologie
 - 1.2.3 Wichtige Meilensteine und technologische Durchbrüche

Kapitel 2: Materialwissenschaftliche Grundlagen von schnittfestem Wolframdraht

- 2.1 Grundlegende Eigenschaften von Wolframdraht
 - 2.1.1 Physikalische Eigenschaften von Wolframdraht
 - 2.1.2 Chemische Eigenschaften von Wolframdraht
 - 2.1.3 Mechanische Eigenschaften von Wolframdraht
- 2.2 Zusammensetzung und Aufbau von schnittfestem Wolframdraht
 - 2.2.1 Unterschiede zwischen reinem Wolframdraht und legiertem Wolframdraht
 - 2.2.2 Mikrostruktur und Kristallstruktur
 - 2.2.3 Auswirkungen von Dotierung und Legierung auf die Leistungsfähigkeit
- 2.3 Vergleich von schnittfestem Wolframdraht mit anderen Materialien
 - 2.3.1 Leistungsvergleich von Wolframdraht mit Stahldraht, Kohlefaser usw.
 - 2.3.2 Vorteile von schnittfestem Wolframdraht in spezifischen Anwendungen

Kapitel 3: Herstellungsprozess des schnittfesten Wolframdrahts der CTIA GROUP

- 3.1 Auswahl der Rohstoffe
 - 3.1.1 Gewinnung und Reinigung von Wolframerz
 - 3.1.2 Auswahl und Rolle der Dotierungselemente
- 3.2 Produktionsprozess des Wolframdrahts der CTIA GROUP
 - 3.2.1 Verfahren der Pulvermetallurgie
 - 3.2.2 Drahtziehverfahren und -ausrüstung
 - 3.2.3 Wärmebehandlungs- und Glühprozess
- 3.3 Qualitätskontrolle und Prüfung von schnittfestem Wolframdraht
 - 3.3.1 Qualitätsüberwachung während der Produktion
 - 3.3.2 Prüfnormen und -verfahren für fertigen Wolframdraht

Kapitel 4: Leistung und Prüfung von schnittfestem Wolframdraht

- 4.1 Mechanische Leistungsprüfung von schnittfestem Wolframdraht
 - 4.1.1 Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit
 - 4.1.2 Härteprüfung
 - 4.1.3 Ermüdungsleistung und Haltbarkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2 Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit von schnittfestem Wolframdraht

- 4.2.1 Verschleißmechanismen und Prüfverfahren
- 4.2.2 Leistungsbewertung in korrosiven Umgebungen

4.3 Hochtemperaturverhalten von schnittfestem Wolframdraht

- 4.3.1 Thermische Stabilität und Oxidationsbeständigkeit
- 4.3.2 Änderungen der mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen

Kapitel 5: Normen in Bezug auf schnittfesten Wolframdraht

5.1 Internationale Normen

- 5.1.1 ISO-Normen
- 5.1.2 ASTM und andere internationale Normen

5.2 Chinesische nationale Standards und Branchenvorschriften

- 5.2.1 GB/T-Normen
- 5.2.2 Branchenvorschriften und Zertifizierungen

5.3 Zusammenfassende Tabelle der Normen für schnittfesten Wolframdraht

5.4 Anwendung und Ausblick auf die Zukunft von Normen

Kapitel 6: Anwendungsgebiete von schnittfestem Wolframdraht

6.1 Verarbeitung des Drahtschneidens

- 6.1.1 Funkenerosion (EDM)
 - 6.1.1.1 Zentrale Rolle von schnittfestem Wolframdraht als Elektrodendraht beim Erodieren
 - 6.1.1.2 Vorteile im hochpräzisen Formenbau
 - 6.1.1.3 Fallbeispiele zur Verarbeitung von komplex geformten Metallteilen
- 6.1.2 Schneiden von Diamantdrahtsägen
 - 6.1.2.1 Wolframdraht als Grundmaterial für Diamantdrahtsägen
 - 6.1.2.2 Hochpräzises Schneiden von Halbleiterwafern und Photovoltaik-Siliziumwafern
 - 6.1.2.3 Schneidanwendungen für harte Materialien wie Stein und Keramik

6.2 Funktionsbauteile in Hochtemperaturumgebungen

- 6.2.1 Heizelemente in Hochtemperaturöfen
 - 6.2.1.1 Anwendungen von Wolframdraht in Vakuum- oder Inertgasöfen
 - 6.2.1.2 Dauerhaftigkeit bei Hochtemperaturglüh- und Sinterprozessen
- 6.2.2 Thermisches Spritzen und Schweißunterstützung
 - 6.2.2.1 Wolframdrahtbauteile beim Plasmaspritzen
 - 6.2.2.2 Wolframelektrodendraht beim Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)
- 6.2.3 Hochtemperaturkomponenten für die Luft- und Raumfahrt
 - 6.2.3.1 Wolframdrahtverstärkte Materialien in Düsen von Raketentriebwerken
 - 6.2.3.2 Wolframdrahtkathoden in elektrischen Triebwerken

6.3 Elektronische und elektrische Anwendungen

- 6.3.1 Elektronenstrahl- und Röntengeräte
 - 6.3.1.1 Wolframdrahtfilamente in Elektronenmikroskopen und Röntgenröhren
 - 6.3.1.2 Hochtemperaturquellen beim Elektronenstrahlschweißen
- 6.3.2 Vakuum-Ausrüstung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.3.2.1 Wolframdraht-Verdampfungsschiffchen bei der Vakuumabscheidung
- 6.3.2.2 Wolframdraht-Ionenquellen in Massenspektrometern
- 6.3.3 Beleuchtung und Display
 - 6.3.3.1 Wolframelektroden in Hochdruckentladungslampen (HID)
 - 6.3.3.2 Wolframdrahtfilamente in Glühlampen und Halogenlampen
- 6.4 Medizinische und wissenschaftliche Instrumente
 - 6.4.1 Chirurgische Instrumente
 - 6.4.1.1 Wolframdrahtelektroden in der Elektrochirurgie
 - 6.4.1.2 Hochpräzises Schneiden von Drähten in der minimalinvasiven Chirurgie
 - 6.4.2 Analytische Instrumente
 - 6.4.2.1 Wolframdrahtdetektoren in Massenspektrometern
 - 6.4.2.2 Hochtemperatur-Probenhalter aus Wolframdraht in thermogravimetrischen Analysatoren
 - 6.4.3 Biomedizinische Forschung
 - 6.4.3.1 Wolframdrahtelektroden in der Zellelektroporation
 - 6.4.3.2 Mikroelektroden-Arrays in den Neurowissenschaften
- 6.5 Unterstützung bei der industriellen Fertigung und Verarbeitung
 - 6.5.1 Textil- und Papierherstellung
 - 6.5.1.1 Verschleißfeste Wolframdrahtführungen in Textilmaschinen
 - 6.5.1.2 Hilfskomponenten aus Wolframdraht in Papierherstellungsmaschinen
 - 6.5.2 Lebensmittelverarbeitung
 - 6.5.2.1 Korrosionsbeständiger Wolframdraht in Lebensmittelschneidlinien
 - 6.5.2.2 Wolframdraht-Heizelemente in Hochtemperatur-Backanlagen
 - 6.5.3 Glas- und Keramikverarbeitung
 - 6.5.3.1 Hochfester Wolframdraht beim Schneiden von Glas
 - 6.5.3.2 Wolframdraht zum Schneiden und Bohren von keramischen Substraten
- 6.6 Energie und Umweltschutz
 - 6.6.1 Kernenergie
 - 6.6.1.1 Steuerkomponenten aus Wolframdraht in Kernreaktoren
 - 6.6.1.2 Wolframdrahtgeflecht in der Strahlenabschirmung
 - 6.6.2 Erneuerbare Energien
 - 6.6.2.1 Schneiden von Wolframdraht bei der Herstellung von Solarzellen
 - 6.6.2.2 Verschleißfeste Wolframdrahtbauteile in Windkraftanlagen
 - 6.6.3 Abfallbehandlung
 - 6.6.3.1 Heizelemente aus Wolframdraht in Hochtemperatur-Verbrennungsanlagen
 - 6.6.3.2 Elektrolytische Wolframdrahtelektroden in der Abwasseraufbereitung
- 6.7 Verteidigung und Sicherheit
 - 6.7.1 Panzerbrechende Materialien
 - 6.7.1.1 Wolframdrahtverstärkte Verbundpanzerung
 - 6.7.1.2 Panzerbrechende Projektilkerne auf Wolframdrahtbasis
 - 6.7.2 Erfassen und Erkennen
 - 6.7.2.1 Wolframdrahtkomponenten in Hochtemperatursensoren
 - 6.7.2.2 Wolframdrahtauslöser in Sprengstoffdetektionsgeräten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.7.3 Kommunikationsgeräte

6.7.3.1 Hochtemperaturbeständiger Wolframdraht in militärischen Kommunikationsantennen

6.7.3.2 Reflektierendes Wolframdrahtgewebe in der Satellitenkommunikation

Kapitel 7: Fortgeschrittene Themen und zukünftige Trends bei schnittfestem Wolframdraht

7.1 Nanotechnologie und Wolframdraht

7.1.1 Herstellung und Eigenschaften von nanoskaligem Wolframdraht

7.1.2 Anwendungsmöglichkeiten und Herausforderungen

7.2 Verbundwerkstoffe und Beschichtungstechnik

7.2.1 Wolframdrahtverstärkte Verbundwerkstoffe

7.2.2 Leistungssteigerung durch Oberflächenbeschichtungen

7.3 Zukünftige Entwicklungstrends

7.3.1 Forschung und Entwicklung neuer Wolframdrahtwerkstoffe

7.3.2 Nachhaltigkeit und Umweltaspekte

7.3.3 Erforschung interdisziplinärer Anwendungen

Kapitel 8: Fallstudien und praktischer Leitfaden für schnittfesten Wolframdraht

8.1 Fallstudien zu praktischen Anwendungen von schnittfestem Wolframdraht

8.1.1 Fallstudien erfolgreicher Anwendungen aus der Industrie

8.1.2 Fehlerfälle und gewonnene Erkenntnisse

8.2 Auswahl- und Verwendungsanleitung für schnittfesten Wolframdraht

8.2.1 So wählen Sie den richtigen schnittfesten Wolframdraht aus

8.2.2 Installation, Wartung und Sicherheitsvorkehrungen

Kapitel 9: Anhang

9.1 Glossar

9.2 Referenzen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 1: Einführung und Überblick

1.1 Einleitung

Schnittfester Wolframdraht nimmt als Hochleistungswerkstoff aufgrund seiner einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften eine bedeutende Position in der modernen Industrie und wissenschaftlichen Forschung ein. Es dient nicht nur als Paradigma für die Schnittstelle zwischen Materialwissenschaft und Ingenieurtechnologie, sondern bietet auch entscheidende Unterstützung über mehrere Branchen hinweg.

1.1.1 Definition und Bedeutung von schnittfestem Wolframdraht

Schnittfester Wolframdraht ist ein feiner Draht, der hauptsächlich aus Wolfram (W, Ordnungszahl 74) besteht und durch Dotierungs- oder Legierungsprozesse optimiert wurde, um eine außergewöhnliche Zugfestigkeit (über 4000 MPa), eine hervorragende Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturstabilität (Schmelzpunkt ca. 3422 °C) aufzuzeichnen. Mit einem typischen Durchmesser von Mikrometern bis zu Millimetern hält es extremen mechanischen Belastungen und thermischen Belastungen stand und eignet sich daher besonders für Präzisionsschneid- und Funktionsanwendungen in Hochtemperaturumgebungen. Im Vergleich zu gewöhnlichem Wolframdraht wurde schnittfester Wolframdraht speziell entwickelt, um die Leistung bei Schneidanwendungen zu verbessern, z. B. als Elektrodendraht in der Funkenerosion (EDM) oder als hochfestes Substrat in Diamantdrahtsägen.

Seine Bedeutung manifestiert sich in mehreren Dimensionen. In der Fertigung verbessert die Haltbarkeit von schnittfestem Wolframdraht die Verarbeitungspräzision und -effizienz erheblich und ermöglicht Toleranzen im Submikrometerbereich (weniger als 1 µm) in Anwendungen wie dem Schneiden von Halbleiterwafern. Seine hohe Temperaturbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit machen es in der Luft- und Raumfahrt (z.B. als Verstärkungsmaterial in Raketendüsen) und in der Elektronikindustrie (z.B. als Filamente in Röntgenröhren) unverzichtbar. Darüber hinaus erweitern die hohe Dichte (19,25 g/cm³) und die Korrosionsbeständigkeit von Wolfram sein Potenzial in den Bereichen Verteidigung und Energie. Als repräsentative Errungenschaft an der Schnittstelle von Materialwissenschaft und -technik treibt schnittfester Wolframdraht den technologischen Fortschritt voran und ist ein unverzichtbares Werkzeug zur Bewältigung komplexer technischer Herausforderungen.

1.1.2 Zweck des Schreibens dieses Buches und Zielgruppe

Ziel dieses Buches ist es, eine umfassende und systematische Einführung in die wissenschaftlichen Grundlagen, Herstellungsverfahren, Leistungstests und weitreichenden Anwendungen von schnittfestem Wolframdraht zu bieten und die Lücke in der bestehenden Literatur für eine systematische Untersuchung dieses Spezialmaterials zu schließen. Durch die Integration der neuesten akademischen Forschung und der industriellen Praxis skizziert das Buch nicht nur den aktuellen Stand der schnittfesten Wolframdrahttechnologie, sondern erforscht auch ihre zukünftigen Entwicklungsrichtungen und bietet theoretische Unterstützung und praktische Anleitung, um Materialinnovationen und Anwendungserweiterungen voranzutreiben.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Zielpublikum umfasst Wissenschaftler und Ingenieure, die sich mit Materialwissenschaften, Maschinenbau und Fertigungstechnologien befassen, insbesondere solche, die sich auf Hochleistungsmaterialdesign, Prozessoptimierung und Anwendungsentwicklung konzentrieren. Darüber hinaus richtet sich das Buch an Praktiker in verwandten Branchen, wie z. B. technische Fachkräfte in der Halbleiterfertigung, Luft- und Raumfahrt und Medizintechnik sowie an Universitätsstudenten und Doktoranden, die sich für fortschrittliche Materialien interessieren. Unabhängig davon, ob die Leser theoretische Einblicke oder praktische Lösungen suchen, ist dieses Buch bestrebt, maßgebliche und detaillierte Inhalte zu liefern, um Durchbrüche sowohl im akademischen als auch im industriellen Bereich zu ermöglichen.

1.2 Historische Entwicklung des schnittfesten Wolframdrahtes

Die Entwicklung des schnittfesten Wolframdrahts spiegelt die breitere Entwicklung der wolframbasierten Materialtechnologie wider und durchläuft mehrere Innovationsstufen von der ersten Entdeckung des Metalls bis hin zu seinen modernen Hochleistungsanwendungen. Diese Reise zeigt, wie es sich von einem Grundmaterial zu einem kritischen Bestandteil der modernen Industrie entwickelt hat.

1.2.1 Entdeckung und frühe Anwendungen von Wolframdraht

Die Entdeckung von Wolfram geht auf das späte 18. Jahrhundert zurück. Im Jahr 1781 schloss der schwedische Chemiker Carl Wilhelm Scheele durch die Analyse von Wolframsäure auf die Existenz von Wolfram. Im Jahr 1783 gelang es den spanischen Brüdern Juan José Elhuyar und Fausto Elhuyar, metallisches Wolfram aus Wolframerz zu isolieren. Aufgrund der damaligen Einschränkungen der metallurgischen Technologie entstanden industrielle Anwendungen von Wolfram jedoch erst im späten 19. Jahrhundert.

Die frühe Verwendung von Wolframdraht begann im frühen 20. Jahrhundert. Im Jahr 1904 entwickelten die ungarischen Wissenschaftler Justus von Liebig und Hans Kuzel ein Verfahren zur Herstellung von Wolframdraht mit Hilfe von Pulvermetallurgie und Drahtziehtechniken, bei dem feiner Wolframdraht hergestellt wurde, der zunächst als Glühfäden in Glühlampen eingesetzt wurde. Der hohe Schmelzpunkt und die elektrische Leitfähigkeit von Wolfram (spezifischer Widerstand ca. $5,6 \mu\Omega\text{cm}$) ermöglichten es, Kohlenstofffilamente schnell zu ersetzen und wurden zum Standardmaterial in der Beleuchtungsindustrie. Im Jahr 1909 verfeinerte William D. Coolidge von General Electric in den Vereinigten Staaten den Herstellungsprozess von Wolframdraht weiter, indem er duktile Wolfram-Ziehmethoden anwandte und seine Verwendung in Elektronenröhren und Heizelementen ausweitete. In dieser Zeit bestand Wolframdraht in erster Linie aus reinem Wolfram mit begrenzter Duktilität (Bruchdehnung typischerweise unter 5 %), legte jedoch den Grundstein für seine Entwicklung als Hochleistungswerkstoff.

1.2.2 Entwicklung der schnittfesten Wolframdrahttechnologie

Mit dem Fortschritt der Industrietechnologie wurden die Grenzen von reinem Wolframdraht deutlich, insbesondere bei Anwendungen, die eine höhere Festigkeit und Haltbarkeit erfordern. Zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beginn des 20. Jahrhunderts markierte die Einführung der Dotierungstechnologie einen bedeutenden Sprung in der Leistung von Wolframdraht. Im Jahr 1913 leistete General Electric Pionierarbeit bei der Dotierung von Wolframdraht mit Kalium (K) und kontrollierte seine mikroskopische Verteilung, um die Durchgangfestigkeit bei hohen Temperaturen zu verbessern. Ursprünglich entwickelt, um die Lebensdauer von Glühlampenfilitamenten zu verlängern, legte dieses Verfahren die technische Grundlage für schnittfesten Wolframdraht. Später verbesserte die Entwicklung von Wolfram-Rhenium-Legierungen (W-Re) die Zähigkeit und Hochtemperaturstabilität des Drahtes weiter und ebnete den Weg für breitere Anwendungen.

Das Konzept des schnittfesten Wolframdrahts als Spezialwerkstoff nahm Mitte des 20. Jahrhunderts Gestalt an. In den 1950er Jahren trieb der Aufstieg der Funkenerosionstechnologie (EDM) die Nachfrage nach hochfesten, verschleißfesten Elektrodenrähren an, was zu einer Differenzierung von schnittfestem Wolframdraht von herkömmlichen Filamentherstellungsverfahren führte. Die Herstellung umfasste aufwendige Zieh- und Wärmebehandlungsschritte, um eine hohe Zugfestigkeit und Oberflächengüte bei feinen Durchmessern zu gewährleisten. In den 1970er Jahren trieb die Kommerzialisierung der Diamantdrahtsägentechnologie die Entwicklung von schnittfestem Wolframdraht weiter voran, der als Substrat für Diamantpartikel in der Halbleiter- und Photovoltaikindustrie weit verbreitet wurde. Diese Phase spiegelt den Übergang von schnittfestem Wolframdraht von einem Allzweckmaterial zu einem spezialisierten Hochleistungsdraht wider.

1.2.3 Wichtige Meilensteine und technologische Durchbrüche

Die Entwicklung von schnittfestem Wolframdraht wurde von mehreren wichtigen Meilensteinen und technologischen Durchbrüchen geprägt, die seine moderne Form definieren. Im Jahr 1927 stellte sich das erfolgreiche Ziehen von ultrafeinem Wolframdraht (Durchmesser unter 0,01 mm) als Durchbruch in der hochpräzisen Verarbeitung ab, der durch Fortschritte in der Ziehwerkzeugpräzision (Toleranz $\pm 0,5 \mu\text{m}$) und optimierte Glühprozesse (temperaturgesteuert zwischen 1200 °C und 1500 °C) ermöglicht wurde. In den 1950er Jahren wurden durch die industrielle Herstellung von Wolfram-Rhenium-Legierungen die Hochtemperaturfestigkeit (über 3000 MPa) und die Ermüdungsbeständigkeit des Drahtes deutlich verbessert, wodurch neue Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt (z. B. Komponenten für Raketentriebwerke) und in der Elektronik (z. B. Röntgenröhren) eröffnet wurden.

Die weit verbreitete Einführung der Erodieretechnologie in den 1970er Jahren markierte einen Wendepunkt für schnittfeste Wolframdrahtanwendungen. Als Erodieretelektrodenraht wies er eine hervorragende Entladestabilität (Stromdichte bis zu 10^6 A/m^2) und Verschleißfestigkeit auf und revolutionierte damit den Formenbau und die Bearbeitung von Präzisionsteilen. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts brachten Fortschritte in der Nanotechnologie und Oberflächentechnik weitere Durchbrüche, wie z. B. die Herstellung von nanoskaligem Wolframdraht (Durchmesser von nur 20-50 nm) und die Anwendung verschleißfester Beschichtungen (z. B. Wolframnitrid-Beschichtungen). Diese Meilensteine erweiterten nicht nur den Funktionsumfang von schnittfestem Wolframdraht, sondern festigten auch seine zentrale Rolle im High-Tech-Bereich und verdeutlichen das enge Zusammenspiel von Materialwissenschaft und industriellen Anforderungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Kapitel 2: Materialwissenschaftliche Grundlagen von schnittfestem Wolframdraht

2.1 Grundlegende Eigenschaften von Wolframdraht

Die Leistungsfähigkeit von Wolframdraht beruht auf den einzigartigen Eigenschaften des Wolframelements, wobei sein hoher Schmelzpunkt, seine hohe Dichte und seine hervorragende mechanische Festigkeit die Grundlage für die Anwendung von schnittfestem Wolframdraht in extremen Umgebungen bilden. In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Eigenschaften von Wolframdraht aus physikalischer, chemischer und mechanischer Sicht untersucht.

2.1.1 Physikalische Eigenschaften von Wolframdraht

Wolfram (W, Ordnungszahl 74) ist ein Übergangsmetall mit einer kubischen Struktur (BCC) und einem außergewöhnlich hohen Schmelzpunkt von 3422 °C – dem höchsten unter allen reinen Metallen. Sein Siedepunkt liegt bei etwa 5555 °C, was eine bemerkenswerte thermische Stabilität zeigt. Mit einer Dichte von 19,25 g/cm³, vergleichbar mit Gold und Uran, ist Wolfram vorteilhaft für Anwendungen, die eine hohe Massendichte erfordern.

Die Wärmeleitfähigkeit von Wolframdraht beträgt bei Raumtemperatur 173 W/(m·K), während seine elektrische Leitfähigkeit mit einem spezifischen Widerstand von 5,6 μΩ·cm bei 20 °C relativ niedrig ist und bei 2000 °C auf etwa 45 μΩ·cm ansteigt. Sein Wärmeausdehnungskoeffizient ist gering (4,5×10⁻⁶ K⁻¹ bei Raumtemperatur) und trägt zur Dimensionsstabilität bei hohen Temperaturen bei. Diese physikalischen Eigenschaften ermöglichen es, dass Wolframdraht in Hochtemperatur- und Hochpräzisionsumgebungen hervorragend eingesetzt werden kann, z. B. bei schnittfestem Draht oder Hochtemperatur-Heizelementen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabelle 2.1.1 Physikalische Eigenschaften von Wolframdraht

Eigentum	Wert	Bemerkungen
Schmelzpunkt	3422°C	Höchster unter den reinen Metallen
Siedepunkt	5555°C	Ausgezeichnete thermische Stabilität
Dichte	19,25 g/cm ³	Vergleichbar mit Gold und Uran
Wärmeleitfähigkeit	173 W/(m·K)	Bei Raumtemperatur
Widerstandsgröße	5,6 μΩ·cm (20°C)	Steigt auf 45 μΩ·cm bei 2000 °C
Wärmeausdehnung	4,5×10 ⁻⁶ K ⁻¹	Starke Dimensionsstabilität

2.1.2 Chemische Eigenschaften von Wolframdraht

Wolfram weist eine hohe chemische Stabilität bei Raumtemperatur auf und weist eine gute Beständigkeit gegen Korrosion durch die meisten Säuren (z. B. Salzsäure, Schwefelsäure) und Laugen auf. Bei erhöhten Temperaturen (>400 °C) reagiert Wolfram jedoch mit Sauerstoff zu Wolframtrioxid (WO₃), das bei etwa 800 °C zu sublimieren beginnt, was zu Materialverlust führt. Daher wird Wolframdraht in Hochtemperaturanwendungen typischerweise im Vakuum oder in Inertgasumgebungen (z. B. Argon oder Stickstoff) verwendet, um eine Oxidation zu verhindern.

Wolfram hat eine schwächere Beständigkeit gegen Halogene (z. B. Fluor, Chlor) und bildet bei hohen Temperaturen flüchtige Halogenide (z. B. WF₆). Darüber hinaus reagiert es bei erhöhten Temperaturen mit Kohlenstoff zu Wolframkarbid (WC), eine Eigenschaft, die bei der Oberflächenmodifizierung von schnittfestem Wolframdraht von großem Wert sein kann. Diese chemischen Eigenschaften bestimmen die Anpassungsfähigkeit von Wolframdraht an die Umwelt und seine Grenzen unter bestimmten Bedingungen.

Tabelle 2.1.2 Chemische Eigenschaften von Wolframdraht

Reaktionsbedingung	Eigentum	Produkt oder Wirkung
Raumtemperatur	Beständig gegen Säuren und Laugen	Hohe chemische Stabilität
Hohe Temperatur (>400°C)	Reagiert mit Sauerstoff	Bildet WO ₃ , sublimiert bei 800°C
Hochtemperatur-Halogene	Bildet flüchtige Halogenide	z.B. WF ₆ , schwächerer Widerstand
Hochtemperatur-Kohlenstoff	Bildet Wolframkarbid (WC)	Anwendbar in der Oberflächenmodifikation

2.1.3 Mechanische Eigenschaften von Wolframdraht

Die mechanischen Eigenschaften von Wolframdraht sind sein zentraler Vorteil als schnittfester Werkstoff. Reines Wolfram hat eine Zugfestigkeit von ca. 550-1000 MPa bei Raumtemperatur, die nach dem Drahtziehen je nach Durchmesser und Verarbeitungstechniken auf 3000-4000 MPa ansteigen kann. Seine Härte ist hoch (Vickers-Härte von 350-450 HV), aber seine Duktilität ist gering, mit einer Bruchdehnung von typischerweise unter 5 %, was auf eine gewisse Sprödigkeit hinweist.

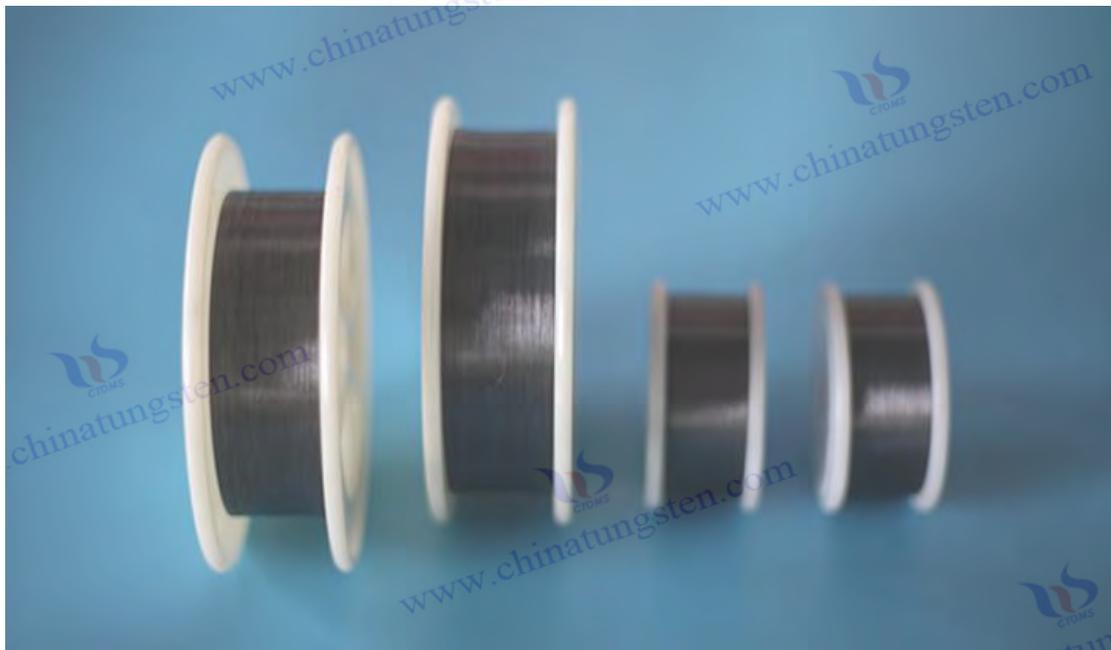
Bei hohen Temperaturen (>1000 °C) nimmt die Festigkeit von Wolfram ab, aber durch Dotierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oder Legierung (z. B. Kaliumdotierung oder Wolfram-Rhenium-Legierungen) wird die Hochtemperaturfestigkeit und Ermüdungsbeständigkeit deutlich verbessert. Wolfram-Rhenium-Legierungen können beispielsweise bei 2000 °C eine Zugfestigkeit von über 500 MPa aufrechterhalten. Diese mechanischen Eigenschaften ermöglichen es Wolframdraht, hohen Belastungen und Verschleiß standzuhalten, was ihn zur idealen Wahl für schnittfeste Anwendungen macht.

Tabelle 2.1.3 Mechanische Eigenschaften von Wolframdraht

Eigentum	Wert	Bedingung oder Bemerkungen
Zugfestigkeit	550-1000 MPa	Reines Wolfram, Raumtemperatur
	3000-4000 MPa	Nach dem Drahtziehen
	500 MPa (2000 °C)	Wolfram-Rhenium-Legierung
Härte	350-450 HV	Vickers-Härte
Bruchdehnung	<5%	Geringe Duktilität



2.2 Zusammensetzung und Aufbau von schnittfestem Wolframdraht

Die Leistungsfähigkeit von schnittfestem Wolframdraht hängt nicht nur vom Wolfram selbst ab, sondern auch von seiner Zusammensetzung und Mikrostruktur. In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zwischen reinem und legiertem Wolframdraht analysiert, ihre Mikrostrukturen untersucht und die Auswirkungen von Dotierung und Legierung erläutert.

2.2.1 Unterschiede zwischen reinem Wolframdraht und legiertem Wolframdraht

Reiner Wolframdraht, der zu über 99,95 % aus Wolfram besteht, bietet den höchsten Schmelzpunkt und die höchste Dichte, weist jedoch eine schlechte Standfestigkeit und Duktilität bei hohen Temperaturen auf, wodurch er anfällig für Rekristallisation bei erhöhten Temperaturen ist, was zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kornwachstum und Festigkeitsminderung führt. Im Gegensatz dazu verbessert legierter Wolframdraht die Leistung durch die Zugabe anderer Elemente. Wolfram-Rhenium-Legierungen (W-Re, mit 3 %-26 % Rhenium) verbessern beispielsweise die Zähigkeit und Hochtemperaturfestigkeit, die üblicherweise in Komponenten für die Luft- und Raumfahrt verwendet werden, während Wolfram-Molybdän-Legierungen (W-Mo) die Korrosionsbeständigkeit verbessern und für bestimmte chemische Umgebungen geeignet sind.

Schnittfester Wolframdraht verwendet in der Regel Dotierung oder milde Legierung, um Festigkeit und Verarbeitbarkeit in Einklang zu bringen. Reiner Wolframdraht ist beim Präzisionsschneiden nur begrenzt anwendbar, während legierter Wolframdraht mit maßgeschneiderten Zusammensetzungen die Anforderungen hoher Lasten und extremer Bedingungen besser erfüllt.

Tabelle 2.2.1 Vergleich von reinem Wolframdraht und legiertem Wolframdraht

Art	Zusammensetzung	Vorteile	Begrenzungen
Reines Wolfram	>99,95 % W	Hoher Schmelzpunkt, Dichte	Schlechte Duktilität, Rekristallisation
Tungsten-Rhenium	W + 3%-26% Re	Hohe Zähigkeit, Festigkeit	Höhere Kosten
Wolfram-Molybdän	W + Mo	Verbesserte Korrosionsbeständigkeit	Etwas geringere Festigkeit

2.2.2 Mikrostruktur und Kristallstruktur

Die Mikrostruktur von Wolframdraht wird maßgeblich durch seinen Herstellungsprozess beeinflusst. Reines Wolfram hat eine BCC-Kristallstruktur mit einer Gitterkonstante von 3,165 Å. Beim Drahtziehen entstehen längliche, faserige Körner, typischerweise 0,1-10 µm groß, die entlang der Ziehrichtung ausgerichtet sind. Diese faserige Struktur erhöht die Zugfestigkeit, erhöht aber die Anisotropie.

Dotierter Wolframdraht (z. B. kaliumdotiert) bildet während der Hochtemperaturverarbeitung stabile Kaliumblasen (10-100 nm Durchmesser) an den Korngrenzen, die das Kornwachstum und die Rekristallisation hemmen und so die Hochtemperaturstabilität verbessern. Die Mikrostruktur von legiertem Wolframdraht variiert mit den zugesetzten Elementen; Bei Wolfram-Rhenium-Legierungen beispielsweise führt die Feststoffverfestigung von Rhenium zu Gitterverzerrungen, die die Zähigkeit erhöhen. Diese strukturellen Eigenschaften wirken sich direkt auf die Leistung und Lebensdauer von schnittfestem Wolframdraht aus.

Tabelle 2.2.2 Mikrostrukturelle Merkmale von Wolframdraht

Art	Kristallstruktur	Merkmale der Maserung	Spezielle Struktur
Reines Wolfram	BCC, 3.165 Å	Faserig, 0,1-10 µm	Nichts
Dotiertes Wolfram (K)	BCC	Faserig	Kaliumblasen, 10-100 nm
Tungsten-Rhenium	BCC	Raffiniertes Getreide	Gitterverzerrung (feste Lösung)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.3 Auswirkungen von Dotierung und Legierung auf die Leistungsfähigkeit

Dotieren und Legieren sind wichtige Methoden, um die Leistung von schnittfestem Wolframdraht zu verbessern. Die Kaliumdotierung (0,01 %-0,05 %) bildet Kaliumblasen, die die Migration der Korngrenzen hemmen und die Durchgangfestigkeit über 2000 °C aufrechterhalten, ideal für Hochtemperatur-Schneid- oder Heizelemente. Spuren von Silikon und Aluminium verbessern die Oberflächenhärte und Verschleißfestigkeit und eignen sich für Anwendungen mit hohem Verschleiß.

Beim Legieren erhöht Rhenium (3 %-26 %) die Zähigkeit und Zugfestigkeit durch Feststoffverfestigung und Kornfeinung, wobei Wolfram-Rhenium-Legierungen Festigkeiten von bis zu 700 MPa bei 2500 °C erreichen. Die Dotierung von Thorium (Th) oder Lanthan (La) (1%-2%) verbessert die Elektronenemissionseigenschaften, was für Elektrodendrähte von Vorteil ist. Diese Modifikationen ermöglichen es, schnittfesten Wolframdraht zu erfüllen, um spezifische Anwendungsanforderungen zu erfüllen.

Tabelle 2.2.3 Auswirkungen des Dotierens und Legierens auf die Leistung

Element	Inhalt	Primäre Wirkung	Anwendungsbeispiel
Kalium (K)	0.01%-0.05%	Durchgangfestigkeit, Rekristallisationsunterdrückung	Hochtemperatur-Schneiden, Heizelemente
Silizium (Si), Aluminium (Al)	Spur	Erhöhte Härte, Verschleißfestigkeit	Verschleißfester Schneiddraht
Rhenium (Re)	3%-26%	Verbesserte Zähigkeit, Festigkeit	Komponenten für die Luft- und Raumfahrt
Thorium (Th) und Lanthan (La)	1%-2%	Verbesserte Elektronenemission	Erodieredraht

2.3 Vergleich von schnittfestem Wolframdraht mit anderen Materialien

Die einzigartigen Eigenschaften von schnittfestem Wolframdraht unterscheiden ihn unter verschiedenen Materialien. In diesem Abschnitt wird Wolframdraht mit gängigen Materialien wie Stahldraht und Kohlefaser verglichen und seine Vorteile in spezifischen Anwendungen analysiert.

2.3.1 Leistungsvergleich von Wolframdraht mit Stahldraht, Kohlefaser usw.

Im Vergleich zu Stahldraht bietet Wolframdraht eine überlegene Zugfestigkeit (4000 MPa vs. 2000 MPa für hochfesten Stahl) und einen höheren Schmelzpunkt (3422 °C vs. ~1500 °C für Stahl), obwohl seine Duktilität geringer ist (<5 % vs. 20 %-30 % für Stahl). Stahldraht lässt sich bei Raumtemperatur leichter verarbeiten, während Wolframdraht sich hervorragend in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung eignet.

Kohlefaser weist eine außergewöhnliche spezifische Festigkeit auf (Zugfestigkeit ~3500 MPa, Dichte 1,8 g/cm³), wodurch sie viel leichter als Wolframdraht ist, aber ihre Temperaturbeständigkeit ist schlecht (zersetzt sich bei ~500 °C), was sie für das Schneiden bei hohen Temperaturen ungeeignet macht. Die Leitfähigkeit von Wolframdraht übertrifft auch die von Kohlefasern, was ihm einen Vorteil beim Erodieren verschafft.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Im Vergleich zu Kupferdraht (Zugfestigkeit 200-400 MPa, Schmelzpunkt 1085°C) übertrifft Wolframdraht die Festigkeit und Temperaturbeständigkeit bei weitem, obwohl seine Leitfähigkeit etwas geringer ist (Kupferwiderstand 1,7 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$). Diese Unterschiede geben die jeweiligen Anwendungsszenarien vor.

Tabelle 2.3.1 Leistungsvergleich von Wolframdraht mit anderen Materialien

Material	Zugfestigkeit (MPa)	Schmelzpunkt (°C)	Dichte (g/cm³)	Spezifischer Widerstand ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Duktilität
Tungsten Wire	4000	3422	19.25	5.6	<5%
Hochfester Stahl	2000	~1500 kg	7.8	~15	20%-30%
Kohlefaser	3500	~500 (zersetzt sich)	1.8	Nicht leitend	Hoch
Kupferdraht	200-400	1085	8.96	1.7	>30%

2.3.2 Vorteile von schnittfestem Wolframdraht in spezifischen Anwendungen

Bei der Funkenerosion (EDM) ermöglicht die hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit von schnittfestem Wolframdraht, dass er hohen Stromdichten und Entladeverschleiß standhält und im Vergleich zu Kupfer- oder Stahldraht eine überlegene Schnittpräzision bietet. Bei Diamantdrahtsägen übertrifft die Haltbarkeit von Wolframdraht als Substrat Stahldraht und gewährleistet die Stabilität beim Schneiden von Halbleiterwafern und Steinen.

In Umgebungen mit hohen Temperaturen (z. B. Düsen in der Luft- und Raumfahrt, >2000 °C) übertrifft die thermische Stabilität von Wolframdraht die von Kohlefaser und Stahl, was ihn zum bevorzugten Material macht. Seine hohe Dichte bietet auch einen unersetzlichen Massenvorteil bei Verteidigungsanwendungen (z. B. panzerbrechende Projektilkerne). Diese Eigenschaften positionieren schnittfesten Wolframdraht einzigartig in Hochpräzisions-, Hochtemperatur- und Hochlastanwendungen.

Tabelle 2.3.2 Anwendungsvorteile von schnittfestem Wolframdraht

Anwendung	Wichtige Anforderung	Wolframdraht Vorteil	Einschränkungen von Vergleichsmaterialien
Erodieren von Draht	Hohe Festigkeit, Verschleißfestigkeit	Hält einer Stromdichte von 10 ⁶ A/m ² stand	Kupfer fehlt es an Festigkeit, Stahl verschleißt schnell
Diamant-Drahtsäge	Haltbarkeit	Hochfester Untergrund	Stahl hat eine kürzere Lebensdauer
Hochtemperatur-Komponenten (>2000°C)	Thermische Stabilität	Schmelzpunkt 3422°C	Kohlefaser zersetzt sich, Stahl schmilzt
Panzerbrechende Kerne	Hohe Dichte	19,25 g/cm ³	Stahl hat eine geringere Dichte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 3: Herstellungsprozess des schnittfesten Wolframdrahts der CTIA GROUP

3.1 Auswahl der Rohstoffe

Die Herstellung von schnittfestem Wolframdraht durch die CTIA GROUP beginnt mit der sorgfältigen Auswahl hochwertiger Rohstoffe, wobei die Leistung auf der Reinheit des Wolframs und der optimierten Zusammensetzung der Dotierungselemente beruht. Die Gewinnung und Reinigung von Wolframerz sowie die Auswahl und Rolle der Dotierungselemente bilden den Kern dieses Prozesses.

3.1.1 Gewinnung und Reinigung von Wolframerz

Als Primärrohstoffe verwendet die CTIA GROUP hochwertigen Wolframit (Fe,MnWO₄) und Scheelit (CaWO₄). Die Gewinnung beginnt mit dem Bergbau, der im Tagebau oder unter Tage durchgeführt wird, gefolgt von Aufbereitungsprozessen (z. B. Schwerkrafttrennung, magnetische Trennung und Flotation), um Wolframminerale aus dem Abraumgestein zu trennen. Geräte wie Vorrichtungen und Separatoren für schwere Medien sorgen für eine effiziente Trennung. Bei der chemischen Extraktion wird die Alkalifusionsmethode verwendet, bei der das Erz mit Natriumcarbonat (Na₂CO₃) oder Natriumhydroxid (NaOH) bei 800-1000 °C reagiert, um Natriumwolframat (Na₂WO₄) zu erzeugen, oder die Säurelaugungsmethode mit Salzsäure (HCl) oder Schwefelsäure (H₂SO₄) zur Extraktion von Wolfram.

Der Reinigungsprozess umfasst eine mehrstufige Fällung und Filtration, um Verunreinigungen (z. B. Molybdän, Phosphor, Arsen) zu entfernen, wobei Ammoniumparawolframat (APT, (NH₄)₁₀(H₂W₁₂O₄₂)·4H₂O) entsteht. APT wird bei 600-800 °C zu Wolframtrioxid (WO₃) kalziniert, das dann in einem Wasserstoffofen (900-1100 °C, H₂-Durchfluss 20-50 m³/h) zu hochreinem Wolframpulver (Reinheit >99,97 %, Partikelgröße 1-3 µm) reduziert wird. Dieses Verfahren spiegelt die hohen Anforderungen der CTIA GROUP an hochreine Rohstoffe wider und bietet eine erstklassige Grundlage für schnittfesten Wolframdraht.

Tabelle 3.1.1 Extraktions- und Reinigungsprozess von Wolframerz

Schritt	Methode/Bedingung	Produkt	Wichtige Parameter
Aufbereitung	Schwerkraft, magnetisch, Flotation	Wolfram-Konzentrat	Vorrichtungen, schwere Medien
Chemische Extraktion	Alkali-Fusion, 800-1000 °C	Na ₂ WO ₄	Na ₂ CO ₃ oder NaOH
	Säureauslaugung	Wolframsäure	HCl oder H ₂ SO ₄
Reinigung	Fällung, Filtration	PASSEND	Entfernt Mo, P, As
Verkalkung	600-800°C	WO ₃	-
Reduzierung von Wasserstoff	900-1100°C	Tungsten powder (>99.97%)	H ₂ Durchfluss 20-50 m ³ /h

3.1.2 Auswahl und Rolle der Dotierungselemente

Die CTIA GROUP wählt Dotierungselemente auf der Grundlage der hohen Leistungsanforderungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

an schnittfesten Wolframdraht aus, um seine Eigenschaften zu optimieren. Kalium (K, 0,01 %-0,03 %) bildet Kaliumblasen (10-50 nm Durchmesser), um die Rekristallisation bei hohen Temperaturen zu hemmen und die Durchhangfestigkeit für Hochtemperatur-Schneidanwendungen zu verbessern. Silizium (Si) und Aluminium (Al, <0,005 %) verbessern die Oberflächenhärte und Verschleißfestigkeit, ideal für Präzisionsschnitte. Rhenium (Re, 5 %-20 %) verbessert die Zähigkeit und Hochtemperaturfestigkeit durch Feststoffverfestigung und erfüllt so die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt. Thorium (Th, 1 %-1,5 %) oder Lanthan (La, 1 %-1,5 %) optimieren die Elektronenemissionseigenschaften von Erodierelktrodendrähten.

Dotierungselemente werden während der Wolframpulvervorbereitung mit hochpräzisen Mischanlagen (z. B. Planetenkugelmühlen) eingearbeitet, um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten. Dieser Prozess zeigt, wie präzise die CTIA GROUP die Materialeigenschaften kontrolliert.

Tabelle 3.1.2 Dotierungselemente und ihre Rolle

Element	Inhalt	Rolle	Anwendungsszenario
Kalium (K)	0,01%-0,03%	Hemmt Rekristallisation, Durchhangfestigkeit	Hochtemperatur-Schneiddraht
Silizium (Si)	0,005 % <	Verbessert die Härte und Verschleißfestigkeit	Verschleißfester Schneiddraht
Aluminium (Al)	0,005 % <	Verbessert die Oberflächeneigenschaften	Hochpräzises Schneiden
Rhenium (Re)	5%-20%	Erhöht die Zähigkeit, Festigkeit	Komponenten für die Luft- und Raumfahrt
Thorium (Th)	1%-1,5%	Verbessert die Elektronenemission	Erodierelktrodendraht
Lanthan (La)	1%-1,5%	Verbessert die Emission, Haltbarkeit	Hochleistungs-Elektroden

3.2 Produktionsprozess des Wolframdrahts der CTIA GROUP

Der Wolframdraht-Produktionsprozess der CTIA GROUP ist auf hohe Präzision und Leistung ausgelegt und erfüllt die strengen Anforderungen an schnittfesten Wolframdraht. Pulvermetallurgie, Drahtziehen, Wärmebehandlung, Oberflächenbehandlung und Prozessoptimierung sind Schlüsselkomponenten dieses Prozesses.

3.2.1 Verfahren der Pulvermetallurgie

Die CTIA GROUP nutzt die Pulvermetallurgie, um Wolframpulver (Partikelgröße 1-3 µm) in Wolframstäbe umzuwandeln. Das Pulver wird mit einem Hochgeschwindigkeitsmischer mit einem Bindemittel (z. B. Polyvinylalkohol) vermischt und mit einer hydraulischen Präzisionspresse bei 500-600 MPa zu Stäben (Durchmesser 8-15 mm, Länge 150-300 mm) gepresst. Das Vorsintern erfolgt in einer Wasserstoffatmosphäre (1000-1200°C, 1-2 Stunden), um das Bindemittel zu entfernen und eine erste Verdichtung zu erreichen. Das Vollsintern wird in einem Hochtemperaturofen (2300-2500 °C, H₂-Durchfluss 40-60 m³/h, 5-6 Stunden) durchgeführt, wobei eine Stabdichte von 95 % bis 97 % des theoretischen Wertes erreicht wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dotierelemente werden während der Mischphase durch Sprühtrocknung hinzugefügt, um eine mikroskopische Gleichmäßigkeit zu gewährleisten und ein hochfestes, duktils Stabfundament für das anschließende Ziehen zu schaffen.

Tabelle 3.2.1 Prozessparameter der Pulvermetallurgie

Schritt	Zustand	Zweck	Wichtige Parameter
Mischen	Tungsten powder + binder	Gleichförmigkeit	Partikelgröße 1-3 μm
Dringend	500-600 MPa	Stabbildung	Durchmesser 8-15 mm
Vor-Sintern	1000-1200°C, H ₂	Entfernen von Bindemitteln	1-2 Stunden
Vollständiges Sintern	2300-2500°C, H ₂	Densification	Dichte 95%-97%, 5-6 Stunden



3.2.2 Drahtziehverfahren und -ausrüstung

Das Drahtziehen ist ein zentraler Schritt bei der Herstellung von schnittfestem Wolframdraht der CTIA GROUP. Die hohe Härte (Vickers-Härte 400-450 HV) und die Sprödigkeit von Wolfram erfordern mehrere Ziehdurchgänge, um den Durchmesser (von Millimetern auf 15 μm) zu reduzieren, wobei jeder Durchgang den Durchmesser um 10 % bis 15 % reduziert. Das Zwischenglühen in Wasserstoff oder Argon (1300-1500 °C, 10-20 Sekunden) stellt die Duktilität wieder her und baut nach jedem Durchgang Spannungen ab.

Die CTIA GROUP verwendet Einmatrizenziehmaschinen (Grobziehen, 1-5 mm) und Mehrmatrizen-Endlosziehmaschinen (Feinziehen, <0,3 mm), die mit hochpräzisen Diamantmatrizen (Toleranz $\pm 0,3 \mu\text{m}$) oder Hartmetallmatrizen (Grob Tisch) ausgestattet sind. Die Ziehgeschwindigkeit beträgt 5-15 m/min, mit Graphitemulsionsschmiermittel zur Verringerung der Reibung. Überwacht werden die Ziehkraft (<40 N), der Werkzeugverschleiß und die Drahttemperatur (<250 °C). Die Optimierung umfasst das Glühen alle 2-3 Durchgänge und das Lasermessen auf Durchmesserkonsistenz (Toleranz $\pm 0,1 \mu\text{m}$). In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Parameter und Geräte aufgeführt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabelle 3.2.2a Parameter des Drahtziehprozesses

Parameter	Bereich	Zweck	Ausstattung/Zustand
Reduzierung des Durchmessers	Millimeter bis 15 µm	Allmähliche Formgebung	10%-15% pro Durchgang
Glühtemperatur	1300-1500°C	Wiederherstellung der Duktilität	H ₂ oder Argon, 10-20 Sek.
Zeichnungsgeschwindigkeit	5-15 m/min	Qualitätskontrolle	Ein-/Mehrwerkzeugmaschinen
Die Precision	Toleranz ±0,3 µm	Oberflächenqualität	Diamant- oder Hartmetallmatrizen
Zugkraft	<40 N	Verhindern Sie Bruch	Inline-Kraftsensor
Schmiermittel	Graphit-Emulsion	Reduzieren Sie die Reibung	-

Tabelle 3.2.2b Liste der Drahtziehgeräte

Name der Ausrüstung	Funktionsbeschreibung	Anwendbare Bühne
Grobziehmaschine mit einer Matrize	Bearbeitung von groben Stäben (1-5 mm), Erstformgebung	Grobes Ziehen
Feinziehmaschine mit mehreren Matrizen	Kontinuierliches Ziehen in mehreren Durchgängen (<0,3 mm)	Feinzeichnung
Ultrapräziser Diamantstempel	Hochpräzises Zeichnen (Toleranz ±0,3 µm)	Feine Drahtformung
Hochverschleiß-Hartmetallmatrize	Hohe Haltbarkeit beim Grobziehen (>1 mm)	Grob-/Mittelzeichnung
Echtzeit-Zugkraftüberwachung	Überwacht die Kraft (<40 N), um einen Bruch zu verhindern	Überall
Hochpräzises Lasermessgerät	Misst den Durchmesser (Toleranz ±0,1 µm)	Feinzeichnung
Graphit-Emulsions-Sprühsystem	Gleichmäßiger Schmierstoffauftrag	Überall

3.2.3 Wärmebehandlungs- und Glühprozess

Die Wärmebehandlung optimiert die Leistung von schnittfestem Wolframdraht. Das Glühen erfolgt bei 1300-1800 °C in einer Wasserstoffatmosphäre für 5-15 Sekunden (Feindraht) oder bis zu 1 Minute (Grobdraht), um Spannungen abzubauen und die Kornstruktur anzupassen. Die Alterungsbehandlung (1600-2000 °C, 15-30 Minuten) stabilisiert die Mikrostruktur weiter und erhöht die Festigkeit bei hohen Temperaturen. Bei dotiertem Wolframdraht wird bei der Wärmebehandlung die Größe der Kaliumblase (10-50 nm) mit hochpräzisen Rohröfen (H₂-Sauerstoffgehalt <5 ppm) kontrolliert, um die Oxidationsbeständigkeit zu gewährleisten. Dieser Prozess wirkt sich direkt auf die Haltbarkeit und Schneidleistung des Drahtes aus.

Tabelle 3.2.3 Parameter des Wärmebehandlungsprozesses

Art	Temperatur	Zweck	Zustand
Glühen	1300-1800°C	Stress abbauen, Getreide anpassen	H ₂ Atmosphäre, 5 sec-1 min
Behandlung des Alterns	1600-2000°C	Stabilisieren Sie die Struktur, erhöhen Sie die Festigkeit	H ₂ Atmosphäre, 15-30 min

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.4 Oberflächenbehandlung und Nachbearbeitung

Die CTIA GROUP erhöht die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit durch Oberflächenbehandlungen. Durch elektrolytisches Polieren (NaOH-Lösung, Stromdichte 60-100 A/m²) werden Mikrodefekte entfernt, wodurch eine Oberflächengüte von Ra <0,05 µm erreicht wird. Für eine hohe Verschleißfestigkeit wird bei der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) eine Wolframkarbid (WC)-Beschichtung (2-4 µm dick) aufgebracht.

Die Nachbearbeitung umfasst Präzisionsschnitte (Längtoleranz ±0,3 mm) und automatisiertes Aufwickeln (Spannung 15-25 N), um konsistente Spezifikationen zu gewährleisten. Diese Schritte verbessern die Praktikabilität des Drahtes.

Tabelle 3.2.4 Parameter der Oberflächenbehandlung und Nachbearbeitung

Prozess	Zustand	Zweck	Wichtige Parameter
Elektrolytisches Polieren	NaOH, 60-100A/m ²	Verbessern Sie die Oberflächengüte	Ra <0,05 µm
Beschichtung (CVD)	WC, 2-4 µm	Verbessern Sie die Härte und Verschleißfestigkeit	-
Schneiden	Toleranz ±0,3 mm	Konsistenz der Spezifikationen	Präzisions-Schneidemaschine
Wicklung	Spannung 15-25 N	Einfacher Transport/Gebrauch	Wickelmaschine

3.2.5 Prozessoptimierung für schnittfesten Wolframdraht

Die CTIA GROUP optimiert Prozesse für Schnittfestigkeit. Die Kaliumdotierung wird präzise bei 0,02 % ±0,002 % kontrolliert, und die Ziehdurchgänge werden auf 25-35 erhöht, um eine Durchmesser-toleranz von ±0,1 µm zu erreichen. Bei der Wärmebehandlung wird eine Gradientenheizung (1300-1800 °C) verwendet, um die Kornstabilität zu verbessern.

Darüber hinaus erhöht das Funkenplasmasintern (SPS, 2300 °C, 60 MPa) die Stabdichte (>98 %) und reduziert so interne Defekte. Diese Optimierungen verbessern die Festigkeit und Zuverlässigkeit von schnittfestem Wolframdraht erheblich.

Tabelle 3.2.5 Prozessoptimierung für schnittfesten Wolframdraht

Optimierungsmaßnahme	Zustand	Zweck	Effekt
Dotierung	K 0,02 %±0,002 %	Unwuchtfestigkeit, Duktilität	Verbesserte Standfestigkeit
Erhöhte Zeichnungsdurchgänge	25-35 Pässe	Gleichmäßigkeit des Durchmessers	Toleranz ±0,1 µm
Gradienten-Wärmebehandlung	1300-1800°C	Verbessern Sie die Kornstabilität	Erhöhte Hochtemperaturfestigkeit
Spark-Plasma-Sintern	2300 °C, 60 MPa	Reduzieren Sie Fehler	Dichte >98%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Qualitätskontrolle und Prüfung von schnittfestem Wolframdraht

Die Qualitätskontrolle der CTIA GROUP erstreckt sich über den gesamten Produktionsprozess und gewährleistet hohe Standards für schnittfesten Wolframdraht. Die Überwachung während der Produktion und die Prüfmethode des Endprodukts garantieren gemeinsam die Qualität.

3.3.1 Qualitätsüberwachung während der Produktion

Die Partikelgröße (1-3 μm) und die Reinheit (>99,97 %) des Wolframpulvers werden mittels Laser-Partikelgrößenanalyse und ICP-Spektroskopie verifiziert. Das Sintern steuert die Temperatur ($\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$) und den H_2 -Durchfluss (40-60 m^3/h). Das Ziehen überwacht die Kraft (<40 N) und die Oberflächenqualität (keine Risse) mit Mikroskopen und Kraftsensoren und sorgt so für die Stabilität des Zwischenprodukts.

Tabelle 3.3.1 Qualitätsüberwachung während der Produktion

Bühne	Parameter "Monitoring"	Ziel	Prüfverfahren
Wolfram-Pulver	Größe 1-3 μm , >99,97 %	Gleichmäßigkeit, Reinheit	Laserdimensionierung, ICP-Spektroskopie
Sintern	2300-2500 $^\circ\text{C}$, 40-60 m^3/h	Fehlerfrei, verdichtet	Thermometer, Durchflussmesser
Zeichnung	Kraft <40 N	Rissfreie Oberfläche	Kraftsensor, Mikroskop

3.3.2 Prüfnormen und -verfahren für fertigen Wolframdraht

Die Prüfung des fertigen Produkts umfasst die chemische Zusammensetzung (ICP-Spektroskopie, Reinheit >99,97 %), die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit 3500-4500 MPa, Härte 400-450 HV), die Maßgenauigkeit (Toleranz $\pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$, Lasermessgerät) und die Oberflächenqualität (keine Risse, REM-Prüfung). Die Schnittfestigkeit wird durch Verschleißtests validiert (Verschleißrate <0,05 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). Diese Standards stellen sicher, dass der Draht die Anforderungen von High-End-Anwendungen erfüllt.

Tabelle 3.3.2 Prüfnormen und -verfahren für Fertigerzeugnisse

Prüfgegenstand	Norm	Methode	Ziel
Chemische Zusammensetzung	Reinheit >99,97%	ICP-Spektroskopie	Bestätigen Sie den Verunreinigungsgrad
Zugfestigkeit	3500-4500 MPa	Zugversuch	Einhaltung der Festigkeit
Härte	400-450 HV	Vickers-Härteprüfung	Verschleißfestigkeit
Maßgenauigkeit	Toleranz $\pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$	Laser-Messgerät	Konsistenz
Oberflächenqualität	Keine Risse	SEM	Zuverlässigkeit der Nutzung
Schnittfestigkeit	Verschleißrate <0,05 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$	Verschleißtest	Haltbarkeit des Schnitts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm ³)	19.3
Tensile Strength (N/mm ²)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatungsten".

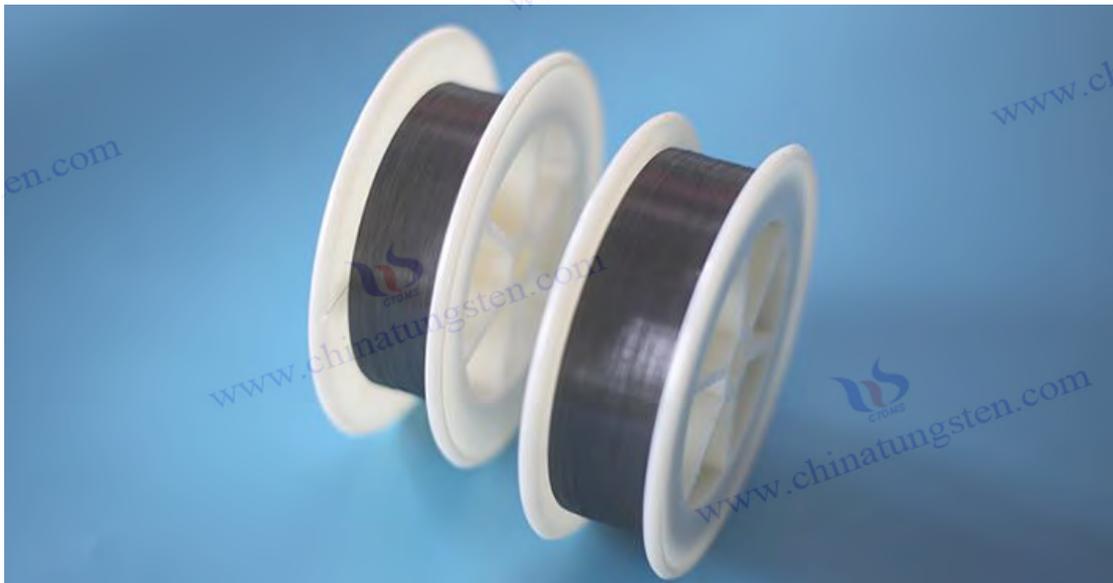


COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 4: Leistung und Prüfung von schnittfestem Wolframdraht

4.1 Mechanische Leistungsprüfung von schnittfestem Wolframdraht

Die mechanischen Eigenschaften von schnittfestem Wolframdraht bieten außergewöhnlichen Halt in Umgebungen mit hoher Beanspruchung. Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit, Härte sowie Ermüdungsleistung und Haltbarkeit sind die wichtigsten Metriken für die Bewertung des mechanischen Verhaltens.



4.1.1 Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit

Die Zugfestigkeit spiegelt die Fähigkeit von Wolframdraht wider, Zugbelastungen zu widerstehen, die typischerweise durch präzises Ziehen und Wärmebehandlung optimiert werden, um 3000-4500 MPa zu erreichen, was gewöhnlichen Stahldraht (ca. 2000 MPa) deutlich übertrifft. Die Prüfung erfolgt mit einer universellen Prüfmaschine (Belastungsrate 0,5 mm/min, konform mit ASTM E8) mit Probendurchmessern von 20 µm bis 300 µm. Die Bruchdehnung liegt zwischen 2 % und 5 %, was auf eine ausgewogene Zähigkeit hinweist.

Die Bruchzähigkeit (K_{IC}) wird mit dem SENB-Test (Single-Edge Notched Beam (SENB)) gemessen, wobei die typischen Werte zwischen 5 und 10 $MPa \cdot m^{(1/2)}$ liegen. Dotierungselemente wie Kalium oder Rhenium regulieren das Gefüge (z. B. Bildung von Kaliumblasen oder Feststoffverfestigung), hemmen effektiv die Ausbreitung von Rissen an der Korngrenze und sorgen für Zuverlässigkeit in Schneidszenarien mit hoher Beanspruchung.

Tabelle 4.1.1 Prüfung der Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit

Parameter	Wert	Prüfmethode	Leistungsvorteil
Zugfestigkeit	3000-4500 MPa	ASTM E8, Zugversuch	Hervorragende Belastbarkeit
Bruchdehnung	2%-5%	Universal-Prüfmaschine	Ausgewogene Duktilität
Bruchzähigkeit (K_{IC})	5-10 $MPa \cdot m^{(1/2)}$	SENB-Prüfung	Überlegene Rissbeständigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1.2 Härteprüfung

Die Härte ist eine grundlegende Eigenschaft, die es dem schnittfesten Wolframdraht ermöglicht, Verschleiß und Verformung zu widerstehen. Nach dem Ziehen von Verstärkungen und Oberflächenbehandlungen (z. B. Beschichtungen) liegt die Vickers-Härte (HV) typischerweise zwischen 350 und 450 HV, gemessen mit einem Vickers-Härteprüfer (Belastung 500 g, Eindringzeit 10 Sekunden, entspricht der Norm ISO 6507). Die Härte nimmt mit der Kornfeinung zu, wobei sich feine Drähte (<50 µm) der Obergrenze von 450 HV nähern.

Diese Eigenschaft sorgt für eine hervorragende Haltbarkeit und Stabilität beim Schneiden von harten Materialien wie Keramik und Siliziumwafern.

Tabelle 4.1.2 Härteprüfung

Parameter	Wert	Prüfmethode	Leistungsvorteil
Vickers-Härte	350-450 HV	ISO 6507, 500 g Belastung	Hervorragende Verschleißfestigkeit
Variation der Härte	Nimmt mit kleinerem Durchmesser zu	Mikrohärte-Prüfgerät	Erfüllt die hohen Festigkeitsanforderungen feiner Drähte

4.1.3 Ermüdungsleistung und Haltbarkeit

Das Ermüdungsverhalten gibt die Lebensdauer von Wolframdraht bei wiederholter Belastung an. Ermüdungsversuche bei rotierender Biegung (Frequenz 50 Hz, Spannungsverhältnis 0,1, gemäß ASTM E466) ergeben eine Ermüdungsgrenze von 1200-1800 MPa mit einer Lebensdauer von bis zu 10^7 Zyklen. Die Dotierung mit Rhenium reduziert die Entstehung von Mikrorissen durch Feststoffverfestigung und verlängert so die Lebensdauer.

Die Haltbarkeitsprüfung simuliert reale Schnittbedingungen (z. B. EDM-Austragszyklen) und zeigt eine Lebensdauer von 300-600 Stunden, abhängig von Durchmesser und Dotierungszusammensetzung, die für längere Vorgänge mit hoher Belastung geeignet ist.

Tabelle 4.1.3 Ermüdungsleistungs- und Haltbarkeitsprüfung

Parameter	Wert	Prüfmethode	Leistungsvorteil
Dauerfestigkeit	1200-1800 MPa	ASTM E466, 50 Hz	Hervorragende zyklische Haltbarkeit
Nutzungsdauer	300-600 Stunden	Simulierte Schnittbedingungen	Langfristige Betriebsstabilität

4.2 Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit von schnittfestem Wolframdraht

Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit bestimmen die Leistung von Wolframdraht in abrasiven und chemisch aggressiven Umgebungen und sind wichtige Garantien für seine Zuverlässigkeit.

4.2.1 Verschleißmechanismen und Prüfverfahren

Der Verschleiß bei schnittfestem Wolframdraht resultiert in erster Linie aus abrasiven und adhäsiven

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mechanismen, die beim Schneiden harter Materialien besonders ausgeprägt sind. Bolzen-auf-Scheiben-Verschleißtests (Last 10 N, Drehzahl 200 U/min, gemäß ASTM G99) zeigen eine Verschleißrate von 0,05-0,1 mm³/N·m, weit niedriger als bei Stahldraht (ca. 0,2-0,3 mm³/N·m). Oberflächenbeschichtungen (z.B. Wolframcarbid, WC, 1-5 µm dick) reduzieren die Verschleißtiefe auf <1 µm/1000 m.

Studien zu Verschleißmechanismen zeigen, dass die Kornverfeinerung und der Beschichtungsschutz den Materialverlust und die Oberflächenhaftung effektiv reduzieren und so die Haltbarkeit unter Bedingungen mit hoher Reibung verbessern.

Tabelle 4.2.1 Prüfung des Verschleißverhaltens

Parameter	Wert	Prüfmethode	Leistungsvorteil
Verschleißrate	0,05-0,1 mm ³ /N·m	ASTM G99, Stift-auf-Scheibe	Überlegene Verschleißfestigkeit
Verschleißtiefe	<1 µm/1000 m	Oberflächen-Profilometer	Deutlich verlängerte Lebensdauer

4.2.2 Leistungsbewertung in korrosiven Umgebungen

Die Korrosionsbeständigkeit wird in neutralem Salzsprühnebel (5 % NaCl, 35 °C, entspricht den Normen ASTM B117) und in sauren Umgebungen (pH 2, H₂SO₄-Lösung) getestet. Unbeschichteter Wolframdraht weist nach 72 Stunden im Salzsprühnebel einen Gewichtsverlust von 0,2-0,5 mg/cm² auf, während oberflächenbehandelter Draht (z. B. Wolframnitrid, WN, 1-3 µm dick) diesen auf <0,1 mg/cm² reduziert. Unter sauren Bedingungen liegt die Korrosionsrate zwischen 0,02 und 0,05 mm/Jahr und übertrifft damit unbehandelte Proben (0,1 bis 0,2 mm/Jahr). Diese Leistung gewährleistet Stabilität in feuchten oder chemisch korrosiven Umgebungen und eignet sich daher für medizinische Geräte und industrielle Anwendungen.

Tabelle 4.2.2 Prüfung der Korrosionsbeständigkeit

Parameter	Wert	Prüfmethode	Leistungsvorteil
Salzsprühnebel Gewichtsverlust	<0,1 mg/cm ² (72 Std.)	ASTM B117, 5 % NaCl	Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit
Saure Korrosionsrate	0,02-0,05 mm/Jahr	pH 2, H ₂ SO ₄ Einweichen	Überlegene chemische Stabilität

4.3 Hochtemperaturverhalten von schnittfestem Wolframdraht

Die Hochtemperaturbeständigkeit von schnittfestem Wolframdraht untermauert seinen Nutzen unter extremen Bedingungen. Thermische Stabilität, Oxidationsbeständigkeit und Änderungen der mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen sind wichtige Bewertungskriterien.

4.3.1 Thermische Stabilität und Oxidationsbeständigkeit

Thermische Stabilitätstests im Vakuum oder in inerter Atmosphäre (Ar, 10⁻⁵ Pa) zeigen, dass Wolframdraht nach 100 Stunden bei 2500 °C dank Dotierungselementen (z. B. Kalium), die das Kornwachstum und die Rekristallisation unterdrücken, seine Festigkeit mit weniger als 15 % Verlust beibehält. Die Oxidationsbeständigkeit wird durch Hochtemperatur-Expositionstests (1000 °C, Luft)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bewertet, bei denen unbeschichteter Draht aufgrund der Bildung flüchtiger WO_3 5-10 mg/cm²/h verliert, während beschichteter Draht (z. B. WN, 1-3 µm) diese auf <0,5-1 mg/cm²/h reduziert. Diese Eigenschaften ermöglichen eine hervorragende Leistung in Hochtemperaturöfen und Komponenten für die Luft- und Raumfahrt.

Tabelle 4.3.1 Prüfung der thermischen Stabilität und Oxidationsbeständigkeit

Parameter	Wert	Prüfmethode	Leistungsvorteil
Festigkeitsverlust bei hohen Temperaturen	<15 % (2500 °C, 100 Std.)	Vakuum-Hochtemperatur-Test	Ausgezeichnete thermische Stabilität
Oxidation Gewichtsverlust	<0,5-1 mg / cm ² / h (1000 °C)	Prüfung der Lufteinwirkung	Überlegene Oxidationsbeständigkeit

4.3.2 Änderungen der mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen

Die mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen werden durch Zugversuche (1000-2000 °C, Ar-Atmosphäre, gemäß ASTM E21-Normen) gemessen. Rhenium-dotierter Draht (3 %-26 %) behält eine Zugfestigkeit von 500-700 MPa bei 2000 °C bei und übertrifft damit reinen Wolframdraht (ca. 300-400 MPa). Die Härte sinkt auf 300-400 HV bei 1500 °C, was für Hochtemperatur-Schneidanforderungen immer noch ausreichend ist.

Hochtemperatur-Zeitstandversuche (1800 °C, 50 MPa Last) zeigen eine Kriechrate von unter 10⁻⁶ s⁻¹, wobei Kornstabilisierungsbehandlungen (z. B. Gradientenwärmebehandlung) die Verformung weiter reduzieren und die strukturelle Integrität in Hochtemperaturumgebungen gewährleisten.

Tabelle 4.3.2 Mechanische Leistungsprüfung bei hohen Temperaturen

Parameter	Wert	Prüfmethode	Leistungsvorteil
Hochtemperatur-Zugfestigkeit	500-700 MPa (2000 °C)	ASTM E21, Zugversuch	Hervorragende Festigkeitsbeständigkeit
Hochtemperatur-Härte	300-400 HV (1500 °C)	Hochtemperatur-Härteprüfer	Anhaltende Haltbarkeit
Kriechgeschwindigkeit	<10 ⁻⁶ s ⁻¹ (1800°C)	Zeitstandversuch	Überlegene Verformungsbeständigkeit



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 5: Normen in Bezug auf schnittfesten Wolframdraht

Schnittfester Wolframdraht als Hochleistungsmaterial erfordert die Einhaltung einer Reihe internationaler und nationaler Standards bei seiner Herstellung, Qualitätskontrolle und Anwendung, um die Leistungskonsistenz, die Einhaltung der Branchenkonformität und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt zu gewährleisten. In diesem Kapitel wird der für schnittfeste Wolframdraht relevante Normenrahmen, der die International Organization for Normung (ISO), die American Society for Testing and Materials (ASTM), die chinesischen nationalen Normen (GB/T) und branchenspezifische Vorschriften umfasst, systematisch überprüft und deren Rollen und Anwendungen in der Wolframdrahtindustrie detailliert beschrieben.

5.1 Internationale Normen

Internationale Normen bieten einen einheitlichen Rahmen für den globalen Handel, den technischen Austausch und das Qualitätsmanagement von schnittfestem Wolframdraht, der Qualitätsmanagementsysteme, Materialeleistungsprüfungen, Umweltsicherheit und spezifische Anwendungsanforderungen abdeckt.

5.1.1 ISO-Normen

ISO-Normen werden in der Wolframdrahtproduktion häufig angewendet und befassen sich mit Qualitäts-, Umwelt-, Sicherheits- und Leistungstests.

- **ISO 9001:2015**

Deutscher Name: Qualitätsmanagementsysteme

Englischer Name: Quality Management Systems

Chinesischer Name: 质量管理体系

Erscheinungs-/Überarbeitungsjahr: 2015

Geltungsbereich: Management von Produktionsprozessen

Spezifische Anforderungen: Verlangt von Unternehmen, ein vollständiges Prozessmanagementsystem von der Rohstoffbeschaffung bis zur Produktlieferung einzurichten, um die Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. Hersteller von Wolframdraht müssen sich jährlichen Audits unterziehen, wobei die Zertifizierungskosten zwischen 200.000 und 500.000 RMB liegen und eine Zeitspanne von 6 bis 12 Monaten haben.

Anwendungsszenario: Schnittfester Wolframdraht, der nach Europa und Nordamerika exportiert wird, erfordert häufig eine ISO 9001-Zertifizierung, um das Vertrauen der Kunden zu stärken.

- **ISO 14001:2015**

Deutscher Name: Umweltmanagementsysteme

Englischer Name: Environmental Management Systems

Chinesischer Name: 环境管理体系

Erscheinungs-/Überarbeitungsjahr: 2015

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Geltungsbereich: Umweltauflagen

Spezifische Anforderungen: Fördert eine umweltfreundliche Produktion und erfordert eine Überwachung und Reduzierung der Emissionen beim Sintern und Ziehen (z. B. CO₂-Emissionen <500 kg pro Tonne Wolframdraht, Schwermetallgehalt im Abwasser <0,1 mg/L).

Anwendungsszenario: Entspricht den Nachhaltigkeitstrends, die in der Photovoltaik- und Elektronikindustrie besonders streng sind.

- **ISO 45001:2018**

Deutscher Name: Managementsysteme für Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz

Englischer Name: Occupational Health and Safety Management Systems

Chinesischer Name: 职业健康安全管理体系

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2018

Geltungsbereich: Produktionssicherheit

Spezifische Anforderungen: Regelt risikoreiche Vorgänge wie Hochtemperaturesintern (2200-2500 °C) und Ziehen mit dem Ziel, die Unfallraten um 30 % zu senken, mit regelmäßigen Sicherheitsschulungen und Geräterwartung. Die Zertifizierungskosten liegen zwischen 100.000 und 300.000 RMB.

Anwendungsszenario: Gewährleistet die Sicherheit der Arbeiter und erhöht die Produktionsstabilität.

- **ISO 6892-1:2019**

Deutscher Name: Metallische Werkstoffe - Zugversuch

Englischer Name: Metallic Materials - Tensile Testing

Chinesischer Name: 金属材料拉伸试验

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2019

Umfang: Mechanische Leistungsprüfung

Spezifische Anforderungen: Gilt für die Prüfung der Zugfestigkeit und Duktilität von Wolframdraht bei Raum- und hohen Temperaturen (z. B. 2000 °C), um sicherzustellen, dass die mechanischen Eigenschaften den Normen entsprechen (Zugfestigkeit von schnittfestem Wolframdraht: 2000-2500 MPa).

Anwendungsszenario: Hohe Festigkeitsanforderungen beim Schneiden von Photovoltaik und in der Luft- und Raumfahrt.

- **ISO 22489:2016**

Deutscher Name: Mikrostrahlanalytik - Elektronensonden-Mikroanalytik

Englischer Name: Microbeam Analysis - Electron Probe Microanalysis

Chinesischer Name: 微束分析 - 电子探针显微分析

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2016

Umfang: Prüfung der Zusammensetzung

Spezifische Anforderungen: Erkennt mikroskopische Zusammensetzungen auf der Oberfläche und im Inneren von Wolframdraht, die einen Verunreinigungsgehalt (z. B. Sauerstoff, Stickstoff) <20 ppm erfordern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendungsszenario: Gewährleistet Qualitätskonsistenz in High-End-Elektronik und medizinischen Anwendungen.

- **ISO 10993-1:2018**

Deutscher Name: Biologische Bewertung von Medizinprodukten

Englischer Name: Biological Evaluation of Medical Devices

Chinesischer Name: 医疗器械生物相容性评价

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2018

Geltungsbereich: Medizinischer Wolframdraht

Spezifische Anforderungen: Für beschichteten Wolframdraht in der Medizin wird die Toxizität, Reizung und Allergenität bewertet, um sicherzustellen, dass keine Schadstoffe freigesetzt werden. Die Zertifizierungskosten liegen zwischen 400.000 und 800.000 RMB.

Anwendungsszenario: Anwendbar auf implantierbare medizinische Geräte.

- **ISO/AWI 24370-2 (Under Development)**

Deutscher Name: Feindraht aus Wolfram - Teil 2 (in Entwicklung)

Englischer Name: Fine Wire of Tungsten - Part 2 (Under Development)

Chinesischer Name: 细线钨丝第 2 部分（在研）

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: Voraussichtlich 2026

Geltungsbereich: Nanoskaliger Wolframdraht

Spezifische Anforderungen: Zielt auf nanoskaligen Wolframdraht (Durchmesser $<1 \mu\text{m}$) ab, der eine Maßtoleranz von $\pm 0,2 \mu\text{m}$ und eine Oberflächengüte von $Ra < 0,05 \mu\text{m}$ erfordert.

Anwendungsszenario: Halbleiter und Sensoren der nächsten Generation.

5.1.2 ASTM and Other International Standards

ASTM standards provide detailed specifications for material properties and production processes of tungsten wire, widely adopted in the North American market.

- **ASTM B760-07 (Revised 2019)**

Deutscher Name: Standardspezifikation für Wolframplatten, -bleche und -folien

Englischer Name: Standard Specification for Tungsten Plate, Sheet, and Foil

Chinesischer Name: 钨板、片和箔

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2019

Geltungsbereich: Reinheits- und Leistungsanforderungen

Spezifische Anforderungen: Spezifiziert die Reinheit des Wolframmaterials $>99,95 \%$, mit Verunreinigungen (z. B. Fe, Mo) $<50 \text{ ppm}$, die häufig auf die Wolframdrahtproduktion ausgedehnt werden.

Anwendungsszenario: Sichert die Rohstoffqualität für die schnittfeste Wolframdrahtproduktion.

- **ASTM B777-20**

Deutscher Name: Standardspezifikation für Wolframbasis, Metall mit hoher Dichte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Englischer Name: Standard Specification for Tungsten Base, High-Density Metal

Chinesischer Name: 钨基高密度合金

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2020

Geltungsbereich: Verbundstoff-Wolframdraht

Spezifische Anforderungen: Erfordert eine Dichte $>17 \text{ g/cm}^3$ und eine Zugfestigkeit $>1500 \text{ MPa}$.

Anwendungsszenario: Wolframdrahtverstärkte Verbundwerkstoffe in der Luft- und Raumfahrt und im Militär.

- **ASTM E8/E8M-21**

Deutscher Name: Standardprüfverfahren für die Zugprüfung von metallischen Werkstoffen

Englischer Name: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

Chinesischer Name: 金属材料拉伸试验方法

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2021

Geltungsbereich: Leistung bei hohen Temperaturen

Spezifische Anforderungen: Verfeinert die Prüfung der Dehnungsrate und der Bruchzähigkeit bei verschiedenen Temperaturen, die eine Kriechdehnung von $<0,005 \text{ %/h}$ bei 1000 °C erfordern.

Anwendungsszenario: Hochtemperaturumgebungen wie z. B. Gasturbinenschaufeln.

- **ASTM F1925-17**

Deutscher Name: Standard Specification for Semiconductor Tungsten Materials

Englischer Name: Standard Specification for Semiconductor Tungsten Materials

Chinesischer Name: 半导体用钨材料规范

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2017

Geltungsbereich: Schneiden von Halbleitern

Spezifische Anforderungen: Erfordert eine Reinheit $>99,999 \text{ %}$, eine Durchmesserkonsistenz $\pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ und einen spezifischen Widerstand $<5,0 \text{ }\mu\Omega\text{cm}$.

Anwendungsszenario: Feinstschneiden in der Chipfertigung.

- **AMS 7880**

Deutscher Name: Wolframdraht Hochtemperatureigenschaften

Englischer Name: Tungsten Wire High-Temperature Properties

Chinesischer Name: 钨丝高温性能规范

Veröffentlichungs-/Revisionsjahr: Keine Angabe

Geltungsbereich: Hochtemperaturanwendungen in der Luft- und Raumfahrt

Spezifische Anforderungen: Erfordert eine Kriechrate von $<0,01 \text{ %/h}$ bei 2500 °C , wobei die Zertifizierung 1-2 Jahre dauert und $500.000\text{-}1.000.000 \text{ RMB}$ kostet.

Anwendungsszenario: Raketendüsen und Turbinenschaufeln.

- **JIS H 4461:2002**

Deutscher Name: Wolframdraht (Japanischer Industriestandard)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Englischer Name: Tungsten Wire (Japanese Industrial Standard)

Chinesischer Name: 钨丝（日本工业标准）

Erscheinungs-/Überarbeitungsjahr: 2002

Geltungsbereich: Präzisionsinstrumente

Spezifische Anforderungen: Erfordert rissfreie Oberflächen und eine Zugfestigkeit >2200 MPa.

Anwendungsszenario: Präzisionsinstrumente und Beleuchtungsgeräte, die ISO-Normen ergänzen.

- **EN 10204:2004**

Deutscher Name: Metallische Produkte - Arten von Prüfdokumenten

Englischer Name: Metallic Products - Types of Inspection Documents

Chinesischer Name: 金属产品检验文件

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2004

Geltungsbereich: Qualitätszertifizierung

Spezifische Anforderungen: Erfordert, dass Wolframdraht mit einem Materialzertifikat vom Typ 3.1 versandt wird, um die Rückverfolgbarkeit der Qualität zu gewährleisten.

Anwendungsszenario: Ausführen in den EU-Markt.

5.2 Chinesische nationale Standards und Branchenvorschriften

Die chinesischen Standards entsprechen den Anforderungen der heimischen Industrie und decken Rohstoffe, Produktion, Leistungstests und neue Anwendungen von Wolframdraht ab.

5.2.1 GB/T-Normen

GB/T-Standards bieten grundlegende Spezifikationen für schnittfesten Wolframdraht, der für die Großserienproduktion und Qualitätskontrolle geeignet ist.

- **GB/T 3459-2017**

Deutscher Name: Wolfram-Pulver

Englischer Name: Tungsten Powder

Chinesischer Name: 钨粉

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2017

Geltungsbereich: Reinheit des Rohmaterials

Spezifische Anforderungen: Erfordert Wolframpulverreinheit >99,95 %, Partikelgröße 10-50 µm.

Anwendungsszenario: Sintern von Rohmaterial für Wolframdraht, was sich direkt auf die Produktionskosten auswirkt (450-1.100 RMB/kg).

- **GB/T 4181-2017**

Deutscher Name: Wolfram-Stangen

Englischer Name: Tungsten Bars

Chinesischer Name: 钨棒

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2017

Geltungsbereich: Oberflächenqualität und Reinheit

Spezifische Anforderungen: Oberfläche frei von Oxiden und Rissen, Reinheit >99,95%.

Anwendungsszenario: Erstreckt sich auf die Herstellung von Wolframdraht, anwendbar beim Schneiden von Photovoltaik.

• **GB/T 4197-2017**

Deutscher Name: Tungsten Wire

Englischer Name: Tungsten Wire

Chinesischer Name: 钨丝

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2017

Geltungsbereich: Drahtschneiden und Elektronik

Spezifische Anforderungen: Durchmesser-toleranz $\pm 1 \mu\text{m}$, Zugfestigkeit 2000-2500 MPa, Bruchdehnung >2%.

Anwendungsszenario: Drahterodier- und Elektronikindustrie.

• **GB/T 17492-2019**

Deutscher Name: Chemische Analyseverfahren für Wolfram und Wolframlegierungen

Englischer Name: Chemical Analysis Methods for Tungsten and Tungsten Alloys

Chinesischer Name: 钨及钨合金化学分析方法

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2019

Geltungsbereich: Kontrolle von Verunreinigungen

Spezifische Anforderungen: Eisengehalt <30 ppm, Molybdän <10 ppm.

Anwendungsszenario: Stabilität von Wolframdraht in hochreinen Anwendungen.

• **GB/T 43293-2023**

Deutscher Name: Prüfverfahren für Hochtemperatureigenschaften von Wolframdraht

Englischer Name: Test Method for High-Temperature Properties of Tungsten Wire

Chinesischer Name: 钨丝高温性能测试方法

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2023

Geltungsbereich: Anwendungen der Kernfusion

Spezifische Anforderungen: Prüfung der Oxidationsbeständigkeit und der Kriecheigenschaften bei 2000-2500 °C, Gewichtsverlustrate <0,5 mg/cm²/h.

Anwendungsszenario: Wolframbasierte Bauelemente in Kernfusionsanlagen.

• **GB/T 41319-2022**

Deutscher Name: Spezifikation für Wolframdraht in Photovoltaik-Anwendungen

Englischer Name: Specification for Tungsten Wire in Photovoltaic Applications

Chinesischer Name: 光伏用钨丝规范

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2022

Geltungsbereich: Photovoltaik-Schneiden

Spezifische Anforderungen: Durchmesser 20-50 μm , Bruchrate <0,8 %, Oberflächenrauheit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ra <0,08 µm.

Anwendungsszenario: Verbessert die Effizienz des Schneidens von Photovoltaik-Siliziumwafern um 10 %.

5.2.2 Branchenvorschriften und Zertifizierungen

Branchenvorschriften, die von Einrichtungen wie der China Nonferrous Metals Industry Association, dem Militär und dem Nuklearsektor formuliert wurden, ergänzen die nationalen Standards durch detaillierte Bestimmungen.

- **YS/T 1356-2020**

Deutscher Name: Technische Bedingungen für Wolframdraht

Englischer Name: Technical Conditions for Tungsten Wire

Chinesischer Name: 钨丝技术条件

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2020

Geltungsbereich: Photovoltaik und Glasbearbeitung

Spezifische Anforderungen: Die Verschleißfestigkeit gewährleistet eine Lebensdauer >120 Stunden, eine Oberflächenfehlertiefe <0,5 µm.

Anwendungsszenario: Photovoltaik und Glasverarbeitung.

- **GJB 9001C-2017**

Deutscher Name: Anforderungen an das Qualitätsmanagementsystem für militärische Produkte

Englischer Name: Quality Management System Requirements for Military Products

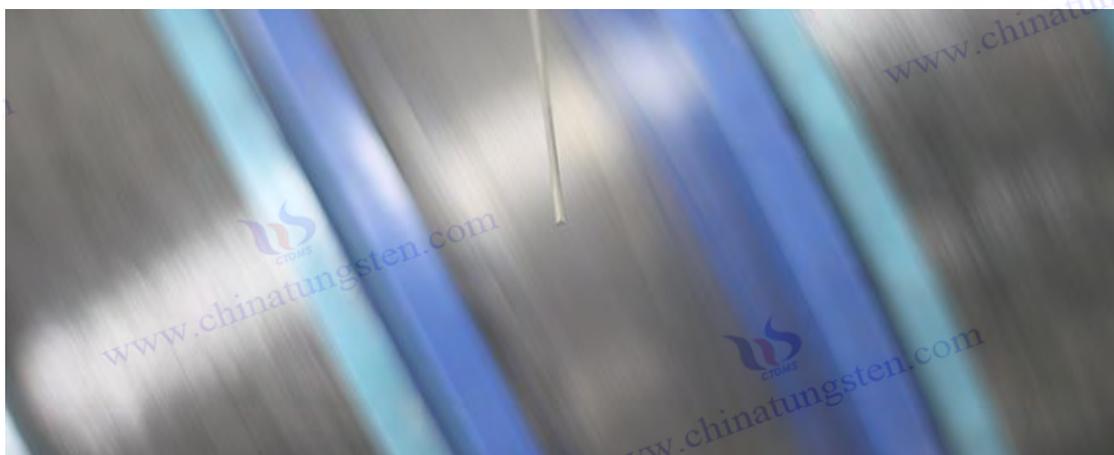
Chinesischer Name: 军用产品质量管理体系

Veröffentlichungs-/Überarbeitungsjahr: 2017

Geltungsbereich: Militärische Anwendungen

Spezifische Anforderungen: Erfordert strenge Qualitätskontrollsysteme für die Herstellung von Wolframdraht, wobei die fertigen Produkte von militärischen Inspektionszertifikaten begleitet werden.

Anwendungsszenario: Raketen und gepanzerte Komponenten.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Zusammenfassende Tabelle der Normen für schnittfesten Wolframdraht

Zur Vereinfachung der Bezugnahme fasst die folgende Tabelle die Normen für schnittfesten Wolframdraht umfassend zusammen, einschließlich chinesischer und englischer Namen, Veröffentlichungs-/Revisionsjahre, Geltungsbereiche und spezifischer Anforderungen.

Tabelle 5.1 Normen für schnittfesten Wolframdraht (chinesisch-englischer Vergleich)

Normnummer	Chinesischer Name	Englischer Name	Loslassen/Revisionsjahr	Umfang	Spezifische Anforderungen
ISO 9001:2015	Qualitätsmanagementsystem	Quality Management Systems	2015	Produktionsprozess	Vollständige Prozessaufzeichnungen, Rückverfolgbarkeit
ISO 14001:2015	Umweltmanagementsysteme	Environmental Management Systems	2015	Umwelt	CO ₂ -Emissionen <500 kg/Tonne
ISO 45001:2018	Managementsysteme für Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz	Occupational Health and Safety Management Systems	2018	Produktionssicherheit	Unfallrate um 30 % gesenkt
ISO 6892-1:2019	Metallische Werkstoffe - Zugversuch	Metallic Materials - Tensile Testing	2019	Mechanische Prüfung	Zugfestigkeit 2000-2500 MPa
ISO 2489:2016	Mikrostrahlanalytik - Elektronensonden-Mikroanalytik	Microbeam Analysis - Electron Probe Microanalysis	2016	Prüfung der Zusammensetzung	Verunreinigungen <20 ppm
ISO 10993-1:2018	Biologische Bewertung von Medizinprodukten	Biological Evaluation of Medical Devices	2018	Medizinische Draht	Ungiftig, nicht reizend
ASTM B760-07	Standardspezifikation für Wolframplatten, -bleche und -folien	Standard Specification for Tungsten Plate, Sheet, and Foil	2019	Reinheit, Leistung	Reinheit >99,95%, Verunreinigungen <50 ppm
ASTM B777-20	Standardspezifikation für Wolframbasis, Metall mit hoher Dichte	Standard Specification for Tungsten Base, High-Density Metal	2020	Verbundwerkstoff-Wolframdraht	Dichte >17 g/cm ³
ASTM E8/E8M-21	Standardprüfverfahren für die Zugprüfung von metallischen Werkstoffen	Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials	2021	Leistung bei hohen Temperaturen	Kriechdehnung <0,005 %/h
ASTM F1925-17	Standardspezifikation für Halbleiter-Wolframmaterialien	Standard Specification for Semiconductor Tungsten Materials	2017	Schneiden von Halbleitern	Reinheit >99,999%, spezifischer Widerstand <5,0 μΩ·cm
AMS	Hochtemperatureigenschaften	Tungsten Wire High-	-	Luft- und	Kriechrate <0,01 %/h

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7880	n von Wolframdraht	Temperature Properties		Raumfahrt Hochtemperatur	bei 2500 °C
JIS H 4461:2002	Wolframdraht (Japanischer Industriestandard)	Tungsten Wire (Japanese Industrial Standard)	2002	Präzisionsinstrumente	Zugfestigkeit >2200 MPa
EN 10204:2004	Metallische Produkte - Arten von Prüfdokumenten	Metallic Products - Types of Inspection Documents	2004	Qualitätszertifizierung	Materialzertifikat Typ 3.1
GB/T 3459-2017	Wolfram-Pulver	Tungsten Powder	2017	Reinheit des Rohmaterials	Reinheit >99,95%, Partikelgröße 10-50 µm
GB/T 4181-2017	Wolfram-Stangen	Tungsten Bars	2017	Oberflächenqualität, Reinheit	Oxidfrei, Reinheit >99,95 %
GB/T 4197-2017	Tungsten Wire	Tungsten Wire	2017	Drahterodieren, Elektronik	Zugfestigkeit 2000-2500 MPa
GB/T 17492-2019	Chemische Analyseverfahren für Wolfram und Wolframlegierungen	Chemical Analysis Methods for Tungsten and Tungsten Alloys	2019	Kontrolle von Verunreinigungen	Fe <30 ppm, Mo <10 ppm
GB/T 43293-2023	Prüfverfahren für Hochtemperatureigenschaften von Wolframdraht	Test Method for High-Temperature Properties of Tungsten Wire	2023	Kernfusion	Gewichtsverlust <0,5 mg/cm ² /h
GB/T 41319-2022	Spezifikation für Wolframdraht in Photovoltaik-Anwendungen	Specification for Tungsten Wire in Photovoltaic Applications	2022	Schneiden von Photovoltaik-Anlagen	Durchmesser 20-50 µm, Bruchrate <0,8%
YS/T 1356-2020	Technische Bedingungen für Wolframdraht	Technical Conditions for Tungsten Wire	2020	Photovoltaik, Glas	Schnittlebensdauer > 120 h, Defekte <0,5 µm
GJB 9001C-2017	Anforderungen an das Qualitätsmanagementsystem für militärische Produkte	Quality Management System Requirements for Military Products	2017	Militärische Anwendungen	Militärisches Inspektionszertifikat

5.4 Anwendung und Ausblick von Normen

Diese Standards spielen in der schnittfesten Wolframdrahtindustrie eine mehrfache Rolle. ISO 9001 und GB/T 4197 sorgen für Produktionskonsistenz, AMS 7880 und ISO 10993 erfüllen High-End-Anforderungen in der Luft- und Raumfahrt und Medizin, während EN 10204 und YS/T 1356 die Glaubwürdigkeit des Marktes erhöhen. Mit dem Fortschritt der Technologien (z. B. 3D-gedruckter Wolframdraht, nanoskalige Anwendungen) und der Erweiterung interdisziplinärer Bereiche (z. B. Quantencomputing, Erforschung des Weltraums) werden sich neue Standards auf die ultrafeine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dimensionskontrolle (Durchmesser $<0,5 \mu\text{m}$), die Sprödbeständigkeit bei niedrigen Temperaturen, die Leistung im Ultrahochvakuum und das Management des CO₂-Fußabdrucks konzentrieren.

- **Zukünftige Trends:**

Bis 2027 könnten internationale Standards für nanoskaligen Wolframdraht entstehen, die eine Durchmessertoleranz von $\pm 0,1 \mu\text{m}$ und atomar glatte Oberflächen erfordern und Anwendungen in Quantengeräten vorantreiben.

Die Photovoltaikindustrie könnte eine Steigerung der Effizienz beim Schneiden von Wolframdraht um 15 % und einen geringeren Verlust von Siliziumwafern verlangen, was zu Überarbeitungen von GB/T 41319 führt.

Im Militär- und Kernfusionssektor wird der Schwerpunkt auf Strahlungsbeständigkeit und Hochtemperaturstabilität liegen, wobei eine Leistungsminderung von $<3 \%$ angestrebt wird.

- **Kosten und Nutzen:**

Die Zertifizierungskosten (200.000-1.200.000 RMB) erhöhen den Produktionsaufwand, verbessern aber die Produktqualität und den Marktzugang, wodurch indirekt die Nacharbeitskosten (ca. 500.000-600.000 RMB jährlich) gesenkt werden.

Die parallele Entwicklung internationaler und lokaler Standards wird die Wolframdrahtindustrie auf ein höheres technologisches Niveau und in breitere Anwendungsbereiche bringen.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm^3)	19.3
Tensile Strength (N/mm^2)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatungsten".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 6: Anwendungsgebiete von schnittfestem Wolframdraht

6.1 Drahterodierprozesse

Schnittfester Wolframdraht zeichnet sich beim Drahtschneiden durch seine außergewöhnliche Festigkeit, Verschleißfestigkeit und Leitfähigkeit aus und ist damit in der Präzisionsfertigung unverzichtbar, insbesondere bei der Funkenerosion (EDM) und beim Schneiden von Diamantdrahtsägen.

6.1.1 Funkenerosion (EDM)

6.1.1.1 Zentrale Rolle von schnittfestem Wolframdraht als Elektrode beim Erodieren

Bei der Funkenerosion (EDM) wird Material durch Funkenentladungen abgetragen und ermöglicht so die Bearbeitung von Metallen mit hoher Härte oder komplexen Geometrien. Schnittfester Wolframdraht, der als Elektrode dient, nutzt seine hervorragende Leitfähigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit, um einen stabilen Betrieb bei hochfrequenten gepulsten Entladungen zu gewährleisten. Im Gegensatz zu herkömmlichen Kupfer- oder Messingdrähten widersteht Wolframdraht dem Schmelzen oder Brechen während der Entladung und eignet sich daher ideal zum Schneiden anspruchsvoller Materialien wie Formstahl, Titanlegierungen und Hartmetallen. Sein feiner Durchmesser und seine Präzision ermöglichen die Bearbeitung kleinster Merkmale wie schmale Schlitzlöcher oder scharfe Kanten und erfüllen damit die hohen Präzisionsanforderungen der modernen Fertigung.

6.1.1.2 Vorteile im hochpräzisen Formenbau

Im Formenbau bietet schnittfester Wolframdraht unvergleichliche Vorteile. Die Industrie verlangt nach glatten Oberflächen und hoher geometrischer Genauigkeit, die Wolframdraht durch seine Langlebigkeit und Stabilität erreicht. Im Vergleich zu anderen Elektrodenmaterialien weist Wolframdraht einen minimalen Verschleiß über mehrere Entladezyklen auf, wodurch Produktionsunterbrechungen aufgrund von Elektrodenwechsel reduziert werden. Darüber hinaus verbessert seine Oberflächengüte die Qualität der fertigen Formen, die üblicherweise in Stanzformen für die Automobilindustrie, Spritzgussformen und Formen für Luft- und Raumfahrtkomponenten verwendet werden. Bei der Herstellung von Präzisionsstanzwerkzeugen schneidet Wolframdraht beispielsweise komplexe Konturen, wobei die Kantenschärfe und -konsistenz erhalten bleiben, wodurch die Lebensdauer der Form verlängert und die Ausbeute an Stanzteilen verbessert wird.

6.1.1.3 Fallstudien zur Bearbeitung komplexer Metallteile

Schnittfester Wolframdraht hat zahlreiche Anwendungen bei der Bearbeitung komplexer Teile. In der Luft- und Raumfahrt wird es zur Herstellung von Turbinenschaufelformen verwendet, wo eine präzise Steuerung der Entladungsparameter das Schneiden komplizierter Blattwurzeloberflächen mit einer Genauigkeit im Mikrometerbereich ermöglicht, wodurch die anschließende Polierzeit um ca. 20 % reduziert wird. Bei der Herstellung von Medizinprodukten erleichtert Wolframdraht die Herstellung von orthopädischen Implantaten, wie z. B. Mikrolöchern und Schlitzlöchern in

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Knigelenersatzkomponenten. Durch die Optimierung der Entladungsfrequenz und des Entladungsstroms eignet es sich hervorragend für die Bearbeitung von Titanlegierungen, erreicht eine Ausbeute von über 98 % und reduziert die Ausschussraten erheblich. Diese Beispiele verdeutlichen die Flexibilität und Zuverlässigkeit von Wolframdraht in High-Tech-Bereichen.

6.1.2 Schneiden von Diamantdrahtsägen

6.1.2.1 Wolframdraht als Substrat für Diamantdrahtsägen

Diamantdrahtsägen, die durch das Anbringen von Diamantpartikeln an Wolframdrahtoberflächen hergestellt werden, werden zum Schneiden harter Materialien verwendet. Schnittfester Wolframdraht als Substrat hält der Spannung und Reibung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden stand und sorgt so für eine sichere Diamantbefestigung und effektive Leistung. Im Vergleich zu Stahldrahtsubstraten sorgt die hohe Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Wolframdraht für eine höhere Stabilität bei längerem Betrieb, insbesondere in feuchten oder sauren Umgebungen. Sein feiner Durchmesser und seine Gleichmäßigkeit erhöhen die Flexibilität von Drahtsägen und ermöglichen das Schneiden komplexer Formen oder ultradünner Materialien, was sie zu einem unverzichtbaren Bestandteil der modernen Schneidtechnik macht.



6.1.2.2 Hochpräzises Schneiden von Halbleiterwafern und Photovoltaik-Siliziumwafern

In der Halbleiter- und Photovoltaikindustrie werden Diamantdrahtsägen mit Wolframdrahtsubstraten häufig zum Schneiden von Siliziumwafern eingesetzt. Die Dicke der Siliziumwafer muss im Mikrometerbereich präzise gesteuert werden, um die Leistungsanforderungen der Chipherstellung und der Solarzellen zu erfüllen. Die hohe Verschleißfestigkeit von Wolframdraht sorgt für Stabilität beim Hochgeschwindigkeitsschneiden und erzeugt flache, rissfreie Oberflächen. Bei der Herstellung von Photovoltaikzellen schneiden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beispielsweise Wolframdrahtsägen polykristalline Silizium-Ingots in 150 Mikrometer dicke Wafer und verarbeiten so über 500 Wafer pro Stunde mit einer Makulaturrate von unter 5 %. Dieser effiziente Zuschnitt steigert die Materialausnutzung und treibt die Photovoltaikindustrie zu niedrigeren Kosten und höherer Effizienz. Beim Schneiden von Halbleiterwafern unterstützen Wolframdrahtsägen Waferdurchmesser von 150 mm bis 300 mm und erreichen Ausbeuten von über 95 % und bieten eine zuverlässige Unterstützung für die Chipherstellung.

6.1.2.3 Schneidanwendungen in Stein, Keramik und anderen harten Materialien

Wolframdraht-Diamantsägen sind aus der Stein- und Keramikbearbeitung nicht mehr wegzudenken. Beim Schneiden von Marmor oder Granit verhindert die hohe Festigkeit des Wolframdrahts einen Bruch unter Spannung und erreicht Schnittgeschwindigkeiten von 15-20 Metern pro Minute und eine gleichmäßige Plattendicke, ideal für architektonische Dekoration und Bildhauerei. In den italienischen Marmorbrüchen von Carrara beispielsweise werden Wolframdrahtsägen zur Gewinnung und Verarbeitung eingesetzt, die über 1.000 Quadratmeter pro Sitzung schneiden und dabei eine Effizienz erzielen, die herkömmliche Stahldrahtsägen weit übertrifft. In der Keramikverarbeitung schneiden Wolframdrahtsägen Materialien mit hoher Härte wie Aluminiumoxid oder Siliziumnitrid und erzeugen so glatte, ausrissfreie Kanten, oft für elektronische Keramiksubstrate. Bei der Herstellung von 5G-Geräten erzeugen Wolframdrahtsägen Mikrolöcher in Substraten mit einer Größe von nur 0,1 mm und erfüllen damit die strengen Anforderungen an die Hochfrequenz-Signalübertragung. Diese Anwendungen zeigen die Vielseitigkeit und Effizienz von Wolframdraht bei der Verarbeitung harter Materialien.

6.2 Funktionsbauteile in Hochtemperaturumgebungen

Aufgrund seiner überlegenen Leistung bei hohen Temperaturen ist schnittfester Wolframdraht ein bevorzugtes Material für Funktionsbauteile unter extremen Bedingungen, insbesondere in Hochtemperaturöfen, thermischem Spritzen, Schweißen und Luft- und Raumfahrtanwendungen.

6.2.1 Heizelemente in Hochtemperaturöfen

6.2.1.1 Wolframdrahtanwendungen in Vakuum- oder Inertgasöfen

In Hochtemperaturöfen unter Vakuum- oder Schutzgasschutz (z. B. Argon) dient schnittfester Wolframdraht als Heizelement, der bei Temperaturen bis zu 2500 ° C stabil arbeitet. Seine hohe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine schnelle Erwärmung und eignet sich daher ideal für das Glühen von Halbleiterwafern, das Sintern von Metall und das Aushärten von Keramiken. Im Vergleich zu herkömmlichen Nichromlegierungen verbessern der niedrige Dampfdruck und die Oxidationsbeständigkeit von Wolframdraht die Haltbarkeit in Vakuumumgebungen und verhindern, dass die Verflüchtigung bei hohen Temperaturen den Ofen verunreinigt. In Silizium-Wafer-Glühöfen beispielsweise erhöhen Wolframdraht-Heizelemente die Temperaturen in Sekundenschnelle auf über 2000 ° C, was eine schnelle Reparatur der Kristallstruktur gewährleistet und die Chipleistung verbessert.

6.2.1.2 Dauerhaftigkeit beim Hochtemperaturglühen und Sintern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beim Hochtemperaturglühen und -sintern ist die Durchhangfestigkeit des Wolframdrahts ein entscheidender Vorteil. Die Kaliumdotierung hemmt das Kornwachstum, so dass der Draht nach längerem Hochtemperaturbetrieb seine Form behält und eine hervorragende Gleichmäßigkeit des Wärmefelds gewährleistet. Dies ist entscheidend beim keramischen Sintern, wie z. B. bei der Herstellung von Zirkonoxid-Dentalkeramik, bei der Wolframdraht-Heizelemente Hunderte von Stunden Dauerbetrieb unterstützen und Sinterdichten von nahezu 99 % des theoretischen Wertes erreichen, wobei die mechanische Festigkeit und Transparenz den medizinischen Standards entspricht. In der Pulvermetallurgie erhitzt Wolframdraht Wolframlegierungsteile während des Sinterns und sorgt so für ein porositätsfreies Inneres, das den Zuverlässigkeitsstandards für die Luft- und Raumfahrt entspricht. Diese Anwendungen unterstreichen die Langlebigkeit und Stabilität von Wolframdraht in Hochtemperaturprozessen.

6.2.2 Thermisches Spritzen und Schweißunterstützung

6.2.2.1 Wolframdrahtbauteile beim Plasmaspritzen

Beim Plasmaspritzen werden Hochtemperatur-Plasmalichtbögen verwendet, um verschleiß- oder korrosionsbeständige Beschichtungen abzuschneiden, wobei schnittfester Wolframdraht als Elektroden oder Träger dient und lokalen Temperaturen über 3000 ° C standhält. Seine Langlebigkeit und Oxidationsbeständigkeit gewährleisten die Kontinuität des Prozesses, die üblicherweise für die Oberflächenveredelung von Triebwerksschaufeln und industriellen Formen verwendet wird. Bei der Beschichtung von Turbinenschaufeln ermöglichen Wolframdrahtkomponenten beispielsweise eine gleichmäßige Abscheidung der Keramiksicht (0,2-0,5 mm dick) und verbessern so die Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen um über 30 %. Im Vergleich zu anderen Materialien reduziert der hohe Schmelzpunkt und die Stabilität von Wolframdraht die Häufigkeit des Austauschs von Komponenten, wodurch die Produktionskosten erheblich gesenkt werden.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.2.2 Wolframdrahtelektroden beim Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)

Beim WIG-Schweißen dient schnittfester Wolframdraht als Elektrode und bietet einen stabilen Hochtemperaturlichtbogen zum Schweißen von Edelstahl, Aluminiumlegierungen und Titanlegierungen. Thorium- oder Lanthan-dotierter Wolframdraht erhöht die Effizienz der Elektronenemission und ermöglicht so eine schnelle Lichtbogenzündung und eine hohe Schweißpräzision. Dies ist bei der Herstellung von Druckbehältern und Teilen für die Luft- und Raumfahrt von entscheidender Bedeutung. Bei der Herstellung von hydraulischen Pipelines in der Luft- und Raumfahrt erzielen Wolframdrahtelektroden beispielsweise nahtlose Schweißnähte von bis zu 10 Metern Länge, mit einer Schweißnahtfestigkeit von nahezu 98 % des Grundmaterials und minimalen Defekten. In der Schiffbauindustrie unterstützt Wolframdraht das Schweißen von dicken Edelstahlblechen, wobei korrosionsbeständige Schweißnähte den Anforderungen der Meeresumwelt entsprechen und seine Zuverlässigkeit bei anspruchsvollen Schweißanwendungen unter Beweis stellen.

6.2.3 Hochtemperaturkomponenten für die Luft- und Raumfahrt

6.2.3.1 Wolframdrahtverstärkte Materialien in Düsen von Raketentriebwerken

Düsen von Raketentriebwerken halten Gaserosion bei hohen Temperaturen und extremer thermischer Belastung stand, wobei schnittfester Wolframdraht, veredelt mit Rheniumdotierung, Verbundwerkstoffe verstärkt, die hervorragende mechanische Eigenschaften über 2000 ° C beibehalten. Oxidationsbeständige Beschichtungen verlängern die Lebensdauer der Düsen weiter und halten Hunderten von Zyklen stand. In Feststoffraketenantrieben zeigen wolframdrahtverstärkte Düsen nach mehreren Bodentests keine Risse oder Ablationen, wobei sich der Halsdurchmesser unter 0,1 mm ändert, um die Schubstabilität zu gewährleisten. Diese hohe Zuverlässigkeit macht es zu einer wichtigen Komponente bei Weltraummissionen.

6.2.3.2 Wolframdrahtkathoden in elektrischen Triebwerken

In elektrischen Triebwerken (z. B. Hall- oder Ionentriebwerken) dient schnittfester Wolframdraht als Kathode und sorgt für eine effiziente Elektronenemission für die Umlaufbahn- und Lageregelung von Raumfahrzeugen. Die hohe Emissionseffizienz und die Beständigkeit gegen Ionenbeschuss durch Lanthan-dotierten Wolframdraht ermöglichen einen Betrieb über 2.000 ° C für mehr als 1.000 Stunden. In geosynchronen Kommunikationssatelliten unterstützen Wolframdraht-Kathoden Triebwerkssysteme durch 10.000 Impulszündungen, wodurch der Wirkungsgrad des Antriebs um 15 % verbessert und die Lebensdauer der Satelliten verlängert wird. In Weltraumsonden sorgen Wolframdrahtkathoden für einen stabilen Betrieb des Triebwerks im Vakuum und tragen so zu erfolgreichen Planetenerkundungsmissionen bei.

6.3 Elektronik und elektrische Anwendungen

Schnittfester Wolframdraht wird in elektronischen und elektrischen Anwendungen wegen seiner Leitfähigkeit, Hochtemperaturleistung und Stabilität geschätzt und wird häufig in Elektronenstrahlgeräten, Vakuumsystemen und Beleuchtungen eingesetzt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.1 Elektronenstrahl- und Röntgengeräte

6.3.1.1 Wolframdrahtfilamente in Elektronenmikroskopen und Röntgenröhren

Elektronenmikroskope und Röntgenröhren sind auf Wolframdrahtfilamente als Elektronenemissionsquellen angewiesen und nutzen deren hohen Schmelzpunkt und Emissionseffizienz. Sie arbeiten Tausende von Stunden lang stabil bei 2500 ° C und sind ideal für die Materialwissenschaft und die medizinische Bildgebung. In Rasterelektronenmikroskopen (REM) unterstützen thoriumdotierte Wolframfilamente die Bildgebung mit einer Auflösung von 10 Nanometern und unterstützen so die Analyse der Oberflächenmorphologie von Nanomaterialien. In Röntgenröhren für CT-Scanner erzeugen Wolframfilamente starke, klare Röntgenstrahlen, die bei der Diagnose von Lungenerkrankungen weit verbreitet sind und die diagnostische Genauigkeit erheblich verbessern.

6.3.1.2 Hochtemperaturquellen beim Elektronenstrahlschweißen

Beim Elektronenstrahlschweißen wird Wolframdraht verwendet, um Hochtemperaturstrahlen zu erzeugen, die im Vergleich zu herkömmlichen Methoden eine überlegene Tiefe und Präzision bieten. Seine Stabilität gewährleistet eine präzise Strahlfokussierung, die häufig in der Luft- und Raumfahrt und Automobilindustrie eingesetzt wird. Bei der Herstellung von Turbinenscheiben für Flugzeugtriebwerke schweißen Wolframdraht-Elektronenstrahlen beispielsweise dicke Platten aus Titanlegierungen bis zu einer Tiefe von 50 mm mit einer Schweißnahtfestigkeit von 95 % des Grundmaterials. In der Automobilproduktion unterstützt Wolframdraht das Karoserieschweißen von Aluminiumlegierungen und erzeugt porenfreie Schweißnähte, die den Anforderungen des Leichtbaus entsprechen, was seine Unverzichtbarkeit beim Präzisionsschweißen unterstreicht.

6.3.2 Vakuum-Ausrüstung

6.3.2.1 Wolframdraht-Verdampfungsschiffchen bei der Vakuumabscheidung

Bei der Vakuumabscheidung verdampfen Wolframdraht-Verdampfungsschiffchen Metalle für die Dünnschichtabscheidung, die in der Optik und Elektronik weit verbreitet ist. Ihre hohe Temperaturbeständigkeit und ihr niedriger Dampfdruck sorgen für eine effiziente, gleichmäßige Beschichtung. Bei der optischen Linsenbeschichtung scheiden Wolframschiffchen mehrschichtige Antireflexfolien ab, die das Reflexionsvermögen auf unter 1 % reduzieren und die Lichtdurchlässigkeit verbessern. In der Halbleiterfertigung unterstützt Wolframdraht die Abscheidung von Kupfer- oder Aluminiumfilmen mit einer Dickengleichmäßigkeit von $\pm 2\%$ und erfüllt damit die Leistungsanforderungen für integrierte Schaltkreise, was ihn zu einer Schlüsselkomponente in der Vakuumbeschichtungstechnologie macht.

6.3.2.2 Wolframdraht-Ionenquellen in Massenspektrometern

In Massenspektrometern erzeugen Wolframdraht-Ionenquellen stabile Ionenströme für die molekulare Massenanalyse, wobei ihre hohe Temperaturbeständigkeit und Emissionsstabilität eine präzise Detektion ermöglicht. Bei der Umweltüberwachung analysieren Wolfram-Ionenquellen flü

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chtige organische Verbindungen (VOCs) in der Atmosphäre mit ppb-Empfindlichkeit und helfen so bei der Identifizierung von Schadstoffquellen. Im Bereich der Lebensmittelsicherheit erkennen sie Pestizidrückstände auf ng-Niveau, gewährleisten die Einhaltung von Sicherheitsstandards und beweisen ihre Zuverlässigkeit in wissenschaftlichen und industriellen Tests.

6.3.3 Beleuchtung und Display

6.3.3.1 Wolframelektroden in Hochdruckentladungslampen (HID)

HID-Lampen (z. B. Xenonlampen) verwenden Wolframelektroden für die Beleuchtung mit hoher Helligkeit, die in Automobil- und Projektionssystemen weit verbreitet sind. Sie arbeiten über 2.000 Stunden lang bei 2000 ° C und erreichen eine Helligkeit von bis zu 100 Lumen pro Watt. In Autoscheinwerfern ermöglichen Wolframelektroden einen schnellen Start und eine stabile Leistung, verbessern die Sichtbarkeit bei Nacht um 50 % und erhöhen die Fahrsicherheit. In Filmprojektoren sorgen sie für intensives Licht und sorgen für helle, farbgenaue Bilder.

6.3.3.2 Wolframdrahtfilamente in Glühlampen und Halogenlampen

In Glüh- und Halogenlampen sind Wolframdrahtfilamente für ihre Leistung und Haltbarkeit bei hohen Temperaturen bekannt. Halogenzyklen reduzieren die Wolframverdampfung und verlängern die Lebensdauer des Filaments auf Tausende von Stunden. In Premium-Halogenlampen arbeitet Wolfram bei 2600 ° C mit einer stabilen Farbtemperatur von 3200 K, was in der Studiobeleuchtung für weiches, kontinuierliches Licht weit verbreitet ist. In Haushaltsglühlampen unterstützt Wolfram eine längere Beleuchtung und ist nach wie vor eine klassische Wahl in der traditionellen Beleuchtung.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 Medizinische und wissenschaftliche Instrumente

Schnittfester Wolframdraht erfüllt mit seiner Präzision und Stabilität spezielle Anforderungen im medizinischen und wissenschaftlichen Bereich und wird häufig in chirurgischen Instrumenten und Analyseinstrumenten eingesetzt.

6.4.1 Chirurgische Instrumente

6.4.1.1 Wolframdrahtelektroden in der Elektrochirurgie

In der Elektrochirurgie schneiden und koagulieren schnittfeste Wolframdrahtelektroden Gewebe mit hoher Festigkeit und Temperaturbeständigkeit und sorgen so für präzise, effiziente Abläufe, oft in der Tumorresektion und Herzchirurgie. Bei der Entfernung von Leberkrebs trennen Wolframelektroden das Gewebe unter hochfrequentem Strom, wodurch das Trauma um 30 % und die Erholungszeit um 20 % reduziert wird. Ihre glatten Oberflächen minimieren die Gewebeadhäsion und erhöhen die Sicherheit. In der koronaren Bypass-Chirurgie ermöglichen sie eine präzise Handhabung von Mikrogefäßen und reduzieren so das Blutungsrisiko erheblich.

6.4.1.2 Hochpräzises Schneiden von Drähten in der minimalinvasiven Chirurgie

In der minimal-invasiven Chirurgie dient Wolframdraht als Schneidlinie für die Neurochirurgie und Ophthalmologie, da er mit seinem feinen Durchmesser und seiner Korrosionsbeständigkeit bei komplexen Eingriffen hervorragend ist. Bei der Kataraktchirurgie teilt Wolframdraht trübe Linsen und verkürzt die Operation auf 10 Minuten mit einer Schwiederherstellungsrate von 95 %. In der Neurochirurgie erzeugt es Mikroschnitte im Hirngewebe mit einer Genauigkeit von 0,1 mm, um Schäden an gesunden Bereichen zu vermeiden und minimalinvasive Techniken zu unterstützen.

6.4.2 Analytische Instrumente

6.4.2.1 Wolframdrahtdetektoren in Massenspektrometern

In Massenspektrometern bieten Wolframdrahtdetektoren eine hohe Temperaturbeständigkeit und ein schnelles Ansprechverhalten für eine präzise Analyse. In der Arzneimittelentwicklung weisen sie Metaboliten im Pikogramm-Bereich nach und helfen so bei der Identifizierung von Stoffwechselwegen. In der Geologie unterstützen sie die Isotopenanalyse (z. B. Uran-Blei-Verhältnisse in Gesteinen) mit einer Genauigkeit von 0,01 % und liefern zuverlässige Daten für die Bestimmung des Erdalters, was sie zu einer Kernkomponente in analytischen Bereichen macht.

6.4.2.2 Hochtemperatur-Probenhalter aus Wolframdraht in thermogravimetrischen Analysatoren

In thermogravimetrischen Analysatoren arbeiten Wolframdraht-Probenhalter bei 2500 ° C mit hoher Belastbarkeit und Massenstabilität, was eine genaue Hochtemperaturprüfung gewährleistet. In Polymerpyrolysestudien erhitzen sie Proben auf 2000 ° C, zeichnen Gewichtsverlustkurven mit einer Abweichung von <0,5 % auf und analysieren die thermische Stabilität. In der keramischen Forschung und Entwicklung unterstützen sie Hochtemperatur-Sinterproben, wobei die Ergebnisse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Leistungstests zu 98 % mit den theoretischen Werten übereinstimmen.

6.4.3 Biomedizinische Forschung

6.4.3.1 Wolframdrahtelektroden in der Zellelektroporation

Bei der Zellelektroporation zur Gentransfektion verwenden Wolframdrahtelektroden Hochspannungsimpulse, um Zellmembranen zu durchdringen, wobei ihre Leitfähigkeit und Stabilität wiederholte Experimente unterstützen. Bei der CRISPR-Geneditierung erreichen sie eine Transfektionseffizienz von 85 % und steigern so den Erfolg der Geninsertion. In der Stammzellforschung verarbeiten sie große Zellchargen, verbessern die Konsistenz um 20 % und unterstützen so die regenerative Medizin.

6.4.3.2 Wolframdraht-Mikroelektroden-Arrays in den Neurowissenschaften

In den Neurowissenschaften zeichnen Wolframdraht-Mikroelektrodenarrays neuronale Signale mit hoher Präzision und geringem Rauschen auf, wobei ihre feine Größe die Aufzeichnung einzelner Neuronen in tiefem Hirngewebe ermöglicht. In Studien an der Mausrinde erfassen sie Entladungssignale mit einer um 20 % verbesserten Auflösung, was Lern- und Gedächtnismechanismen aufklärt. In Versuchen mit menschlichen Gehirn-Computer-Schnittstellen zeichnen sie Signale des motorischen Kortex für die Steuerung des Roboterarms mit einer Genauigkeit von 90 % auf und fördern so die Neurorehabilitation.



6.5 Unterstützung bei der industriellen Fertigung und Verarbeitung

Schnittfester Wolframdraht verbessert die Verarbeitungseffizienz und die Haltbarkeit von Bauteilen in der industriellen Fertigung, in der Textilien, in der Lebensmittelverarbeitung und in Glas/Keramik.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5.1 Textilien und Papierherstellung

6.5.1.1 Verschleißfeste Wolframdrahtführungen in Textilmaschinen

In Textilmaschinen reduzieren Wolframdrahtführungen durch ihre Härte und Verschleißfestigkeit den Faserreibungsverlust. In Hochgeschwindigkeitswebstühlen (5.000 U/min) verhindern ihre glatten Oberflächen das Verheddern und Brechen von Fasern. In der Baumwollspinnerei halten sie über 1.000 Stunden, wodurch die Ausfallzeiten um 50 % reduziert und die Glätte des Gewebes verbessert wird. In der Wollspinnerei reduzieren sie Grate und verbessern so die hochwertige Textilqualität.

6.5.1.2 Hilfskomponenten aus Wolframdraht in Papierherstellungsmaschinen

In Papierherstellungsmaschinen arbeiten Wolframdrahtkomponenten (z. B. Führungsringe) unter nassen, heißen Bedingungen stabil und mit hoher Korrosionsbeständigkeit. In Hochgeschwindigkeitsmaschinen verbessern sie die Ebenheit des Papiers auf 99 % und reduzieren verschleißbedingte Ausfallzeiten. Bei der Herstellung von Zeitungsdruckpapier halten sie ihre Leistung über sechs Monate aufrecht und reduzieren die Wartungshäufigkeit um 30 %. In der Kunstdruckpapierherstellung sorgen sie für makellose Oberflächen für den Premiumdruck.

6.5.2 Lebensmittelverarbeitung

6.5.2.1 Korrosionsbeständiger Wolframdraht in Lebensmittelschneidlinien

In der Lebensmittelverarbeitung bieten Wolframdraht-Schneideanlagen Korrosionsbeständigkeit und Präzision beim Schneiden von Fleisch, Käse und Gemüse. Sie arbeiten zuverlässig unter sauren oder feuchten Bedingungen und sorgen für gleichmäßige Schnitte. In automatisierten Schneidemaschinen schneiden sie 200 Fleischscheiben pro Minute mit gleichmäßiger Dicke und einer Ausbeute von 98 %, was die Effizienz steigert. Bei der Käseherstellung schaffen sie komplexe Formen, reduzieren den Abfall um 10 % und erfüllen gleichzeitig die Anforderungen an Verpackung und Ästhetik.

6.5.2.2 Wolframdraht-Heizelemente in Hochtemperatur-Backanlagen

In Hochtemperatur-Backanlagen sorgen Wolframdraht-Heizelemente für gleichmäßige Wärmefelder für die Lebensmittelproduktion im industriellen Maßstab, wobei ihre Temperaturbeständigkeit eine langfristige Zuverlässigkeit gewährleistet. In Brotproduktionslinien behalten sie eine konsistente Textur mit minimaler Temperaturabweichung bei und verbessern die Effizienz um 15 %. Bei der Fleischpökelerung arbeiten sie bei 2000 ° C, was die Verarbeitung um 20 % beschleunigt und die Kapazität erhöht.

6.5.3 Glas- und Keramikverarbeitung

6.5.3.1 Hochfester Wolframdraht beim Schneiden von Glas

Beim Schneiden von Glas unterstützt die Festigkeit des Wolframdrahts die Verarbeitung von dicken Blechen und der Präzisionsverarbeitung, die in optischem und architektonischem Glas verwendet

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden. Er schneidet 10 mm dickes Glas mit glatten, rissfreien Kanten. In der Smartphone-Bildschirmproduktion verarbeitet sie 1.000 Stück pro Stunde mit einer Fehlerquote von <2 % und erfüllt damit die Anforderungen an die Touchscreen-Qualität. In Vorhangfassadenglas sorgt es für präzises Schneiden in großem Maßstab und verbessert die Installationseffizienz.

6.5.3.2 Wolframdraht zum Schneiden und Bohren von keramischen Substraten

Bei der Verarbeitung von keramischen Substraten schneidet Wolframdraht Materialien mit hoher Härte (z. B. Siliziumnitrid) mit glatten Kanten und langer Lebensdauer. In der Elektronik bohrt es 0,1-mm-Löcher in 5G-Keramiksubstrate und erfüllt so die Anforderungen an hochfrequente Signale. In keramischen Teilen aus der Luft- und Raumfahrt schneidet es komplexe Formen wie Beschichtungssubstrate für Turbinenschaufeln und erreicht dabei hohe Temperatur- und Festigkeitsstandards, was seinen Wert in der fortschrittlichen Keramikverarbeitung unterstreicht.

6.6 Energie- und Umwelthanwendungen

Schnittfester Wolframdraht unterstützt die effiziente Ressourcennutzung und den Umweltschutz in Energie- und Umweltbereichen, einschließlich Kernenergie, erneuerbare Energien und Abfallwirtschaft.

6.6.1 Kernenergie

6.6.1.1 Steuerkomponenten aus Wolframdraht in Kernreaktoren

In Kernreaktoren regulieren Wolframdraht-Steuerkomponenten den Neutronenfluss mit ihrer hohen Temperatur- und Strahlungsbeständigkeit und arbeiten bei 2500 ° C mit minimalem Festigkeitsverlust für eine präzise Steuerung. In schnellen Neutronenreaktoren erhöhen sie die Stabilität des Neutronenflusses über Jahre um 10 % und erhöhen so die Sicherheit. In gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren halten sie über fünf Jahre lang Strahlung und thermischer Belastung stand und dienen als kritische Unterstützung.

6.6.1.2 Wolframdrahtgeflecht in der Strahlenabschirmung

Wolframdrahtgeflecht mit seiner hohen Dichte schirmt Strahlung ab und schützt so Personal und Ausrüstung. Drähte mit feinem Durchmesser bilden leichte, effiziente Netze. In der Nuklearmedizin blockieren sie über 90 % der Gammastrahlen und sind damit 20 % leichter als Blei. Bei der Lagerung von nuklearen Abfällen reduzieren sie als Schutzschichten Leckagen und gewährleisten so die Umweltsicherheit.

6.6.2 Erneuerbare Energien

6.6.2.1 Schneiden von Wolframdraht bei der Herstellung von Solarzellen

In der Solarzellenproduktion schneidet Wolframdraht Siliziumwafer und unterstützt so den Wirkungsgrad der Photovoltaik. Seine Verschleißfestigkeit sorgt für einen stabilen, ergiebigen Schnitt. Beim Schneiden von monokristallinen Silizium-Barren werden 600 Wafer pro Stunde verarbeitet, wodurch die Kosten durch präzise Dickenkontrolle um 15 % gesenkt werden. In Dü

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nnschichtsolarzellen verbessert es die Substratkonsistenz um 10 % und fördert so die Einführung erneuerbarer Energien.

6.6.2 Verschleißfeste Wolframdrahtbauteile in Windkraftanlagen

In Windkraftanlagen sind Wolframdrahtkomponenten verschleißfest für einen langfristigen Betrieb und zeichnen sich unter rauen Bedingungen aus. In Offshore-Windparks ertragen sie Sand und Salznebel in Rotorblattverstellmechanismen, die über 10 Jahre halten. An Land verlängern sie die Wartungszyklen auf fünf Jahre und verbessern so die Zuverlässigkeit.

6.6.3 Abfallwirtschaft

6.6.3.1 Heizelemente aus Wolframdraht in Hochtemperatur-Verbrennungsanlagen

In Hochtemperatur-Verbrennungsanlagen ermöglichen Wolframdraht-Heizelemente eine effiziente Abfallentsorgung, indem sie bei 2500 ° C für eine gründliche Verbrennung bei der Verarbeitung von medizinischen und industriellen Abfällen arbeiten. Bei der Verbrennung medizinischer Abfälle erreichen sie einen Wirkungsgrad von >90 % und senken die Emissionen um 50 %. Bei gefährlichen chemischen Abfällen erhöhen sie die Kapazität um 20 % und zeigen damit einen ökologischen Nutzen.

6.6.3.2 Wolframdrahtelektroden in der Abwasseraufbereitung

In der Abwasseraufbereitung widerstehen Wolframdrahtelektroden der Korrosion bei der Elektrolyse und entfernen Schwermetalle und organische Schadstoffe. In industriellen Abwässern reinigen sie bleikontaminiertes Wasser mit einem Wirkungsgrad von 98 %. Im kommunalen Abwasser entfernen sie Ammoniumstickstoff mit langer Lebensdauer, senken die Kosten und unterstützen das Wasserrecycling.

6.7 Verteidigung und Sicherheit

Schnittfester Wolframdraht erfüllt mit seiner hohen Dichte und Festigkeit extreme Anforderungen in den Bereichen Verteidigung und Sicherheit und erstreckt sich über panzerbrechende Materialien bis hin zur Sensorik und Kommunikation.

6.7.1 Panzerbrechende Materialien

6.7.1.1 Wolframdrahtverstärkte Verbundpanzerung

Die mit Wolframdraht verstärkte Verbundpanzerung widersteht mit ihrer Dichte und Schlagfestigkeit Hochgeschwindigkeitsprojektilen, die in Panzern und gepanzerten Fahrzeugen verwendet werden. Seine Zähigkeit absorbiert Aufprallenergie und erhöht so die Haltbarkeit. In Kampfpanzern erhöht er den Schutz gegen panzerbrechende Geschosse um 30 % und reduziert das Gewicht um 10 %. In Leichtfahrzeugen unterstützt es modulare Bauweisen, die Mobilität und Sicherheit in Einklang bringen.

6.7.1.2 Panzerbrechende Projektilkerne auf Wolframdrahtbasis

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auf Wolframdraht basierende Projektilkerne bieten eine hohe Härte und Durchschlagskraft für Panzerabwehrwaffen, wobei ihre Dichte die kinetische Energie erhöht. In 125-mm-Panzergeschützen durchdringen sie 500-mm-Stahlplatten mit einer Trefferquote von >90 %. In tragbaren Panzerabwehrwaffen ermöglichen sie kompakte Designs mit robuster Durchschlagskraft, die auf modernen Schlachtfeldern von entscheidender Bedeutung sind.

6.7.2 Erfassen und Erkennen

6.7.2.1 Wolframdrahtkomponenten in Hochtemperatursensoren

In Hochtemperatursensoren bieten Wolframdrahtkomponenten eine schnelle Reaktion und Langlebigkeit für die Überwachung extremer Umgebungen. Bei der Erprobung von Raketentriebwerken messen sie die Temperatur in <0,1 Sekunden mit hoher Genauigkeit. In vulkanischen Studien zeichnen sie Temperaturänderungen von Lava bei 2000 ° C auf, was die Vorhersage von Eruptionen unterstützt und ihren Wert für eine zuverlässige Erfassung zeigt.

6.7.2.2 Wolframdrahtauslöser in Sprengstoffdetektionsgeräten

Bei der Sprengstoffdetektion bieten Wolframdrahtauslöser Festigkeit und Stabilität für eine schnelle Detektion. Auf Flughäfen erkennen sie TNT-Spuren im ppm-Bereich mit <1 % falsch positiven Ergebnissen. In Kampfgebieten ermöglichen sie tragbare Detektoren mit kurzen Auslösezeiten, was die Effizienz und Sicherheit erhöht.

6.7.3 Kommunikationsgeräte

6.7.3.1 Hochtemperatur-Wolframdraht in militärischen Kommunikationsantennen

In militärischen Antennen hält Wolframdraht hohen Temperaturen für die Signalübertragung unter extremen Bedingungen stand. Im Wüstenbetrieb arbeiten sie über fünf Jahre lang bei 1500 ° C mit geringen Fehlerquoten. In Drohnen in großer Höhe widerstehen sie Windlasten und sichern so den Erfolg der Mission.

6.7.3.2 Reflektornetze aus Wolframdraht in der Satellitenkommunikation

In der Satellitenkommunikation verbessern Reflektornetze aus Wolframdraht die Signalqualität mit hoher Dichte und Reflexionsvermögen. Feine Drähte bilden leichte, effiziente Netze. In geosynchronen Satelliten erhöhen sie die Signalverstärkung um 10 dB und unterstützen HD-Video. In der Kommunikation im Weltraum halten sie Strahlung stand und unterstützen interstellare Missionen.

Tabelle 6.1 Überblick über die Anwendungsbereiche von schnittfestem Wolframdraht

Feld	Teilfeld	Typische Anwendung	Leistungsmerkmale	Vorteile
Draht Schneiden	EDM	Formen, Turbinenschaufeln	Hohe Festigkeit, Leitfähigkeit	Hohe Präzision, lange Lebensdauer
Draht	Diamant-	Siliziumwafer,	Verschleißfestigkeit,	Hohe Ergiebigkeit,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schneiden	Drahtsäge	Stein	Zähigkeit	großer Schnittbereich
Hochtemperatur-Komponenten	Heizelemente	Hochtemperatur-Öfen	Hohe Wärmeleitfähigkeit, Durchhangfestigkeit	Gleichmäßiges Wärmefeld, Langlebigkeit
	Thermisches Spritzen/Schweißen	WIG-Schweißen	Hoher Schmelzpunkt, Emissionseffizienz	Hochwertige Schweißnähte, lange Lebensdauer
	Luft- und Raumfahrt	Raketen-Düsen	Hohe Festigkeit bei hoher Temperatur	Hält Mehrfachzündungen stand
Elektronik	Elektronenstrahl/Röntgen	Röntgenröhren	Hohe Emission, Hitzebeständigkeit	Klare Bildgebung, tiefe Schweißnähte
	Vakuum-Austrüstung	Verdunstungsschiffen	Niedriger Dampfdruck, Gleichmäßigkeit	Effiziente Beschichtung
	Beleuchtung/Display	HID-Lampen	Hohe Helligkeit, Korrosionsbeständigkeit	Lange Lebensdauer, stabile Leistung
Medizinisch/Wissenschaftlich	Chirurgische Instrumente	Minimalinvasive Chirurgie	Hohe Präzision, Korrosionsbeständigkeit	Minimales Trauma, hohe Sicherheit
	Analytische Instrumente	Massenspektrometer	Hohe Empfindlichkeit, Stabilität	Präzise Detektion
	Biomedizinische Forschung	Elektroporation	Spannungsstabilität, lange Lebensdauer	Hohe Transfektionseffizienz
Industrielle Fertigung	Textilien/Papierherstellung	Faden-Leitfäden	Verschleißfestigkeit, glatte Oberfläche	Geringer Ausfall, hohe Ebenheit
	Lebensmittelverarbeitung	Schneiden von Linien	Säurebeständigkeit, Präzision	Gleichbleibende Leistung
	Glas/Keramik	Schneiden von Glas	Hohe Festigkeit, Langlebigkeit	Hohe Verarbeitungseffizienz
Energie/Umwelt	Kernenergie	Steuerungskomponenten	Strahlungsbeständigkeit, hohe Dichte	Lange Lebensdauer, effektive Abschirmung
	Erneuerbare Energie	Schneiden von Siliziumwafern	Verschleißfestigkeit, hohe Ergiebigkeit	Kosteneffizient
	Abfallwirtschaft	Verbrennungsöfen	Hochtemperaturbeständigkeit, Effizienz	Geringe Emissionen
Verteidigung/Sicherheit	Panzerbrechend	Projektil-Kerne	Hohe Härte, Eindringtiefe	Starker Schutz
	Erfassung/Detektion	Hochtemperatur-Sensoren	Schnelle Reaktion, hohe Genauigkeit	Hohe Zuverlässigkeit
	Kommunikationen	Reflektor-Netze	Hohes Reflexionsvermögen, Hitzebeständigkeit	Überlegene Signalqualität

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm^3)	19.3
Tensile Strength (N/mm^2)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatungsten".

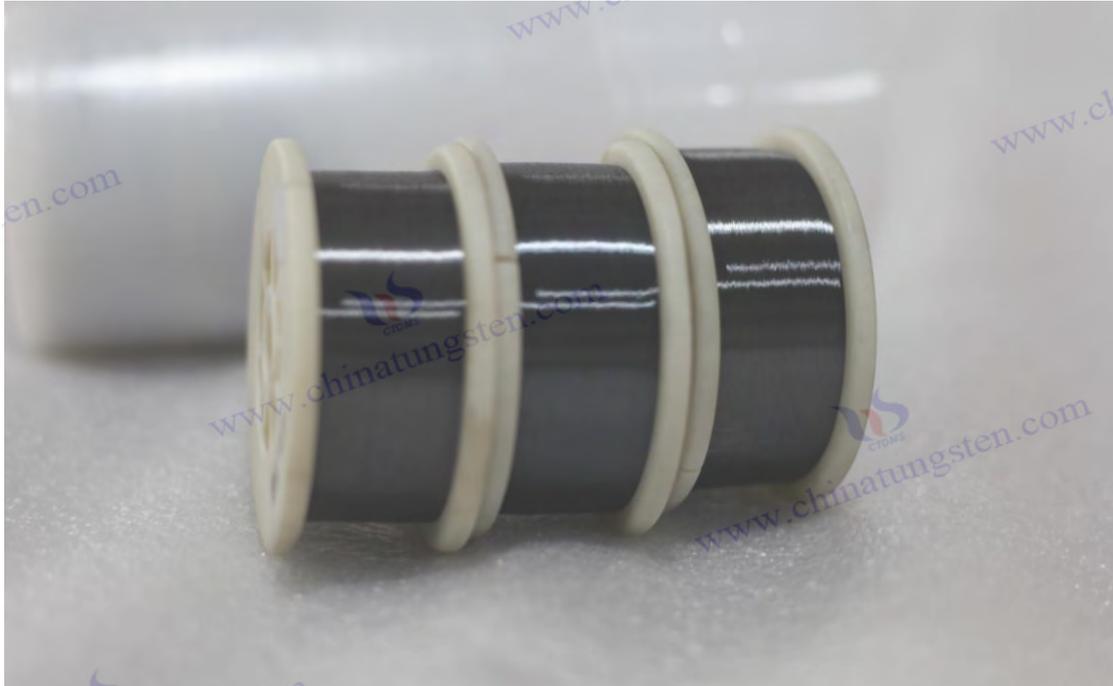


COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 7: Fortgeschrittene Themen und zukünftige Trends bei schnittfestem Wolframdraht

7.1 Nanotechnologie und Wolframdraht

Der rasante Fortschritt der Nanotechnologie hat schnittfesten Wolframdraht wiederbelebt, wobei die einzigartigen Eigenschaften von nanoskaligem Wolframdraht enorme Perspektiven in High-Tech-Bereichen eröffnen.



7.1.1 Herstellung und Eigenschaften von nanoskaligem Wolframdraht

Nanoskaliger Wolframdraht bezieht sich auf Wolframdraht mit Durchmessern von 1 bis 100 Nanometern, der hauptsächlich mit fortschrittlichen Techniken wie chemischer Gasphasenabscheidung (CVD), elektrochemischer Abscheidung oder Hochenergie-Kugelfräsen in Kombination mit Glühen hergestellt wird. Im Vergleich zu herkömmlichem Wolframdraht im Mikrometerbereich weisen nanoskalige Versionen aufgrund der reduzierten Korngröße eine deutlich höhere Oberflächenenergie und mechanische Festigkeit auf, während sie eine hervorragende Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit im mikroskopischen Maßstab beibehalten. Darüber hinaus bieten sie eine verbesserte Flexibilität und Ermüdungsbeständigkeit. Zum Beispiel weist nanoskaliger Wolframdraht, der über CVD hergestellt wurde, eine etwa 20 % höhere Bruchzähigkeit auf als Draht im Mikrometerbereich, was auf eine erhöhte Korngrenzdichte und eine effektive Fehlerkontrolle zurückzuführen ist, was ihn zu einem idealen Material für flexible elektronische Geräte macht. Bei der Vorbereitung ist es entscheidend, die Abscheidungs geschwindigkeit von Wolframvorläufern (z. B. WF_6) und die Glüh temperature genau zu steuern. Studien zeigen, dass das Glühen bei 800-1000 °C eine stabile Einkristallstruktur bildet, die die Leistung bei hohen Temperaturen weiter verbessert. Die hohe Oberflächenreaktivität von nanoskaligem Wolframdraht macht ihn jedoch anfällig für die Oxidation zu WO_3 an der Luft, was die Lager- und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nutzungsbedingungen einschränkt.

Die aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Optimierung von Zubereitungsprozessen, um die Ausbeute und Konsistenz zu verbessern. So ermöglicht beispielsweise die plasmagestützte CVD (PECVD) die Abscheidung bei niedrigeren Temperaturen (ca. 600 °C), wodurch der Energieverbrauch und der Geräteverschleiß reduziert werden. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung von Kohlenstoffnanoröhren oder Graphen als Templates die Herstellung geordneter Wolframdrahtarrays, die die Leitfähigkeit um etwa 15 % erhöhen und den Weg für Hochleistungsleiter ebnen. Die mechanischen Eigenschaften von nanoskaligem Wolframdraht werden auch von der Kornorientierung beeinflusst, wobei eine kürzlich durchgeführte Röntgenbeugungsanalyse (XRD) darauf hindeutet, dass <110>orientierte Drähte in Zugversuchen eine größere Duktilität aufweisen, was eine theoretische Grundlage für die spätere Prozessauslegung bietet. Diese Fortschritte deuten darauf hin, dass die nanoskaligen Wolframdrahtvorbereitungstechniken ausgereift sind und eine solide Grundlage für ihre Anwendungen bilden.

Tabelle 7.1 Vergleich der Präparationsmethoden und Eigenschaften von nanoskaligem Wolframdraht

Zubereitungsart	Prozessbedingungen	Durchmesserbereich	Wichtige Leistungsverbesserung	Herausforderungen
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	WF ₆ Vorläufer, 800-1000°C Glühen	10-50 nm	Erhöhung der Bruchzähigkeit um 20 %	Oxidationsempfindlichkeit, hohe Kosten
PECVD	600 °C Niedertemperatur-Abscheidung	5-30 nm	Leitfähigkeit um 15 % gesteigert	Komplexe Anlagen, geringe Ausbeute
Elektrochemische Abscheidung	Elektrolytabcheidung, Raumtemperatur	20-80 nm	Erhöhte Flexibilität	Schlechte Konsistenz
Hochenergetisches Kugelfräsen + Glühen	Mechanisches Schleifen, 900°C Glühen	50-100 nm	Erhöhte Oberflächenenergie	Partikelagglomeration, komplexer Prozess

7.1.2 Anwendungsmöglichkeiten und Herausforderungen

Die potenziellen Anwendungen von nanoskaligem Wolframdraht erstrecken sich über flexible Elektronik, Energiespeicherung und Katalyse. In der flexiblen Elektronik kann es in leitfähige Netzwerke für tragbare Sensoren und Displays eingewoben werden, wobei seine hohe Flexibilität einen stabilen Betrieb bei wiederholtem Biegen gewährleistet. In intelligenten Geweben überwachen beispielsweise nanoskalige leitfähige Wolframdrahtschichten die Herzfrequenz und Temperatur in Echtzeit mit Reaktionszeiten unter 1 Millisekunde und einer Genauigkeit von ±0,5 %. In der Energiespeicherung ist es aufgrund seiner großen Oberfläche ein vielversprechendes Elektrodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien oder Superkondensatoren, das die Speicherdichte um 15 bis 30 % erhöht und die Laderaten verdoppelt. In der Katalyse ermöglichen seine photokatalytischen Eigenschaften die Wasserspaltung für die Wasserstoffproduktion, wodurch sich

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Wirkungsgrad im Vergleich zu herkömmlichen Wolframmaterialien verdoppelt und saubere Energietechnologien vorangebracht werden.

Sein Potenzial erstreckt sich auch auf biomedizinische und nanomechanische Systeme. In der Biomedizin kann oberflächenmodifizierter nanoskaliger Wolframdraht als Träger für die Verabreichung von Medikamenten dienen, da seine große Oberfläche eine größere Wirkstoffbeladung ermöglicht – z. B. für Chemotherapeutika in der Krebstherapie, wodurch die Freisetzungseffizienz um etwa 25 % verbessert wird. In nanomechanischen Systemen ist es aufgrund seiner hohen Festigkeit und Leitfähigkeit eine Kernkomponente für Mikroaktoren, wie z. B. den Antrieb winziger Roboterarme in Nanorobotern mit Submikron-Präzision. Die Herausforderungen sind jedoch nach wie vor erheblich. Hohe Vorbereitungskosten, die durch PECVD-Ausrüstung und Vorläuferkosten verursacht werden, behindern die Produktion in großem Maßstab. Darüber hinaus ist seine Stabilität in Hochtemperatur- oder oxidativen Umgebungen begrenzt, so dass antioxidative Beschichtungen oder Seltenerd-dotierung (z. B. Lanthan) erforderlich sind, um die Haltbarkeit zu verbessern. Die Umweltsicherheit ist ein weiteres Problem, da Nanopartikel durch Einatmen oder Hautkontakt Toxizitätsrisiken darstellen können. Jüngste Studien deuten auf eine Oberflächenpassivierung hin, um die Bioaktivität zu reduzieren. Die Bewältigung dieser Probleme durch Materialdesign, Prozessoptimierung und Sicherheitsbewertungen ist entscheidend für den Übergang von nanoskaligem Wolframdraht vom Labor in die Industrie.

Tabelle 7.2 Mögliche Anwendungen und technische Herausforderungen von nanoskaligem Wolframdraht

Anwendungsbereich	Typische Anwendung	Leistungsvorteil	Technische Herausforderungen	Lösungen
Flexible Elektronik	Tragbare Sensoren	Reaktionszeit <1 ms	Hohe Vorbereitungskosten	Optimierung des PECVD-Prozesses
Energiespeicherung	Elektroden für Li-Ionen-Batterien	Erhöhung der Speicherdichte um 15 % auf 30 %	Schlechte Stabilität bei hohen Temperaturen	Doping von Seltenen Erden
Katalyse	Photokatalytische Wasserstoffproduktion	Doppelte Effizienz	Oxidationsempfindlichkeit	Antioxidative Beschichtungen
Biomedizinisch	Träger für die Verabreichung von Medikamenten	Steigerung der Freisetzungseffizienz um 25 %	Mögliche Toxizität	Oberflächenneutralisierung
Nanomechanik	Mikro-Aktuatoren	Submikron-Präzision	Schlechte Konsistenz	Vorlagengestützte Aufbereitung

7.2 Verbundwerkstoffe und Beschichtungstechnologien

Fortschritte bei Verbundwerkstoffen und Beschichtungstechnologien bieten eine robuste Unterstützung für die Optimierung der Leistung von schnittfestem Wolframdraht und erweitern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

seine Anwendungen unter extremen Bedingungen.

7.2.1 Wolframdrahtverstärkte Verbundwerkstoffe

Wolframdrahtverstärkte Verbundwerkstoffe betten schnittfesten Wolframdraht in Keramik-, Metall- oder Polymermatrizen ein und verbessern so die Gesamtmaterialeigenschaften erheblich. Die hohe Festigkeit und Zähigkeit des Drahtes kompensiert die Sprödigkeit bzw. die niedrigen Temperaturgrenzen der Matrix. Bei wolframdrahtverstärkten Keramikmatrix-Verbundwerkstoffen (CMCs) erhöht der Draht beispielsweise die Bruchzähigkeit um 30 % bis 50 % und erhöht die Temperaturgrenze auf über 2000 °C. Dieses Material eignet sich hervorragend für die Luft- und Raumfahrt, z. B. für die Herstellung von Gasturbinenschaufeln, da es hohen Luftströmungen und thermischen Belastungen mit einer doppelt so hohen Lebensdauer wie herkömmliche Keramiken standhält. In Metallmatrix-Verbundwerkstoffen (MMCs) entstehen durch die Kombination von Wolframdraht mit Nickel- oder Titanbasislegierungen hochdichte und hochfeste Komponenten wie Steckverbinder für Triebwerke, die die Ermüdungsbeständigkeit um 40 % verbessern und das Gewicht um 10 % reduzieren.

Fortschritte bei den Präparationstechniken verbessern diese Composite weiter. Das heißisostatische Pressen (HIP) bei hohem Druck und hoher Temperatur (z. B. 200 MPa, 1800 °C) gewährleistet eine dichte Grenzflächenverbindung, reduziert die Porosität auf unter 1 % und erhöht die Zuverlässigkeit. Die Pulvermetallurgie mit Infiltration eignet sich für komplexe Formen, wie z. B. Raketendüsen, bei denen wolframdrahtverstärkte Wolframverbundwerkstoffe Gradientenstrukturen erreichen – hohe Temperaturbeständigkeit intern und Oxidationsbeständigkeit extern – und so eine ausgewogene Leistung erzielen. Thermische Ausdehnungsabweichungen zwischen Draht und Matrix können jedoch zu Grenzflächenspannungen und Mikrorissen führen. Neuere Studien schlagen vor, Übergangsschichten (z. B. Molybdän oder Niob) oder Gradientendotierung hinzuzufügen, um dies zu mildern. Bei wolframdrahtverstärkten Nickellegierungen reduziert beispielsweise eine Molybdän-Übergangsschicht das Risiko einer Grenzflächendelamination um 30 % und bietet Lösungen für hochzuverlässige Anwendungen. Diese Fortschritte signalisieren den Fortschritt hin zu höherer Leistung und breiterer Nutzung.

Tabelle 7.3 Matrixtypen und Leistungsverbesserungen bei wolframdrahtverstärkten Verbundwerkstoffen

Matrix-Typ	Typische Anwendung	Leistungssteigerung	Zubereitungs-technik	Grenzflächenoptimierung
Keramik (CMC)	Schaufeln von Gasturbinen	Bruchzähigkeit um 30 %-50 % erhöht	Heißisostatisches Pressen (HIP)	Gradienten-Doping
Metall (MMC)	Aero-Steckverbinder	Erhöhung der Ermüdungsbeständigkeit um 40 %	Pulvermetallurgie + Infiltration	Mo/Nb-Übergangsschicht
Polymer	Hochtemperatur-Dichtungen	Temperaturbeständigkeit bis 500°C	Heißpressen	Aktivierung der Oberfläche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.2 Leistungssteigerung durch Oberflächenbeschichtungen

Oberflächenbeschichtungstechnologien scheiden funktionale Schichten auf Wolframdraht ab und verbessern so die Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit erheblich. Zu den gängigen Beschichtungen gehören Wolframkarbid (WC), Wolframnitrid (WN) und Aluminiumoxid (Al₂O₃), die durch physikalische Gasphasenabscheidung (PVD), chemische Gasphasenabscheidung (CVD) oder Plasmaspritzen aufgetragen werden. So erhöhen beispielsweise WC-Beschichtungen über CVD die Verschleißfestigkeit um das 2-3-fache, ideal für Schneidwerkzeuge mit hoher Reibung. In der Luft- und Raumfahrt reduzieren WN-Beschichtungen den Oxidationsgewichtsverlust bei 1000 °C in Luft auf ein Zehntel des unbeschichteten Niveaus und verlängern so die Lebensdauer von Komponenten bei hohen Temperaturen. In medizinischen Anwendungen verbessert hydroxylapatitbeschichteter Wolframdraht die Biokompatibilität von Implantaten.

Jüngste Entwicklungen bei der Beschichtung fügen weitere Funktionen hinzu. In der Elektronik erhöhen Graphen-Beschichtungen, die über Van-der-Waals-Kräfte geklebt werden, die Leitfähigkeit um etwa 20 % bei gleichzeitiger Beibehaltung der Flexibilität, die für flexible Leiter geeignet ist. Studien zeigen, dass Graphen auch als thermische Barriere wirkt, indem es die Oberflächentemperaturgradienten bei 2000 °C um 15 % reduziert und so die Lebensdauer bei hohen Temperaturen verlängert. In der Schifffahrt verdoppeln Verbundbeschichtungen (z. B. WN+Ni) die Korrosionsbeständigkeit durch Salzsprühnebel und eignen sich für Tiefseeausrüstungen. Die Haftfestigkeit der Beschichtung und des Substrats muss jedoch verbessert werden, da die Delamination bei hohen Temperaturen anhält. Mehrschichtige Designs, wie z. B. WC-Basisschichten mit Al₂O₃-Deckschichten, reduzieren die Delamination durch Spannungspufferung um 40 %. Die Schichtdicke muss genau gesteuert werden (1-5 µm) – zu dick verringert die Flexibilität, zu dünn bietet unzureichenden Schutz. Diese Verbesserungen führen die Beschichtungstechnologie zu mehr Zuverlässigkeit und Multifunktionalität.

Tabelle 7.4 Auswirkungen von Oberflächenbeschichtungen auf die Leistung von Wolframdraht

Art der Beschichtung	Abscheidungs-methode	Leistungssteigerung	Anwendungsbereich	Technische Herausforderungen
Wolframkarbid (WC)	Herz-Kreislauf-Erkrankungen	Verschleißfestigkeit bis zum 2-3-fachen	Schneidwerkzeuge	Kontrolle der Dicke
Wolframnitrid (WN)	PVD	Oxidationsverlust um 90 % gesenkt	Luft- und Raumfahrt	Hochtemperatur-Delamination
Graphen	Van-der-Waals-Ablagerung	Leitfähigkeit um 20 % gesteigert	Flexible Elektronik	Haftfestigkeit
WN+Al ₂ O ₃ Mehrschichtig	CVD+PVD	Delamination um 40 % gesunken	Hochtemperatur-Komponenten	Komplexität des Prozesses

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3 Zukünftige Trends

Die Zukunft des schnittfesten Wolframdrahts wird von technologischer Innovation, Umweltaforderungen und interdisziplinären Anwendungen geprägt sein, was eine spannende Perspektive verspricht.

7.3.1 Entwicklung neuartiger Wolframdrahtwerkstoffe

Die Forschung an neuartigen Wolframdrahtmaterialien zielt darauf ab, die derzeitigen Leistungsgrenzen für extreme Umgebungen zu überschreiten. Die Dotierung ist ein wichtiger Schwerpunkt, wobei Seltenerdelemente (z. B. Lanthan, Cer) oder Übergangsmetalle (z. B. Rhenium, Molybdän) die Hochtemperaturfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit verbessern. Studien zeigen, dass Rhenium-dotierter Wolframdraht die Kriechraten bei 2500 °C um 50 % reduziert und damit neue Optionen für Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt bietet. Die Entwicklung von nanostrukturiertem Wolframdraht zielt auf kleinere Größen und höhere Leistung ab, wie z. B. selbstorganisierte poröse Wolframdrähte mit 2-3 mal größerer Oberfläche, ideal als Katalysatorträger.

Die Forschung an legiertem Wolframdraht schreitet voran. Wolfram-Molybdän-Rhenium-ternäre Legierungen vereinen den hohen Schmelzpunkt von Wolfram, die Duktilität von Molybdän und die Korrosionsbeständigkeit von Rhenium und verlängern die Lebensdauer der Ermüdung um 60 % gegenüber reinem Wolfram, mit Potenzial für die Kernfusion und Weltraumsonden. Die additive Fertigung (3D-Druck) revolutioniert die Wolframdrahtumformung. Beim Laser-Pulverbettenschmelzen (LPBF) werden komplexe Strukturen wie poröse Wolframdrahtgitter mit einer Porositätskontrolle von 10 % bis 30 % gedruckt, die für das Wärmemanagement geeignet sind. Hochentropie-Legierungen (HEAs) wie Wolfram-Niob-Molybdän-Tantal behalten ihre Festigkeit bei 2000 °C durch Multielementsynergie. Das Preis-Leistungs-Verhältnis bleibt eine Herausforderung – die Rohmaterialkosten für 3D-gedruckten Wolframdraht sind 50 % höher als bei herkömmlichen Zeichnungen, was eine Prozessoptimierung für die industrielle Einführung erfordert.

Tabelle 7.5 Entwicklungsrichtungen und Leistungsziele für neuartige Wolframdrahtwerkstoffe

Materialart	Entwicklungstechnik	Zielleistung	Anwendungsbereich	Aktueller Fortschritt
Rhenium-dotiertes Wolfram	Doping + Ziehung	Kriechrate um 50 % gesunken	Luft- und Raumfahrt	Kleinserienfertigung
Nanoporöses Wolfram	Selbstmontage + Glühen	Oberfläche bis 2-3x	Catalyst-Unterstützung	Labor-Validierung
W-MO-RE Legierung	Pulvermetallurgie	Erhöhung der Ermüdungslebensdauer um 60 %	Kernfusion	Leistungstests
3D-gedrucktes Wolfram	LPBF	Porosität 10%-30%	Thermisches Management	Prozessoptimierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.2 Nachhaltigkeit und Umweltaspekte

Nachhaltigkeit und Umwelanforderungen verändern die Wolframdrahttechnologie. Der Abbau und die Raffination von Wolfram sind energieintensiv und umweltschädlich und erfordern grüne Metallurgie wie die Biolaugung, bei der Mikroben zur Extraktion von Wolfram verwendet werden, wodurch der Chemikalienverbrauch und das Abwasser um ~70 % reduziert werden. Das Recycling und die Wiederverwendung von Wolframdraht haben Priorität, wobei durch Hochtemperaturschmelzen oder Säureauflösung bis zu 80 % des Drahtschrotts zurückgewonnen werden. Beim Drahtschneiden liegt die derzeitige Recyclingquote bei 30 %, aber die elektromagnetische Trennung und chemische Reinigung könnten diese auf 70 % erhöhen, wodurch der Bedarf an primärem Wolframabbau reduziert wird.

Die Kontrolle der Kohlenstoffemissionen in der Produktion ist von entscheidender Bedeutung. Die Nutzung erneuerbarer Energien (z. B. Sonne, Wind) für die Entnahme und Wärmebehandlung reduziert den CO₂-Fußabdruck um 40 % bis 50 %. Ein europäisches Wolframdrahtwerk mit 80 % solarbetriebener Produktion reduziert die CO₂-Emissionen um ~5.000 Tonnen pro Jahr. Am Ende der Anwendung ersetzen Alternativen mit geringer Toxizität wie Lanthan-dotierter Draht thoriumdotierten Draht, wodurch die Strahlenrisiken für den Einsatz in der Medizin und Elektronik minimiert werden. Ökobilanzen (LCA) zeigen, dass die Optimierung von Lieferketten und die Verlängerung der Lebensdauer die Umweltbelastung um 30 % reduzieren. Diese grünen Technologien erfordern politische Unterstützung und die Zusammenarbeit mit der Industrie für eine nachhaltige Entwicklung von Wolframdraht.

Tabelle 7.6 Nachhaltigkeitsverbesserungen und -effekte für Wolframdraht

Verbesserungsmaßnahme	Technik	Erwartete Wirkung	Herausforderung bei der Implementierung	Aktueller Stand
Grüne Metallurgie	Biolaugung	Abwasser um 70 % gesunken	Skalierung von Prozessen	Versuchsstadium
Recycling von Altdraht	Elektromagnetische Trennung + Reinigung	Recycling bis zu 70%	Hohe Kosten	Kleinräumiger Einsatz
Nutzung erneuerbarer Energien	Sonnenenergie	CO ₂ -Fußabdruck um 40% bis 50% gesunken	Hohe Anfangsinvestition	Teilweise Werksübernahme
Alternativen mit geringer Toxizität	Lanthan-Doping	Reduziertes Strahlenrisiko	Leistungsvalidierung	Schrittweise Einführung

7.3.3 Erforschung interdisziplinärer Anwendungen

Interdisziplinäre Anwendungen erweitern das Potenzial von Wolframdraht in aufstrebenden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bereichen. In der Biomedizin ist die Kombination von Wolframdraht mit Tissue Engineering – z. B. biologisch abbaubarer Draht mit Polymilchsäurebeschichtungen für temporäre Gefäßstents – vielversprechend. Studien deuten auf eine vollständige Degradation innerhalb von sechs Monaten hin, was die Regeneration der Schiffe unterstützt und langfristige Risiken reduziert. In der Quantentechnologie dient ultrafeiner Wolframdraht als Quantenleiter für Niedertemperaturverbindungen im Quantencomputing und übertrifft Kupfer mit 20 % geringeren Übertragungsverlusten bei 4K, z. B. in Qubit-Verbindungen.

Im Energiebereich könnte Wolframdraht der Kernfusion dienen, wie z. B. Plasmaeinschlusskomponenten im Internationalen Thermonuklearen Versuchsreaktor (ITER). Sein hoher Schmelzpunkt und seine Strahlungsbeständigkeit halten Plasmastößen von 5000 °C stand, wobei wolframdrahtverstärkte Verbundwerkstoffe die Lebensdauer bei Schmelzumgebungen um 50 % verlängern. In der intelligenten Fertigung entstehen durch die Integration von Wolframdraht mit Sensoren adaptive Schneidwerkzeuge, die Parameter basierend auf der Echtzeit-Verschleißüberwachung anpassen und die Effizienz um ~20 % steigern. Bei der Bearbeitung von Teilen in der Luft- und Raumfahrt passen adaptive Werkzeuge beispielsweise die Drahtgeschwindigkeit dynamisch an und reduzieren so den Bruch um 30 %. In der Weltraumforschung unterstützt Wolframdraht mit seiner Dichte und Hitzebeständigkeit thermische Schutzsysteme für Planetensonden wie Marslander, die mit seiner Dichte und Hitzebeständigkeit die strukturelle Integrität unter extremen Bedingungen gewährleisten. Diese Anwendungen erfordern eine tiefe Integration von Materialwissenschaft, Physik und Ingenieurwesen und treiben die Wolframdrahttechnologie auf ein neues Niveau.

Tabelle 7.7 Interdisziplinäre Anwendungsfelder und Leistungsschwerpunkte von Wolframdraht

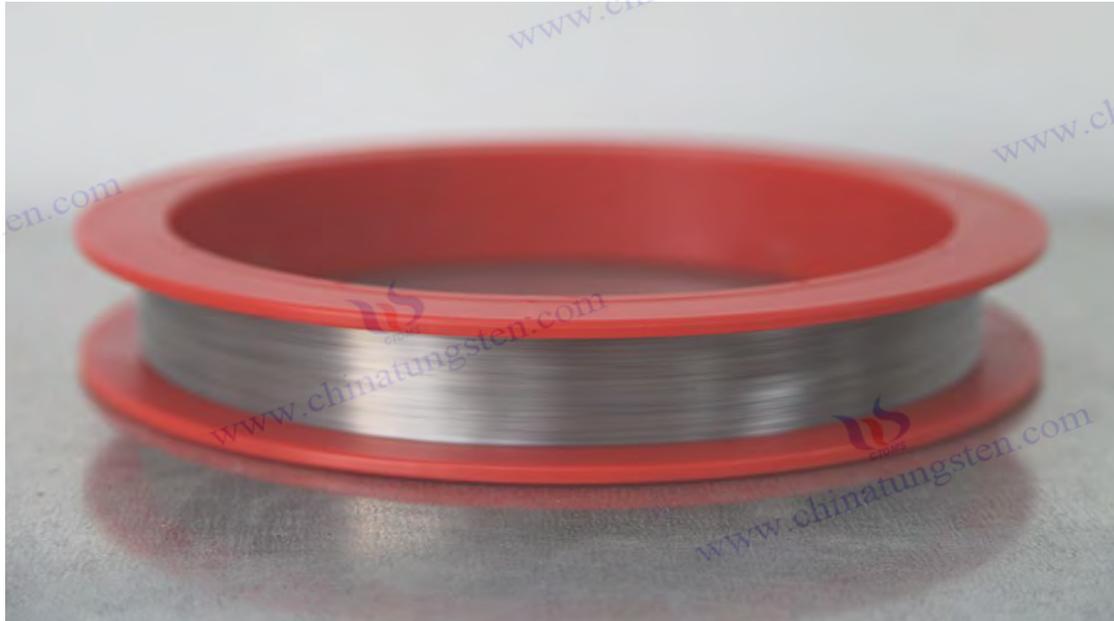
Anwendungsbereich	Typische Anwendung	Wichtigste Leistung	Technische Anforderungen	Entwicklungsphase
Biomedizinisch	Abbaubare Stents	Baut sich in 6 Monaten ab	Biokompatibilität	Forschung im Labor
Quantentechnologie	Quanten-Leiter	Verlust um 20 % bei niedrigen Temperaturen	Ultrafeine Größe	Erste Validierung
Kernfusion	Einschluss im Plasma	Lebenserwartung um 50 % gestiegen	Strahlungsbeständigkeit	Experimentelle Tests
Intelligente Fertigung	Adaptive Schneidwerkzeuge	Effizienzsteigerung um 20 %	Integration von Sensoren	Entwicklung von Prototypen
Raumforschung	Thermischer Schutz	Hohe Dichte, Hitzebeständigkeit	Strukturelle Optimierung	Konzeptentwurf

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 8: Wirtschaftliche und industrielle Analyse von schnittfestem Wolframdraht

8.1 Kostenanalyse

Als Hochleistungswerkstoff wirken sich die Produktionskosten und wirtschaftlichen Vorteile von schnittfestem Wolframdraht direkt auf seine Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt und seinen Anwendungsbereich aus.



8.1.1 Zusammensetzung der Produktionskosten

Die Herstellungskosten von schnittfestem Wolframdraht setzen sich in erster Linie aus Rohstoffen, Verarbeitungstechniken und Energieverbrauch zusammen. Wolframrohstoffe sind die zentrale Kostenkomponente.

Laut [den Daten von Chinatungsten Online](#) für das Jahr 2024 liegt der Durchschnittspreis für Wolframkonzentrat (65 % WO_3) bei etwa 137.000 RMB/Tonne, Ammoniumparawolframat (APT) bei durchschnittlich 203.000 RMB/Tonne und Wolframpulver bei etwa 304,5 RMB/kg. Berechnungen zeigen, dass Rohstoffe 40 % bis 50 % der Gesamtkosten von schnittfestem Wolframdraht ausmachen. Verarbeitungstechniken – einschließlich Pulvermetallurgie, Drahtziehen und Oberflächenbehandlung – tragen 25 % bis 30 % bei, wobei der Ziehprozess aufgrund mehrerer Durchgänge und Präzisionsformen (z. B. Diamantformen) kostspielig ist. Der Energieverbrauch, hauptsächlich durch Hochtemperaturesintern (2200-2500 °C) und Glühen, macht 15 bis 20 % der Gesamtkosten aus, wobei die Stromkosten in Regionen mit hohen Energiepreisen besonders hoch sind. Darüber hinaus erhöht der Einsatz von Dotierungselementen (z. B. Rhenium, Kalium) und funktionalen Beschichtungen (z. B. WW, WN) die Kosten weiter und führt zu einem zusätzlichen Kostenfaktor von 10 % bis 15 % bei der Herstellung von Hochleistungs-Wolframdraht.

Die Kostenkontrolle ist eine zentrale Herausforderung in der Produktion. So können beispielsweise

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch den Einsatz effizienter Sinteröfen und erneuerbarer Energien die Energiekosten um etwa 20 % gesenkt werden, während das Recycling von Wolframabfällen (Erhöhung der Rückgewinnungsraten auf 70 %) die Abhängigkeit von primärem Wolfram verringern und 15 % bis 25 % der Rohstoffkosten einsparen kann. Die Abschreibung von Anlagen und die Arbeitskosten dürfen jedoch nicht übersehen werden, insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen mit geringerem Automatisierungsgrad, wo diese indirekten Kosten 10 % der Gesamtkosten übersteigen können.

Insgesamt liegen die Produktionskosten für schnittfesten Wolframdraht je nach Spezifikationen und Leistungsanforderungen zwischen 450 und 1.100 RMB/kg. Die Kosten für hochleistungsfähige nanoskalige oder verbundstoffliche Wolframdrähte können sich verdoppeln und 1.500-2.200 RMB/kg erreichen. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Kostenkomponenten aufgeführt:

Tabelle 8.1 Zusammensetzung der Produktionskosten für schnittfesten Wolframdraht (Schätzung 2025)

Kostenkategorie	Proportionsbereich	Kosten/KG (RMB)	Einflussfaktoren
Wolfram-Rohstoffe	40%-50%	180-550	Wolframerzpreis, Versorgungsstabilität
Verarbeitungstechniken	25%-30%	110-330	Ziehdurchgänge, Werkzeugverschleiß
Energieverbrauch	15%-20%	70-220	Sintertemperatur, Energiepreise
Zusätzliche Materialien	10%-15%	50-165	Dotierungselemente, Beschichtungsart
Sonstiges (Abschreibungen usw.)	10%-15%	40-165	Anlagenautomatisierung, Arbeitskosten
Gesamt	100%	450-1.100 (Standard)	Hochleistungsprodukte: 1.500-2.200

Haftungsausschluss: Die Daten basieren auf Marktinformationen von China Tungsten Online 2024 und Trendprognosen für 2025, die aufgrund von Rohstoffpreisen, geopolitischen Faktoren und technologischen Veränderungen schwanken können. Nur als Referenz.

8.1.2 Abwägung von Kosten und Leistung

In der realen Produktion ist das Gleichgewicht zwischen Kosten und Leistung von zentraler Bedeutung für Geschäftsentscheidungen. Hochleistungs-Wolframdraht (z. B. Rhenium-dotiert oder nanostrukturiert) bietet eine überlegene Festigkeit, Verschleißfestigkeit und thermische Stabilität, wodurch die Lebensdauer und Effizienz des nachgelagerten Produkts erheblich verbessert wird, jedoch zu hohen Kosten. So kostet beispielsweise rheniumdotierter Wolframdraht etwa 1.500 bis 1.700 RMB/kg – 50 % bis 100 % mehr als Standarddraht – und verdoppelt dennoch die Lebensdauer von Hochtemperaturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt, wodurch indirekt die Wartungs- und Austauschkosten gesenkt werden. Umgekehrt eignen sich kostengünstige Optionen wie reiner Wolframdraht für weniger anspruchsvolle Anwendungen (z. B. allgemeines Drahtschneiden), verfügen jedoch nicht über die Haltbarkeit und Präzision, die für High-End-Märkte erforderlich sind.

Diese Balance zeigt sich auch in der Prozessoptimierung. Die Reduzierung von Ziehdurchgängen oder die Verfeinerung der Glühparameter kann die Verarbeitungskosten um 10 % bis 15 % senken,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kann jedoch die Durchmessertoleranz oder die Oberflächengüte beeinträchtigen und den Einsatz in Premium-Anwendungen einschränken. Unternehmen müssen diese Faktoren auf der Grundlage der Zielmärkte abwägen – z. B. priorisiert die Photovoltaikindustrie die Kostenkontrolle, während die Luft- und Raumfahrt den Schwerpunkt auf die Leistung legt.

8.2 Marktnachfrage und -angebot

Die Nachfrage- und Angebotsdynamik von schnittfestem Wolframdraht wird durch den technologischen Fortschritt, den industriellen Vertrieb und die globalen Wirtschaftsbedingungen beeinflusst und weist sich entwickelnde Trends auf.

8.2.1 Trends der globalen Marktnachfrage

Die Nachfrage nach schnittfestem Wolframdraht stammt vor allem aus der Luft- und Raumfahrt, der Elektronikfertigung, der Photovoltaik und der Medizintechnik. Bis 2025 wird die weltweite Nachfrage voraussichtlich 5.000 bis 6.000 Tonnen pro Jahr erreichen, was einem Anstieg von 30 % gegenüber 2020 entspricht, mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 5 % bis 7 %. Die Luft- und Raumfahrt ist mit 25 % bis 30 % der Nachfrage der größte Treiber, da sie auf hochtemperatur- und verschleißfeste Materialien angewiesen ist – z. B. verbraucht die Produktion von Raketendüsen und Turbinenschaufeln jährlich ~1.500 Tonnen. Die Photovoltaikindustrie folgt mit 20%-25%, angetrieben durch das schnelle Wachstum beim Schneiden von Solarzellen-Siliziumwafern, wobei das Schneiden von monokristallinen Siliziumbarren jährlich ~1.200 Tonnen erfordert. Die Elektronikfertigung und medizinische Geräte tragen jeweils 15 bis 20 % bei, was auf die steigende Nachfrage nach nanoskaligem Draht in flexibler Elektronik und minimalinvasiven chirurgischen Instrumenten zurückzuführen ist.

Technologische Innovationen kurbeln die Nachfrage weiter an. Zum Beispiel erhöhen 5G-Geräte den Bedarf an präzisiertem Schneiden von Keramiks substraten, was zu einem jährlichen Anstieg der Nachfrage nach Wolframdraht für Diamantdrahtsägen um 10 % bis 15 % führt. Regional dominiert der asiatisch-pazifische Raum (insbesondere China) mit über 50 % der weltweiten Nachfrage, dank seiner Photovoltaik- und Elektronik-Hubs; 25 % bzw. 20 % entfallen auf Nordamerika und Europa, wobei der Schwerpunkt auf High-End-Anwendungen liegt. Mit Blick auf die Zukunft dürften das Wachstum der intelligenten Fertigung und der erneuerbaren Energien die Nachfrage in die Höhe treiben, insbesondere in den Schwellenländern (z. B. Indien, Südostasien), wo das Nachfragewachstum bis 2030 10 % übersteigen könnte.

8.2.2 Lieferkette und Schlüsselproduzenten

Die Lieferkette für schnittfesten Wolframdraht wird von China dominiert, das über 80 % des weltweiten Angebots produziert. China Tungsten Intelligent Manufacturing (CTIA GROUP), mit fast 30 Jahren Erfahrung in der Wolfram-Molybdän-Industrie, ist auf die flexible globale Anpassung von Wolfram-Molybdän-Produkten spezialisiert und passt Spezifikationen, Leistung, Abmessungen und Qualitäten an die Kundenbedürfnisse an. Bei Fragen zum Kauf oder zur Anpassung von Wolframdraht, einschließlich detaillierter Informationen, Markttrends und aktueller Preise, wenden Sie sich an die CTIA GROUP. Besuchen Sie unsere professionelle Wolframdraht-Website, um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

weitere Einblicke und Produktdetails zu erhalten.

8.3 Industrielle Herausforderungen und Chancen

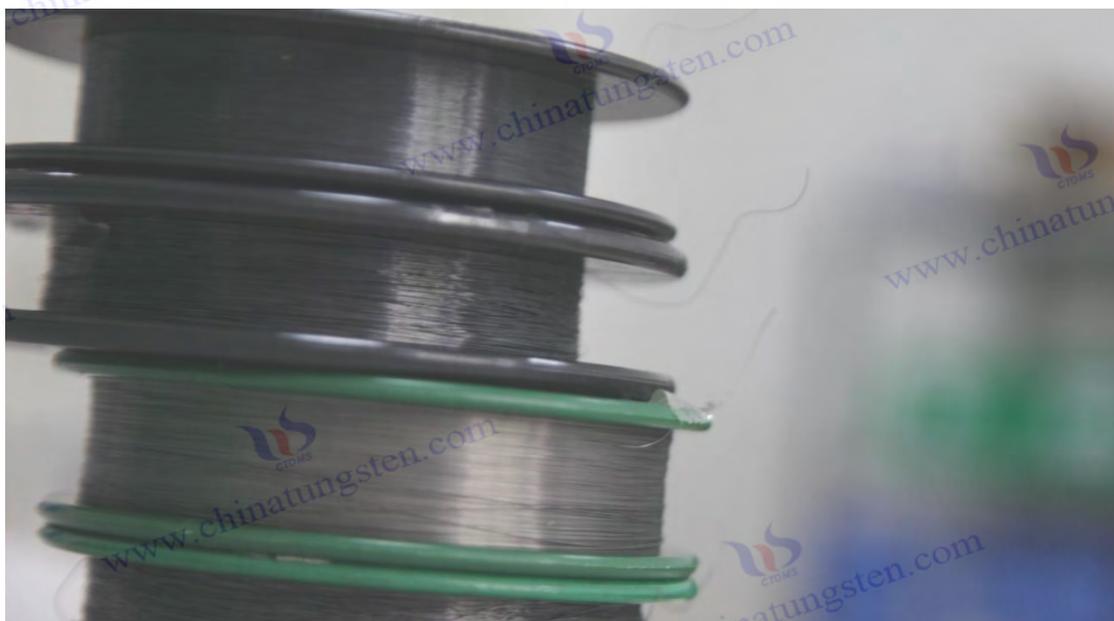
Die Industrie für schnittfeste Wolframdrähte steht angesichts des rasanten Wachstums sowohl vor Herausforderungen als auch vor Chancen.

8.3.1 Herausforderungen im Technologie- und Marktwettbewerb

Technische Hindernisse schrecken neue Marktteilnehmer ab, da die Herstellung von Wolframdraht im Nanomaßstab kostspielige Geräte (z. B. PECVD-Systeme mit Kosten von über 7 Mio. RMB) und Zertifizierungen (z. B. AMS-Standards) erfordert. Die Gewinnmargen des Low-End-Marktes sind aufgrund des Wettbewerbs auf 5 % bis 8 % gesunken, während der High-End-Markt von einigen wenigen Giganten dominiert wird. Umweltvorschriften treiben die Kosten in die Höhe, wobei Chinas Compliance-Ausgaben bis 2025 voraussichtlich um 15 bis 20 % steigen werden. Die Abhängigkeit der Lieferkette von China in Verbindung mit den Exportbeschränkungen für 2024 hat die globalen Rohstoffpreise um 10 % bis 15 % erhöht, was sich auf die Stabilität auswirkt.

8.3.2 Chancen und Zukunftsaussichten

Technologische Fortschritte bieten Chancen – z. B. senkt 3D-gedruckter Wolframdraht die Kosten für komplexe Komponenten um 30 % und erschließt so neue Märkte. Grüne Metallurgie (z. B. Biolaugung) könnte, wenn sie skaliert wird, die Kosten pro Tonne um 10 % bis 15 % senken. In aufstrebenden Bereichen wie der Kernfusion könnte die Nachfrage um 50 % steigen, wobei der Marktwert möglicherweise 19 Mrd. RMB übersteigen könnte. Die Zusammenarbeit zwischen Photovoltaik-Unternehmen und Wolframherstellern bei der Entwicklung von kostengünstigem Draht unterstreicht das technische Potenzial und das Marktpotenzial. Die Branche tritt in eine technologiegetriebene Transformationsphase ein.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kapitel 9 Anhang

9.1 Glossar der Begriffe

(1) Aerospace Material Specification (AMS)

A material standard established by the Society of Automotive Engineers (SAE) for high-performance materials in the aerospace industry, such as AMS 7880, which specifies the high-temperature performance of tungsten wire.

AMS（航空材料规范）

由美国航空航天学会制定的材料标准，适用于航空航天领域的高性能材料，如 AMS 7880 规范钨丝的高温性能。

Materialspezifikation für die Luft- und Raumfahrt (AMS)

Eine von der Society of Automotive Engineers (SAE) festgelegte Materialnorm für Hochleistungswerkstoffe in der Luft- und Raumfahrtindustrie, wie z. B. AMS 7880, die die Hochtemperaturleistung von Wolframdraht spezifiziert.

(2) American Society for Testing and Materials (ASTM)

An international organization that develops standards for material testing and specifications, such as ASTM B760-07, which defines the purity and performance requirements for tungsten materials.

ASTM（美国材料与试验协会）

制定材料测试和规范的国际组织，其标准如 ASTM B760-07 规定钨材料的纯度和性能要求。

Amerikanische Gesellschaft für Prüfung und Materialien (ASTM)

Eine internationale Organisation, die Standards für Materialprüfungen und Spezifikationen entwickelt, wie z. B. ASTM B760-07, die die Reinheits- und Leistungsanforderungen für Wolframmaterialien definiert.

(3) Compound Annual Growth Rate (CAGR)

A measure of the average annual growth rate of a market or demand over a specific period, such as the CAGR of demand for cut-resistant tungsten wire.

CAGR（年复合增长率）

用于衡量市场或需求在特定时期内的平均增长率，如耐切割钨丝需求的年复合增长率。

Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR)

Ein Maß für die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate eines Marktes oder einer Nachfrage über einen bestimmten Zeitraum, z. B. die CAGR der Nachfrage nach schnittfestem Wolframdraht.

(4) Electrical Discharge Machining (EDM)

A technology that uses the principle of electrical discharge to perform high-precision metal processing, where cut-resistant tungsten wire is often used as the electrode wire.

EDM（电火花线切割）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

一种利用电火花放电原理进行高精度金属加工的技术，耐切割钨丝常作为电极丝使用。

Funkenerosion (EDM)

Eine Technologie, die das Prinzip der elektrischen Entladung nutzt, um eine hochpräzise Metallverarbeitung durchzuführen, bei der häufig schnittfester Wolframdraht als Elektrodendraht verwendet wird.

(5) Chinese National Standard (GB/T)

A national standard established by China, such as GB/T 4197-2017, which specifies the performance and quality requirements for tungsten wire.

GB/T (中国国家标准)

中国制定的国家标准，如 GB/T 4197-2017 规定钨丝的性能和质量要求。

Chinesischer nationaler Standard (GB/T)

Ein von China festgelegter nationaler Standard wie GB/T 4197-2017, der die Leistungs- und Qualitätsanforderungen für Wolframdraht festlegt.

(6) Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

A highly sensitive chemical analysis technique used to detect trace impurities in tungsten wire.

ICP-MS (电感耦合等离子体质谱)

一种高灵敏度的化学分析技术，用于检测钨丝中的微量杂质元素。

(7) International Organization for Standardization (ISO)

An organization that develops international standards, such as ISO 9001:2015, which regulates quality management systems.

ISO (国际标准化组织)

制定国际标准的机构，如 ISO 9001:2015 规范质量管理体系。

Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS)

Eine hochempfindliche chemische Analysetechnik, die zum Nachweis von Spuren von Verunreinigungen in Wolframdraht verwendet wird.

(8) Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

An advanced technology for preparing nanoscale tungsten wire or coatings, which deposits thin films on substrates through plasma-enhanced chemical reactions.

PECVD (等离子体增强化学气相沉积)

一种制备纳米级钨丝或涂层的先进技术，通过等离子体增强化学反应在基材上沉积薄膜。

Plasmagestützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD)

Eine fortschrittliche Technologie zur Herstellung von nanoskaligen Wolframdrähten oder -beschichtungen, bei der durch plasmaverstärkte chemische Reaktionen dünne Schichten auf Substraten abgeschieden werden.

(9) Surface Roughness (Ra)

A measure of the surface finish of a material, in micrometers (μm), with the Ra of cut-resistant tungsten wire typically controlled below $0.1 \mu\text{m}$.

Ra (表面粗糙度)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

衡量材料表面光洁度的指标，单位为微米（ μm ），耐切割钨丝的 Ra 通常需控制在 $0.1 \mu\text{m}$ 以下。

Oberflächenrauheit (Ra)

Ein Maß für die Oberflächengüte eines Materials in Mikrometern (μm), wobei der Ra von schnittfestem Wolframdraht typischerweise unter $0,1 \mu\text{m}$ liegt.

(10) Scanning Electron Microscope (SEM)

A microscopy technique used to observe the surface morphology and microstructure of tungsten wire, with magnification up to 100,000 times.

SEM（扫描电子显微镜）

用于观察钨丝表面形貌和微观结构的显微镜技术，放大倍数可达 10 万倍。

Rasterelektronenmikroskop (REM)

Eine Mikroskopietechnik, mit der die Oberflächenmorphologie und Mikrostruktur von Wolframdraht mit bis zu 100.000-facher Vergrößerung beobachtet wird.

(11) Six Sigma

A quality management methodology aimed at reducing production defect rates to 3 parts per million (PPM), widely used in high-end tungsten wire production.

Six Sigma（六西格玛）

一种质量管理方法，旨在将生产缺陷率降至百万分之三（3 PPM），广泛应用于高端钨丝生产。

Six Sigma

Eine Qualitätsmanagementmethode, die darauf abzielt, die Fehlerrate in der Produktion auf 3 Teile pro Million (PPM) zu reduzieren, die in der High-End-Wolframdrahtproduktion weit verbreitet ist.

(12) Tungsten Inert Gas Welding (TIG Welding)

A welding technology that uses a tungsten electrode, where cut-resistant tungsten wire is often used as the electrode material.

TIG 焊（钨极惰性气体保护焊）

一种使用钨电极进行焊接的技术，耐切割钨丝常作为电极材料。

Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG-Schweißen)

Eine Schweißtechnologie, bei der eine Wolframelektrode verwendet wird, wobei häufig schnittfester Wolframdraht als Elektrodenmaterial verwendet wird.

(13) Nano Tungsten Wire

Ultrafine tungsten wire with a diameter ranging from 1-100 nm, possessing excellent mechanical properties and conductivity, suitable for flexible electronics and biomedical fields.

纳米钨丝

直径在 1-100 nm 范围内的超细钨丝，具有优异的力学性能和导电性，适用于柔性电子和生物医学领域。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nano-Wolframdraht

Ultrafeiner Wolframdraht mit einem Durchmesser von 1-100 nm, mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften und Leitfähigkeit, geeignet für flexible Elektronik und biomedizinische Bereiche.

(14) Doped Tungsten Wire

Alloyed tungsten wire with improved performance through the addition of trace elements (such as rhenium, potassium), commonly used in high-temperature and wear-resistant applications.

掺杂钨丝

通过添加微量元素（如铼、钾）改善钨丝性能的合金化钨丝，常用于高温和耐磨应用。

Dotierter Wolframdraht

Legierter Wolframdraht mit verbesserter Leistung durch Zugabe von Spurenelementen (wie Rhenium, Kalium), der häufig in hochtemperatur- und verschleißfesten Anwendungen eingesetzt wird.

(15) Grain Refinement

A process that reduces the internal grain size of tungsten wire through controlled production techniques, thereby enhancing its strength and toughness.

晶粒细化

通过控制生产工艺使钨丝内部晶粒尺寸减小，从而提升其强度和韧性。

Körnung

Ein Verfahren, das die innere Korngröße von Wolframdraht durch kontrollierte Produktionstechniken reduziert und dadurch seine Festigkeit und Zähigkeit erhöht.

(16) Heat Treatment

A process that alters the microstructure and properties of tungsten wire through heating and cooling, such as annealing to eliminate internal stress.

热处理

通过加热和冷却改变钨丝微观结构和性能的过程，如退火可消除内应力。

Wärmebehandlung

Ein Verfahren, das die Mikrostruktur und die Eigenschaften von Wolframdraht durch Erhitzen und Abkühlen verändert, wie z. B. Glühen, um innere Spannungen zu beseitigen.

(17) Biocompatibility

The ability of a material to not cause adverse reactions when in contact with biological organisms, with coated tungsten wire in medical devices required to meet ISO 10993 standards.

生物相容性

材料与生物体接触时不引起不良反应的能力，涂层钨丝在医疗器械中需满足 ISO 10993 标准。

Biokompatibilität

Die Fähigkeit eines Materials, bei Kontakt mit biologischen Organismen keine unerwünschten Reaktionen zu verursachen, wobei beschichteter Wolframdraht in Medizinprodukten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erforderlich ist, um die Normen ISO 10993 zu erfüllen.

(18) Carbon Footprint

The amount of greenhouse gas emissions produced during manufacturing, with the production of cut-resistant tungsten wire needing to consider its environmental impact and comply with ISO 14001 requirements.

碳足迹

生产过程中产生的温室气体排放量，耐切割钨丝生产需关注其环境影响，符合 ISO 14001 要求。

CO₂-Fußabdruck

Die Menge an Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung von schnittfestem Wolframdraht entstehen, wobei die Auswirkungen auf die Umwelt berücksichtigt und die Anforderungen der ISO 14001 erfüllt werden müssen.

(19) 3D Printed Tungsten Wire

Tungsten wire prepared using additive manufacturing technology, featuring complex shapes and customized performance, with broad future application prospects.

3D 打印钨丝

利用增材制造技术制备的钨丝，具有复杂形状和定制化性能，未来应用前景广阔。

3D-gedruckter Wolframdraht

Wolframdraht, der mit Hilfe der additiven Fertigungstechnologie hergestellt wird, sich durch komplexe Formen und kundenspezifische Leistung auszeichnet und breite Zukunftsaussichten bietet.

9.2 References

- [1] ASTM International. (2019). ASTM B760-07(2019): Standard specification for tungsten plate, sheet, and foil. West Conshohocken, PA: ASTM International.
ASTM 国际. (2019). ASTM B760-07(2019): 钨板、片和箔的标准规范. 西康舍霍肯, PA: ASTM 国际.
ASTM International. (2019). ASTM B760-07 (2019): Standardspezifikation für Wolframplatten, -bleche und -folien. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [2] China National Standardization Administration. (2017). GB/T 4197-2017: Tungsten wire. Beijing: Standards Press of China.
中国国家标准化管理委员会. (2017). GB/T 4197-2017: 钨丝. 北京: 中国标准出版社.
Chinesische Nationale Normungsverwaltung. (2017). GB/T 4197-2017: Wolframdraht. Peking: Standards Press of China.
- [3] International Organization for Standardization (ISO). (2015). ISO 9001:2015: Quality management systems - Requirements. Geneva: ISO.
国际标准化组织 (ISO). (2015). ISO 9001:2015: 质量管理体系 - 要求. 日内瓦: ISO.
Internationale Organisation für Normung (ISO). (2015). ISO 9001:2015: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen. Genf: ISO.
- [4] International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018: Biological evaluation of medical devices - Part 1: Evaluation and testing within a risk management process. Geneva: ISO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 国际标准化组织 (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018: 医疗器械的生物学评价 - 第 1 部分: 风险管理过程中的评价和测试. 日内瓦: ISO.
- Internationale Organisation für Normung (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018: Biologische Bewertung von Medizinprodukten - Teil 1: Bewertung und Prüfung im Rahmen eines Risikomanagementprozesses. Genf: ISO.
- [5] International Organization for Standardization (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature. Geneva: ISO.
- 国际标准化组织 (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019: 金属材料 - 拉伸试验 - 第 1 部分: 室温试验方法. 日内瓦: ISO.
- Internationale Organisation für Normung (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019: Metallische Werkstoffe - Zugprüfung - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Genf: ISO.
- [6] Japan Industrial Standards Committee. (2002). JIS H 4461:2002: Tungsten wire. Tokyo: Japanese Standards Association.
- 日本工业标准委员会. (2002). JIS H 4461:2002: 钨丝. 东京: 日本标准协会.
- Japanisches Komitee für Industrienormen. (2002). JIS H 4461:2002: Wolframdraht. Tokio: Japanische Normungsvereinigung.
- [7] Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). Tungsten: Properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). 钨: 元素的性质、化学、技术、合金和化合物. 纽约: 克鲁维尔学术/普伦纳姆出版社.
- Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). Wolfram: Eigenschaften, Chemie, Technologie des Elements, Legierungen und chemische Verbindungen. New York: Kluwer Academic/Plenum Verlag.
- [8] Society of Automotive Engineers (SAE). (n.d.). AMS 7880: Tungsten wire high-temperature properties. Warrendale, PA: SAE International.
- 汽车工程师学会 (SAE). (无日期). AMS 7880: 钨丝高温性能. 沃伦代尔, PA: SAE 国际.
- Gesellschaft der Automobilingenieure (SAE). (o.D.). AMS 7880: Hochtemperatureigenschaften von Wolframdraht. Warrendale, PA: SAE International.
- [9] US Geological Survey (USGS). (2024). Mineral commodity summaries 2024: Tungsten. Reston, VA: USGS.
- 美国地质调查局 (USGS). (2024). 2024 年矿产商品概要: 钨. 雷斯顿, VA: USGS.
- US Geological Survey (USGS). (2024). Zusammenfassungen der Mineralrohstoffe 2024: Wolfram. Reston, VA: USGS.
- [10] Chinatungsten Online. (2024). Tungsten market report 2024. Retrieved from <http://news.chinatungsten.com/cn/>
- 中钨在线. (2024). 钨市场报告 2024. 取自 <http://news.chinatungsten.com/cn/>
- Chinatungsten Online. (2024). Wolfram-Marktbericht 2024. Abgerufen von <http://news.chinatungsten.com/cn/>
- [11] China Nonferrous Metals Industry Association. (2020). YS/T 1356-2020: Technical conditions for tungsten wire. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Association.
- 中国有色金属工业协会. (2020). YS/T 1356-2020: 钨丝技术条件. 北京: 中国有色金属工业协会.
- Chinesischer Verband der Nichteisenmetallindustrie. (2020). YS/T 1356-2020: Technische Bedingungen für Wolframdraht. Peking: Chinesischer Verband der Nichteisenmetallindustrie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT