

# Wolframlegierungsstab-Enzyklopädie

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Inhaltsverzeichnis

### Vorwort

Schreibhintergrund und praktische Bedeutung

Die strategische Position und der Kernwert von Wolframlegierungsstäben

So verwenden Sie dieses Buch

Zielgruppe und Referenzzweck

### Kapitel 1: Grundlegende Konzepte und Klassifizierung von Wolframlegierungsstäben

1.1 Definition und Grundform von Wolframlegierungsstäben

1.2 Einführung in das System der Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu)

1.3 Gängige Größen, Formen und Oberflächenbeschaffenheiten von Wolframlegierungsstäben

1.4 Klassifizierung von Wolframlegierungsstäben (nach Zusammensetzung, Anwendung und Verarbeitungsmethode)

1.5 Vergleich von Wolframlegierungsstäben mit Wolfram-Kupfer-Stäben, reinen Wolframstäben und anderen Materialien

### Kapitel 2: Physikalische und mechanische Eigenschaften von Wolframlegierungsstäben

2.1 Kontrolle von Dichte, spezifischem Gewicht und Maßgenauigkeit

2.2 Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung

2.3 Härte und Schlagzähigkeit

2.4 Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient und Hochtemperaturverhalten

2.5 Elektrische Eigenschaften, magnetische Reaktion und Strahlungsbeständigkeit

2.6 Analyse der Korrosionsbeständigkeit und chemischen Stabilität

### Kapitel 3: Herstellungs- und Formgebungstechnologie von Wolframlegierungsstäben

3.1 Rohstoffaufbereitung und Pulvereigenschaften

3.2 Pulvermetallurgische Pressverfahren (Formpressen, isostatisches Pressen)

3.3 Sintertechnologie und Atmosphärenkontrolle

3.4 Optimierung der Wärmebehandlung und Verdichtung

3.5 Bearbeitungs- und Oberflächenbehandlungstechnologie (Schleifen, Polieren, Drehen)

3.6 Neue Herstellungsverfahren: Extrusion, Walzen und additive Fertigung

### Kapitel 4: Leistungsprüfung und Qualitätsbewertung von Wolframlegierungsstäben

4.1 Prüfung des Aussehens und der geometrischen Abmessungen

4.2 Methoden zur Analyse von Dichte und Mikrostruktur

4.3 Prüfnormen für mechanische Eigenschaften (ASTM, GB, ISO)

4.4 Metallografische Analyse und Charakterisierung der Mikrostruktur

4.5 Analyse der chemischen Zusammensetzung (ICP, XRF, ONH)

4.6 Oberflächenrauheit und Defekterkennung (Sichtprüfung, Computertomographie)

4.7 Zerstörungsfreie Prüftechnologien (Ultraschall, Röntgen, Magnetpulver)

### Kapitel 5: Typische Anwendungsgebiete von Wolframlegierungsstäben

5.1 Gegengewichte und Trägheitskomponenten in der Luft- und Raumfahrt

5.2 Wolframlegierungsstäbe für militärische Ausrüstung (panzerbrechende Kerne,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Raketenheckabschnitte)

5.3 Anwendungen in der Kernenergie (Strahlenschutzstäbe, Neutronenabsorptionsstrukturen)

5.4 Strukturstäbe mit hoher Dichte für medizinische Geräte (Strahlentherapiegeräte)

5.5 Dynamische Ausgleichsstäbe und rotierende Trägheitsteile in hochpräzisen Instrumenten

5.6 Stütz- und Wärmeableitungsstrukturen in der Elektronik- und Kommunikationsindustrie

## **Kapitel 6: Forschung, Entwicklung und Verbesserung von speziellen**

### **Wolframlegierungsstäben**

6.1 Nanopartikelverstärkte Wolframlegierungsstäbe

6.2 Design und Leistungsverbesserung von mikrolegierten Wolframlegierungsstäben

6.3 Regulierung der Zusammensetzung hochfester und zäher Wolframlegierungsstäbe

6.4 Studien zur Wärmebehandlung hochtemperaturbeständiger Wolframlegierungsstäbe

6.5 Oberflächenbeschichtung und Verbesserung der Verschleißfestigkeit von

Wolframlegierungsstäben

6.6 Funktionelle Wolframlegierungsstäbe: elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und antimagnetische Eigenschaften

### **Kapitel 7: Compliance-System für Wolframlegierungsstäbe**

7.1 Chinesische nationale und industrielle Standards (GB/T, YS/T)

7.2 Amerikanisches Standardsystem (ASTM, MIL)

7.3 Internationale EU- und ISO-Standards

7.4 Zertifizierungen für Umweltschutz und Materialsicherheit (RoHS, REACH, MSDS)

7.5 Qualitätssystemanforderungen in der Luftfahrt-, Militär- und Medizinbranche

### **Kapitel 8: Verpackung, Lagerung und Transport von Wolframlegierungsstäben**

8.1 Verpackungsmethoden und Schutzmaßnahmen (Vakuumverpackung, Trockenmittel)

8.2 Lagerbedingungen und Vorsichtsmaßnahmen (Temperatur- und Feuchtigkeitskontrolle, Korrosionsschutz)

8.3 Internationale Transportvorschriften und Richtlinien zur Deklaration gefährlicher Güter

8.4 Zollaufsicht und Anforderungen an die Ausfuhrgenehmigung für Wolframlegierungsstäbe

### **Kapitel 9: Marktstruktur und Entwicklungstrends von Wolframlegierungsstäben**

9.1 Überblick über globale Wolframressourcen und die Industriekette für Wolframlegierungsstäbe

9.2 Analyse der Marktgröße und Wachstumstrends für Wolframlegierungsstäbe

9.3 Wichtige Hersteller und Wettbewerbsumfeld (China, Europa, USA, Japan, Südkorea)

9.4 Analyse der Rohstoffpreisschwankungen und der Kostenstruktur

9.5 Interpretation der Industriepolitik und der Exportsituation

9.6 Prognose der Nachfrage nach Wolframlegierungsstäben in der zukünftigen High-End-Fertigung

### **Kapitel 10: Forschungsschwerpunkte und Spitzentechnologien für Wolframlegierungsstäbe**

10.1 Forschung zu Verdichtungsprozessen von hochdichten Wolframlegierungsstäben

10.2 Intelligente Fertigung und automatisierte Produktionslinien

10.3 Integration von Wolframlegierungsstäben und additiver Fertigung

10.4 Vergleich und Entwicklungspfade von Hochleistungslegierungsalternativen

10.5 Leistungsentwicklung von Wolframlegierungen unter extremen Betriebsbedingungen

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Anhang**

**Anhang 1** : Zusammenfassung der allgemeinen technischen Parameter von Stäben aus Wolframlegierungen

**Anhang 2** : Vergleichstabelle der Wolframlegierungssorten und chemischen Zusammensetzungen

**Anhang 3** : Standarddokumente und Referenzindex für Stäbe aus Wolframlegierungen

**Anhang 4** : Glossar und englische Abkürzungen zu Wolframlegierungen

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

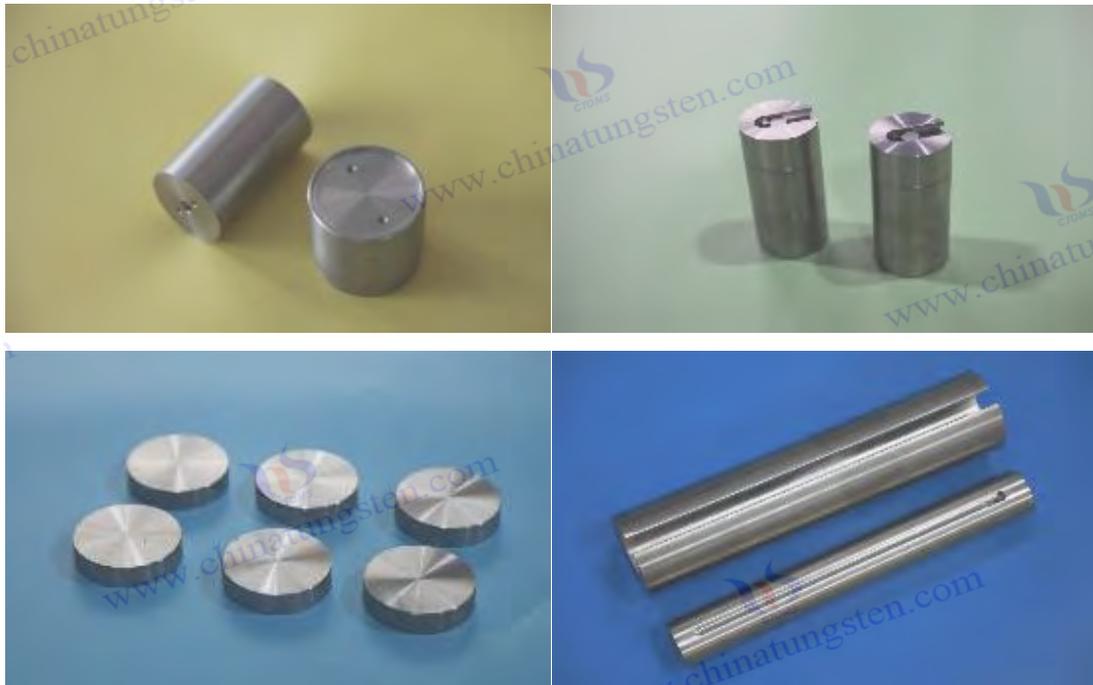
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Vorwort

Mit der Entwicklung neuer Werkstofftechnologien und dem rasanten Aufstieg der High-End-Fertigungsindustrie sind leistungsstarke Funktionslegierungen zu einer wichtigen Grundlage für den Fortschritt in der Luft- und Raumfahrt, der Präzisionsfertigung, der nationalen Verteidigungsausrüstung, der Energiesysteme und der medizinischen Ausrüstung geworden. Wolfram, eines der Metalle mit dem höchsten Schmelzpunkt im Periodensystem, verfügt über eine hohe Dichte, hohe Härte, einen hohen Schmelzpunkt und eine ausgezeichnete Strahlungsbeständigkeit, wodurch es in extremen Umgebungen einzigartige Vorteile bietet. Unter den vielen wolframbasierten Werkstoffen haben sich Wolfram-Schwerlegierungsstäbe aufgrund ihrer einzigartigen physikalischen Eigenschaften, ihrer Formstabilität und ihrer breiten Anpassungsfähigkeit zunehmend zu einer Schlüsselkomponente im strategischen Funktionswerkstoffsystem entwickelt.

Wolframlegierungsstäbe bestehen üblicherweise aus Wolfram (W) als Hauptelement und werden durch Zugabe von Nickel (Ni), Eisen (Fe), Kupfer (Cu) und anderen Metallen zu hochdichten Wolframlegierungen (High Density Tungsten Alloy) pulvermetallurgisch hergestellt. Ihre Dichte kann 17,0–18,8 g/cm<sup>3</sup> erreichen und ist damit deutlich höher als bei gängigen Metallen wie Stahl, Kupfer und Aluminium. Wolfram ist ein technischer Werkstoff mit hoher Festigkeit, guter Bearbeitbarkeit und hervorragender Betriebsstabilität. Mit der steigenden Nachfrage nach kompakten Strukturen, präziser Energiesteuerung und langer Lebensdauer der Geräte entwickeln sich Design und Anwendung von Wolframlegierungsstäben stetig in Richtung hoher Dichte, hoher Gleichmäßigkeit und hoher Reinheit.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungsstäbe werden nicht nur in traditionellen Gegengewichtsanwendungen wie Flugzeugwaagen, Lagekorrekturen in der Luft- und Raumfahrt und Trägheitsmodulen an Bord von Schiffen eingesetzt, sondern auch in Kugelschutz, Strahlenschutz, Kernenergiekomponenten, kinetischen Waffen, Strahlentherapiemodulen für medizinische Geräte, Röntgenabschirmgeräten, Trägheitsrotoren für Gyroskope, Anodenstrukturen für elektrische Vakuumgeräte, thermischen Steuerungskomponenten für elektronische Verpackungen und anderen strategischen Technologiefeldern eingesetzt. Insbesondere in präzisionsgelenkter Munition, panzerbrechenden Geschossen mit hoher Geschwindigkeit, Experimenten der Hochenergiephysik und Projekten zur Erforschung des Weltraums sind Wolframlegierungsstäbe aufgrund ihrer strukturellen Stabilität und Trägheitsreaktionsgenauigkeit zu unersetzlichen Hochleistungskomponenten geworden.

Die globalen Wolframvorkommen sind derzeit extrem konzentriert. China, Russland, Kasachstan, Portugal und andere Länder verfügen über die wichtigsten Bodenschätze. China ist weltweit führend in Bezug auf nachgewiesene Reserven, konzentrierte Produktion und hohe Verarbeitungskapazität von Wolfram Erz. Dies bietet eine solide Rohstoffbasis für Design, Entwicklung und Prozessinnovation von Wolframlegierungsstäben in China. Gleichzeitig haben inländische Wolframlegierungsstäbe mit der rasanten Modernisierung der Mittel- und Oberklasse-Geräteindustrie schrittweise Importe ersetzt und technologische Durchbrüche in Schlüsselbereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der medizinischen Nukleartechnik und der elektronischen Gegenmaßnahmen erzielt und Massenversorgungskapazitäten aufgebaut.

Trotz der zunehmenden Reife des Technologiesystems für Wolframlegierungsstäbe sind noch einige Herausforderungen zu bewältigen, darunter: Wie lassen sich Sinterdichte und organisatorische Gleichmäßigkeit weiter verbessern? Wie lassen sich Technologien zur Herstellung speziell geformter Stäbe entwickeln, die komplexen Strukturanforderungen gerecht werden? Wie lässt sich das Verhältnis von hoher Festigkeit und Bearbeitbarkeit zwischen den Materialien ausbalancieren? Und wie lassen sich der Energieverbrauch bei der Herstellung senken und die Recyclingquote verbessern? Zur Lösung dieser Probleme sind in den letzten Jahren eine Reihe neuer Prozesswege und fortschrittlicher Herstellungsmethoden entstanden, wie z. B. Flüssigphasensinterverdichtung, Optimierung von Mikrolegierungselementen, heißisostatisches Pressen (HIP), mehrskaliges Simulationsdesign, 3D-Druck von Strukturteilen aus Wolframlegierungen usw., die der hochwertigen, funktionellen und intelligenten Entwicklung von Wolframlegierungsstäben neuen Schwung verliehen haben.

Vor diesem Hintergrund wurde das Buch „Enzyklopädie der Wolframlegierungsstäbe“ zusammengestellt. Es behandelt systematisch die Materialgrundlagen, den Herstellungsprozess, die Leistungsbewertung, das Standardsystem, die Anwendungserweiterung und die zukünftigen Trends von Wolframlegierungsstäben und bietet Ingenieuren, Forschern, Hochschullehrern und Studenten sowie strategischem Beschaffungspersonal, das sich mit der Forschung und Entwicklung von Wolframlegierungsmaterialien, dem Produktdesign, der Prozessoptimierung und der industriellen Anwendung beschäftigt, ein detailliertes und praxisnahes Nachschlagewerk.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

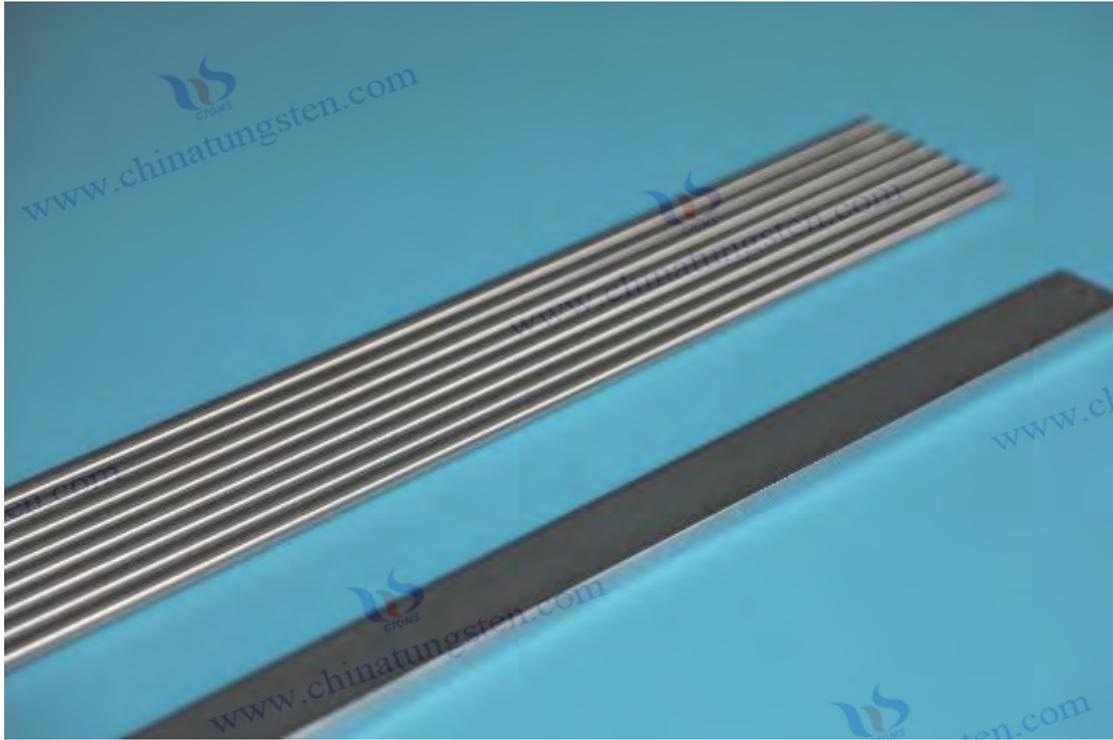
Beim Schreiben dieses Buches haben wir umfassend auf in- und ausländische Forschungsliteratur, Unternehmensanwendungsfälle sowie nationale und industrielle Standards zurückgegriffen und die langjährige praktische Erfahrung der CTIA GROUP LTD und ihrer Partner auf dem Gebiet der Wolframlegierungen miteinbezogen. Dabei haben wir uns bemüht, den Inhalt maßgeblich, die Struktur systematisch, die Sprache verständlich und den Text und die Bilder reichhaltig zu gestalten. Das Buch ist in zehn Kapitel und mehrere Anhänge unterteilt und behandelt die grundlegenden Konzepte von Wolframlegierungsstäben, physikalische und mechanische Eigenschaften, Pulvermetallurgie und Umformtechnik, Test- und Qualitätskontrollmethoden, typische Anwendungsfelder, internationale Standardsysteme, Verpackungs- und Transportspezifikationen, Marktmusteranalysen und Spitzentechnologietrends. Dem Buch sind Begriffsverzeichnisse und Referenzkarten beigelegt, damit die Leser das Buch in ihren Ingenieurwissenschaften konsultieren und anwenden können.

Wir hoffen, dass dieses Buch nicht nur ein Nachschlagewerk zur Materialtechnologie ist, sondern auch eine Brücke zwischen der technischen Anwendung und der wissenschaftlichen Forschung und Entwicklung von Wolframlegierungsstäben schlägt. Ob Sie nun Universitätsforscher, Ingenieur in einem Wolframproduktunternehmen oder Entscheidungsträger im Bereich Industriedesign sind – Sie erhalten darin theoretische Inspiration, Fallbeispiele und praktische Anleitungen.

Aufgrund der großen inhaltlichen Bandbreite und der Fülle an Informationen kommt es zwangsläufig zu Mängeln und Auslassungen im Buch. Ich bitte die Leser aufrichtig um Kritik und Korrektur.

CTIA GROUP LTD  
Juli 2025

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Kapitel 1 Grundkonzepte und Klassifizierung von Wolframlegierungsstäben

### 1.1 Definition und Grundform des Wolframlegierungsstabes

Bei Stäben aus Wolframlegierungen handelt es sich üblicherweise um lange Streifen aus Metallmaterialien, die durch Pulvermetallurgie hergestellt werden und Wolfram (W) als Hauptbestandteil und einen bestimmten Anteil an Bindemetallen wie Nickel (Ni), Eisen (Fe), Kupfer (Cu) usw. aufweisen. Diese Art von Stäben hat eine extrem hohe Dichte (im Allgemeinen zwischen 17,0–18,8 g/cm<sup>3</sup>), hervorragende mechanische Eigenschaften (die Zugfestigkeit kann 700–1200 MPa erreichen), eine gute Hitzebeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit und wird häufig in der Luft- und Raumfahrt, bei militärischen Geräten, in der Kernergietechnik, in medizinischen Geräten, in der Elektronik und Elektrik und in anderen High-End-Bereichen eingesetzt.

Wolframlegierungsstäbe zeichnen sich durch gute Verarbeitbarkeit und Dimensionsstabilität bei gleichzeitig hoher Festigkeit aus. Im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionsmaterialien wie Blei, Stahl, Titan und Kupfer zeichnen sich Wolframlegierungsstäbe durch ein höheres spezifisches Gewicht und eine höhere Haltbarkeit aus. Sie sind in den Bereichen Trägheitsgegengewichte, Schutzabschirmungen und Präzisionszubehör von unersetzlichem technischen Wert.

In Bezug auf die Grundform gibt es Wolframlegierungsstäbe hauptsächlich in den folgenden Typen:

- **Rundstab** : Die gängigste Form, geeignet für eine Vielzahl von Anwendungen, z. B. für rotierende Trägheitskomponenten, Kreiselrotoren, Elektroden und Ausgleichsgewichte.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Durchmesser kann zwischen 1 mm und 100 mm liegen, die Länge beträgt üblicherweise zwischen 50 mm und 1500 mm. Er kann je nach Bedarf geschnitten oder gedreht werden.

- **Vierkantstab/ Rechteckstab** : Wird zur Verarbeitung von Teilen mit besonderen Anforderungen an die Querschnittsform verwendet, häufig zu finden in Halterungen für elektronische Verpackungen, Hochtemperatur- Schaltschützen usw.
- **Profilstab** : Ein Stab mit komplexem Querschnitt, z. B. einer Nut, einem Loch oder einer Stufenform, der durch Extrusion, Drehen oder Elektrobearbeitung hergestellt wird . Er eignet sich für spezielle Verbindungsstrukturen oder multifunktionale Verbundstrukturteile.
- **Stiftförmige Stange** : Wird hauptsächlich als kleines Gegengewicht, Positionierungs- oder Leitkomponente in Mikroprecisionsgeschäften, medizinischen Geräten und elektrischen Vakuumkomponenten verwendet und hat normalerweise einen Durchmesser von <5 mm.
- **Stab mit großen Abmessungen** : Wird für tragende Strukturen und Komponenten mit hoher Aufprallenergie verwendet, wie etwa Überschall-Panzerkerne, Trägheitstestmodule usw., wobei hoher Festigkeit, hoher Gleichmäßigkeit und Dichte der Schwerpunkt liegt.

Darüber hinaus wurden mit der Entwicklung der personalisierten Fertigung und Funktionsintegration einige Stäbe aus Wolframlegierungen strukturell mit Keramik, Polymeren oder Funktionsbeschichtungen verbunden, wodurch sie über mehrere Verbundfunktionen wie Hitzeschutz, Korrosionsbeständigkeit und elektromagnetische Abschirmung verfügen.

Wolframlegierungsstäbe sind üblicherweise in drei Ausführungen erhältlich: polierte Stäbe (oberflächenpoliert), gedrehte Stäbe (fertig) und schwarze Stäbe (unbearbeitet). Oberflächenqualität und Maßtoleranzen unterscheiden sich je nach Anwendungsbereich. Einige Präzisionsprodukte erfordern Ra-Werte <0,4  $\mu\text{m}$  und eine Maßgenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm. Diese Produkte werden häufig in High-End-Geräten wie der medizinischen Bildgebung, der Mikrowellenkommunikation und Trägheitsinstrumenten eingesetzt.

Mit der Weiterentwicklung der Werkstofftechnik und der Verarbeitungstechnologie werden auch die Produktformen von Wolframlegierungsstäben ständig erweitert. Von traditionellen Vollstäben mit gleichem Querschnitt über funktional gradierte Strukturstäbe, mehrphasig mitgebrannte Strukturstäbe bis hin zu 3D-gedruckten porösen Stäben passen sie sich schrittweise an neue Anwendungsszenarien wie extreme Einsatzumgebungen, intelligente Strukturkontrolle und multifunktionale Integration an und bieten flexiblere und effizientere Materiallösungen für fortschrittliche Fertigungssysteme.

## 1.2 Einführung in das System schwerer Wolframlegierungen (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu).

Wolframschwerlegierungen (THA) sind eine Pseudolegierung bzw. ein Metallverbundwerkstoff auf Wolframbasis ( W ), der durch Zugabe eines bestimmten Anteils von Bindemetallen (z. B. Nickel, Eisen, Eisen, Kupfer usw.) entsteht. Typische Eigenschaften sind hohe Dichte, hohe Festigkeit, gute mechanische Bearbeitbarkeit und thermische Stabilität bei Raumtemperatur sowie ein niedriger

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeausdehnungskoeffizient und gute Korrosionsbeständigkeit. Wolframschwerlegierungen finden breite Anwendung in technologieintensiven Bereichen wie Hochleistungs-Gegengewichtskomponenten, Strahlenschutzkomponenten, militärischen panzerbrechenden Komponenten und Trägheitskomponenten. Sie zählen zu den unverzichtbaren Schlüsselwerkstoffen im modernen High-End-Gerätebau.

Unter allen hochdichten Wolframlegierungssystemen sind die beiden repräsentativsten und industriell ausgereiftesten:

- **Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungssystem (W-Ni-Fe)**
- **Wolfram-Nickel-Kupfer-Legierungssystem (W-Ni-Cu)**

Die Grundstruktur dieser beiden Systeme ist eine „Zweiphasenstruktur“, d. h. Wolframpartikel mit einem Volumenanteil von mehr als 90 % stellen die Hauptphase dar und sind durch eine kontinuierliche Bindungsphase (Matrix) aus Nickel und Eisen oder Kupfer eng miteinander verbunden, wodurch eine Legierungsstruktur mit hoher Dichte und hoher Gleichmäßigkeit entsteht.

#### **W-Ni-Fe-Wolframlegierung: hochfester industrieller Haupttyp**

Das W-Ni-Fe-System ist die Wolframlegierung mit der höchsten Leistung und den meisten Anwendungen. Seine typische Zusammensetzung ist:

- **Wolfram (W) : 90–97 Gew. %**
- **Nickel (Ni) : 3–7 Gew. %**
- **Eisen (Fe) : 1–3 Gew. %**
- **Dichtebereich : 17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>**

Die Legierung weist eine extrem hohe Zugfestigkeit (in der Regel bis zu 900–1200 MPa) und eine gute Bruchdehnbarkeit (Dehnung kann 10–30 % erreichen) auf. Dank des Eisengehalts sind ihre magnetischen Eigenschaften einstellbar. Sie eignet sich für Anwendungen, die herausragende mechanische Eigenschaften erfordern, wie z. B. Trägheitskomponenten, seismische Gegengewichte und dynamisch belastbare Strukturteile.

#### **Vorteil :**

- Hohe Festigkeit und gute Verschleißfestigkeit
- Wärmebehandelbar
- Anwendbar auf militärische Strukturteile und Trägheitsgeräte für die Luft- und Raumfahrt

#### **Manko :**

- Der Fe-Gehalt macht es magnetisch, was zum Beschweren einiger elektronischer Geräte ungeeignet ist.
- Die Korrosionsbeständigkeit ist etwas geringer als die des Ni-Cu-Systems

#### **W-Ni-Cu-Wolframlegierung: geringe magnetische Eigenschaften und hohe Leitfähigkeit**

Die W-Ni-Cu-Legierung ersetzt Eisen durch Kupfer und bildet so eine nicht- oder schwachmagnetische Bindungsphase. Ihre typische Zusammensetzung ist:

- **Wolfram (W) : 90–95 Gew. %**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Nickel (Ni)** : 2–5 Gew. %
- **Kupfer (Cu)** : 2–4 Gew.-%
- **Dichtebereich** : 17,0–18,0 g/cm<sup>3</sup>

Diese Art von Wolframlegierung hat eine etwas geringere Zugfestigkeit (etwa 700–900 MPa), verfügt jedoch über eine bessere elektrische Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit und ihre magnetische Permeabilität liegt nahe bei 1. Es handelt sich um ein typisches nichtmagnetisches Strukturmaterial und wird häufig in der Elektronik, im Vakuumbereich, in medizinischen Diagnosegeräten und anderen Geräten verwendet, die extrem hohe Anforderungen an die Kontrolle elektromagnetischer Störungen stellen.

#### **Vorteil :**

- Nicht magnetisch oder schwach magnetisch, geeignet für Präzisionsinstrumente
- Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit sind besser als beim W-Ni-Fe-System
- Hohe Beständigkeit gegen Seewasserkorrosion, geeignet für den maritimen und medizinischen Bereich

#### **Manko :**

- Die Zugfestigkeit und Zähigkeit sind etwas gering, nicht geeignet für Strukturen mit hoher dynamischer Belastung
- Etwas höhere Kosten und etwas schwieriger herzustellen

#### **Weitere sich entwickelnde Wolframlegierungssysteme**

In den letzten Jahren wurden Wolframlegierungssysteme in Richtung Funktionalisierung und High-End weiterentwickelt, wie zum Beispiel:

- **W-Ni-Co-System** : wird verwendet, um eisenhaltige magnetische Probleme zu beheben und die Hitzebeständigkeit zu verbessern
- **W-Cu -System** : geeignet für Geräte mit hohem Wärmefluss, wie beispielsweise mikroelektronische Kühlmodule
- **W-Polymer-Strukturverbundstab** : Eine Wolfram-Polymer-Verbundstruktur, die entwickelt wurde, um den Widerspruch zwischen Gewicht und Verarbeitbarkeit zu lösen
- **Nano-Wolfram-Legierungssystem** : Einführung von Nano -Wolframpulver oder intermetallischen Verbindungspartikeln (wie TiC, LaB<sub>6</sub>) zur Verbesserung der Materialdichte und Festigkeitszähigkeit

#### **Merkmale der Organisationsstruktur und Leistungskontrollpunkte**

Hochdichte Wolframlegierungen bestehen aus einer zweiphasigen Verbundstruktur aus Wolframpartikeln und Bindephase. Der Volumenanteil der Wolframpartikel beträgt über 85 % und spielt die Hauptrolle bei der Tragfähigkeit. Die Ni-Fe- oder Ni-Cu-Bindephase bestimmt die allgemeine Duktilität und Verarbeitbarkeit. Ihre organisatorische Gleichmäßigkeit, die Größenverteilung der Wolframpartikel und die Kontinuität der Bindephase bestimmen die endgültigen mechanischen Eigenschaften und die Lebensdauer des Stabes.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- **Wolframpartikelverteilung** : Die Partikelgröße liegt im Allgemeinen zwischen 10 und 50  $\mu\text{m}$  . Je kleiner die Partikelgröße, desto besser die Grenzflächenbindung und desto höher die mechanischen Eigenschaften.
- **Sinterdichte** : Die Kontrolle der Porosität  $<0,5\%$  trägt zur Verbesserung der Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit bei ;
- **Bindemittelverhältnis** : Ein zu niedriges **Verhältnis** führt zu hoher Sprödigkeit und Schwierigkeiten bei der Verarbeitung; ein zu hohes Verhältnis führt zu geringerer Dichte und unzureichender Festigkeit; im Allgemeinen liegt es bei 3–10 Gew.-%.
- **Einheitlichkeit der Zusammensetzung** : Verhinderung der Elementtrennung oder -agglomeration und Verbesserung der Produktkonsistenz;
- **Kontrolle der Mikrostruktur** : Durch Flüssigphasensintern und Wärmebehandlung können eine Kornverfeinerung und eine gleichmäßige Struktur erreicht und dadurch die Ermüdungsbeständigkeit verbessert werden.

## Abschluss

Wolframlegierungsstäbe, W-Ni-Fe- und W-Ni-Cu-Systeme, unterstützen zwei Kernanwendungssysteme: **hochfeste Strukturen und schwach magnetische Elektronik. Ihre Flexibilität bei der Zusammensetzungskontrolle, Organisationsregulierung und Leistungsanpassung macht Wolframlegierungsstäbe in der Luft- und Raumfahrt, der Landesverteidigung, der Präzisionselektronik, der medizinischen Nukleartechnik und anderen Bereichen unersetzlich. Mit dem technologischen Fortschritt werden die Leistungsgrenzen und die Anwendungsbreite von Wolframlegierungsstäben im Bereich der High-End-Fertigung zukünftig durch Mikrolegierungen, Nanoverstärkungen und Funktionsverbundwerkstoffe weiter erweitert.**

## 1.3 Gängige Größen, Formen und Oberflächenbeschaffenheiten von Stäben aus Wolframlegierungen

Als Hochleistungs-Konstruktionswerkstoff sind Wolframlegierungsstäbe in verschiedenen Größen, Formen und Oberflächenbeschaffenheiten in unterschiedlichen Branchen und Einsatzumgebungen erhältlich. Ihre Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit beeinflussen nicht nur die Montagegenauigkeit und Lebensdauer, sondern wirken sich auch direkt auf die Verarbeitungseffizienz, die strukturelle Stabilität und die Betriebszuverlässigkeit aus. Daher ist ein tiefes Verständnis der standardisierten und kundenspezifischen Formen von Wolframlegierungsstäben die Grundlage für Produktdesign und Werkstoffauswahl.

### 1. Abmessungen

Wolframlegierungsstäbe werden üblicherweise in zwei Kategorien unterteilt: standardisierte und kundenspezifische Stäbe. Zu den üblichen Spezifikationen gehören Durchmesser (oder Seitenlänge), Länge, Rundheit, Geradheit und Maßtoleranz.

- **Durchmesserbereich** : 1 mm bis 200 mm, die am häufigsten verwendeten Spezifikationen sind 3 mm bis 100 mm;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Längenbereich** : 10 mm – 2000 mm, konventionell verarbeitete Stangen werden meist auf 50 mm – 1000 mm kontrolliert ;
- **Längentoleranz** : im Allgemeinen  $\pm 0,5$  mm, die Präzisionsbearbeitung kann  $\pm 0,1$  mm erreichen;
- **Geradheitsfehler** : Produkte in Industriequalität werden auf 0,5 mm/m kontrolliert, und Produkte in Präzisionsqualität können 0,1 mm/m erreichen;
- **Kontrolle der Koaxialität und Vertikalität : Für dynamische Teile verwendete Stäbe aus Wolframlegierungen** erfordern eine höhere geometrische Konsistenz, die im Allgemeinen im Bereich von  $\pm 0,02$  mm kontrolliert wird.

Bei Stäben, die in bestimmten Bereichen (z. B. ballistischen Waffen, Hochgeschwindigkeitsgyroskopen und optischen Präzisionssystemen) eingesetzt werden, müssen auch die Kontrolle der Wärmeausdehnung und die Einhaltung der Lieferabmessungen berücksichtigt werden. Die Qualitätskontrolle erfolgt üblicherweise in Kombination mit CAD-Modellierung und dreidimensionalen Erkennungssystemen.

## 2. Formklassifizierung:

Die Form und Struktur von Stäben aus Wolframlegierungen muss den Integrationsanforderungen verschiedener mechanischer Komponenten, thermischer Steuereinheiten, elektrischer Verbindungen oder Trägheitselemente entsprechen. Die wichtigsten Formen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. **Massiver Rundstab** : Die gängigste Struktur, geeignet für die meisten industriellen Gegengewichte, Elektroden und Trägheitskomponenten.
2. **Hohlstab** : Er dient der Gewichtsreduzierung oder Flüssigkeitskühlung und wird häufig in der Medizin sowie der Luft- und Raumfahrt verwendet.
3. **Quadratische/rechteckige Stange** : Geeignet für Rahmenkonstruktionen, elektrische Kontaktsockel usw.
4. **Profilstab** : Mit speziellen Designs wie Schlitzten, Löchern, Aussparungen, Fasen usw. wird er hauptsächlich für **kundenspezifische** Montageteile und komplexe integrierte Strukturen verwendet.
5. **Mikrostab** : Der Durchmesser beträgt weniger als 2 mm, wird hauptsächlich in Mikrowellenkomponenten, der Nuklearmedizin, Präzisionsgyroskopen oder MEMS-Systemen verwendet .
6. **Abgestufte/konische Stangen** : Geeignet für Anwendungen mit hoher Trägheit oder Kraftübertragung und erfüllen die Anforderungen der funktionalen und strukturellen Integration.

## 3. Oberflächenbeschaffenheit

Wolframlegierungsstäbe wirken sich direkt auf die Ermüdungsbeständigkeit, die Passgenauigkeit, den Korrosionsschutz und die Materiallebensdauer aus. Zu den üblichen Oberflächenbedingungen gehören:

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **As-Sintered**

ist eine unbearbeitete Oberfläche mit einer Schicht aus schwarzem Oxidfilm, die für die anschließende Bearbeitung oder für Strukturteile ohne freiliegende Oberfläche geeignet ist.

2. **Der gedrehte Stab**

wird grob bearbeitet und die Rauheit beträgt im Allgemeinen Ra 1,6–3,2  $\mu\text{m}$ , was für Zubehör mit mittlerer Präzision geeignet ist.

3. **Erdungsstäbe**

werden präzisionszylindrisch geschliffen, um eine hervorragende Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit mit Ra unter 1,0  $\mu\text{m}$  zu erreichen, und werden häufig in medizinischen und elektronischen Geräten verwendet.

4. **Der polierte Stab**

wird anschließend auf Hochglanz poliert, mit einem Ra-Wert von 0,2–0,4  $\mu\text{m}$ . Er wird häufig in Geräten mit hohen Anforderungen an das Erscheinungsbild, geringer Reibung oder in optischen Geräten verwendet.

5. **Bei beschichteten Stäben wird durch Galvanisieren, chemisches Plattieren oder PVD eine funktionale Oberfläche, wie beispielsweise eine Ni-, Cr- oder**

TiN -Beschichtung, gebildet, um die Korrosionsbeständigkeit, den elektrischen Kontakt oder die Verschleißfestigkeit zu verbessern.

6. **Eine spezielle Oberflächenbehandlung (elektropoliert/plasmabearbeitet)**

eignet sich für Umgebungen mit hoher Sauberkeit, bei hoher Strahlung oder für medizinische/nukleare Technikgeräte, um die Oberflächendichte zu verbessern und Mikrorisse zu entfernen.

#### 4. Genauigkeitsgrad

Je nach Verarbeitungsgenauigkeit und Prüfanforderungen können Wolframlegierungsstäbe in die folgenden drei Güteklassen unterteilt werden:

- **Industriequalität (Standardqualität)** : Geeignet für allgemeinen Schutz, strukturelle Unterstützung, Gegengewichtskomponenten, Maßtoleranz  $\pm 0,5$  mm;
- **Präzisionsklasse** : Anwendbar auf bewegliche Komponenten, Führungskomponenten und Trägheitssysteme, mit einer Toleranz von  $\pm 0,1$  mm, Ra  $< 1,6$   $\mu\text{m}$  ;
- **Ultrapräzisionsqualität** : Wird in medizinischen Systemen **sowie in der Luft- und Raumfahrt** und in Gyroskopsystemen verwendet, mit Maßtoleranzen von bis zu  $\pm 0,01$  mm, Ra  $< 0,4$   $\mu\text{m}$ , und erfordert NDT-Tests und metallografische Qualifikationsstandards.

Mit der steigenden Marktnachfrage nach speziell geformten Strukturen und funktionalen Verbundteilen entwickeln sich Wolframlegierungsstäbe zunehmend zu hochwertigen, maßgeschneiderten und intelligenten Lösungen hinsichtlich Größe, Struktur und Oberflächenbearbeitung. Dank modernster Fertigungstechnologien wie Laserbearbeitung, Mikrofräsen, Ultrapräzisionsschleifen und Plasmaverpackungen werden Wolframlegierungsstäbe zukünftig ihr technisches Potenzial in Kernanwendungen wie komplexen Strukturen, hochfrequenten Vibrationen, extremen Wärmefeldern und Präzisionsgegengewichten weiter ausbauen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1.4 Klassifizierung von Wolframlegierungsstäben (nach Zusammensetzung/Verwendung/Verarbeitungsmethode)

Wolframlegierungsstäbe finden breite Anwendung in vielen wichtigen Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie, der Medizin, der Militärindustrie und der High-End-Fertigung. Es gibt sie in verschiedenen Ausführungen und für unterschiedliche Anwendungen. Um das Produktsystem effizienter zu gestalten, die Materialauswahl zu steuern und die Prozesse zu optimieren, ist es in der Regel notwendig, Wolframlegierungsstäbe systematisch nach verschiedenen Abmessungen zu klassifizieren. Die drei gängigsten Klassifizierungsmethoden sind: nach Zusammensetzung, nach Verwendung und nach Verarbeitungsverfahren.

### 1. Klassifizierung nach Inhaltsstoffen

Wolframlegierungsstäbe bestehen hauptsächlich aus Wolfram (W) und Bindemetallen (wie Ni, Fe, Cu, Co usw.). Entsprechend den Unterschieden in den Legierungssystemen können sie unterteilt werden in:

#### 1. W-Ni-Fe-Legierungsstab

- Gehalt: W 90–97 %, Ni 2–7 %, Fe 1–3 %
- Eigenschaften: Magnetische Legierung, hohe Festigkeit, gute Duktilität
- Anwendung: Trägheitskomponenten, militärische Gegengewichte, hochfeste Strukturteile

#### 2. W-Ni-Cu-Legierungsstab

- Gehalt: W 90–95 %, Ni 2–5 %, Cu 2–4 %
- Eigenschaften: nicht magnetisch oder schwach magnetisch, gute Wärmeleitfähigkeit, starke Korrosionsbeständigkeit
- Anwendung: medizinische Geräte, Nuklearmedizin, elektronische Gegenmaßnahmenkomponenten

#### 3. W-Cu-Legierungsstab

- Gehalt: W 70–90 %, Cu 10–30 %
- Eigenschaften: Hervorragende elektrische und thermische Leitfähigkeit, geeignet für Hochleistungsgeräte
- Anwendung: Elektroden, Heizkörper, Vakuumkontakte usw.

#### 4. Spezielle Legierungssysteme (wie z. B. W-Ni-Co, W-Re, W- TiC )

- Eigenschaften: Besondere Hochtemperaturbeständigkeit oder erhöhte Strahlungsbeständigkeit
- Anwendung: Wärmekontrollkomponenten für die Luft- und Raumfahrt, Nuklearmaterialien, Laser-Gegenmaßnahmenysteme

#### 5. Dotierte modifizierte Legierung

- Erde ( $Y_2O_3$ ,  $CeO_2$ ), Karbid ( $TiC$ ,  $ZrC$ ) usw.
- Funktion: Verbesserung der Mikrostruktur, Erhöhung der Hochtemperaturfestigkeit oder Korrosionsbeständigkeit

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Klassifizierung nach Zweck

Entsprechend den spezifischen Verwendungsszenarien von Wolframlegierungsstäben können sie in die folgenden Kategorien unterteilt werden:

### 1. Wolframstab für die Struktur

- Funktion: Lastaufnahme, Hochtemperatur-Strukturunterstützung, Rotorteile
- Typische Anwendungen: Satelliten-Trägheitsstrukturen, Gyroskope, Triebwerkszentrierachsen

### 2. Wolframstab zum Schutz

- Funktion: Abschirmung von Röntgenstrahlen, Gammastrahlen, Neutronenstrahlung
- Anwendungen: Medizinische CT, Kernreaktoren, Isotopentransportbehälter

### 3. Militärischer kinetischer Wolframstab

- Funktion: Hochdichte Wirkung, panzerbrechend, kinetische Energie Tötung
- Anwendung: APFSDS-Kern, hochexplosives Kernmaterial, Heckflossen-Gegengewicht

### 4. Wolframstäbe für elektronische Geräte

- Funktion: elektrische und thermische Leitfähigkeit, Wärmediffusion, Mikrowellenabsorption
- Anwendung: Chip-Verpackung, Kühlstruktur, elektrischer Elektrodenkontakt

### 5. Wolframstäbe für medizinische Geräte

- Funktion: Strahlentherapienadel, Tumorintensitätsmodulationskomponente, Mikrogegengewicht
- Anforderungen: nicht magnetisch, ultrarein, hohe Dichte

### 6. Wolframstab für die wissenschaftliche Forschung

- Anwendungen: Teilchenbeschleuniger, Neutronenquellentargets, Vakuumanoden, experimentelle Instrumente

## 3. Klassifizierung nach Verarbeitungsmethode

Stäbe aus Wolframlegierungen variieren je nach Herstellungsverfahren. Zu den gängigen Verarbeitungsmethoden gehören:

### 1. Pulvermetallurgisch gepresste Stäbe (CIP / geformt)

- Verfahren: Kaltisostatisches Pressen, uniaxiales Pressen mit anschließendem Hochtemperatursintern
- Eigenschaften: dichte Organisation, Batch-Formung

### 2. Heißisostatisch gepresster Stab (HIP-Stab)

- Prozess: Nach der Verkapselung wird das Ganze unter hoher Temperatur und hohem Druck verdichtet
- Vorteile: Ultrahohe Dichte, extrem geringe Porosität, geeignet für hohe Zuverlässigkeitsanforderungen

### 3. Extrudierte Stäbe

- Prozess: Wolframlegierung wird voraussichtlich heiß zu langen Streifen extrudiert
- Anwendung: Mikrowellenkommunikation, thermische Kontrollkomponenten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Drehstäbe/ Schleifstäbe

- Prozess: Durch die Bearbeitung werden hochpräzise Fertigstäbe hergestellt
- Eigenschaften: Ra < 1 μ m , ±0,01 mm Maßtoleranz

#### 5. Spritzgegossene Stäbe (MIM-Verfahren)

- Eigenschaften: Geeignet für kleine und komplexe Strukturstäbe
- Anwendung: Medizinische Wolframteile, Mikro-Trägheitssysteme

#### 6. Gesinterter Blankstab (Schwarzhautstab)

- Status: Unbearbeitet oder nur vorgeschnitten, geeignet für die nachfolgende individuelle Bearbeitung

#### 7. 3D-gedruckte Wolframstäbe (Additiv Fertigung)

- Status: Noch im Explorationsstadium, geeignet für Kleinserienprodukte mit komplexen Strukturen und flexiblen Anforderungen

### Zusammenfassen

Als funktionales Konstruktionsmaterial bildet die Klassifizierung von Wolframlegierungsstäben nicht nur die Grundlage für Produktstandardisierung und -serialisierung, sondern hat auch wichtige Bedeutung für Leistungsdesign, Prozessauswahl und Marktförderung. Das Materialsystem lässt sich durch die Zusammensetzung präzisieren, die Funktion gezielt positionieren und durch den Prozess das optimale Gleichgewicht zwischen Qualität und Effizienz erreichen. Mit der Weiterentwicklung der High-End-Fertigung hin zu intelligenter und individueller Fertigung wird das mehrdimensionale Klassifizierungssystem für Wolframlegierungsstäbe künftig verfeinert und tendenziell digitalisiert und modularisiert, um die Materialforschung und -entwicklung sowie industrielle Anwendungen wissenschaftlicher und systematischer zu unterstützen.

### 1.5 Vergleich zwischen Wolframlegierungsstäben und Wolframkupferstäben , Wolframstäben und anderen Materialien

Wolframlegierungsstäbe, Wolframkupferstäbe und reine Wolframstäbe sind einige häufig verwendete Wolfram-basierte Materialien in der Industrie. Aufgrund ihrer unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften und Anwendungsgebiete spielen sie eine wichtige Rolle in der Fertigungs- und Elektronikindustrie. Das Verständnis ihrer Unterschiede hilft Ihnen, bei der Konstruktion und Auswahl von Materialien sinnvolle Entscheidungen zu treffen.

#### 1.5.1 Vergleich der Zusammensetzung und der grundlegenden Eigenschaften

Materialtyp	Hauptzutaten	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Härte	Wärmeleitfähigkeit	Leitfähigkeit	Mechanische Festigkeit	Hauptmerkmale
Wolframlegierungsstab	Wolfram + Legierungselemente wie	17,0 ~ 18,5	Höher	Medium	Niedrig bis mittel	exzellent	Hohe Dichte, hohe Festigkeit, mechanische

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Nickel, Eisen oder Kupfer						Eigenschaften sind besser als reine Wolframstäbe
<b>Wolframkupferstab</b>	Wolfram + Kupfer	14,0 ~ 16,0	Medi um	Sehr hoch	Höher	besser	Durch die Kombination der hohen Dichte von Wolfram mit der guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Kupfer bietet es eine hervorragende Wärmemanagementl eistung
<b>Reiner Wolframstab</b>	Wolfram	19,3	Sehr hoch	Niedrig	Niedrig	Spröde	Höchste Dichte, hohe Temperaturbeständi gkeit, hohe Härte, aber relativ spröde

### 1.5.2 Dichte und Gewicht

- **Wolframstäbe** haben den höchsten Wolframgehalt und die größte Dichte (19,3 g/cm<sup>3</sup>) und eignen sich daher für Anwendungen mit extrem hohen Anforderungen an Gewicht und Dichte, wie z. B. Gegengewichte, Strahlenschutz usw.
- **Stäbe aus Wolframlegierungen** weisen eine etwas geringere Dichte auf, sind aber dennoch Materialien mit hoher Dichte und einer höheren Festigkeit als reines Wolfram, sodass sie sich für die Herstellung hochfester und hochdichter Teile eignen.
- **Wolframkupferstäbe** haben eine geringere Dichte als Wolfram und Wolframlegierungen, da sie mit Kupfer dotiert sind. Kupfer weist jedoch eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit auf, weshalb es in Situationen beliebter ist, in denen Wärmemanagement erforderlich ist.

### 1.5.3 Wärme- und elektrische Leitfähigkeit

- **Wolframkupferstäbe** haben einen höheren Kupfergehalt und ihre thermische und elektrische Leitfähigkeit ist deutlich besser als die von Stäben aus Wolframlegierungen und reinen Wolframstäben. Daher werden sie häufig in elektronischen Heizkörpern, Elektroden und elektronischen Vakuumgeräten eingesetzt.
- **von Stäben aus Wolframlegierung** ist durchschnittlich und niedriger als bei Wolframkupfer, aber besser als bei reinem Wolfram, was sie für mechanische Strukturen und Hochtemperaturkomponenten geeignet macht.
- **Reine Wolframstäbe haben eine relativ geringe** thermische und elektrische Leitfähigkeit und werden häufiger in Umgebungen verwendet, die eine hohe Temperaturbeständigkeit und hohe Dichte erfordern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 1.5.4 Mechanische Eigenschaften und Verarbeitbarkeit

- **Wolframlegierungsstäbe** weisen durch die Zugabe von Legierungselementen eine deutlich verbesserte Zähigkeit und mechanische Festigkeit auf. Ihre Verarbeitungseigenschaften sind besser als die von reinem Wolfram und sie eignen sich für die Bearbeitung komplexer Teile.
- **Wolframkupferstäbe** vereinen die Festigkeit von Wolfram und die Duktilität von Kupfer mit guter Zähigkeit und thermischer Ermüdungsbeständigkeit, aber der Kupfergehalt begrenzt ihre Hochtemperaturleistung.
- **Reine Wolframstäbe** weisen eine hohe Härte und Sprödigkeit auf, sind schwer zu verarbeiten und neigen zur Rissbildung. Sie werden hauptsächlich in Hochtemperaturumgebungen und Strukturteilen verwendet.

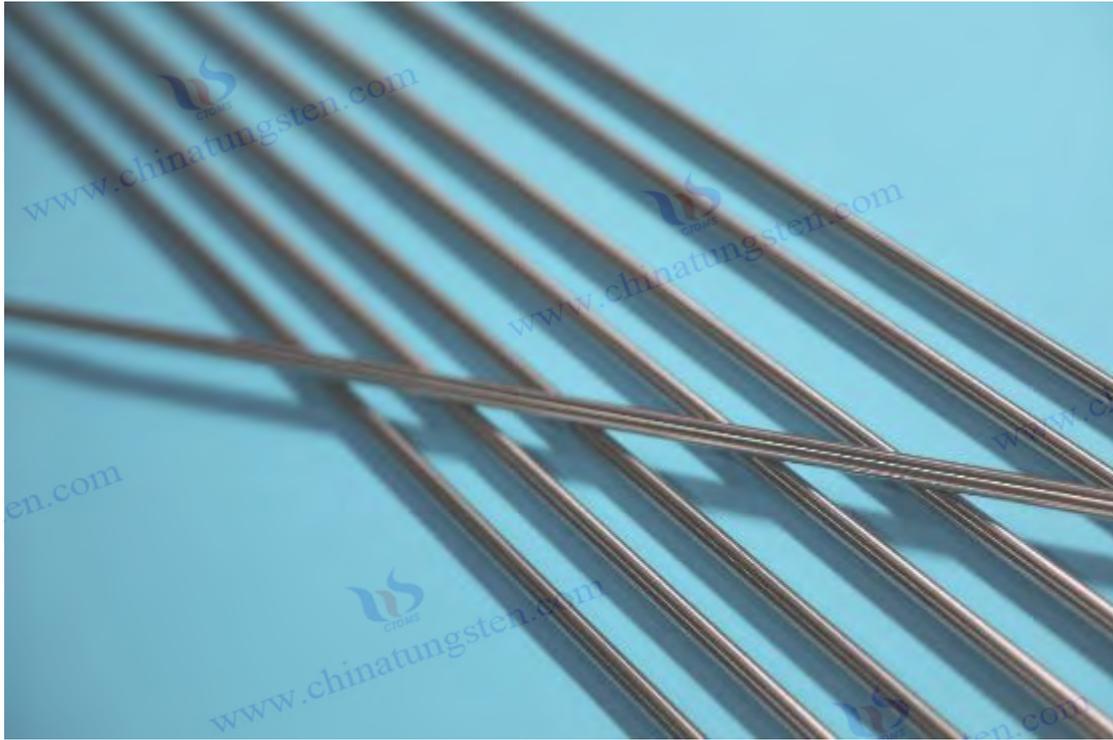
#### 1.5.5 Typische Anwendungsgebiete

Material	Anwendungsbeispiele
<b>Wolframlegierungsstab</b>	Gewichtsgegengewicht, hochfeste Strukturteile, panzerbrechende Kerne, Luft- und Raumfahrtteile
<b>Wolframkupferstab</b>	Elektroden, Strahler, Vakuumröhrenkomponenten, Mikrowellengeräte
<b>Reiner Wolframstab</b>	Hochtemperaturofenteile, Glühfäden, Strahlenschutz, Materialien für die Nuklearindustrie

#### Zusammenfassen

Wolframlegierungsstäbe, Wolframkupferstäbe und reine Wolframstäbe haben jeweils ihre eigenen Vorteile. Wolframlegierungsstäbe werden aufgrund ihrer hohen Dichte und mechanischen Festigkeit häufig im Bereich mechanischer Strukturen eingesetzt. Wolframkupferstäbe sind aufgrund ihrer hervorragenden Wärme- und elektrischen Leitfähigkeit zu einem unverzichtbaren Werkstoff in der Elektronikindustrie geworden. Reine Wolframstäbe eignen sich aufgrund ihrer extrem hohen Dichte und Temperaturbeständigkeit für spezielle Hochtemperatur- und Strahlungsumgebungen. Eine sinnvolle Materialauswahl erfordert eine umfassende Berücksichtigung von Faktoren wie Dichte, Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Anwendungsumgebung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 2 Physikalische und mechanische Eigenschaften von Wolframlegierungsstäben

### 2.1 Kontrolle der Dichte, des spezifischen Gewichts und der Maßgenauigkeit

Da es sich um ein hochdichtes Material handelt, hängt die Kontrolle der Dichte und Größe von Stäben aus Wolframlegierungen direkt mit ihrer Leistung und den Qualitätsanforderungen nachfolgender Anwendungen zusammen. Eine genaue Kontrolle der Dichte und Größe ist der Schlüssel zur Gewährleistung der Stabilität und Konsistenz von Stäben aus Wolframlegierungen.

#### 2.1.1 Dichte und spezifisches Gewicht

- **Die Dichte** ist die Masse eines Materials pro Volumeneinheit und der wichtigste Indikator zur Messung der Qualität von Stäben aus Wolframlegierungen. Die Dichte von Stäben aus Wolframlegierungen liegt üblicherweise zwischen 17,0 und 18,5 g/cm<sup>3</sup>. Der spezifische Wert hängt vom Wolframgehalt und dem Anteil der Legierungselemente ab.
- **Das spezifische Gewicht** ist das Verhältnis der Materialdichte zur Dichte von Wasser. Da die Dichte von Wasser 1 g/cm<sup>3</sup> beträgt, entspricht das spezifische Gewicht eines Wolframlegierungsstabs grundsätzlich seinem Dichtewert.

Durch eine genaue Kontrolle der Dichte kann sichergestellt werden, dass das Material die erwarteten physikalischen Eigenschaften erreicht, wie z. B. genaue Gewichtsverteilungsanforderungen, mechanische Festigkeit und elektromagnetische Abschirmwirkung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eine zu große Dichteabweichung führt zu Schwankungen in der Produktleistung und beeinträchtigt in schwerwiegenden Fällen die Montage und Passung der Teile sowie die Sicherheit des Endprodukts.

### 2.1.2 Schlüsselfaktoren der Dichtekontrolle

- **Verhältnis der Rohstoffkomponenten** : Je höher der Wolframgehalt, desto höher die Dichte. Ein angemessenes Verhältnis von Wolfram und Legierungselementen (wie Nickel, Eisen, Kupfer) ist die Grundlage für die Kontrolle der Dichte .
- **Sinterprozessparameter** : Temperatur, Zeit und Atmosphärenkontrolle haben einen erheblichen Einfluss auf die Dichte. Eine zu niedrige Sintertemperatur führt leicht zu erhöhter Porosität und verringerter Dichte; eine zu hohe Sintertemperatur kann zu Überbrennen und verringerter Materialeistung führen.
- **Gleichmäßigkeit der Pulverpartikel** : Feines Pulver und gleichmäßiges Mischen tragen dazu bei, die Dichte zu verbessern, die Porosität zu verringern und die Materialdichte zu erhöhen.
- **Kaltbearbeitung und Wärmebehandlung** : Durch geeignete Schmiede-, Extrusions- und Wärmebehandlungsverfahren kann die innere Porosität im Material weiter beseitigt und die Dichte verbessert werden.

### 2.1.3 Maßgenauigkeitskontrolle

Wolframlegierungsstäbe beziehen sich auf den Abweichungsbereich zwischen Länge, Durchmesser und Außenmaßen und dem Konstruktionswert. Eine hochpräzise Maßkontrolle gewährleistet die Stabilität und Zuverlässigkeit von Wolframlegierungsstäben während der Bearbeitung, Montage und Verwendung.

- **Die Maßtoleranz** wird üblicherweise entsprechend den Kundenanforderungen und Normen festgelegt. Im Allgemeinen kann die Durchmessertoleranz im Bereich von  $\pm 0,01$  mm bis  $\pm 0,05$  mm kontrolliert werden.
- **die Oberflächenrauheit** trägt zur Maßgenauigkeit bei. Ein guter Oberflächenzustand kann die Bearbeitung vereinfachen und die Leistung des Teils verbessern.
- Um eine hohe Maßgenauigkeit und -konsistenz zu gewährleisten, werden moderne Verarbeitungsgeräte und Messinstrumente (wie Dreikoordinatenmessgeräte und Laserdurchmessermessgeräte) eingesetzt.

### 2.1.4 Technische Maßnahmen zur Maßhaltigkeitskontrolle

- **CNC- Verarbeitungsgeräte** : Verwenden Sie für die Verarbeitung hochpräzise CNC-Dreh- und Schleifmaschinen, um eine stabile Maßgenauigkeit zu gewährleisten.
- **Online-Erkennung und Feedback -Kontrolle** : Ein automatisches Messsystem wird während des Produktionsprozesses eingesetzt, um Maßabweichungen in Echtzeit zu überwachen und Anpassungen vorzunehmen .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Optimierung des Wärmebehandlungsprozesses** : Kontrollieren Sie die Verformung während der Wärmebehandlung, um einen Kontrollverlust der Abmessungen zu vermeiden.
- **Strenge Prozessvorgaben** : einschließlich Schneiden, Schleifen, Polieren und anderer Prozesse, um sicherzustellen, dass jeder Verarbeitungsschritt die Maßanforderungen erfüllt.

### Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe bilden die Grundlage für ihre hohe Leistung. Die Dichtegenauigkeit wirkt sich direkt auf die mechanischen Eigenschaften und Anwendungseffekte des Materials aus. Eine strenge Kontrolle der Maßgenauigkeit gewährleistet die Verarbeitungsleistung des Produkts und die Zuverlässigkeit der Endmontage. Durch die Optimierung des Rohstoffverhältnisses, der Prozessparameter und fortschrittlicher Verarbeitungs- und Prüftechnologien kann effektiv sichergestellt werden, dass die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungsstäben den Konstruktionsanforderungen entsprechen.

## 2.2 Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung

Die Belastbarkeit von Stäben aus Wolframlegierungen ist in der Praxis ein wichtiger Indikator für ihre Belastbarkeit. Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung sind dabei wichtige Parameter zur Bewertung der Materialfestigkeit und Plastizität. Das Verständnis und die Kontrolle dieser Leistungsparameter tragen dazu bei, die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Stäben aus Wolframlegierungen bei Herstellung und Einsatz zu gewährleisten.

### 2.2.1 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit bezeichnet die maximale Spannung, der ein Material in einem Zugversuch standhalten kann. Sie spiegelt die Bruchfestigkeit des Materials wider. Die Zugfestigkeit von Stäben aus Wolframlegierungen ist in der Regel hoch und liegt typischerweise zwischen 600 und 1200 MPa. Der spezifische Wert wird von der Legierungszusammensetzung, dem Herstellungsverfahren und dem Wärmebehandlungsstatus beeinflusst.

- Ein hoher Wolframgehalt erhöht im Allgemeinen die Zugfestigkeit des Materials, ein zu hoher Wolframanteil kann jedoch zu einer verringerten Zähigkeit führen.
- Durch eine sinnvolle Legierungskonstruktion und Wärmebehandlung können die Plastizität und Zähigkeit des Materials verbessert und gleichzeitig eine hohe Festigkeit gewährleistet werden.
- Wolframlegierungsstäbe mit hoher Zugfestigkeit eignen sich für mechanische Teile und Strukturteile, die großen Zugbelastungen standhalten.

### 2.2.2 Streckgrenze

Die Streckgrenze ist der Spannungswert, bei dem ein Material unter Spannung eine dauerhafte plastische Verformung erfährt. Sie spiegelt die elastisch-plastische Grenze des Materials wider. Die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Streckgrenze von Stäben aus Wolframlegierungen ist in der Regel etwas niedriger als die Zugfestigkeit und liegt im Allgemeinen zwischen 400 und 900 MPa.

- Die Streckgrenze beeinflusst die Sicherheitsmarge des Materials in praktischen Anwendungen.
- Bei Stäben aus Wolframlegierungen bedeutet eine höhere Streckgrenze, dass sie während des Gebrauchs größeren Arbeitsbelastungen standhalten können, ohne sich dauerhaft zu verformen.
- Durch eine Optimierung der Sintertemperatur und eine anschließende thermomechanische Behandlung kann die Streckgrenze effektiv verbessert werden.

### 2.2.3 Dehnung

Die Dehnung ist die Fähigkeit eines Materials, sich vor dem Bruch plastisch zu verformen. Sie wird üblicherweise in Prozent angegeben und ist ein wichtiger Indikator für die Zähigkeit und Plastizität eines Materials. Die Dehnung von Stäben aus Wolframlegierungen ist im Allgemeinen gering und liegt typischerweise zwischen 1 % und 10 %.

- Eine geringe Dehnung zeigt an, dass das Material spröde und bruchanfällig ist; eine hohe Dehnung zeigt an, dass das Material eine gute plastische Verformbarkeit besitzt.
- Legierungselemente wie Nickel und Eisen, die der Wolframlegierung hinzugefügt werden, tragen dazu bei, die Dehnung zu erhöhen und das Material weniger anfällig für Sprödrisse zu machen.
- Die erhöhte Dehnung ist für die Formgebung und den sicheren Einsatz von Stäben aus Wolframlegierungen unter komplexen Arbeitsbedingungen von Vorteil.

### 2.2.4 Faktoren, die die mechanische Leistung beeinflussen

- **Zusammensetzungsverhältnis** : Je höher der Wolframgehalt, desto höher die Festigkeit, aber die Dehnung kann abnehmen; die Zugabe von Legierungselementen wie Nickel und Eisen kann die Zähigkeit verbessern .
- **Sinterprozess** : Sintertemperatur, -zeit und -atmosphäre wirken sich direkt auf die Mikrostruktur und Dichte des Materials aus und beeinflussen dadurch die Festigkeit und Plastizität .
- **Wärmebehandlung und Bearbeitung** : Durch geeignete Wärmebehandlungen wie Glühen, Altern und Bearbeitungsprozesse (Schmieden, Extrudieren) können die innere Struktur des Materials angepasst und die mechanischen Eigenschaften verbessert werden.
- **Korngröße** : Eine feine und gleichmäßige Kornstruktur trägt zu verbesserter Festigkeit und Zähigkeit bei.

### Zusammenfassung

Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung von Wolframlegierungsstäben sind wichtige Indikatoren für ihre umfassenden mechanischen Eigenschaften. Durch Optimierung der Zusammensetzung und Prozesskontrolle können Wolframlegierungsstäbe eine angemessene Plastizität bei gleichzeitig

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hoher Festigkeit erreichen, um die Materialeleistungsanforderungen verschiedener industrieller Anwendungen zu erfüllen. Die Beherrschung und Kontrolle dieser Leistungsparameter ist entscheidend für die Qualitätssicherung und Anwendungsentwicklung von Wolframlegierungsstäben.

### 2.3 Härte und Schlagzähigkeit

Härte und Schlagzähigkeit von Wolframlegierungsstäben sind wichtige Indikatoren für ihre Verschleißfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Beschädigungen und spielen eine Schlüsselrolle für die Stabilität und Lebensdauer von Materialien unter komplexen Arbeitsbedingungen. Eine angemessene Kontrolle von Härte und Schlagzähigkeit ist ein wichtiges Mittel, um eine ausgewogene Leistung von Wolframlegierungsstäben zu erreichen.

#### 2.3.1 Härte

Die Härte spiegelt die Fähigkeit eines Materials wider, lokaler plastischer Verformung und Verschleiß zu widerstehen und wird üblicherweise mit Methoden wie der Brinellhärte (HB), der Rockwellhärte (HRC) oder der Vickershärte (HV) gemessen.

- Die Härte von Stäben aus Wolframlegierungen liegt im Allgemeinen im Bereich von **200 bis 400 HB**, und der spezifische Wert variiert je nach Wolframgehalt und Art und Anteil der Legierungselemente.
- Ein hoher Wolframgehalt entspricht normalerweise einer höheren Härte, und durch die Zugabe von Legierungselementen wie Nickel und Eisen kann das Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit angepasst werden.
- Wolframlegierungen mit höherer Härte eignen sich zur Herstellung verschleißfester Teile und kratzfester Komponenten.
- Durch eine Wärmebehandlung (z. B. Alterungsbehandlung) kann die Härte noch weiter erhöht werden.

#### 2.3.2 Schlagzähigkeit

Die Schlagzähigkeit ist die Fähigkeit eines Materials, plötzlichen äußeren Kräften standzuhalten, ohne zu brechen. Sie wird üblicherweise mit dem Charpy-Schlagversuch oder dem Izod-Schlagversuch ermittelt.

- Stäbe aus Wolframlegierungen weisen im Allgemeinen eine mittlere bis gute Schlagfestigkeit auf, wobei die typische Schlagabsorptionsenergie im Bereich von **5 bis 20 J/cm<sup>2</sup> liegt**.
- Die Schlagfestigkeit wird maßgeblich durch die Kornstruktur des Materials, die Legierungselemente und den Wärmebehandlungsprozess beeinflusst.
- Durch die Zugabe von Elementen wie Nickel und Eisen zur Legierung können die Zähigkeit und Schlagfestigkeit des Materials deutlich verbessert und das Risiko eines Sprödbruchs verringert werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Auch eine optimierte thermomechanische Verarbeitung (z. B. Schmieden, Extrusion) kann zur Verbesserung der Schlagzähigkeit beitragen.

### 2.3.3 Gleichgewicht zwischen Härte und Schlagfestigkeit

Bei Stäben aus Wolframlegierungen muss normalerweise das beste Gleichgewicht zwischen Härte und Schlagfestigkeit gefunden werden:

- Eine zu hohe Härte verbessert zwar die Verschleißfestigkeit, kann jedoch dazu führen, dass das Material spröde wird und seine Schlagfestigkeit abnimmt.
- Durch die Kombination aus angemessener Härte und guter Zähigkeit kann sichergestellt werden, dass das Material sowohl verschleißfest ist als auch in Umgebungen mit hoher Nutzungsintensität nicht so leicht bricht.
- Bei Stäben aus Wolframlegierungen, wie etwa der Entwurf der Legierungszusammensetzung, die Kontrolle der Sinterparameter und die Optimierung der Wärmebehandlungs- und Kaltbearbeitungsverfahren, sind der Schlüssel zum Erreichen eines Leistungsgleichgewichts.

### Zusammenfassung

Härte und Schlagzähigkeit sind zwei wichtige Aspekte der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungsstäben. Durch geeignete Materialverhältnisse und Prozesskontrolle können Wolframlegierungsstäbe mit hoher Härte und guter Schlagzähigkeit hergestellt werden, die den Anforderungen verschiedener Industriebereiche an Materialverschleißfestigkeit und Schadensresistenz gerecht werden. Eine angemessene Leistungsbalance kann die Anwendungszuverlässigkeit und Lebensdauer von Wolframlegierungsstäben verbessern.

## 2.4 Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient und Hochtemperaturverhalten

Wolframlegierungsstäbe werden in vielen Industriebereichen eingesetzt, insbesondere in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Wärmebelastung. Ihre Wärmeleitfähigkeit, ihr Wärmeausdehnungskoeffizient und ihr Hochtemperaturverhalten wirken sich direkt auf die Stabilität und Lebensdauer des Materials aus. Das Verständnis und die Optimierung dieser thermophysikalischen Eigenschaften ist der Schlüssel zur Entwicklung leistungsstarker Wolframlegierungsprodukte.

### 2.4.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist die Fähigkeit eines Materials, Wärme zu übertragen. Die Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungen liegt zwischen der von reinem Wolfram und anderen Legierungen und beträgt üblicherweise **70 bis 120 W / (m · K)**.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Wolfram selbst hat eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit (etwa  $170 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), aber die Zugabe von Legierungselementen wie Nickel und Eisen verringert die Gesamtwärmeleitfähigkeit.
- Wolframlegierungen eignen sich für viele Anwendungen, die eine schnelle Wärmeableitung erfordern, wie etwa elektronische Heizkörper, Hochtemperaturwerkzeuge und Wärmeaustauschgeräte.
- Die Dichte und Kornstruktur des Materials haben einen erheblichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit, und die Sinter- und Wärmebehandlungsprozesse müssen kontrolliert werden, um die Dichte zu verbessern und die Wärmeleitfähigkeit zu optimieren.

#### 2.4.2 Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE)

Der Wärmeausdehnungskoeffizient gibt die Fähigkeit eines Materials an, sich bei Temperaturänderungen auszudehnen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient einer Wolframlegierung ist relativ niedrig und beträgt etwa  $4,5 \times 10^{-6}$  bis  $6,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

- Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient führt dazu, dass Wolframlegierungen in Hochtemperaturumgebungen nur geringe Maßänderungen und geringe thermische Spannungen aufweisen, sodass sie sich für den Einsatz in Präzisionsgeräten und Hochtemperatur-Strukturteilen eignen.
- Durch die Zugabe von Legierungselementen wird der Wärmeausdehnungskoeffizient leicht erhöht, er ist jedoch immer noch viel niedriger als bei vielen häufig verwendeten Metallmaterialien (wie Kupfer und Aluminium).
- Die Stabilität des Wärmeausdehnungskoeffizienten ist sehr wichtig, um thermische Ermüdungsrisse beim Schweißen, Zusammenbauen und im Gebrauch zu verhindern.

#### 2.4.3 Hochtemperaturverhalten

Stäbe aus Wolframlegierungen verfügen über hervorragende Hochtemperatüreigenschaften, darunter einen hohen Schmelzpunkt, eine gute Hochtemperaturfestigkeit und Wärmeermüdungsbeständigkeit.

- Der Schmelzpunkt von Wolfram liegt bei  $3422 \text{ °C}$ . Obwohl der Schmelzpunkt einer Wolframlegierung etwas niedriger ist, behält sie auch bei Temperaturen über  $1500 \text{ °C}$  gute mechanische Eigenschaften.
- Seine Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen ist etwas schlechter als die von reinem Wolfram und es muss auf der Oberfläche beschichtet oder in einer Schutzatmosphäre verwendet werden, um Oxidationsschäden zu vermeiden.
- Dank der Wolframlegierung findet es breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Militärindustrie und bei der Herstellung von Hochtemperaturöfen.
- Die thermische Ermüdungsbeständigkeit bestimmt die Lebensdauer des Materials in wiederholten Heiz- und Abkühlzyklen. Durch Optimierung der Materialzusammensetzung und Mikrostruktur kann die thermische Ermüdungsbeständigkeit verbessert werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe zeichnen sich durch eine gute Wärmeleitfähigkeit und einen niedrigen und stabilen Wärmeausdehnungskoeffizienten aus, wodurch sie auch in Hochtemperaturumgebungen eine gute Leistung erbringen. Ihre hohe Temperaturfestigkeit und ihr thermisches Ermüdungsverhalten gewährleisten den zuverlässigen Einsatz unter extremen Arbeitsbedingungen. Durch eine sinnvolle Materialkonstruktion und Prozessoptimierung können die thermophysikalischen Eigenschaften von Wolframlegierungsstäben weiter verbessert werden, um den Anforderungen anspruchsvollerer Branchen gerecht zu werden.

## 2.5 Elektrische Eigenschaften, magnetisches Verhalten und Strahlungsbeständigkeit

Wolframlegierungsstäbe finden wichtige Anwendung in bestimmten Spezialbereichen wie der Elektronik, der magnetischen Abschirmung und der Nuklearindustrie. Ihre elektrischen Eigenschaften, ihr magnetisches Verhalten und ihre Strahlungsbeständigkeit sind Schlüsselindikatoren für die Bewertung der Anwendbarkeit von Materialien. Die Beherrschung dieser Eigenschaften trägt zur Optimierung des Materialdesigns und zur Erweiterung des Anwendungsspektrums bei.

### 2.5.1 Elektrische Eigenschaften

Der Wolframgehalt einer Legierung wird maßgeblich durch die Legierungszusammensetzung beeinflusst und liegt normalerweise unter dem von reinem Wolfram, jedoch über dem anderer Schwermetalllegierungen.

- Die elektrische Leitfähigkeit von reinem Wolfram ist relativ hoch und beträgt etwa  $18 \times 10^6$  S/m, aber die elektrische Leitfähigkeit von Wolframlegierungen sinkt aufgrund der Anwesenheit von Legierungselementen wie Nickel und Eisen im Allgemeinen auf 5 bis  $12 \times 10^6$  S/m.
- Der spezifische Widerstand einer Wolframlegierung ist höher als der von reinem Wolfram und sie eignet sich für Anwendungen, die einen gewissen Widerstand, aber auch eine hohe Festigkeit erfordern, wie etwa Widerstandselemente, Elektrodenmaterialien usw.
- Durch die Optimierung des Zusammensetzungsverhältnisses und des Wärmebehandlungsprozesses können die elektrischen Eigenschaften verbessert und ein Gleichgewicht zwischen Festigkeit und Leitfähigkeit erreicht werden.

### 2.5.2 Magnetische Reaktion

Wolfram selbst ist ein paramagnetisches Material. Die magnetischen Eigenschaften von Wolframlegierungen hängen hauptsächlich von der Art und dem Gehalt der Legierungselemente ab.

- Durch die Zugabe von Elementen der Eisengruppe (wie Eisen und Nickel) wird die magnetische Reaktion der Legierung verstärkt, die einen gewissen Ferromagnetismus oder Paramagnetismus aufweisen kann.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Wolframlegierungen haben Auswirkungen auf ihre Stabilität in magnetischen Abschirmmaterialien und Magnetfeldumgebungen.
- In einigen Anwendungen werden Wolframlegierungen mit geringer magnetischer Reaktion bevorzugt, um Störungen des Magnetfelds zu vermeiden.

### 2.5.3 Strahlungsresistenz

Wolfram und Wolframlegierungen werden aufgrund ihrer hohen Ordnungszahl und Dichte häufig in der Nuklearindustrie und im Strahlenschutz verwendet und weisen eine gute Strahlungsbeständigkeit auf.

- Wolframlegierungen weisen eine hervorragende Abschirmwirkung gegenüber elektromagnetischer Strahlung wie Neutronen und Gammastrahlen auf und werden häufig in Schutzmaterialien für Kernreaktoren und Schutzabdeckungen für radioaktive Geräte verwendet.
- Durch die Zugabe von Legierungselementen wird die Strahlungsbeständigkeit im Allgemeinen nicht wesentlich verringert, allerdings sollte auf die Gleichmäßigkeit und Dichte der Legierung geachtet werden, um ein Eindringen der Strahlung zu verhindern.
- Wolframlegierungen weisen eine gute strukturelle Stabilität und Beständigkeit gegen Strahlenschäden in bestrahlten Umgebungen auf und sind für den Langzeitgebrauch geeignet.

### Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe bilden die Grundlage für ihre Anwendung in den Bereichen Elektronik, magnetische Abschirmung und Nuklearindustrie. Durch Anpassung der Legierungszusammensetzung und der Prozessparameter kann die Leistung optimiert und an die Anforderungen unterschiedlicher Industrieumgebungen angepasst werden, um den umfassenden Gebrauchswert des Materials zu steigern.

## 2.6 Analyse der Korrosionsbeständigkeit und chemischen Stabilität

Wolframlegierungsstäbe sind in verschiedenen industriellen Umgebungen chemischen Medien und feuchter Luft ausgesetzt. Ihre Korrosionsbeständigkeit und chemische Stabilität sind Schlüsseleigenschaften für den langfristigen, zuverlässigen Einsatz des Materials. Eine eingehende Analyse der Korrosionsbeständigkeit von Wolframlegierungen kann bei der Materialauswahl und der Entwicklung von Schutzmaßnahmen hilfreich sein.

### 2.6.1 Korrosionsbeständigkeit

Wolframlegierungen weisen eine gute Korrosionsbeständigkeit auf, die sich vor allem in folgenden Eigenschaften zeigt:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Es weist eine hohe Beständigkeit gegenüber den meisten Säuren und Laugen auf** , weist insbesondere in neutralen oder schwach sauren Umgebungen eine hervorragende Leistung auf und eignet sich für chemische Geräte und Instrumentenkomponenten.
- **Wolfram bildet sich ein stabiler Oxidfilm** , der das korrosive Medium wirksam isolieren und eine weitere Korrosion des Materials verzögern kann.
- In stark oxidierenden Säuren (wie Salpetersäure oder Perchlorsäure) kann die Korrosionsbeständigkeit der Wolframlegierung beeinträchtigt sein und es müssen Schutzmaßnahmen ergriffen werden.
- Der Gehalt und die Verteilung von Legierungselementen (wie Nickel und Eisen) beeinflussen die allgemeine Korrosionsbeständigkeit der Wolframlegierung. Eine gleichmäßige Legierungsstruktur trägt zur Verbesserung der Korrosionsgleichmäßigkeit und Korrosionsbeständigkeit bei.

## 2.6.2 Chemische Stabilität

Wolframlegierungen zeichnen sich dadurch aus, dass sich die chemischen Eigenschaften des Materials in verschiedenen Umgebungen nicht leicht verändern. Zu den Hauptmerkmalen gehören:

- **Der hohe Schmelzpunkt und die thermische Stabilität** machen die Wolframlegierung bei hohen Temperaturen und in rauen Umgebungen stabil und sie zersetzt oder verformt sich nicht so leicht.
- Es weist eine gute Stabilität gegenüber den meisten gängigen chemischen Medien wie Wasser und alkalischen Lösungen auf.
- An der Luft und bei Raumtemperatur kann der Oxidfilm auf der Oberfläche der Wolframlegierung eine weitere Oxidation verhindern und die Haltbarkeit des Materials verbessern.
- Beim Einsatz in extremen Umgebungen wie starken Säuren oder Laugen ist eine Materialschuttschicht oder ein spezielles Verfahren zur Verbesserung der Stabilität erforderlich.

## 2.6.3 Faktoren, die die Korrosionsbeständigkeit und chemische Stabilität beeinflussen

- **Legierungszusammensetzung und Mikrostruktur** : Art und Verteilung der Legierungselemente beeinflussen die Bildung und Stabilität der Oxidschicht und damit das Korrosionsverhalten.
- **Oberflächenbehandlung** : **Durch** Polieren, Sprühen oder Beschichten kann die Korrosionsbeständigkeit des Materials wirksam verbessert werden.
- **Umgebungsbedingungen** : Temperatur, Medienkonzentration, pH-Wert usw. wirken sich direkt auf die Korrosionsrate und die Materiallebensdauer aus .
- **Herstellungsverfahren** : Hohe Dichte und gleichmäßige Mikrostruktur tragen zur Reduzierung von Korrosionspunkten und einer Verlängerung der Lebensdauer bei.

## Zusammenfassung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungsstäbe weisen eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und chemische Stabilität auf und eignen sich für den Einsatz in einer Vielzahl rauer Umgebungen. Durch die rationelle Gestaltung der Legierungszusammensetzung, optimierte Herstellungsprozesse und den Einsatz von Oberflächenschutzmaßnahmen können die Korrosionsbeständigkeit und Lebensdauer von Wolframlegierungsstäben weiter verbessert werden, um den Anforderungen verschiedener Industriebereiche gerecht zu werden.

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

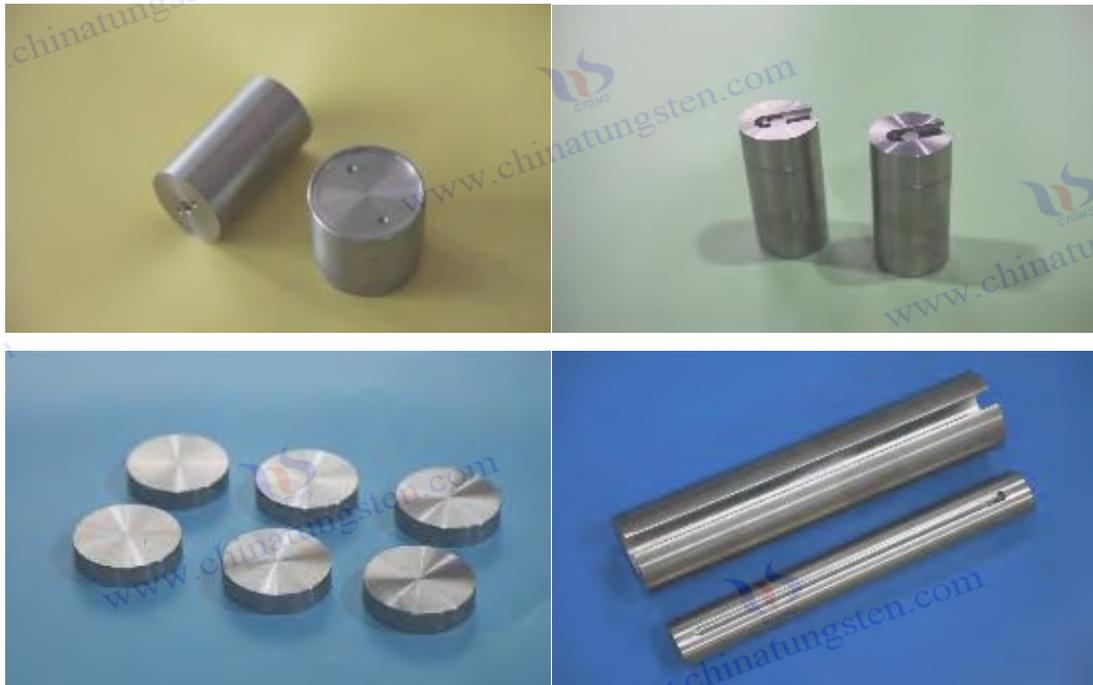
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

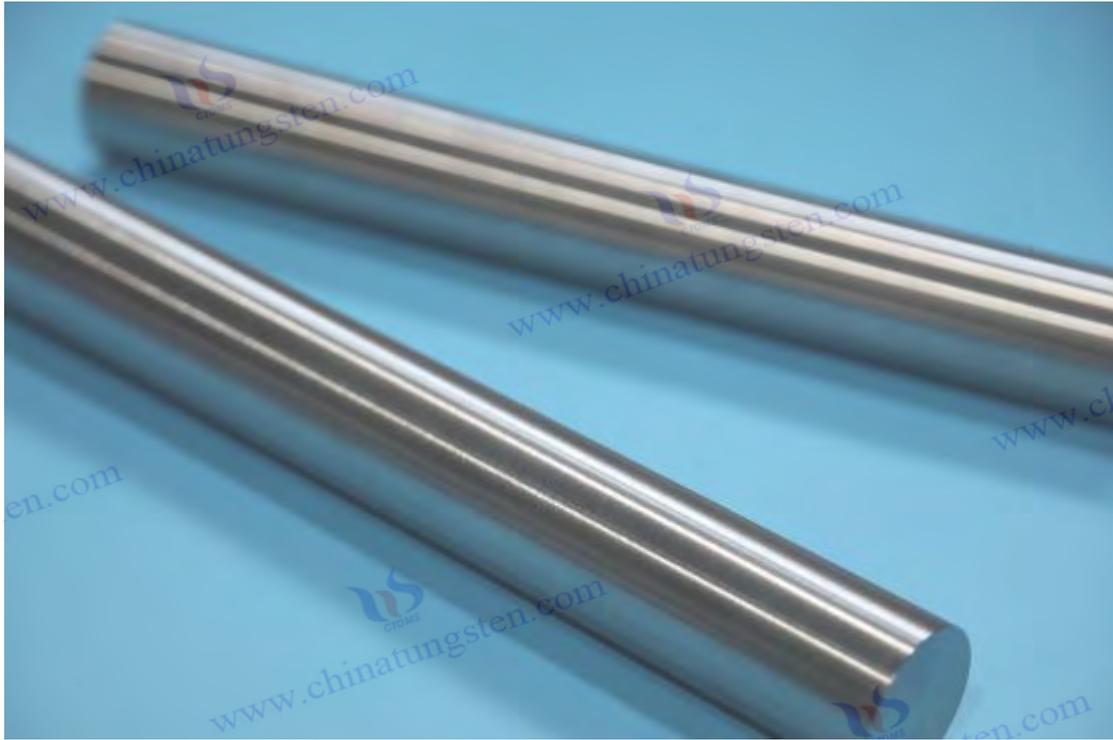
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Kapitel 3 Herstellungs- und Formtechnologie von Wolframlegierungsstäben

### 3.1 Rohstoffaufbereitung und Pulvereigenschaften

Die Qualität von Wolframlegierungsstäben hängt stark von der Reinheit, Partikelgrößenverteilung, Morphologie und Mischgleichmäßigkeit der verwendeten Rohstoffe ab. Eine hochwertige Rohstoffaufbereitung und die Kontrolle der Pulvereigenschaften bilden die Grundlage für hervorragende physikalische und mechanische Eigenschaften sowie die Stabilität von Wolframlegierungsstäben. Dieser Abschnitt erläutert detailliert die Auswahl der Rohstoffe, die Vorbehandlung, die Pulveraufbereitung und den Einfluss ihrer Eigenschaften auf nachfolgende Prozesse und die Produktleistung bei der Herstellung von Wolframlegierungsstäben.

#### 3.1.1 Quellen und Arten von Wolframpulver

Wolframpulver ist der wichtigste Rohstoff für die Herstellung von Stäben aus Wolframlegierungen. Zu den häufig verwendeten Wolframpulvern gehören:

- **Chemisch reduziertes Wolframpulver** : wird durch Reduzierung von Wolframat in Wasserstoff gewonnen, mit hoher Reinheit und guter Partikelmorphologie, geeignet für die Herstellung von Hochleistungswolframlegierungen.
- **Durch carbothermische Reduktion gewonnenes Wolframpulver** : hergestellt durch die Methode der carbothermischen Reduktion, kostengünstig, aber mit relativ hohem Verunreinigungsgehalt und breiter Partikelgrößenverteilung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Sprühgetrocknetes Wolframpulver** : Wird zur Herstellung von hochwertigem Wolframpulver mit gleichmäßigen Partikeln und regelmäßiger Partikelmorphologie verwendet, das sich für das anschließende Pressen und Sintern eignet.
- **Sphärisches Wolframpulver** : hergestellt durch Plasma-Sphäroidisierung und andere Technologien, mit guter Fließfähigkeit und Schüttdichte, geeignet für pulvermetallurgische Hochleistungs-Wolframlegierungen.

Bei der Auswahl von Wolframpulver müssen Reinheit, Partikelgröße, Morphologie und Preisfaktoren umfassend berücksichtigt werden, um bestimmte Prozessanforderungen und Leistungsstandards zu erfüllen.

### 3.1.2 Auswahl des Legierungselementpulvers

Wolframlegierungen werden üblicherweise mit Legierungselementen wie Nickel, Eisen und Kupfer dotiert, die mit Wolframpulver in Pulverform vermischt werden. Die Partikelgröße und Morphologie des Legierungspulvers haben großen Einfluss auf die Mischgleichmäßigkeit und die endgültigen Materialeigenschaften.

- **Nickelpulver** : Häufig wird sphärisches Nickelpulver mit gleichmäßiger Partikelgröße verwendet, was sich positiv auf die Gleichmäßigkeit der Mischung und die Sinterdichte auswirkt .
- **Eisenpulver** : Verwenden Sie Eisenpulver mit hoher Reinheit und niedrigem Sauerstoffgehalt, um zu verhindern, dass Verunreinigungen die Materialeigenschaften beeinträchtigen .
- **Kupferpulver** : Häufig wird kugelförmiges oder flockiges Kupferpulver verwendet. Eine gute Wärmeleitfähigkeit ist besonders wichtig für die Herstellung von Wolfram-Kupfer-Legierungen .

Das Pulver der Legierungselemente sollte eine gleichmäßige Partikelverteilung aufweisen und eine Agglomeration vermeiden, um die Gleichmäßigkeit der Legierungszusammensetzung auf mikroskopischer Ebene sicherzustellen.

### 3.1.3 Pulvervorbehandlungsprozess

Die Pulvervorbehandlung ist entscheidend für die Verbesserung der Partikelleistung und der Mischeffekte. Zu den gängigen Vorbehandlungsmethoden gehören:

- **Trocknungsbehandlung** : Entfernen Sie die auf der Pulveroberfläche absorbierte Feuchtigkeit , um die Bildung von Poren während des Sinterprozesses zu verhindern.
- **Sieben und Klassieren** : Pulver unterschiedlicher Partikelgröße werden durch Siebe getrennt, um gemischte Pulver mit gleichmäßiger Partikelgrößenverteilung zu erhalten und die Pressdichte zu verbessern.
- **Oberflächenaktivierung** : Aktivieren Sie das Pulver mechanisch oder chemisch , um die Bindungskraft zwischen den Partikeln zu verbessern und die Sinterdichte zu fördern.
- **Mischen und Homogenisieren** : Verwenden Sie Kugelmøhlen, Mischer und andere Geräte, um über einen längeren Zeitraum gleichmäßig zu mischen, um eine gleichmäßige

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verteilung der Legierungselemente zu gewährleisten und eine ungleichmäßige Leistung zu vermeiden.

### 3.1.4 Partikelgrößenverteilung und Morphologie von Pulvern

Die Partikelgrößenverteilung hat einen wichtigen Einfluss auf die Dichte, die mechanischen Eigenschaften und die Verarbeitungsleistung von Wolframlegierungsstäben:

- **Feines Pulver** trägt zur Verbesserung der Sinterdichte und der mechanischen Eigenschaften bei, zu feines Pulver neigt jedoch leicht zur Agglomeration, was sich auf die Fließfähigkeit und die Verarbeitungsleistung auswirkt.
- **Grobes Pulver** weist eine gute Fließfähigkeit auf, weist jedoch beim Sintern eine große Porosität und eine geringe Dichte auf.
- **Die ideale Partikelgrößenverteilung** ist normalerweise eine breite Spektrumverteilung, d. h. das feine Pulver füllt die Lücken zwischen den groben Pulvern, um eine hohe Dichte zu erreichen.

Aussehen:

- **Sphärisches Pulver** weist eine gute Fließfähigkeit und Schüttdichte auf, was den Press- und Sinterprozess begünstigt.
- **Bei unregelmäßigen Pulvern** besteht die Gefahr, dass sich zwischen den Pulvern Hohlräume bilden, manchmal tragen sie jedoch dazu bei, die mechanische Verriegelungsfestigkeit zu verbessern.

### 3.1.5 Pulvermischung und Proportionskontrolle

Wolframlegierungen hängen stark vom genauen Verhältnis und der gleichmäßigen Mischung von Wolfram und Legierungselementen ab. In typischen Wolframlegierungen wie dem W-Ni-Fe-System liegt der Wolframgehalt üblicherweise über 90 %, und der Anteil der Legierungselemente ist relativ gering.

- Um die Genauigkeit der Zutaten sicherzustellen, werden hochpräzise Wiegegeräte verwendet.
- Verwenden Sie effiziente Homogenisierungs- und Mischgeräte (z. B. Kugelmöhlen oder Trommelmischer) für eine gründliche Durchmischung. Zeit und Geschwindigkeit müssen optimiert werden, um eine Pulveragglomeration oder Morphologieveränderung zu verhindern.
- Während des Mischvorgangs kann eine entsprechende Menge Schmiermittel (z. B. Polyvinylalkohol, Paraffin) hinzugefügt werden, um die Fließfähigkeit des Pulvers und die Kompressionsleistung zu verbessern.

### 3.1.6 Pulverfließfähigkeit und Schüttdichte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Die Fließfähigkeit** beeinflusst die Gleichmäßigkeit und Formgebungseffizienz beim Pulverpressen. Pulver mit geringer Fließfähigkeit kann leicht zu einer ungleichmäßigen Pressdichte führen, was die spätere Sinterqualität beeinträchtigt.
- **Die Schüttdichte** bestimmt die Pulverbeladungsmenge und Pressdichte beim Pressen und ist ein Schlüsselfaktor zur Verbesserung der Dichte und der mechanischen Eigenschaften des Materials.
- Fließfähigkeit und Schüttdichte werden normalerweise durch die Pulvermorphologie, die Partikelgrößenverteilung und den Vorbehandlungsprozess eingestellt und gesteuert.

### 3.1.7 Chemische Reinheit und Verunreinigungskontrolle von Pulvern

- Verunreinigungselemente wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel usw. beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit der Wolframlegierung erheblich.
- Verwenden Sie hochreine Rohstoffe und eine saubere Produktionsumgebung, um die chemische Reinheit des Pulvers streng zu kontrollieren.
- Verwenden Sie eine Vakuum- oder Schutzatmosphärenverarbeitung, um Oxidation und die Aufnahme von Verunreinigungen zu verringern.

### Zusammenfassung

Die Rohstoffaufbereitung und die Optimierung der Pulvereigenschaften bilden die Grundlage für die Hochleistungsherstellung von Wolframlegierungsstäben. Durch die gezielte Auswahl von hochreinem Wolframpulver und Legierungselementpulver mit geeigneter Partikelgröße und guter Morphologie sowie durch wissenschaftliche Vorbehandlungs- und Mischprozesse können Dichte und mechanische Eigenschaften der Wolframlegierung effektiv verbessert werden. Dies schafft eine solide Grundlage für nachfolgende Formgebungs-, Sinter- und Wärmebehandlungsprozesse. Ein hochwertiges Pulversystem ist der Schlüssel zur Gewährleistung der stabilen Leistung und hervorragenden Qualität von Wolframlegierungsstäben.

## 3.2 Pulvermetallurgisches Pressverfahren (Formpressen, isostatisches Pressen)

Die Herstellung von Wolframlegierungsstäben erfolgt mittels pulvermetallurgischer Presstechnik. Durch die gleichmäßige Formgebung des Wolframlegierungspulvers unter einem bestimmten Druck entsteht ein Grünkörper mit vorläufiger Form und Dichte, der die Grundlage für das anschließende Sintern und die Wärmebehandlung bildet. Die Wahl des Pressverfahrens und die Parametersteuerung wirken sich direkt auf die Dichte, Gleichmäßigkeit und spätere Leistung des Grünkörpers aus und sind ein wichtiger Bestandteil der Wolframlegierungsstabherstellung.

### 3.2.1 Grundprinzipien des Pulverpressens

Beim pulvermetallurgischen Pressen werden Pulverpartikel durch mechanischen Druck miteinander in Kontakt gebracht und verzahnt, wodurch die Porosität reduziert und ein Rohling mit einer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewissen mechanischen Festigkeit gebildet wird. Dieser Prozess wird hauptsächlich durch die Umlagerung, plastische Verformung und Verdichtung der Pulverpartikel erreicht.

- **Umordnungsphase** : Durch die Kompression bewegen sich die Pulverpartikel und ordnen sich neu an, wodurch die Lücken zwischen den Pulvern verringert werden .
- **Phase der plastischen Deformation** : Die Partikel werden komprimiert und plastisch deformiert, wodurch die Hohlräume weiter gefüllt werden.
- **Verdichtungsphase** : maximale **Dichte** erreicht und ein fester Körper gebildet.

Die Morphologie, Partikelgrößenverteilung und Fließfähigkeit des Pulvers haben einen wesentlichen Einfluss auf die Presswirkung.

### 3.2.2 Uniaxiales Pressen

Das Formpressen ist das am häufigsten verwendete Pressverfahren bei der Herstellung von Stäben aus Wolframlegierungen. Das Pulver wird mit einachsigen Druck in die Form gepresst, um den gewünschten Rohling zu bilden.

#### Prozessmerkmale:

- **Das Gerät ist einfach aufgebaut** , bequem zu bedienen und für die Massenproduktion geeignet.
- **Der Formdruck ist hoch und erreicht im Allgemeinen 200–600 MPa** , wodurch die Pulverdichte effektiv erhöht wird.
- **Das Formdesign ist flexibel** und kann verschiedene Anforderungen hinsichtlich Querschnittsform und -größe erfüllen.
- **Die Kraft ist unidirektional, die Dichteverteilung ist ungleichmäßig** und die Dichte in der Mitte des Grünkörpers ist geringer als die an der Oberfläche, was beim anschließenden Sintern zu Verformungen führen kann.

#### Wichtigste Prozessparameter:

- **Pressdruck** : Je höher der Druck, desto höher die Dichte, aber zu hoher Druck kann zu Matrizenverschleiß oder Pulverbruch führen .
- **Pressgeschwindigkeit** : Durch die Steuerung der entsprechenden Geschwindigkeit kann der Bruch der Pulverpartikel verringert und die Gleichmäßigkeit der Dichte verbessert werden .
- **Haltezeit** : Durch **eine** angemessene Haltezeit können die Pulverpartikel vollständig in Kontakt kommen und die Festigkeit des Grünkörpers verbessert werden.
- **Formtemperatur** : **Durch** richtiges Erhitzen der Form kann die Plastizität des Pulvers verbessert und Risse und Verformungen reduziert werden.

#### Anwendung:

Das Formpressen eignet sich zur Herstellung größerer Wolframlegierungsstäbe mit einfachem Querschnitt. Es kann auch zum Vorformen von Knüppeln für die anschließende Weiterverarbeitung verwendet werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.2.3 Isostatisches Pressen

Isostatisches Pressen ist ein Formgebungsverfahren, bei dem eine hohe Dichte und gleichmäßige Dichteverteilung erreicht wird, indem in einem hydraulischen oder pneumatischen Medium ein gleichmäßiger, in mehrere Richtungen gerichteter Druck auf den Pulverkörper ausgeübt wird.

#### Prozessmerkmale:

- **Der Druck wird gleichmäßig übertragen und die Dichte gleichmäßig verteilt**, wodurch das Problem des Dichtegradienten während des Formprozesses wirksam vermieden wird.
- **Die Druckrichtung ist vielfältig, die Größe und Form des Rohlings sind flexibel** und es eignet sich für komplexe Formen und hochpräzise Teile aus Wolframlegierungen.
- **Die Ausrüstungsinvestitionen sind hoch, der Prozess ist relativ kompliziert** und die Produktionseffizienz ist geringer als beim Formen.
- **Es wird im Allgemeinen in zwei Kategorien unterteilt: kaltisostatisches Pressen (CIP) und heißisostatisches Pressen (HIP)**.

#### Wichtigste Prozessparameter:

- **Druckbereich**: Beim kaltisostatischen Pressen beträgt der Druck im Allgemeinen 100 bis 400 MPa, und beim heißisostatischen Pressen kann eine Umgebung mit hohen Temperaturen und Drücken von über 100 MPa erreicht werden.
- **Medienauswahl**: Als Druckübertragungsmedium wird häufig eine Flüssigkeit (z. B. Wasser, Öl) oder ein Gas (z. B. Stickstoff) verwendet.
- **Haltezeit**: Stellen Sie sicher, dass das Pulver vollständig verdichtet und verformt ist.
- **Temperaturkontrolle**: Heißisostatisches Pressen in Kombination mit hohen Temperaturen fördert das Sintern des Pulvers und verbessert Dichte und Leistung.

#### Anwendung:

Isostatisches Pressen eignet sich zur Herstellung von Hochleistungsstäben aus Wolframlegierungen, insbesondere von Schlüsselkomponenten, die eine gleichmäßige Dichte und stabile mechanische Eigenschaften erfordern, wie etwa Legierungsstäbe für die Luft- und Raumfahrtindustrie sowie hochwertige medizinische Geräte.

### 3.2.4 Vergleich der Vor- und Nachteile zwischen Formpressen und isostatischem Pressen

Projekt	Formpressen	Isostatisches Pressen
<b>Ausrüstungsinvestitionen</b>	Untere	Höher
<b>Pressgeschwindigkeit</b>	Schnell, massenproduktionstauglich	Langsam, relativ geringe Produktionseffizienz
<b>Dichtegleichmäßigkeit</b>	Der Dichtegradient ist offensichtlich und die Dichte in der Mitte ist geringer	Gleichmäßige Dichte und wenige Defekte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Komplexität gestalten</b>	Geeignet für einfache Querschnitte	Geeignet für komplexe Formen
<b>Mechanische Eigenschaften des fertigen Produkts</b>	Stabil, abhängig von der nachfolgenden Prozesskontrolle	Hohe Dichte, hohe Leistung
<b>kosten</b>	Niedrig	hoch

### 3.2.5 Schlüsseltechnologien und Prozessoptimierung

- **Optimierung des Formdesigns** : Verwenden Sie mehrstufiges Pressen oder progressive Presstechnologie, um den Dichtegradienten zu reduzieren und die Gleichmäßigkeit des Grünkörpers zu verbessern.
- **Pulvervorbehandlung** : Verbessern Sie die Fließfähigkeit und Schmiereigenschaften des Pulvers, um eine Agglomeration der Pulverpartikel oder Kratzer in der Form während des Pressens zu vermeiden .
- **Anpassung der Pressprozessparameter** : Kontrollieren Sie Druck, Geschwindigkeit und Haltezeit angemessen , um Pulverbruch und Restspannungen zu vermeiden.
- **Modernisierung der Ausrüstung für isostatisches Pressen** : Durch den Einsatz integrierter Hochdruck- und Hochtemperaturausrüstung wird isostatisches Pressen (HIP) erreicht und die Dichte und die mechanischen Eigenschaften des Grünkörpers weiter verbessert.
- **Kombination mehrerer Prozesse** : Kombination aus Formpressen und isostatischem Pressen zur Verbesserung der Produktionseffizienz und Produktleistung.

### 3.2.6 Grünunterdrückung und Umweltschutzanforderungen

Bei der modernen Produktion von Wolframlegierungen wird großer Wert auf Umweltschutz und Sicherheit gelegt. Auch der pulvermetallurgische Pressprozess muss den einschlägigen Umweltschutznormen entsprechen:

- Staubrückgewinnung und -behandlung zur Vermeidung von Umweltverschmutzung und Gesundheitsrisiken für die Bediener.
- Verwenden Sie unschädliche oder wenig giftige Schmiermittel, um die Verschmutzung durch Prozessabfälle zu reduzieren.
- Verwalten Sie den Energieverbrauch im Produktionsprozess und verbessern Sie die Effizienz der Energienutzung.

### Zusammenfassung

Das pulvermetallurgische Pressverfahren ist der Schlüsselschritt bei der Herstellung von Wolframlegierungsstäben. Formpressen und isostatisches Pressen bieten jeweils ihre Vorteile und erfüllen unterschiedliche Produktanforderungen. Die sinnvolle Auswahl und Optimierung der Pressprozessparameter gewährleistet nicht nur die Dichte und Gleichmäßigkeit des Rohlings, sondern bildet auch eine solide Grundlage für die anschließende Sinterung und Wärmebehandlung. Mit dem technologischen Fortschritt werden die Kombination von isostatischem Pressen und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Formpressen sowie die Entwicklung neuer umweltfreundlicher Verfahren die Herstellungstechnologie von Wolframlegierungsstäben weiter vorantreiben und zu hoher Effizienz, hoher Qualität und Umweltschutz beitragen.

### 3.3 Sintertechnologie und Atmosphärenkontrolle

Sintern ist ein kritischer Prozess bei der Herstellung von Wolframlegierungsstäben. Dabei diffundieren und verbinden sich die Pulverpartikel durch Erhitzen bei hohen Temperaturen, wodurch eine Pulververdichtung erreicht und die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Eine sinnvolle Sintertechnologie und Atmosphärenkontrolle beeinflussen nicht nur Dichte, Struktur und Leistung des Materials, sondern auch die Dimensionsstabilität und Qualitätskonsistenz des Endprodukts.

#### 3.3.1 Grundlagen und Prozesse des Sinterns

Sintern ist der Prozess des Erhitzens des Pulverkörpers auf den Feststoffdiffusionstemperaturbereich des Pulvermaterials (üblicherweise 70–90 % des Schmelzpunkts des Materials), um Diffusion und Bindung zwischen den Partikeln zu ermöglichen und so eine Verdichtung zu erreichen. Die wichtigsten Mechanismen sind:

- **Festkörperdiffusion** : Wolfram- und Legierungselementatome diffundieren an der Partikelgrenzfläche **und** bilden Korngrenzenbindungen.
- **Reduzierung der Partikeloberflächenenergie** : Reduzierung der Systemenergie durch Grenzflächendiffusion, die zum Schließen und Verdichten der Poren führt.
- **Kornwachstum** : Ein angemessenes Kornwachstum trägt zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bei, übermäßiges Wachstum führt jedoch zu einer Leistungsminderung .

Der Sinterprozess gliedert sich üblicherweise in drei Phasen: Vorwärmen, Isolieren und Abkühlen. Temperaturverlauf und Isolierzeit müssen präzise gesteuert werden.

#### 3.3.2 Gängige Sintertechnologien

##### 3.3.2.1 Atmosphärenschtzensintern

Das Sintern wird in einer Schutzatmosphäre (wie Wasserstoff, Argon oder Mischgas) durchgeführt, um die Oxidation der Wolframlegierung zu verhindern und die Diffusion und Gleichmäßigkeit der Legierungselemente zu fördern.

- Eine Wasserstoffatmosphäre kann Oberflächenoxide wirksam reduzieren und die Sinterdichte verbessern.
- Eine Argon-Inertatmosphäre eignet sich dazu, die negativen Auswirkungen reduzierender Gase auf bestimmte Legierungselemente zu vermeiden.
- Die Anforderungen an die Reinheit der Atmosphäre sind hoch und der Gehalt an Verunreinigungsgasen (Sauerstoff, Stickstoff, Wasserdampf) liegt unter dem ppm-Wert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3.2.2 Vakuumsintern

Die Hochvakuumumgebung reduziert die Oxidation und verbessert die Reinheit und die mechanischen Eigenschaften des Materials. Vakuumsintern eignet sich für die Herstellung hochwertiger Wolframlegierungsprodukte.

- Der Vakuumgrad erreicht üblicherweise  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  Pa.
- Verhindern Sie wirksam das Eindringen von Verunreinigungsgasen während des Sinterns und reduzieren Sie Poren und Verunreinigungseinschlüsse.
- Die Investitions- und Betriebskosten für die Ausrüstung sind hoch.

### 3.3.2.3 Heißisostatisches Pressen (HIP)

Durch die Kombination von Hochtemperaturesintern und isostatischem Hochdruckpressen kann eine ultrahohe Verdichtung des Wolframlegierungspulvers erreicht werden.

- Hohe Temperaturen und isotroper Hochdruck werden gleichzeitig angewendet, um das Sintern geschlossener Zellen und die Porenbeseitigung des Pulvers zu fördern.
- Die Dichte und die mechanischen Eigenschaften des Materials werden erheblich verbessert und eignen sich für die Herstellung von Schlüsselkomponenten.
- Die Ausrüstung ist komplex und teuer und eignet sich für Produkte mit hoher Wertschöpfung.

### 3.3.3 Steuerung der Sinterprozessparameter

- **Sintertemperatur** : Im Allgemeinen liegt sie bei 1450 °C bis 1600 °C. Bei zu niedriger Temperatur ist die Dichte unzureichend, bei zu hoher Temperatur kann es zu groben Körnern und Komponentenseigerung kommen .
- **Isolierzeit** : Abhängig von der Materialzusammensetzung und der Größe des Rohlings, in der Regel 1 bis 4 Stunden , um eine ausreichende Diffusion und Verdichtung zu gewährleisten.
- **Heizrate** : Kontrollieren Sie die Heizrate angemessen, um übermäßige thermische Spannungen im Rohling zu vermeiden und Risse zu vermeiden .
- **Abkühlrate** : Mäßig langsames Abkühlen , um thermische Spannungen und strukturelle Verformungen zu reduzieren.

### 3.3.4 Wirkung und Steuerungstechnik der Sinteratmosphäre

Die Sinteratmosphäre spielt eine entscheidende Rolle für die Mikrostruktur und die Eigenschaften von Stäben aus Wolframlegierungen.

- **Reduzierende Atmosphäre (Wasserstoff )** : entfernt die Oxidschicht auf der Pulveroberfläche und fördert die Bindung zwischen den Partikeln.
- **Inerte Atmosphäre (Argon )** : verhindert die Korrosion der Wolframlegierung durch reduzierende Atmosphäre bei hohen Temperaturen, geeignet für Legierungen, die empfindlich auf ihre Zusammensetzung reagieren.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Kontrolle der Atmosphärenreinheit** : Verwenden Sie hochreines Gas und stellen Sie das Gerät mit einer Gasreinigungsvorrichtung aus, um einen extrem niedrigen Sauerstoffgehalt sicherzustellen und Oxidation und Nitrierung zu verhindern.
- **Luftstrom und -druck** : Passen Sie Luftstromrate und -druck angemessen an, um eine gleichmäßige Atmosphäre und einen gleichmäßigen Wärmeleitungseffekt zu gewährleisten.

### 3.3.5 Überwachung und Prüfung der Sinterqualität

- Mittels thermischer Analyse (z. B. Differenzial-Thermoanalyse DTA und Thermogravimetrische Analyse TGA) werden die Temperatur- und Reaktionseigenschaften des Sinterprozesses überwacht.
- Der Sintereffekt wurde durch Mikrostrukturanalyse, Porositätsbestimmung und Prüfung der mechanischen Eigenschaften bewertet.
- Überwachen Sie die Zusammensetzung der Atmosphäre in Echtzeit, um das Eindringen von Verunreinigungsgasen zu verhindern.
- Die Größe und Verformung des fertigen Produkts werden getestet, um sicherzustellen, dass das Produkt den Designanforderungen entspricht.

### Zusammenfassung

Sintertechnologie und Atmosphärenkontrolle sind die zentralen Elemente bei der Herstellung von Wolframlegierungsstäben und beeinflussen direkt die Dichte, Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften des Materials. Die Wahl eines geeigneten Sinterverfahrens (Atmosphärenschutz, Vakuum oder heißisostatisches Pressen) in Kombination mit einer präzisen Prozessparameterkontrolle und Atmosphärenreinigungstechnologie kann die Gesamtleistung und Stabilität von Wolframlegierungsstäben deutlich verbessern. Zukünftig wird der Sinterprozess mit der Weiterentwicklung der Anlagentechnik und der Materialwissenschaft effizienter und intelligenter und bietet eine solide Garantie für die hochwertige Herstellung von Wolframlegierungsstäben.

## 3.4 Optimierung des Wärmebehandlungs- und Verdichtungsprozesses

Wolframlegierungsstäbe spielen eine entscheidende Rolle bei der Verbesserung der Materialdichte, der Optimierung der Mikrostruktur und der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Eine sinnvolle Gestaltung und Optimierung des Wärmebehandlungsprozesses kann nicht nur die Restspannung beim Sintern effektiv beseitigen, sondern auch die Kornverfeinerung und gleichmäßige Verteilung der Legierungselemente fördern und so die Gesamtleistung der Wolframlegierung deutlich verbessern.

### 3.4.1 Zweck und Funktion der Wärmebehandlung

- **Spannungsabbau** : Die beim Sintern und Abkühlen entstehende thermische Spannung wird durch eine Wärmebehandlung abgebaut, um Risse und Verformungen des Grünkörpers zu verhindern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Förderung der Verdichtung** : Eine Wärmebehandlung bei hohen Temperaturen fördert den Diffusionsprozess, füllt Mikroporen und erhöht die Materialdichte.
- **Kornkontrolle** : Korngröße kontrollieren, Struktur verfeinern, Zähigkeit und Festigkeit verbessern .
- **Homogenisierung von Legierungselementen** : Beschleunigen Sie die Diffusion von Legierungselementen und vermeiden Sie eine Entmischung der Zusammensetzung.
- **Verbesserung der mechanischen Eigenschaften** : beispielsweise Erhöhung der Härte, Streckgrenze und Duktilität.

### 3.4.2 Hauptarten der Wärmebehandlung

#### 3.4.2.1 Lösungsglühen

- Durch Erhitzen bei hoher Temperatur auf die Lösungstemperatur (normalerweise 1200–1400 °C) können sich die Legierungselemente vollständig in der Matrix auflösen.
- Nach dem Warmhalten für eine gewisse Zeit schnell abkühlen lassen, um eine gleichmäßige feste Lösungsstruktur zu fixieren.
- Verbessern Sie effektiv die Gleichmäßigkeit und die mechanischen Eigenschaften von Materialien.

#### 3.4.2.2 Zeitgerechte Verarbeitung

- Die Ausfällung von Legierungselementen und Verstärkungsphasen wird gefördert, indem die Legierung bei mittleren und niedrigen Temperaturen (500–800 °C) gehalten wird.
- Verbessern Sie die Härte und Festigkeit des Materials, während die entsprechende Duktilität erhalten bleibt.
- Die sinnvolle Auswahl von Alterungstemperatur und -zeit ist der Schlüssel zur Leistungsoptimierung.

#### 3.4.2.3 Glühen

- Durch Niedertemperaturglühen werden innere Spannungen beseitigt und die Materialzähigkeit verbessert.
- Die Temperatur wird im Allgemeinen auf 600–900 °C geregelt und die Isolierzeit wird entsprechend der Materialdicke angepasst.
- Geeignet zur Verbesserung der nachfolgenden Verarbeitungsleistung.

### 3.4.3 Optimierung der Wärmebehandlungsprozessparameter

- **Temperaturregelung** : Steuern Sie die Heiztemperatur präzise, um ein Überbrennen oder eine unzureichende Temperatur zu verhindern.
- **Heizrata** : Langsames Erhitzen , um einen thermischen Schock zu vermeiden und das Risiko von Rissen zu verringern.
- **Haltezeit** : Stellen Sie sicher, dass die Wärmebehandlungswirkung ausreichend ist und vermeiden Sie Kornwachstum aufgrund einer zu langen Haltezeit .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Kühlmethode** : Wählen Sie je nach Leistungsanforderungen eine schnelle oder langsame Abkühlung, die sich auf die Materialstruktur und -leistung auswirkt .

#### 3.4.4 Hilfsttechnologien für den Verdichtungsprozess

- **Wärmebehandlung durch heißisostatisches Pressen (HIP)** : Sintern und Verdichten werden gleichzeitig bei hoher Temperatur und hohem Druck durchgeführt, wodurch die Dichte des Materials erheblich verbessert wird.
- **Kombination aus HIP und Wärmebehandlung** : Maximieren Sie die Leistung durch HIP-Verdichtung, gefolgt von einer gezielten Wärmebehandlung.
- **Impulswärmebehandlungstechnologie** : Verwenden Sie schnelle Impulserhitzung , um die Diffusion zu fördern, die Wärmebehandlungszeit zu verkürzen und die Produktionseffizienz zu verbessern.

#### 3.4.5 Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und Leistung

- Die Wärmebehandlung fördert die Korngrenzendiffusion, verringert die Porosität und verbessert die Bindungsstärke.
- Durch die Kornverfeinerung werden die Zähigkeit und Schlagfestigkeit des Materials verbessert.
- Eine gleichmäßige Verteilung der Legierungselemente verbessert die mechanischen Gesamteigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit.

#### 3.4.6 Qualitätskontroll- und Prüfmethode

- Mittels Mikroskopie wurden die mikrostrukturellen Veränderungen vor und nach der Wärmebehandlung analysiert.
- Der Verdichtungseffekt wurde durch Dichtemessung und Porositätsanalyse bewertet.
- Durch Tests mechanischer Eigenschaften wird die Auswirkung der Wärmebehandlung auf Festigkeit, Härte und Duktilität überprüft.
- Spannungstests (z. B. eine Röntgen-Eigenstressanalyse) bestätigen den Spannungsabbaueffekt.

#### Zusammenfassung

Wärmebehandlung und Verdichtung sind wichtige technische Schritte bei der Herstellung von Wolframlegierungsstäben . Durch die wissenschaftliche Entwicklung von Wärmebehandlungsparametern und die Kombination fortschrittlicher Verdichtungstechnologien können die Gleichmäßigkeit der inneren Struktur und die mechanischen Eigenschaften des Materials effektiv verbessert werden, um die hohen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Wolframlegierungsstäben in High-End-Anwendungen zu erfüllen. Mit der Entwicklung neuer Wärmebehandlungsanlagen und intelligenter Steuerungstechnik wird sich der Wärmebehandlungsprozess von Wolframlegierungsstäben zukünftig präziser, effizienter und umweltfreundlicher gestalten.

#### 3.5 Zerspanungs- und Oberflächentechnik (Schleifen, Polieren, Drehen)

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stäbe aus Wolframlegierungen müssen üblicherweise bearbeitet und oberflächenbehandelt werden, um die Anforderungen an Größe und Oberflächenqualität zu erfüllen. Aufgrund der hohen Härte und Sprödigkeit von Wolframlegierungen ist ihre Verarbeitung schwierig. Eine sinnvolle Auswahl und Optimierung der Bearbeitungs- und Oberflächenbehandlungsverfahren ist von großer Bedeutung, um Produktgenauigkeit und -leistung zu gewährleisten.

### 3.5.1 Bearbeitungseigenschaften von Stäben aus Wolframlegierung

- **Hohe Härte und Zähigkeit** : Wolframlegierungen haben eine Härte von HV300 oder höher und weisen eine gute Zähigkeit auf, gleichzeitig ist das Material jedoch spröde und neigt bei der Verarbeitung zu Rissen.
- **Hohe Verschleißfestigkeit** : Bei der Verarbeitung von Wolframlegierungen verschleifen die Werkzeuge schnell, daher sind Werkzeuge mit hoher Härte und Verschleißfestigkeit erforderlich.
- **Gute Wärmeleitfähigkeit** : Sie begünstigt die schnelle Ableitung der Verarbeitungswärme, die hohe Härte führt jedoch zu großen Schnittkräften.
- **Verarbeitungsschwierigkeiten** : Während des Schneidvorgangs können Mikrorisse, Verbrennungen und Oberflächenrauheiten auftreten und die Verarbeitungsparameter müssen streng kontrolliert werden .

### 3.5.2 Schleifen

Schleifen ist die am häufigsten verwendete Endbearbeitungsmethode bei der Verarbeitung von Stäben aus Wolframlegierungen und dient hauptsächlich der Verbesserung der Maßgenauigkeit und Oberflächenrauheit.

- **Schleifwerkzeuge** : Es wird eine Diamantschleifscheibe oder eine CBN-Schleifscheibe verwendet, die sich aufgrund ihrer hohen Härte und Verschleißfestigkeit für die Bearbeitung von Wolframlegierungen eignet .
- **Parameter des Schleifprozesses** :
  - Schleifscheibengeschwindigkeit: Wird durch die Materialhärte und das Schleifscheibenmaterial bestimmt, im Allgemeinen 20.000–40.000 U/min.
  - Vorschubgeschwindigkeit: langsam und gleichmäßig, um Überhitzung und Verbrennungen zu vermeiden.
  - Kühlung und Schmierung: Verwenden Sie Kühlmittel auf Wasser- oder Ölbasis, um Materialschäden durch zu hohe Verarbeitungstemperaturen zu vermeiden.
- **Schleifmethode** :
  - Das Außenrundscheifen wird zur Durchmesserbearbeitung von Stäben aus Wolframlegierungen verwendet.
  - Durch Innenlochscheifen wird die Lochgröße angepasst.
- **Notiz** :
  - Kontrollieren Sie die Schleifzugabe, um Risse durch Überbearbeitung zu vermeiden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Um die Schleifleistung und Oberflächenqualität aufrechtzuerhalten, richten Sie die Schleifscheibe regelmäßig aus.

### 3.5.3 Polieren

Das Polieren wird hauptsächlich verwendet, um die Oberflächenbeschaffenheit von Stäben aus Wolframlegierungen zu verbessern, Oberflächendefekte zu reduzieren und die Korrosionsbeständigkeit und Ästhetik zu verbessern.

- **Poliermaterial** : Verwenden Sie Diamantpolierpaste oder Aluminiumoxid-Poliermittel und wählen Sie je nach Polieranforderungen unterschiedliche Partikelgrößen aus .
- **Poliermethode** :
  - Das manuelle Polieren eignet sich für kleine Chargen oder Sonderteile.
  - Mechanische Poliergeräte eignen sich für die Produktion im großen Maßstab und verbessern Effizienz und Konsistenz.
- **Poliervorgang** :
  1. Grobpolieren: Entfernen Sie große Kratzer und Unebenheiten auf der Oberfläche.
  2. Feinpolieren: Verfeinern Sie die Oberfläche weiter und verbessern Sie die Glätte.
  3. Ultrafeines Polieren: Erzielt einen Spiegeleffekt, die Oberflächenrauheit Ra kann unter 0,01 µm liegen.
- **Polierhinweise** :
  - Halten Sie die polierte Oberfläche sauber, um Kratzer durch Verunreinigungen zu vermeiden.
  - Kontrollieren Sie Polierzeit und Druck, um übermäßigen Materialverschleiß zu vermeiden.

### 3.5.4 Drehen

Drehen ist ein wichtiges Verfahren zur Formgebung und Maßbearbeitung von Stäben aus Wolframlegierungen und eignet sich zur Bearbeitung von Wellen, Zylindern und anderen Formen.

- **Werkzeugauswahl** :
  - Verwenden Sie Hartmetallwerkzeuge oder Diamantwerkzeuge, um scharfe Schnitte und Verschleißfestigkeit zu gewährleisten.
  - Die Parameter der Werkzeuggeometrie müssen entsprechend den Eigenschaften der Wolframlegierung optimiert werden, um Schnittkräfte und Vibrationen zu reduzieren.
- **Verarbeitungsparameter** :
  - Die Schnittgeschwindigkeit ist im Allgemeinen niedrig und liegt bei 20–60 m/min.
  - Vorschubgeschwindigkeit und Schnitttiefe werden entsprechend der Werkstückhärte und der Standzeit des Werkzeugs angepasst.
  - Um thermische Schäden zu vermeiden, muss für eine ausreichende Kühlung gesorgt werden.
- **Drehmethode** :
  - Durch Grobdrehen wird überschüssiges Material schnell entfernt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Durch Fertigdrehen werden die gewünschten Abmessungen und die gewünschte Oberflächenqualität erreicht.
- **Wendeschwierigkeiten :**
  - Absplitterungen beim Schneiden.
  - Verhindern Sie Risse oder Materialablösungen während der Verarbeitung.

### 3.5.5 Hilfsfunktion der Oberflächenbehandlungstechnologie

- **Bearbeitung nach der Wärmebehandlung :** Durch die Wärmebehandlung kommt es häufig zu Maßänderungen, und durch die Bearbeitung kann die Maßgenauigkeit korrigiert und verbessert werden.
- **Oberflächenverstärkungsbehandlung :** Verbessern Sie die Oberflächenhärte und Verschleißfestigkeit durch Kugelstrahlen, Laseroberflächenbehandlung und andere Technologien .
- **Korrosionsschutzbeschichtung :** Auf die Oberfläche des Wolframlegierungsstabs wird eine Schutzschicht aufgetragen, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern .

### 3.5.6 Qualitätskontrolle der Bearbeitung und Oberflächenbehandlung

- **Maßerkennung :** Verwenden Sie ein Dreikoordinatenmessgerät (KMG), ein Laserdurchmessermessgerät und andere Geräte, um die Maßgenauigkeit sicherzustellen .
- **Erkennung der Oberflächenrauheit :** Verwenden Sie ein Rauheitsmessgerät zum Messen und stellen Sie sicher, dass die Designindikatoren eingehalten werden.
- **Mikrostrukturprüfung :** Analysieren Sie die Änderungen der Oberflächenstruktur nach der Verarbeitung und erkennen Sie , ob eine Wärmeeinflusszone entsteht.
- **Leistungsprüfung :** **Prüfung** der mechanischen Eigenschaften und der Ermüdungslebensdauer, um die Auswirkungen der Verarbeitungstechnologie auf die Materialeigenschaften zu überprüfen.

### Zusammenfassung

Die Bearbeitungs- und Oberflächenbehandlungstechnologie ist ein wichtiger Bestandteil der Herstellung von Wolframlegierungsstäben. Angesichts der hohen Härte und Sprödigkeit von Wolframlegierungen können geeignete Schleif-, Polier- und Drehverfahren in Kombination mit optimierten Verarbeitungsparametern und modernster Ausrüstung die Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität des Produkts gewährleisten und den Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen gerecht werden. Gleichzeitig können durch Oberflächenverstärkung und Korrosionsschutzbehandlung die Leistung und Lebensdauer von Wolframlegierungsstäben weiter verbessert werden.

### 3.6 Neue Fertigungstechnologien: Extrusion, Walzen, Additive Fertigung

Mit dem kontinuierlichen Fortschritt der Materialwissenschaft und Fertigungstechnologie nimmt das traditionelle Pulvermetallurgieverfahren zwar eine dominierende Stellung bei der Herstellung von Stäben aus Wolframlegierungen ein, es weist jedoch auch einige Einschränkungen auf, wie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beispielsweise begrenzte Dichte und organisatorische Gleichmäßigkeit, geringe Komplexität der Formgebung usw. Um den Bedarf an Hochleistungsstäben aus Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in anderen Bereichen hinsichtlich komplexer Formen, hoher Dichte und hervorragender mechanischer Eigenschaften zu decken, wurden in den letzten Jahren schrittweise neue Herstellungstechnologien wie Extrusion, Walzen und additive Fertigung eingeführt und rasch weiterentwickelt, wodurch die Herstellungsverfahren für Stäbe aus Wolframlegierungen erheblich bereichert wurden.

### 3.6.1 Extrusionstechnologie

Beim Extrudieren handelt es sich um einen kontinuierlichen Formungsprozess, bei dem Barren aus Wolframlegierungen bei hoher Temperatur oder Raumtemperatur durch die Matrizenöffnung einem Druck ausgesetzt werden, damit das Material plastisch entlang der Matrizenöffnung fließen kann und die gewünschte Querschnittsform und -größe erreicht wird.

#### Eigenschaften des Extrusionsprozesses

- **Hohe plastische Verformung** : Durch eine starke plastische Verformung werden die Körner verfeinert und die mechanischen Eigenschaften des Materials verbessert.
- **Verbesserung der Dichte** : Der Extrusionsprozess fördert den Verschluss der inneren Poren und die Verdichtung des Gewebes.
- **Flexible Form** : Um komplexe strukturelle Anforderungen zu erfüllen, können verschiedene Querschnittsformen verarbeitet werden.
- **Hohe Produktionseffizienz** : geeignet für die kontinuierliche Chargenproduktion langer Stangen.

#### Extrusionsverfahren

- **Direktextrusion** : Die Richtung des Knüppels und der Extrusion ist gleich, die Gerätestruktur ist einfach und das Verfahren eignet sich für großformatige Materialien.
- **Indirektes Extrudieren** : Die Matrize bewegt sich und der Block bleibt stationär, wodurch Reibung und Extrusionsdruck reduziert werden.
- **Heißextrusion** : Extrusion bei hoher Temperatur zur Verbesserung der Materialplastizität und Reduzierung der Verarbeitungskraft.
- **Kaltfließpressen** : Extrusion bei Raumtemperatur zur Verbesserung der Oberflächenqualität und der mechanischen Eigenschaften des Endprodukts.

#### Extrusionsprozessparameter

- Extrusionstemperatur, Geschwindigkeit und Düsendesign haben einen erheblichen Einfluss auf die Qualität des fertigen Produkts.
- Je größer das Extrusionsverhältnis (Querschnittsflächenverhältnis), desto vollständiger die Verformung und desto besser die Materialdichte und Leistung.
- Schmiermittel werden verwendet, um die Reibung zu verringern und die Oberflächenqualität zu verbessern.

#### Anwendung der Extrusionstechnologie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Herstellung von hochfesten und hochdichten Stäben aus Wolframlegierungen, insbesondere solchen mit großen Abmessungen und komplexem Querschnitt.
- Durch mehrere Extrusionsprozesse werden die Körner weiter verfeinert, um die Zähigkeit und Verschleißfestigkeit zu verbessern.

### 3.6.2 Walztechnik

Walzen ist ein Verarbeitungsverfahren, bei dem mit Walzen Druck auf Wolframlegierungsstäbe ausgeübt wird, um eine plastische Verformung des Materials zu bewirken, die Querschnittsgröße zu verringern und die Organisationsstruktur zu verbessern.

#### Merkmale des Walzprozesses

- **Starke Kontinuität** : geeignet für die Massenproduktion von Stangen und Streifen.
- **Kornverfeinerung** : Plastische Verformung fördert die Bildung von Korngrenzen und verbessert die Zähigkeit des Materials .
- **Hohe Maßgenauigkeit** : Durch mehrere Walzdurchgänge kann die Größe präzise gesteuert werden.
- **Gute Oberflächenqualität** : Die Oberfläche ist nach dem Walzen relativ glatt, was für die nachfolgende Verarbeitung praktisch ist.

#### Rollverfahren

- **Warmwalzen** : Bei hoher Temperatur durchgeführt, weist das Material eine gute Plastizität auf und lässt sich leicht verformen .
- **Kaltwalzen** : Verarbeitung bei Raumtemperatur zur Erhöhung der Oberflächenhärte und -festigkeit und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften .
- **Rückwärtswalzen** : Walzen in abwechselnde Richtungen , um die Gleichmäßigkeit der Struktur zu verbessern.
- **Mehrwälzenwalzen** : geeignet für die Umformung komplexer Querschnitte.

#### Walzprozessparameter

- Walztemperatur und -geschwindigkeit wirken sich direkt auf die Struktur und Eigenschaften des Materials aus.
- Um Verformungen und Lücken zu kontrollieren, muss das Design des Mehrdurchgang-Walzschemas wissenschaftlich erfolgen.
- Walzenmaterialien und Schmiertechnologie gewährleisten Oberflächenqualität und Gerätelebensdauer.

#### Anwendung der Walztechnologie

- Bereiten Sie schlanke Stäbe, Streifen und Bleche aus Wolframlegierungen vor.
- Wird für Wolframlegierungsprodukte mit hohen Anforderungen an Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität verwendet.

### 3.6.3 Additive Fertigungstechnologie (3D-Druck)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Additive Fertigungstechnologien, insbesondere 3D-Drucktechnologien wie das Laserschmelzen von Metallpulvern (Selective Laser Melting, SLM) und das Elektronenstrahlschmelzen (EBM), bieten neue Möglichkeiten für die individuelle Anpassung und Herstellung komplexer Strukturen von Stäben aus Wolframlegierungen.

### Funktionen der additiven Fertigung

- **Herstellung komplexer Strukturen** : Es können komplexe geometrische Formen hergestellt werden, die mit herkömmlichen Verfahren nur schwer herzustellen sind, wie z. B. innere Hohlräume und Gitterstrukturen.
- **Hohe Materialausnutzungsrate** : Pulver wird direkt geformt , um Materialabfall zu reduzieren.
- **Große Designfreiheit** : Das Design kann schnell an die Nachfrage angepasst werden, wodurch der Produktentwicklungszyklus verkürzt wird.
- **Funktionale Integration** : Ermöglicht die Herstellung multifunktionaler Verbundstrukturen.

### Herausforderungen im additiven Fertigungsprozess

- Der hohe Schmelzpunkt und die hohe Wärmeleitfähigkeit der Wolframlegierung erschweren die Kontrolle der Temperatur des Schmelzbades.
- Das schnelle Schmelzen und Abkühlen von Pulver durch Laser- oder Elektronenstrahlen kann leicht zu thermischen Spannungen und Rissen führen.
- Die Fließfähigkeit und die Gleichmäßigkeit der Verteilung des Pulvers haben einen erheblichen Einfluss auf die Formqualität.
- Die Gerätekosten sind hoch, die Prozessparameter komplex und für Wolframlegierungen ist eine spezielle Entwicklung erforderlich.

### Technologischer Fortschritt

- Neue hochenergetische Strahlquellen und Scanstrategien reduzieren die thermische Belastung und verbessern die Umformqualität.
- Durch eine Pulvervorbehandlung und eine Optimierung der Atmosphärenkontrolle können Defekte reduziert werden.
- Zur Verbesserung der Materialeigenschaften werden Nachbearbeitungsprozesse (wie beispielsweise heißisostatisches Pressen) mit dem 3D-Druck kombiniert.

### Anwendungsperspektiven der additiven Fertigung

- Kundenspezifische Produktion von Wolframlegierungsteilen in Kleinserien und mit hoher Komplexität.
- Rapid Prototyping und Funktionstestmuster.
- Die Luft- und Raumfahrtindustrie, die Nuklearindustrie usw. haben Bedarf an komplexen Strukturen und Hochleistungsteilen aus Wolframlegierungen.

### Zusammenfassung

Extrusion, Walzen und additive Fertigung bieten vielfältige technische Möglichkeiten zur Herstellung von Wolframlegierungsstäben . Extrusions- und Walztechnologien verfeinern die Körner und erhöhen die Dichte durch plastische Verformung, was sich für die Massenproduktion

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Größenkontrolle eignet. Die additive Fertigung hingegen ist mit ihrer strukturellen Gestaltungsfreiheit und den Vorteilen der Materialeinsparung der Zukunftstrend bei der Herstellung komplexer Wolframlegierungsteile. In Kombination mit traditionellen pulvermetallurgischen Verfahren wird die koordinierte Anwendung dieser neuen Technologien die Entwicklung der Wolframlegierungsstabherstellung hin zu hoher Leistung, Multifunktionalität und Intelligenz fördern.

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

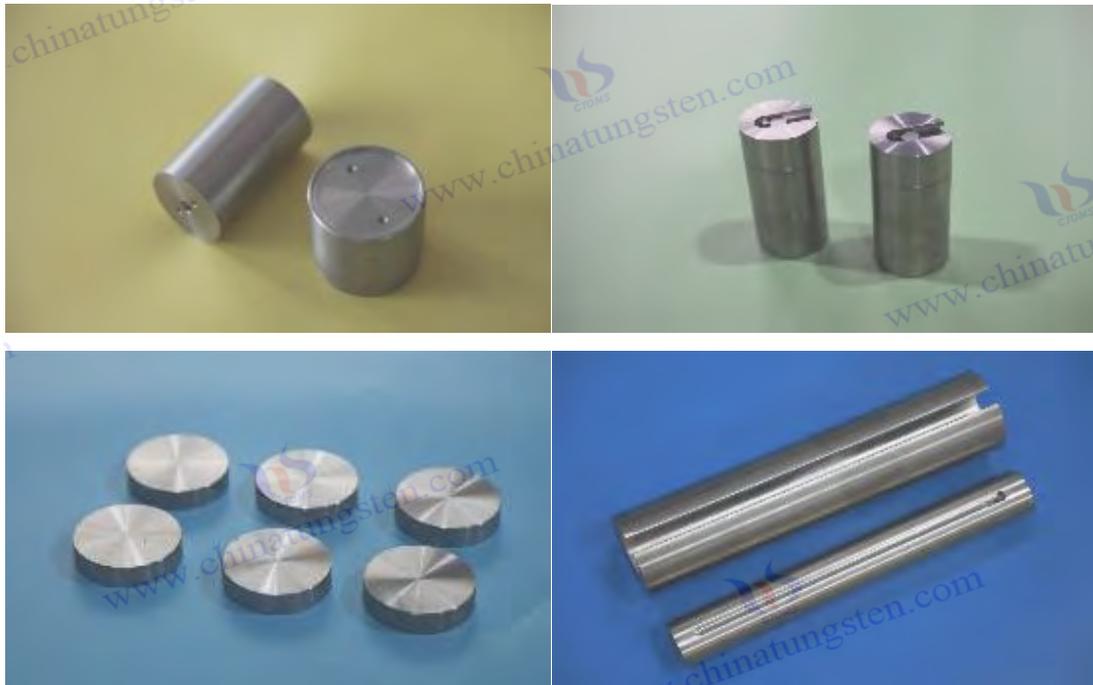
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Kapitel 4 Leistungsprüfung und Qualitätsbewertung von Wolframlegierungsstäben

### 4.1 Prüfung des Aussehens und der geometrischen Abmessungen

Als Hochleistungsfunktionswerkstoff finden Wolframlegierungsstäbe breite Anwendung in Schlüsselbereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie, der Medizin und dem Militär. Ihre optische Qualität und geometrische Maßgenauigkeit wirken sich direkt auf die nachfolgende Verarbeitung, Montage und Leistung aus. Daher ist die Prüfung von Aussehen und Maßen der erste Schritt in der Qualitätsbewertung von Wolframlegierungsstäben und zugleich ein wichtiger Schritt, der vor Verlassen des Werks abgeschlossen sein muss.

#### 4.1.1 Grundanforderungen an die Erscheinungsqualität

Bei Stäben aus Wolframlegierungen liegt der Schwerpunkt auf sichtbaren Oberflächenfehlern, die die Nutzung oder Zuverlässigkeit beeinträchtigen. Die Bewertung erfolgt nach relevanten nationalen Normen (wie GB/T 21114, ASTM B777) oder benutzerdefinierten Spezifikationen. Zu den üblichen Prüfinhalten gehören:

- **Oberflächenbeschaffenheit** : Die Oberfläche muss frei von sichtbaren Kratzern, Löchern, Sinterrissen, Metallgraten, Oxidschichten und anderen Defekten sein .
- **Farbe und Konsistenz** : Die Oberfläche sollte einen gleichmäßigen metallischen Glanz haben und keine Oxidationsverfärbungen, Flecken, Punkte usw. aufweisen.
- **Fehlerprüfung** : Konzentrieren Sie sich auf die folgenden typischen Oberflächenfehler:
  - Mikrorisse und -spalten;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Grate und Kantenschäden;
  - Sinterlöcher oder lose Stellen;
  - Rost, Verfärbungen oder Ölflecken;
  - Lokale Dellen, Verwerfungen, Verbiegungen und andere Deformationen.
- **Zustand der Stirnflächen** : Beide Enden sollten flach sein, ohne abgeplatzte Kanten, Risse oder offensichtliche Materialmängel, und die Vertikalität der Stirnflächen sollte den Standardanforderungen entsprechen.

#### Erkennungstools und -methoden:

- **Sichtprüfung** : Sichtprüfung oder Lupenprüfung bei natürlichem Licht oder Standardbeleuchtung .
- **Beleuchtete Beobachtungsplattform** : Verwenden Sie einen starken Lichthintergrund, um auf kleine Oberflächenrisse oder Farbunterschiede zu prüfen.
- **Hilfsmittel zur Oberflächenreinigung** : Beobachten Sie die tatsächliche Qualität der Metalloberfläche, nachdem Sie Öl und Schmutz von der Oberfläche entfernt haben.

Bei der Produktion auf Fabrikebene wird zur Prüfung des Erscheinungsbilds häufig eine Kombination aus „vollständiger Prüfung + Stichprobenprüfung“ verwendet, während bei militärischen oder Luft- und Raumfahrtkomponenten im Allgemeinen eine 100-prozentige Sichtprüfung durchgeführt wird.

#### 4.1.2 Messobjekte mit geometrischen Abmessungen

Durch die Prüfung der geometrischen Abmessungen wird sichergestellt, dass der Wolframlegierungsstab die in den Konstruktionszeichnungen oder Verträgen festgelegten Genauigkeitsanforderungen erfüllt. Zu den üblichen Messgrößen gehören:

- **Länge** : Je nach Konstruktionszweck der Stange kann es sich um eine feste oder eine beliebige Länge handeln, die normalerweise mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5$  mm oder höher gesteuert wird.
- **Durchmesser** : Die Rundheit und Toleranz des Stabs müssen hoch sein und die Präzisionsanwendung kann innerhalb von  $\pm 0,01$  mm gesteuert werden.
- **Ovalität** : kontrolliert den Unterschied zwischen den beiden Durchmessern des Querschnitts, der im Allgemeinen 0,05 mm nicht überschreitet.
- **Vertikalität/Endflachheit** : Die Endfläche des Stabs aus Wolframlegierung sollte senkrecht zur Mittellinie des Stabs stehen.
- **Geradheit (Krümmung)** : Misst die Geradheitsabweichung des Stabs über seine gesamte Länge, normalerweise ausgedrückt in „mm/m“, z. B.  $\leq 0,5$  mm/m.
- **Konzentrität (sofern zutreffend)** : Überprüfen Sie bei Hohlstäben oder gedrehten Konstruktionsstäben die interne und externe Konzentritätsabweichung.

#### Prüfgeräte:

- **Messschieber und Mikrometer** : dienen zum schnellen Messen von Länge und Durchmesser, geeignet zur vorläufigen Größenbestätigung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Außenmikrometer, Innenmikrometer** : Wird zur hochpräzisen Durchmessermessung verwendet.
- **Messuhr + V- Rahmen** : wird zum Messen von Geradheit und Krümmung verwendet.
- **Laser- Durchmessermeßgerät** : ermöglicht berührungslose, hochpräzise Online-Messungen, geeignet für automatisierte Produktionslinien.
- **Koordinatenmeßgerät (KMG)** : Wird zur präzisen Inspektion komplexer geometrischer Strukturen und zur Bereitstellung von Koordinatendaten in voller Größe verwendet.

#### 4.1.3 Maßtoleranzklassen und Standardgrundlagen

Wolframlegierungsstäbe variieren je nach Produkthanwendung und internationalen Standards. Typische Standardspezifikationen umfassen:

- **Chinesischer Nationalstandard (GB/T 21114)** : Gibt den Durchmesser, die Länge und die Toleranzklasse von Wolframlegierungsstäben unterschiedlicher Größen an.
- **Amerikanischer Standard (ASTM B777)** : Detaillierte Vorschriften zur Maßkontrolle von Produkten aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte.
- **Benutzerdefinierte Standards** : Kunden aus der Luft- und Raumfahrt- sowie der Nuklearindustrie benötigen häufig Abmessungen und geometrische Toleranzen, die strenger sind als nationale Standards.

Gemeinsame Maßtoleranzreferenz:

Stabdurchmesserbereich	Normale Toleranz (mm)	Präzisionstoleranz (mm)
≤10 mm	±0,10	±0,02
10–30 mm	±0,15	±0,03
>30 mm	±0,20	±0,05

#### 4.1.4 Automatisierte Prüfung und Datenaufzeichnung

Mit der Entwicklung von Industrie 4.0 führen immer mehr Unternehmen automatisierte Testtechnologien ein, um die Effizienz der Qualitätskontrolle zu verbessern:

- **Visuelles Erkennungssystem** : kombiniert Video- und Bilderkennungsalgorithmen, um eine Online-Erkennung von Erscheinungsfehlern zu erreichen.
- **Laser- Größenscanner** : In Zusammenarbeit mit dem automatischen Zuführgestell wird die vollautomatische Erkennung von Stangenlänge und -durchmesser ermöglicht.
- **Qualitätsdatenbanksystem** : Zeichnen Sie die Testdaten in Echtzeit auf und laden Sie sie in die Datenbank hoch , um ein Chargenrückverfolgbarkeitsmanagement zu erreichen.

#### 4.1.5 Prüfhäufigkeit und Beurteilungskriterien

Die Prüfhäufigkeit richtet sich nach Produktionscharge, Einsatzzweck und Kundenanforderungen:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Chargenlieferung** : Es wird eine Stichprobenprüfung durchgeführt, beispielsweise eine AQL-Einstufung gemäß dem Standard GB/T 2828.1 .
- **Militärische/nukleare Energienutzung** : vollständige Inspektion + Stichprobenprüfung, Schlüsseldimensionen und Schlüsselindikatoren müssen einzeln geprüft werden .
- **Ausschuss- und Nacharbeitskriterien** :
  - Produkte mit durchdringenden Rissen, tiefen Kratzern, großflächiger Oxidation und stirnseitigen Abstrahlungen auf der Oberfläche werden als ungeeignet beurteilt.
  - Als ungeeignet gelten auch Maße, die den Toleranzbereich überschreiten und nicht durch Nachbearbeitung korrigiert werden können.

## Zusammenfassung

Die Prüfung des Aussehens und der geometrischen Abmessungen ist das grundlegende Bindeglied der Qualitätskontrolle von Wolframlegierungsstäben. Sie steht im Zusammenhang mit der Produktqualifikation und beeinflusst die Montageanpassung und Zuverlässigkeit nachfolgender Anwendungen. Mit der Einführung automatisierter Prüfmethode und der Verbesserung von Prüfstandards erreichen moderne Hersteller von Wolframlegierungsstäben eine höhere Qualitätskonsistenz, schnellere Prüffizienz und ein umfassenderes Rückverfolgbarkeitsmanagement.

## 4.2 Methoden der Dichte- und Mikrostrukturanalyse

Dichte und Mikrostruktur sind wichtige Indikatoren für die Messung der Gleichmäßigkeit, Dichte und Prozessreife von Wolframlegierungsstäben und haben direkten Einfluss auf deren mechanische und thermische Eigenschaften sowie Lebensdauer. Dichtemessungen können indirekt die Sinterdichte und Porenverteilung bestimmen; die Mikrostrukturanalyse liefert wichtige Informationen wie Kornstruktur, Phasenverteilung und Porendefekte. Daher ist die Etablierung eines systematischen Bewertungsmechanismus für Dichte und Organisation ein wichtiger Schritt zur Gewährleistung einer qualitativ hochwertigen Produktion von Wolframlegierungsstäben.

### 4.2.1 Bedeutung und Methoden der Dichtebestimmung

von Wolframlegierungsstäben erfolgt üblicherweise anhand ihrer chemischen Zusammensetzung. Beispielsweise kann die theoretische Dichte in W-Ni-Fe- oder W-Ni-Cu-Systemen 17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup> erreichen. Die tatsächliche Produktdichte, -gleichmäßigkeit und -dichte spiegeln die Sinterqualität, den Verdichtungsgrad und vorhandene Defekte (wie geschlossene Poren, Einschlüsse, Ablösungen usw.) wider.

#### (1) Archimedes-Methode (Flüssigkeitsdrainagemethode)

**Prinzip** : Nach dem Archimedes-Prinzip kann aus der Differenz zwischen der in Luft und in Flüssigkeit gewogenen Probe das Volumen berechnet werden, aus der Masse lässt sich die Dichte ableiten.

**Schritt** :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Verwenden Sie deionisiertes Wasser oder Ethanol als Immersionsflüssigkeit;
- Wiegen Sie das Trockengewicht (W1) und das Gewicht in der Immersionslösung (W2).
- Berechnen Sie die Dichte:  $\rho = W1 / (W1 - W2) \times \rho_{\text{liquid}}$ .

**Vorteile** : Einfach zu bedienen, für die meisten festen Proben geeignet.

**Einschränkungen** : Ungenau bei Proben mit geschlossenen Poren oder fehlerhaften Oberflächen.

### (2) Heliumpyknometer-Methode (Gasaustauschmethode)

**Prinzip** : Durch Messen der Druckdifferenz zwischen der Probenkammer und der Referenzkammer werden das Probenvolumen und die Dichte berechnet.

**Vorteile** :

- Hohe Genauigkeit (bis zu  $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ );
- Kann mikroporöse Materialien erkennen;
- Geeignet für hochwertige Präzisionsprodukte aus Wolframlegierungen.

**Repräsentative Ausstattung** : AccuPyc , Micromeritics und andere automatische Gasdichtometer.

### (3) Röntgenberechnungsverfahren (Voxeldichte)

In Kombination mit industriellen CT- oder Röntgen-Scannergeräten wird die Voxeldichte der Probe durch Bildrekonstruktion berechnet, was für Strukturteile mit komplexen Formen oder solche, die nicht berührt werden können, geeignet ist.

## 4.2.2 Zweck und Kennzahlen der Gefügeanalyse

Die Entwicklung der Wolframlegierung spiegelt sich während des Sinterns, der Wärmebehandlung und der anschließenden Verarbeitung wider. Durch mikroskopische Analyse können folgende Schlüsselindikatoren ermittelt werden:

- Korngröße und -verteilung;
- Verteilung der Legierungselementphase (W-Phase, Phase auf Ni/Fe/Cu-Basis) und Klarheit der Phasengrenzen;
- Die Anzahl und Morphologie von Poren oder Einschlüssen;
- Gleichmäßigkeit und Richtung des Gewebes;
- Ausscheidung der zweiten Phase und Merkmale der eutektischen Struktur.

## 4.2.3 Mikrostrukturanalysetechniken

### (1) Optisches metallographisches Mikroskop (OM)

**verwenden** :

- Beobachten Sie die Kornmorphologie, Poren und makroskopische Struktur.
- Phasengrenzen können mit Standard-Ätzlösungen sichtbar gemacht werden.

**Probenvorbereitungsprozess** :

- Inlay, Schleifen und Polieren;
- Chemisches Ätzen (übliche Reagenzien: Eisenchlorid-Salzsäure-Lösung);
- Wählen Sie die passende Vergrößerung für die Beobachtung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## (2) Rasterelektronenmikroskopie (REM)

### Vorteile :

- Hohe Auflösung, ermöglicht die Beobachtung von Strukturen im Nanomaßstab;
- Kann mit einem energiedispersiven Spektrometer (EDS) kombiniert werden, um die Elementverteilung zu analysieren;
- Erkennen Sie Mikrodefekte wie Sinterlöcher, Rissbildungsquellen und Schnittstellenverbindungen.

### Anwendungsbereich :

- Forschung zu Legierungsgrenzflächen, Korngrenzenstruktur und Mikrorissidentifizierung;
- Analyse des lokalen Entmischungs- und Diffusionsverhaltens von Legierungselementen.

## (3) Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)

### verwenden :

- Untersuchen Sie die Ausscheidungsphase, Versetzung, Mikrokorngrenze usw. in Wolframlegierungen.
- Analysieren Sie nanoskalige Verstärkungsmechanismen, amorphe Phasen und Grenzflächenreaktionsschichten.

### Grenze :

- Die Probenvorbereitung ist aufwendig und eignet sich für die wissenschaftliche Forschung oder die High-End-Materialentwicklung.

## (4) Energiespektroskopie (EDS / WDS)

- **EDS** : Schnelle Elementaranalyse, wird in Verbindung mit SEM verwendet;
- **WDS** : wird zur hochpräzisen Erkennung von Elementen mit geringem Gehalt (wie Sauerstoff- und Kohlenstoffverunreinigungen) verwendet;
- Wird verwendet, um die Zusammensetzung jeder Phase und die Einheitlichkeit der Elementverteilung innerhalb der Organisation zu analysieren.

## (5) Röntgenbeugung (XRD)

### Zweck :

- Identifizieren Sie die in Wolframlegierungen vorhandene Kristallstruktur und Phasentypen.
- Erkennen, ob Verunreinigungen wie Oxide und Carbide vorhanden sind;
- Das Inhaltsverhältnis der Hauptphase und der Nebenphase kann quantitativ analysiert werden.

## 4.2.4 Organisatorische Mängel und Kriterien für die Qualitätsbewertung

Zu den häufigsten mikrostrukturellen Defekten gehören:

- Sinterlöcher oder Restporen;
- „Kern-Schale“-Struktur durch Elemententmischung;
- Ungebundene Partikel oder schwach gebundene Sintergrenzfläche;
- Die zweite Phase ist ungleichmäßig verteilt oder übermäßig ausgefällt;
- Vergrößerung der Körner durch Wärmebehandlung.

### Beurteilungskriterien :

- GB/T 13298 (Allgemeine Regeln für die metallografische Strukturanalyse);

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ASTM E1245 (Bewertung von Einschlüssen in Metallen);
- Interne Kontrollstandards des Unternehmens: Legen normalerweise akzeptable Bereiche für Porosität, Korngröße und Einschlussgrad fest.

#### 4.2.5 Analyse der Beziehung zwischen Dichte und Organisation

Dichtepprüfung und organisatorische Beobachtung bestätigen sich gegenseitig und sind wichtige Mittel zur Bewertung der Qualität von Wolframlegierungsprodukten.

- Eine hohe Dichte entspricht oft einer ausreichenden Sinterung und geringen Porosität;
- Eine gute Gleichmäßigkeit der Anordnung und feine Körnung führen zu hervorragenden mechanischen Eigenschaften.
- Wenn die Dichte gering ist und die Struktur eine große Anzahl geschlossener Poren aufweist, kann dies an einer unzureichenden Sintertemperatur oder einer schlechten Pulververdichtung liegen.
- Wenn die Dichte zwar stimmt, aber eine strukturelle Entmischung vorliegt, kann dies an einer ungleichmäßigen Verteilung der Rohstoffe oder einer ungleichmäßigen Wärmebehandlung liegen.

#### Zusammenfassung

Dichte- und Mikrostrukturanalyse sind die Kernpunkte der Qualitätsbewertung von Wolframlegierungsstäben. Sie ermöglichen die vollständige Darstellung der inneren Struktureigenschaften und der Dichte des Materials. Präzise Dichtemessungen werden mithilfe der Archimedes-Methode, der gasspezifischen Schwerkraftmethode und der Röntgenmethode erreicht. Umfassende Untersuchungen der Strukturmorphologie und -zusammensetzung werden durch die Kombination von optischer Mikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie, Elektronenstrahl-Szintigraphie, Röntgenbeugung und anderen Methoden durchgeführt. Dies stellt nicht nur sicher, dass das Produkt den technischen Standards entspricht, sondern bietet auch eine wissenschaftliche Grundlage für Prozessoptimierung und die Erforschung und Entwicklung neuer Materialien. Mit der Verbreitung hochauflösender Prüfgeräte und der Einführung automatisierter Prüfplattformen werden die organisatorische Kontrolle und Qualitätssicherung von Wolframlegierungsstäben schrittweise verbessert.

#### 4.3 Prüfnormen für mechanische Eigenschaften (ASTM, GB, ISO)

Als funktionaler Konstruktionswerkstoff mit hohem spezifischen Gewicht und hervorragender Zähigkeit bestimmen die mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungsstäben direkt ihre Betriebssicherheit in anspruchsvollen Umgebungen wie hoher Beanspruchung, hoher Belastung und hoher Schlagzähigkeit. Parameter wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung, Härte, Schlagzähigkeit und Dauerfestigkeit sind die wichtigsten Grundlagen für die Messung ihrer Qualität und technischen Anwendbarkeit. Um die Wissenschaftlichkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse zu gewährleisten, müssen die Prüfungen der mechanischen Eigenschaften streng nach international anerkannten Normen (ASTM, GB, ISO) durchgeführt werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 4.3.1 Prüfung der Zugeigenschaften

die grundlegendste und gebräuchlichste Methode zum Prüfen der mechanischen Eigenschaften von Stäben aus Wolframlegierungen. Durch Anlegen einer axialen Spannung wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten vor dem Bruch gemessen, um Kernindikatoren wie Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung zu erhalten.

#### Prüfnormen und Geltungsbereich:

- **ASTM E8/E8M** „Standardmethode für Zugprüfungen an metallischen Werkstoffen“: Anwendbar auf Metallstangen, -platten und kleine Proben;
- **GB/T 228.1** „Zugversuch an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“: Dies ist der allgemeine nationale Standard Chinas;
- **ISO 6892-1** „Zugversuch an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“: international anerkannter Standard, grundsätzlich gleichwertig mit GB.

#### Wichtige Parameterdefinitionen:

- **Zugfestigkeit (UTS)** : Die maximale Spannung, der ein Material standhalten kann, in MPa;
- **Streckgrenze (YS)** : die Mindestspannung, bei der ein Material eine plastisch Verformung erfährt;
- **Dehnung (El)** : Die Dehnung der Probe vor dem Bruch, die die Zähigkeit des Materials misst;
- **Abschnittsschrumpfungsrate (Z)** : Der Grad der Einschnürung am Bruch, der die Plastizität widerspiegelt.

#### Probenvorbereitung und Zustandskontrolle:

- Beispielform: Standardrundstab (z. B.  $\Phi 6$ – $\Phi 12$  mm) oder Flachstab;
- Steuerung der Ladegeschwindigkeit: z. B. 0,5–2 mm/min;
- Temperaturbedingungen: normalerweise Raumtemperatur ( $20 \pm 5$  °C), bei Bedarf kann eine Dehnung bei hohen Temperaturen durchgeführt werden.

#### Notiz:

- Wolframlegierung, der Klemmteil sollte so konstruiert sein, dass ein Verrutschen oder eine Spannungskonzentration verhindert wird;
- Es muss eine elektronische Universalprüfmaschine mit hoher Steifigkeit und einer Belastungsgenauigkeit von  $\pm 1$  % verwendet werden;
- Nach der Dehnung müssen Bruchfotos zur Analyse des Bruchmechanismus aufgenommen werden.

### 4.3.2 Härteprüfung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Härte ist ein wichtiger Indikator zur Bewertung der Widerstandsfähigkeit einer Wolframlegierung gegenüber lokaler plastischer Verformung und wird häufig bei der Prozesskontrolle, Produktklassifizierung und Qualitätssortierung verwendet.

#### Gängige Prüfverfahren und Normen:

- **Brinellhärte (HB) :**
  - Geeignet für mittel- und niedrigharte Wolframlegierungen;
  - Norm: ASTM E10 / GB/T 231.1;
  - Belastungsbereich: 500–3000 kgf , Kugelkopfdurchmesser 2,510 mm.
- **Rockwellhärte (HRC/HRB) :**
  - Geeignet für die Prüfung der Oberflächenhärte fertiger Stäbe;
  - Norm: ASTM E18 / GB/T 230.1;
  - Wolframlegierungen liegen normalerweise zwischen 6080 HRB oder bis zu 2040 HRC (in einigen Wärmebehandlungszuständen).
- **Vickershärte (HV) :**
  - Wird für Mikrohärteprüfungen von Wolframlegierungen im Mikrobereich oder in kleinen Größen verwendet.
  - Norm: ASTM E384 / GB/T 4340.1;
  - Anwendungen: Schnittstelle, Kornverfeinerung, Bewertung der Mikrolegierungsstruktur .

#### Sonstige Hinweise:

- Um sicherzustellen, dass der Eindruck deutlich erkennbar und messbar ist, muss die Oberfläche vor dem Testen auf Hochglanz poliert werden.
- Der Prüfpunkt sollte abseits von Kanten, Rissen und Poren liegen;
- Für Wolframlegierungen mit hoher Härte wird die Verwendung eines harten Eindringkörpers und einer Prüflösung mit geringer Belastung empfohlen.

#### 4.3.3 Schlagzähigkeitsprüfung

Der Aufpralltest bewertet die Fähigkeit des Materials, Energie unter dynamischen Belastungen zu absorbieren und spiegelt seine Widerstandsfähigkeit gegen Sprödbruch wider. Er ist ein äußerst wichtiger Indikator für Wolframlegierungen in panzerbrechenden und dynamischen Belastungsanwendungen.

#### Gemeinsame Standards:

- **ASTM E23 / GB/T 229** : Norm für den Charpy-Schlagversuch für Metalle;
- **ISO 148-1** : Norm für die Schlagzähigkeitsprüfung metallischer Werkstoffe.

#### Probenanforderungen:

- Standardgröße: 55 × 10 × 10 mm mit V-förmiger oder U-förmiger Kerbe;
- Die Kerbengröße und die Verarbeitungsgenauigkeit müssen streng kontrolliert werden.
- Probenanzahl: In der Regel werden durchschnittlich 3 Stück pro Charge genommen.

#### Besondere Anweisungen:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Wolframlegierungen weisen aufgrund ihrer hohen Sprödigkeit oft eine geringe Stoßabsorptionsenergie (<10 J) auf.
- Um die Zähigkeit zu verbessern, wird im Allgemeinen ein ultrafeines Korn- oder Mikrolegierungsdesign verwendet.
- Nach dem Aufprall kann die Bruchoberfläche mittels Metallografie oder SEM analysiert werden, um spröde/duktile Brucharten zu identifizieren.

#### 4.3.4 Ermüdungs- und Kriechverhaltensprüfung (optional)

Unter bestimmten extremen Betriebsbedingungen (wie etwa in Trägheitssystemen der Luft- und Raumfahrt oder in Kernreaktorkomponenten) müssen Stäbe aus Wolframlegierungen zudem eine ausgezeichnete Ermüdungsbeständigkeit und Kriechstabilität bei hohen Temperaturen aufweisen.

##### Zugehörige Normen:

- **ASTM E466 / GB/T 3075** : Prüfverfahren für Metaller müdung (Hochlast-Ermüdung);
- **ASTM E139 / GB/T 2039** : Prüfverfahren für Metallkriechen (konstante Spannung bei hoher Temperatur).

##### Anwendungsbeschreibung:

- Mit Ermüdungsprüfungen lässt sich die Lebensdauer von Werkstoffen unter zyklischer Beanspruchung beurteilen.
- Kriechversuche werden oft bei hohen Temperaturen (800–1000 °C) und konstanten Belastungen durchgeführt;
- Beide werden häufig in der Kernenergie, der Erforschung des Weltraums und der Materialentwicklung für Hyperschallwaffen eingesetzt.

#### 4.3.5 Kriterien zur Beurteilung der Prüfergebnisse zu mechanischen Eigenschaften

Verschiedene Normen stellen unterschiedliche Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften von Stäben aus Wolframlegierungen. Zum Beispiel:

Projekt	Allgemeine Industriequalität	Militär-/Luftfahrtqualität	Medizinische/nukleare Qualität
<b>Zugfestigkeit</b>	≥700 MPa	≥900 MPa	≥1000 MPa
<b>Verlängerung</b>	≥5 %	≥10 %	≥12 %
<b>Härte (HRB)</b>	70~85	75~90	78~92
<b>Schlagzähigkeit (J)</b>	≥6 J	≥8 J	≥10 J

Die konkrete Beurteilungsgrundlage sollte sich auf die Produktkonstruktionszeichnungen, technischen Vereinbarungen oder Ausschreibungsspezifikationen beziehen.

#### Zusammenfassung

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Prüfung von Wolframlegierungsstäben muss streng nach dem international anerkannten Standardsystem erfolgen, um die Genauigkeit, Rückverfolgbarkeit und Universalität der Daten für multinationale Projekte zu gewährleisten. ASTM, GB, ISO und andere Normen decken die gesamte Prüfkette ab – von Zugfestigkeit, Härte, Schlagfestigkeit bis hin zu Ermüdung, Kriechfestigkeit usw. – und bilden die Grundlage für die Qualitätsprüfung und Materialauswahl von Wolframlegierungsstäben. Mit der kontinuierlichen Erweiterung hochwertiger Anwendungsfelder steigen auch die Anforderungen an Automatisierung, Digitalisierung und Präzision der Detektionsmethoden.

#### 4.4 Metallographische Analyse und mikrostrukturelle Charakterisierung

Metallografische Analysen und mikrostrukturelle Charakterisierung sind wichtige Mittel zur Bewertung der inneren Struktur und des Leistungspotenzials von Wolframlegierungsstäben. Durch Beobachtung und Messung der inneren Kornmorphologie, der Phasenverteilung, der Poren, Einschlüsse und anderer Materialeigenschaften können der Verdichtungsgrad des pulvermetallurgischen Prozesses, die Diffusionsgleichmäßigkeit der Legierungselemente, der Wärmebehandlungseffekt und die organisatorischen Defekte bestimmt und so das Betriebsverhalten und die Zuverlässigkeit weiter vorhergesagt werden. Dies ist ein wichtiges Bindeglied in der Qualitätskontrolle, Prozessoptimierung sowie der Forschung und Entwicklung neuer Materialien.

##### 4.4.1 Zweck und Bedeutung der metallographischen Analyse

Die metallografische Analyse ist nicht nur ein wichtiges Mittel der Grundlagenforschung in der Materialwissenschaft, sondern spielt auch in der Produktionspraxis von Stäben aus Wolframlegierungen folgende Schlüsselrollen:

- **Bewerten Sie die Sinterqualität und Porosität** : Beobachten Sie die Porenverteilung, -größe und -morphologie, um den Verdichtungsgrad zu bestimmen.
- **Korngröße und Gleichmäßigkeit bestimmen** : Kleine und gleichmäßige Körner werden oft mit hohen Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften in Verbindung gebracht;
- **Sie die Phasengrenzstruktur** : Die Klarheit der Schnittstelle zwischen W-Partikeln und Ni-Fe/Cu-Matrixphase beeinflusst die mechanischen Gesamteigenschaften.
- **Entdecken Sie mikroskopische Defekte und Einschlüsse** : einschließlich Rissursprung, nicht verschmolzener Bereiche, Ansammlung von Verunreinigungen und andere Probleme;
- **Untersuchen Sie die Elementverteilung und das Ausscheidungsverhalten** : Analysieren Sie mikrostrukturelle Veränderungen wie die Diffusion von Legierungselementen und die Ausscheidung der zweiten Phase.

##### 4.4.2 Probenvorbereitungsprozess

Die hohe Härte und Dichte von Wolframlegierungen stellen hohe Anforderungen an die metallografische Probenpräparation. Die Standardschritte der Probenpräparation sind wie folgt:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Schneiden** : Verwenden Sie einen Diamantschneider mit niedriger Geschwindigkeit, um Überhitzung und Mikrorisse zu vermeiden.
2. **Montage** : Verwenden Sie heiße oder kalte Montagmaterialien, um die Probe zu fixieren, was für den Schleifvorgang praktisch ist.
3. **Grobschliff** : Beginnen Sie mit Schleifpapier der Körnung 120 und schleifen Sie schrittweise auf Schleifpapier der Körnung 800–1200, um es glatt zu halten .
4. **Feinschleifen und Polieren** :
  - Sie 3  $\mu\text{m}$  , 1  $\mu\text{m}$  und 0,25  $\mu\text{m}$  Diamantpolierflüssigkeit ;
  - Nach dem Polieren sollten keine Kratzer, Oxidationsflecken oder gebürstete Linien vorhanden sein.
5. **Chemisches Ätzen** :
  - Gängige Formel für Ätzlösungen (Referenz):
    - Flusssäure + Salpetersäure + Wasser (gefährlich, bitte auf die Sicherheit achten);
    - Eisenchlorid + Salzsäure + Ethanol-Gemisch;
  - Die Ätzzeit wird im Bereich von wenigen Sekunden bis zu mehreren zehn Sekunden gesteuert, um die Korngrenzfläche und die Phasenverteilung sichtbar zu machen.

#### 4.4.3 Methode zur Beobachtung der Mikrostruktur

##### (1) Optische Mikroskopie (OM)

- **Auflösungsbereich** : 0,5–1  $\mu\text{m}$  ;
- **Hauptanwendungen** :
  - Kornbeobachtung und Größenmessung;
  - Porositätsverteilung und Identifizierung von Makrodefekten;
  - der Phasengrenzmorphologie und Gewebeverteilung;
- Die Korngröße und Porosität können **mit der Bildanalysesoftware automatisch berechnet werden** .

##### (2) Rasterelektronenmikroskopie (REM)

- **Die Auflösung ist besser als 10 nm** , was das Kernwerkzeug für die Strukturanalyse von Wolframlegierungen ist.
- **Anwendbarer Inhalt** :
  - Beobachtung der Schnittstelle zwischen W-Partikeln und Ni-Fe/Cu-Matrix mit hoher Vergrößerung;
  - Erkennen Sie Mikrorisse, Mikrolöcher, Einschlüsse, fehlende Verschmelzung und andere Defekte.
  - Kombiniert mit energiedispersiver Spektroskopie (EDS) zur Analyse der räumlichen Verteilung von Elementen;
- **Bruchanalyse** : dient zur Bestimmung der spröden oder duktilen Brucheigenschaften (Spaltebene, Delle, Quasi-Spaltstruktur etc.).

##### (3) Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ultrahohe Auflösung (<1 nm ) ;**
- **Forschungsinhalt :**
  - Korngrenzenstruktur und Versetzungsverteilung;
  - Grenzflächenreaktionsschicht oder Abscheidung einer zweiten Phase;
  - Strukturanalyse auf atomarer Ebene und Kristallverzerrungsforschung;
- **Anwendungsbereich :** Wird hauptsächlich in der wissenschaftlichen Forschung oder bei der Verbesserung und Entwicklung von Wolframlegierungen verwendet.

**(4) Energiespektroskopie (EDS / WDS)**

- EDS eignet sich für die schnelle qualitative und semiquantitative Analyse mehrerer Elemente.
- WDS (wellenlängendispersive Spektroskopie) eignet sich für die Analyse feiner Spurenelemente (wie O, C).
- In Kombination mit SEM wird es verwendet, um die Verteilung und Diffusionsgleichmäßigkeit von Ni, Fe, Cu usw. in der Wolframmatrix zu untersuchen.

**(5) Röntgenbeugung (XRD)**

- Wird verwendet, um die Kristallstruktur und Phasentypen jedes Metalls zu bestätigen;
- Kann erkennen, ob Verunreinigungen wie Wolframoxid und Karbid vorhanden sind;
- Unterstützt die Schätzung der Korngröße und die Analyse der Texturstärke (mit Richtungsscan).

**4.4.4 Bewertungskriterien für Korngröße und Phasenzusammensetzung**

**Methode zur Bestimmung der Korngröße:**

- **GB/T 6394** „Verfahren zur Bestimmung der durchschnittlichen Korngröße von Metallen“;
- **ASTM E 112** : Bewertung der Kornqualität durch Standardvergleichstabelle oder Bildanalyse;
- Feine Körner werden üblicherweise über Körnung 9 (entsprechend einer mittleren Korngröße von weniger als 15 μ m ) eingestuft ;
- Ungleichmäßige Struktur, grobe Körnung und Korngrenzeinschlüsse sind keine Seltenheit.

**Phasenanalyse und quantitative Methoden:**

- Flächenverhältnis jeder Phase nach der Aufteilung des optischen oder SEM- Bildes;
- Graustufensegmentierung und Verteilungsmessung der typischen W-Phase/Ni-Fe-Basisphase ;
- Durch EDS in Kombination mit Bildanalysesoftware kann eine regionale Komponentenquantifizierung erreicht werden.

**4.4.5 Analyse der Beziehung zwischen Mikrostruktur und Leistung**

<b>Mikroskopische Merkmale</b>	<b>Auswirkungen auf die Leistung</b>
--------------------------------	--------------------------------------

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

<b>Kleine und gleichmäßige Körner</b>	Verbessern Sie Festigkeit und Zähigkeit, reduzieren Sie Rissquellen
<b>Die W-Partikelverteilung ist gleichmäßig</b>	Fördert die Stoßfestigkeit und gleichmäßige Lastübertragung
<b>W/Ni-Fe-Schnittstelle ist fest verbunden</b>	Verbessern Sie die Gesamtplastizität und Schlagfestigkeit
<b>Hohe Porosität oder ungleichmäßige Verteilung</b>	Reduzieren Sie Festigkeit und Dichte und werden Sie leicht zum Ursprung von Rissen
<b>Mikrorisse/Einschlüsse vorhanden</b>	Kann zu vorzeitigem Bruch führen und die Lebensdauer verkürzen
<b>Ausfällung der groben zweiten Phase</b>	Kann zu einem Spannungskonzentrationspunkt werden, was zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt

### Zusammenfassung

Metallografische Analysen und mikrostrukturelle Charakterisierung sind für Wolframlegierungsstäbe unverzichtbar – von der Rohstoffkontrolle bis zur Leistungsüberprüfung des Endprodukts. Durch die Kombination von optischer Mikroskopie, SEM, TEM, XRD und anderen Technologien gewinnen wir nicht nur ein tiefes Verständnis der organisatorischen Evolutionsgesetze und mikroskopischer Defekte in Wolframlegierungen, sondern bieten auch umfassende technische Unterstützung bei der Produktionsoptimierung und der Entwicklung neuer Produkte. Mit der Entwicklung von Bilderkennung und KI-gestützter Analysetechnologie entwickelt sich die metallografische Analyse von Wolframlegierungen in Richtung Automatisierung, Quantifizierung und Intelligenz.

### 4.5 Analyse der chemischen Zusammensetzung (ICP, XRF, ONH)

Wolframlegierungsstäben ist entscheidend. In hochdichten Wolframlegierungen wie W-Ni-Fe und W-Ni-Cu beeinflussen der Anteil der Hauptelemente (Wolframgehalt liegt üblicherweise bei 85–98 %), die Kontrolle der Verunreinigungen (C, O, N, H, P, S) und Spurenelemente (Cr, Co, Mo usw.) die physikalischen, mechanischen, Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften der Legierung maßgeblich. Daher ist die Einrichtung eines präzisen und umfassenden Systems zur Analyse der chemischen Zusammensetzung die Grundlage für die Sicherstellung der Produktqualität und die Erfüllung von Standardspezifikationen und Kundenanforderungen.

#### 4.5.1 Bedeutung der Analyse der chemischen Zusammensetzung

Zu den Stäben aus Wolframlegierungen gehören:

- **Bestätigen Sie, ob die Legierungsqualität dem Standard entspricht** (z. B. A, B, C im ASTM B777-Standard).
- **Überprüfen Sie die Stabilität der Zutaten und des Schmelzprozesses**.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Kontrollieren Sie den Gehalt an schädlichen Verunreinigungen (wie O, N, C, S, P), um Sprödigkeit und Rissneigung zu vermeiden .**
- **Analysieren Sie die abnormale Zusammensetzung fehlerhafter Produkte .**
- **Unterstützt die Rückverfolgbarkeit von Materialien und die Qualitätskontrolle von Chargen .**

#### 4.5.2 Übersicht über die gängigen chemischen Analysemethoden

Methodenkategorie	Analyseobjekt	Merkmale
ICP-OES / ICP-MS	Metallelemente (Hauptbestandteil + Spurenmenge)	Hohe Empfindlichkeit, geeignet für die gleichzeitige Analyse mehrerer Elemente
XRF (Röntgenfluoreszenzspektroskopie)	Hauptbestandteil aus Metall	Schnell und zerstörungsfrei, geeignet für Fabrikstandort- oder Batchanalyse
ONH-Analyse	Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff	Hochtemperaturpyrolyseverfahren, geeignet für Wolfram und seine Legierungen
CS-Analysator	Kohlenstoff, Schwefel	Lichtbogenverbrennungsverfahren, schnell und effizient
Nasschemische Analyse	Spezifische Elemente	Hohe Genauigkeit, aber geringe Effizienz und hohes Kontaminationsrisiko

Spezifische Normen sollten sich auf Folgendes beziehen:

- ASTM B777, B702;
- GB/T 21114, GB/T 38792;
- Kunden- oder Militär-/Luftfahrtstandards.

#### Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe decken Makrohauptelemente, Spurenverunreinigungen und Spurengaselemente ab und sind das wichtigste Mittel zur Beurteilung der Stabilität, Reinheit und Konsistenz von Legierungen. Moderne Detektionstechnologien wie ICP-OES, XRF und ONH-Analysatoren ermöglichen eine hochpräzise, durchsatzstarke und automatisierte Zusammensetzungskontrolle und verbessern so die Effizienz der Qualitätskontrolle erheblich. Mit der Entwicklung intelligenter Fertigung werden diese Technologien künftig auch in der Online-Überwachung, Chargenrückverfolgbarkeit und Prozessoptimierung im geschlossenen Kreislauf stärker eingesetzt.

#### 4.6 Oberflächenrauheit und Defekterkennung (Sichtprüfung, CT)

Die Oberflächenqualität von Stäben aus Wolframlegierungen beeinflusst nicht nur direkt die Lebensdauer, Passgenauigkeit und das Erscheinungsbild des Materials, sondern steht auch in engem

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zusammenhang mit der Wärmeableitung, Spannungskonzentration, Ermüdungsrissbildung usw. in nachfolgenden Anwendungen. Daher sind die Kontrolle der Oberflächenrauheit und die Fehlererkennung wichtige Faktoren, die bei der Qualitätsbewertung fertiger Produkte nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Erkennungstechnologie wurde die traditionelle manuelle Sichtprüfung schrittweise mit High-End-Verfahren wie digitaler Bildgebung, 3D-Computertomographie und Laserkonturscanning kombiniert, um effiziente, automatisierte und präzise Erkennungsprozesse zu ermöglichen.

#### 4.6.1 Bedeutung und Kennwertdefinition der Oberflächenrauheitsprüfung

Die Oberflächenrauheit ist ein wichtiger Parameter, der den Grad mikroskopischer Unebenheiten auf der Werkstückoberfläche charakterisiert. Die Rauheit beeinflusst nicht nur die Montage, Reibung, den Verschleiß, die Wärmeleitfähigkeit und das Ermüdungsverhalten von Wolframlegierungsstäben, sondern auch die Haftung und Korrosionsbeständigkeit von Beschichtungen.

#### Gängige Rauheitsparameter (nach GB/T 3505, ISO 4287):

Parametername	Bedeutung	Einheit
Ra	Arithmetische Mittenrauheit, der am häufigsten verwendete Indikator	µm
R	Maximale Höhe (Durchschnitt aus fünf Punkten)	µm
R	Gesamthöhe (der Unterschied zwischen dem höchsten Gipfel und dem tiefsten Tal)	µm
R	RMS-Rauheit (empfindlicher gegenüber Spitzen)	µm

#### 4.6.2 Methoden und Geräte zur Prüfung der Oberflächenrauheit

##### (1) Kontaktrauheitsprüfgerät

- **Prinzip** : Die Sonde wird entlang der Oberfläche bewegt, um die Konturänderungen aufzuzeichnen.
- **Repräsentative Geräte** : Japan Mitutoyo SJ-210, Deutschland Mahr Perthometer ;
- **Vorteile** : Genaue Messung, geeignet für Chargenstandardteile;
- **Einschränkungen** : Nicht geeignet für weiche oder stark reflektierende Oberflächen, Kontaktbetrieb erforderlich.

##### (2) Berührungsloses Laser-Konfokal- oder Weißlicht-Interferometer

- **Prinzip** : Verwenden Sie Laser-/Weißlichtinterferometrie, um eine 3D-Konturkarte zu erstellen.
- **Vorteile** :
  - Berührungslose, zerstörungsfreie Prüfung;
  - Hohe Präzision (Nanometerbereich);

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Kann große Bereiche schnell scannen;
  - **Repräsentative Geräte** : Keyence VK-X-Serie, Zygo Nexview , Sensofar .
- (3) **3D-Profilscanner/Strukturlichtprojektor**
- **Anwendung** : Kann verwendet werden, um die Gesamtkonsistenz des Oberflächenprofils, Stufen, Vertiefungen usw. des Balkens zu erkennen.
  - **\*\*Geeignet für Chargenprüfungen vor Ort oder visuell unterstützte Qualitätsprüfungen.**

#### 4.6.3 Technologie und Anwendung zur Erkennung von Oberflächendefekten

Zu den Defekten, die bei der Formung oder Verarbeitung von Stäben aus Wolframlegierungen auftreten können, gehören:

- Oberflächenrisse, Kratzer und Löcher;
  - Oxidschicht, schwarze Flecken, Kohlenstoffrückstände ;
  - Anhaftungen, Abblättern, Nadellöcher;
  - Geometrische Verformung oder Ovalität außerhalb der Toleranz.
- (1) **Sichtprüfung**
- **Standard** : Beschreibung des Oberflächenzustands in GB/T 8170 / ASTM B777;
  - **Methode** : Bloßes Auge + Lupe (3- bis 10-fach);
  - **Typische Beurteilungsregeln** :
    - Risse oder Abblättern sind nicht zulässig.
    - Oberflächenfarbunterschiede und leichte Reibungsspuren sind akzeptabel (je nach Anwendungsstufe);
    - Die Defektgröße in einem bestimmten Bereich überschreitet einen bestimmten Wert nicht (z. B.  $\leq 0,5$  mm).

(2) **Digitalkamera + Bilderkennungssystem**

- Angewendet zur Online-Erkennung von Fließbändern;
- Mithilfe von Algorithmen des maschinellen Lernens kann es Kratzer, Löcher und Farbanomalien automatisch erkennen.
- Die Genauigkeitsrate kann über 95 % erreichen, was sich besonders für groß angelegte Erscheinungsscreenings eignet.

(3) **Dreidimensionale Röntgen-Computertomographie (CT)**

- **Prinzip** : Verwenden Sie Röntgen-Mehrwinkel-Scanning, um ein dreidimensionales Volumenbild zu rekonstruieren.
- **Erkennbarer Inhalt** :
  - Innere Poren, Einschlüsse, Risse und Lockerheit;
  - Tiefe und Ausdehnungsrichtung des Oberflächenrisses;
  - Gleichmäßigkeit des Gewebes in der Mitte und am Rand des Stabes;
- **Repräsentative Ausrüstung** : Nikon, GE Phoenix, Yxlon ;
- **Auflösung** : bis zu 1–5  $\mu\text{m}$  , geeignet für die Analyse hochwertiger Militärprodukte, Kernenergie und Wolframlegierungsstäbe für die Luft- und Raumfahrt .

#### 4.6.4 Fehlergradbewertung und Qualitätsbestimmung

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Bewertung verschiedener Oberflächendefekte erfordert die Formulierung von Beurteilungskriterien entsprechend den Anforderungen verschiedener Anwendungsbereiche. Nachfolgend finden Sie eine Referenzklassifizierung:

Fehlertyp	Militärische/nukleare Wolframlegierung	Wolframlegierung für den industriellen Einsatz
Riss	verbieten	verbieten
Gruben	≤0,3 mm	≤0,8 mm
Oxidationsflecken	Kann nicht existieren	Kann leicht vorhanden sein
Oberflächenrauheit	Ra ≤ 0,4 μm	Ra ≤ 1,6 μm

Zu den relevanten Referenzstandards gehören:

- **GB/T 13306** : Terminologie von Metalloberflächendefekten;
- **ASTM E45/E 1245** : Verfahren zur Erkennung von Einschlüssen und Defekten;
- **YS/T 582** : Spezifikation für die Qualitätsprüfung von Produkten aus Wolframlegierungen (Industriestandard).

#### 4.6.5 Trends in der Automatisierung und im intelligenten Testen

Moderne Hersteller von Stäben aus Wolframlegierungen führen nach und nach Folgendes ein:

- **- Sichtprüfungssystem** : arbeitet synchron mit dem CNC-Bearbeitungszentrum, um eine 100-prozentige Qualitätskontrolle des Erscheinungsbilds in Echtzeit zu erreichen;
- **-Plattform zur Bilderkennung** : Trainieren von Defektmerkmalsmodellen auf Basis von Deep Learning zur Verbesserung der Erkennungsgenauigkeit;
- **Modellierung in voller Größe** : Laser- oder Weißlichtscannen, um die vollständige Topologie der Staboberfläche zu erhalten;
- **Hochwertige Big Data -Analyse** : Fehlerverfolgung, Gerätezuordnung und Prozessiterationsoptimierung.

Diese Technologien haben die Erkennungseffizienz und Qualitätsstabilität erheblich verbessert und tragen dazu bei, dass sich die Herstellung hochwertiger Stäbe aus Wolframlegierungen in Richtung „Null-Fehler“ entwickelt.

#### Zusammenfassung

Oberflächenrauheit und Defekterkennung sind der Schlüssel zum Übergang von Wolframlegierungsstäben vom Funktionswerkstoff zum Präzisionsbauteil. Durch berührungslose/kontaktlose Rauheitsmessung, CT-Bildgebung, visuelle Erkennung und andere technische Mittel lassen sich die Oberflächenqualität und die inneren Defekte des Materials vollständig erfassen. Intelligente Erkennung, automatisierte Qualitätskontrolle und datenbasierte Defektvorhersage werden künftig zu den Kernkompetenzen der High-End-Fertigung von Wolframlegierungsstäben gehören.

#### 4.7 Zerstörungsfreie Prüftechnik (Ultraschall, Röntgen, Magnetpulver)

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungsstäbe werden hauptsächlich in Bereichen eingesetzt, in denen hohe Zuverlässigkeit gefragt ist, wie z. B. in der Luftfahrt, im Militär, in der Kernenergie und in der Medizin. Dort werden extrem hohe Anforderungen an die innere Qualität und strukturelle Integrität gestellt. Konventionelle zerstörende Prüfungen können zwar einige mechanische und mikroskopische Daten liefern, können jedoch die inneren Defekte des gesamten Stabes nicht vollständig beurteilen. Daher ist der Einsatz **zerstörungsfreier Prüfverfahren (NDT, Non-Destructive Testing)** zur Identifizierung und Beurteilung versteckter Defekte wie Risse, Löcher, Einschlüsse und Lockerheit in Wolframlegierungsstäben ein notwendiges Mittel, um Produktsicherheit, Zuverlässigkeit und Betriebsstabilität zu gewährleisten.

In diesem Abschnitt werden die drei typischen zerstörungsfreien Prüfmethoden für Stäbe aus Wolframlegierungen systematisch vorgestellt: **Ultraschallprüfung (UT), Durchstrahlungsprüfung (RT) und Magnetpulverprüfung (MT)**.

#### 4.7.1 Ultraschallprüfung (UT)

##### Grundsätze und Vorteile:

Bei der Ultraschallprüfung werden hochfrequente Schallwellen (1–10 MHz) im Material ausgebreitet. Beim Auftreffen auf diskontinuierliche Strukturen wie Grenzflächen, Poren und Risse entsteht ein reflektiertes Signal, das vom Wandler empfangen und analysiert wird, um festzustellen, ob Defekte vorliegen.

- **Geeignet zur Erkennung innerer Defekte in Wolframlegierungen**, insbesondere Poren, Einschlüsse und nicht verdichtete Bereiche;
- **Starke Eindringtiefe und große Erkennungstiefe**, geeignet für Stangen mit mittlerem und dickem Durchmesser ( $\Phi 6\sim\Phi 100$  mm);
- **Automatisches Scannen und Erkennen ist möglich**.

##### Nachweismethode:

- Verwenden Sie Longitudinalwellen (gerade Sonde) oder Scherwellen (Winkelsonde).
- Das Mehrkanalsystem erreicht eine vollständige Oberflächen- und Mehrwinkelabdeckung;
- High-End-Geräte sind mit den Funktionen **\*\*A-Scan (Amplitude vs. Zeit) und C-Scan (2D- Bild) \*** ausgestattet.

##### Standardgrundlage:

- **ASTM E114 / E 2375** : Norm für die Ultraschallprüfung metallischer Werkstoffe;
- **GB/T 12604.1, GB/T 5777** : Ultraschallprüfverfahren für Metallschmiedestücke/-stangen.

##### Technische Punkte:

- Wolframlegierungen weisen eine große akustische Dämpfung auf, daher sollte eine Hochenergiesonde (z. B. 5 MHz) verwendet werden.
- Die Erkennungsempfindlichkeit muss angepasst werden, um Defekte von 0,2 bis 0,5 mm erkennen zu können.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Oberfläche muss poliert werden, um den Kopplungsschichtfehler zu reduzieren.
- Nach der Erkennung sollten Position, Tiefe und Amplitude der Defektreflexionswelle aufgezeichnet werden, um ihren Pegel zu bestimmen.

**Fehleridentifizierungsdiagramm:**

Fehlertyp	Ultraschallfunktionen
Riss	Stark reflektierendes Signal mit klaren Grenzen
Porosität	Mäßig reflektierend, unregelmäßige Form
Mangel an dichtem Gebiet	Überlagertes Echo, Mehrfachreflexionen

**4.7.2 Durchstrahlungsprüfung (RT)**

**Prinzip und Anwendung:**

Bei der Röntgenprüfung werden Röntgen- oder Gammastrahlen eingesetzt, um Materialien zu durchdringen. Bereiche unterschiedlicher Dichte oder Dicke haben unterschiedliche Strahlungsabsorptionsfähigkeiten. Das Strahlungstransmissionsbild wird durch eine Bildplatte (Film oder digitaler Detektor) aufgezeichnet, um innere Defekte zu identifizieren.

- **Anwendbar zur Erkennung von Dichteunterschiedsdefekten wie Poren, Rissen, Einschlüssen usw. in Stäben aus Wolframlegierung ;**
- **Gute Auflösung bei oberflächennahen oder tiefliegenden Defekten ;**
- **Wird häufig als Mittel zur abschließenden Qualitätsbewertung oder zur Akzeptanz auf hoher Ebene verwendet .**

**Prüfmittel:**

- Industrielles Röntgengerät (Röhrenspannung 160–320 kV);
- Für dickwandige Stäbe werden Isotopen-Gammaquellen (wie Ir-192) verwendet;
- Digitale Radiographiesysteme (DR/CR) können hochauflösende Echtzeitbilder erzeugen.

**Technische Indikatoren:**

- Minimal erkennbare Defektgröße: ca. 0,1–0,3 mm;
- Bildschärfe und Detektionsempfindlichkeit hängen von Strahlungsenergie, Belichtungszeit und Brennweite ab;
- Oft ist es notwendig, die Bildauflösung mithilfe eines Vergleichstestblocks (IQI) zu überprüfen.

**Prüfnormen:**

- **ASTM E1742, E 1030 ;**
- **GB/T 3323, GB/T 19802 ;**
- Auch im Bereich der medizinischen Kernenergie müssen höhere Standards wie ISO 5579 und EN 462 eingehalten werden.

**Vorteile und Einschränkungen:**

Vorteil	Limit
Die Erkennungsbilder sind intuitiv und die Aufzeichnungen können gespeichert werden	Hohe Gerätekosten und komplizierte Bedienung

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

<b>Porosität, Risse und Einschlüsse können identifiziert werden</b>	Unempfindlich gegenüber Defekten mit geringem Dichteunterschied
<b>Kann für die Endkontrolle und Fehleranalyse verwendet werden</b>	Begrenztes Eindringen in dicke und große Stücke

#### 4.7.3 Magnetpulverprüfung (MT)

##### Prinzip:

Wenn beim Magnetisieren ferromagnetischer Materialien Defekte wie Risse, Einschlüsse und nicht verschmolzene Materialien auf der Oberfläche oder in deren Nähe vorhanden sind, erzeugen diese Bereiche magnetische Streufelder. Nach dem Aufsprühen des Magnetpulvers sammelt sich das Magnetpulver an den Defekten und bildet sichtbare Spuren.

- **Geeignet für die schnelle Erkennung von Oberflächen-/oberflächennahen Defekten ;**
- Es wird hauptsächlich für eisenhaltige Wolframlegierungsstäbe (wie die W-Ni-Fe-Serie) verwendet, nicht jedoch für die W-Ni-Cu-Serie.

##### Nachweismethode:

- Wechselstrommagnetisierung wird zum Erkennen von Oberflächendefekten verwendet;
- Durch Gleichstrommagnetisierung können etwas tiefere Defekte (1–3 mm) erkannt werden.
- Es kann das Nassverfahren (magnetische Suspension) oder das Trockenverfahren mit Magnetpulver verwendet werden.
- Schwarz-weiße Kontrastflüssigkeit oder fluoreszierendes Magnetpulver in Kombination mit ultraviolettem Licht verbessern die Erkennung.

##### Geltende Normen:

- **ASTM E 709** : Allgemeine Grundsätze für Prüfverfahren mit magnetischen Partikeln;
- **GB/T 15822, JB/T 6063** : Magnetpulverprüfverfahren und Qualitätsbewertung;

##### Merkmalsanalyse:

Vorteile	Einschränkungen
<b>Niedrige Kosten und schnelle Erkennungsgeschwindigkeit</b>	Nur ferromagnetische Materialien (Ni-Fe-System)
<b>Die Defektpositionierung ist intuitiv und hochsensibel</b>	Kann keine tiefen oder nicht öffnenden Defekte erkennen
<b>Geeignet für Batch-Operationen vor Ort</b>	Pulverrückstände und Kontaminationsrisiken müssen beseitigt werden

#### 4.7.4 Fehlerklassenbewertung und Kriterien für die zerstörungsfreie Prüfung

Um eine einheitliche Qualitätsbewertung zu gewährleisten, muss festgestellt werden, ob die Mängel die Grenzwerte gemäß den einschlägigen Normen überschreiten, beispielsweise:

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fehlertyp	Maximal zulässige Größe (Beispiel: $\Phi 20$ mm Stange)	Ist es erlaubt?
Riss	Nicht existieren dürfen	NEIN
Löcher	$\leq 0,3$ mm, nicht dicht	Ja
Schichtung	Nicht erlaubt	NEIN
Nichtmetallische Einschlüsse	$\leq 0,5$ mm, gleichmäßig verteilt	Abhängig vom Niveau

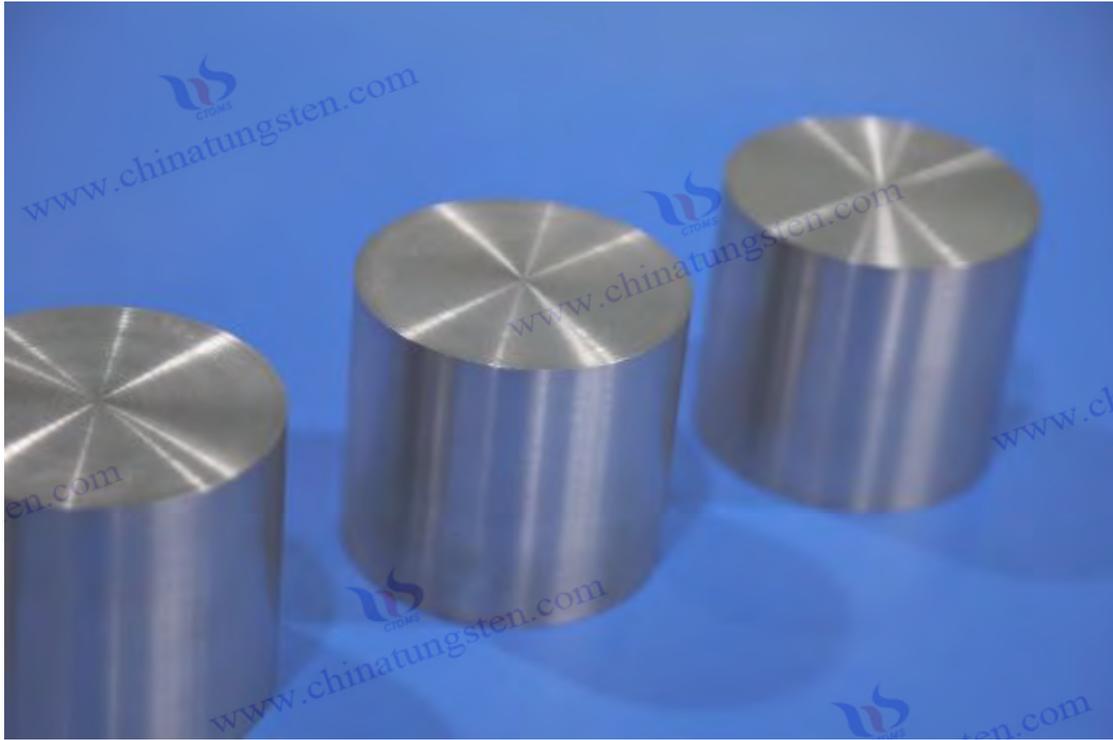
Gemeinsame Bewertungsstandards:

- **ASTM B777/B 702** : Referenzstandard für die zerstörungsfreie Prüfung von Wolframlegierungen;
- **GB/T 38561, GB/T 31928** : Spezielle Standards für die Prüfung von Wolframlegierungen;
- **Technische Kundenvereinbarung** : Kundenspezifische Standards für die Luftfahrt, Kernenergie usw. sind strenger.

### Zusammenfassung

Bei Stäben aus Wolframlegierungen kann die zerstörungsfreie Prüftechnologie innere und oberflächliche Defekte erkennen, ohne das Material zu zerstören. Ultraschallprüfungen eignen sich für die interne Qualitätsprüfung der meisten Stäbe; Röntgenprüfungen bieten klare Vorteile bei der Bildgebung und sind ein unverzichtbares Mittel für hochwertige Produkte; Magnetpulverprüfungen ermöglichen eine hochempfindliche Erkennung von Oberflächenmikrorissen. Die sinnvolle Kombination dieser drei Verfahren ermöglicht eine mehrstufige und umfassende Qualitätssicherung für Stäbe aus Wolframlegierungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 5 Typische Anwendungsgebiete von Wolframlegierungsstäben

### 5.1 Gegengewichte und Trägheitskomponenten in der Luft- und Raumfahrt

Wolframlegierungsstäbe nehmen in der Luft- und Raumfahrt eine unersetzliche und wichtige Stellung ein und eignen sich besonders für **Gegengewichtssysteme** und **Trägheitskomponenten**. Aufgrund ihrer ultrahohen Dichte, guten Verarbeitbarkeit und hervorragenden strukturellen Stabilität werden Wolframlegierungsstäbe häufig in Massenausgleichs-, kinetischen Energieregulungs- und **Lageregelungssystemen** in Flugzeugen, Satelliten, Raketen, Drohnen und anderen Fluggeräten eingesetzt und zählen zu den wichtigsten Vertretern leistungsstarker Metallwerkstoffe in der modernen Luft- und Raumfahrtindustrie.

#### 5.1.1 Hintergrund und Anforderungen an Gegengewichtssysteme

In Luft- und Raumfahrtssystemen werden Gegengewichtsbaugruppen häufig für folgende Zwecke verwendet:

- **Schwerpunktkontrolle** : Um die Stabilität der Fluglage und die vernünftige Verteilung des Trägheitsmoments des Flugzeugs aufrechtzuerhalten, ist es notwendig, im Struktur- oder Leistungsausgleichsbereich Präzisionsgegengewichte zu konfigurieren.
- **Dynamisches Auswuchten** : Bei sich mit hoher Geschwindigkeit drehenden Strukturen (wie Gyroskopen, Motorrotoren, Schwungrädern usw.) werden Gegengewichte verwendet, um das unausgeglichene Drehmoment fein abzustimmen und so Resonanz oder Ermüdung zu verhindern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ausgleich des Kraftstoffverbrauchs** : Wenn der Verbrauch von flüssigem Kraftstoff abnimmt, verlagert sich der Schwerpunkt des Flugzeugs und das Gleichgewicht wird durch dynamische Gewichte aus Wolframlegierung aufrechterhalten.
- **Lagekorrektur** : Einige Satelliten-/Raketensysteme verwenden gleitende oder bewegliche Wolframgewichte zur Feinkompensation der Lageregelung .

**möglichst hohes Gewichtsmaterial pro Volumeneinheit** , das gleichzeitig eine gute **Vibrationsfestigkeit, strukturelle Stabilität und Anpassungsfähigkeit an die Umgebung aufweist** . Die Entwicklung von Stäben aus Wolframlegierungen erfüllt genau diesen anspruchsvollen Standard.

### 5.1.2 Materialvorteile von Stäben aus Wolframlegierungen

Stäbe aus Wolframlegierungen (typischerweise W-Ni-Fe- oder W-Ni-Cu-Systeme) haben gegenüber anderen Metallwerkstoffen die folgenden wesentlichen Vorteile:

Leistungsparameter	Wolframlegierungsstab	führen	Edelstahl	Titanlegierung
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	17,0–18,8	11.3	~7,8	~4,5
Festigkeit (MPa)	700–1000	15–30	500–800	900–1100
Temperaturstabilität	Ausgezeichnet (>1200 °C, keine Verringerung der Plastizität)	Unterschied	Gut	exzellent
Umweltschutz/Toxizität	Ungiftig und umweltfreundlich	giftig	Ungiftig	Ungiftig
Verarbeitungsanpassungsfähigkeit	Gut	einfach	Medium	Schwierig zu verarbeiten

Daher ist Wolframlegierung eine ideale Upgrade-Option, um herkömmliche Materialien wie Blei in Gegengewichtssystemen in der Luft- und Raumfahrt zu ersetzen.

### Typische Struktur einer Gegengewichtsstange aus Wolframlegierung

Gegengewichte für die Luft- und Raumfahrt haben oft folgende Formen:

1. **Standard-Rundstab/Vierkantstab**
  - Wird für Kreiselrotoren, Trägheitsringe oder zentralisierte Gewichte am Boden von Kraftstofftanks verwendet;
2. **Gewindestange/Bolzen Wolframstange**
  - Einfach an der Struktur anzubringen oder daraus zu entfernen, wird oft als Gegengewicht für Satelliten oder für Bodentests verwendet;
3. **Verarbeitbare Sonderformblöcke/Einsätze**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Kundenspezifische Schlitz-, Stanz- oder Stufenstrukturen entsprechend der Flugzeugstruktur können dicht in die Kabine eingebettet werden;
- 4. **Abnehmbarer/verschiebbarer Wolframstab**
  - Bei Lageregelungssystemen kann der Schwerpunkt durch Bewegung entlang der Führungsschiene eingestellt werden.
- 5. **Dünnblech/kurzer Stabeinsatz aus Wolframlegierung**
  - Wird zur Trägheitseinstellung von Blättern und Rotorstrukturen verwendet.

#### 5.1.4 Wesentliche Leistungsanforderungen

Wolframlegierungsstäbe in Luft- und Raumfahrtqualität müssen die folgenden Indikatoren erfüllen:

- **Dichte** :  $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$ , kontrolliert innerhalb von  $\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ ;
- **Maßgenauigkeit** :  $\pm 0,01 \sim \pm 0,05 \text{ mm}$ , erfordert feines Drehen und Schleifen;
- **Mechanische Eigenschaften** :
  - Zugfestigkeit  $\geq 750 \text{ MPa}$ ;
  - Dehnung  $\geq 10 \%$ , wodurch Schlagzähigkeit gewährleistet wird;
- **Oberflächenrauheit** :  $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$  (Anforderung an glänzende Oberfläche) ;
- **Magnetische Anforderungen** : Einige Trägheitssysteme erfordern **schwach magnetische oder nicht magnetische Wolframlegierungen** (W-Ni-Cu ist besser als W-Ni-Fe);
- **Hohe Temperaturstabilität** : beständig gegen Hitzeschock und keine strukturelle Verformung;
- **Zuverlässigkeit** : Innere Defekte können durch zerstörungsfreie Prüfungen (Ultraschall/Radio) erkannt werden.

#### 5.1.5 Praktische Anwendungsfälle

##### (1) Satelliten-Trägheitsrad und Lageregler

- Ein Stab aus Wolframlegierung wird als **Schwungradkern** oder **Kreisel-Trägheitsring verwendet**.
- Erhöhen Sie die Trägheit durch hohe Dichte und verbessern Sie die Genauigkeit der Lageanpassung.
- In vielen Satellitentypen in den USA und Europa werden hochdichte W-Ni-Fe-Stäbe verwendet.

##### (2) Dynamische Ausgleichsgewichte für Flugzeuge/UAVs

- Dient zur Balancekorrektur von Flügeln, Heckflügeln und Propellerblättern;
- Zur Feinabstimmung des Gewichts können kleine Wolframstäbe in die Klingen eingesetzt werden;
- Der UAV-Markt wächst und die Nachfrage nach präzisen Wolframstäben kleiner Größe steigt.

##### (3) Raketenheckraum und Gegengewicht des Lenkabschnitts

- Um eine stabile Fluglage zu gewährleisten, wird am Heckbereich häufig ein Wolframstab zur Schwerpunktausbalancierung eingebaut;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- in der Gleitschienenstruktur wird eine adaptive Gewichtung realisiert;
- Erfordert hohe Dichte, starke Bindung und Vibrationsfestigkeit.

#### (4) Kreiselkomponenten von Flugzeugtriebwerken

- An beiden Enden des Schafts sind Wolframgewichte angebracht, um die Stabilität und Reaktionsgeschwindigkeit zu verbessern;
- In Kombination mit der Hülle aus Hochtemperaturlegierung bildet es eine dynamische Trägheitseinheit.

#### 5.1.6 Analyse von Alternativen mit anderen Materialien

Mit der Verschärfung der Umweltvorschriften und der steigenden Nachfrage nach Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt ersetzen Stäbe aus Wolframlegierungen nach und nach die folgenden traditionellen Gewichtsmaterialien:

Material	Grund für den Austausch
<b>führen</b>	Hochgiftig, verboten oder in der Verwendung eingeschränkt
<b>Stahl</b>	Geringe Dichte, daher ist ein größeres Volumen erforderlich, um den Standard zu erfüllen
<b>Kupferlegierung</b>	Hohe Leitfähigkeit, kann zu elektromagnetischen Störungen führen
<b>Keramik</b>	Sehr spröde, unfähig, Vibrations- und Stoßbelastungen standzuhalten

Wolframlegierungen bieten erhebliche Vorteile hinsichtlich Gewichtsgenauigkeit, Sicherheit, Volumenkontrolle und Recyclingfähigkeit und sind zur gängigen Wahl für hochwertige Gewichtsmaterialien in der Luftfahrt geworden.

#### Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe bieten umfassende Vorteile für Gegengewichte und Trägheitskomponenten in der Luft- und Raumfahrt, wie hohe Dichte, stabile Struktur, hohe Temperaturbeständigkeit und gute Verarbeitungsflexibilität. Sie erfüllen nicht nur die strengen Anforderungen moderner Flugzeuge an die Schwerpunktkontrolle, sondern unterstützen auch eine Vielzahl integrierter Designs. Sie sind die erste Wahl für Hochleistungs-Gegengewichtsmaterialien. Mit der Entwicklung intelligenter Flugzeuge, kleiner Satelliten und hochdynamischer Plattformen werden Wolframlegierungsstäbe künftig eine zentrale Rolle in weiteren Schlüsselstrukturen spielen.

#### 5.2 Wolframlegierungsstab für militärische Ausrüstung (panzerbrechender Kern, Raketenheckfach)

Wolframlegierungen spielen aufgrund ihrer hohen Dichte, hohen Festigkeit, hohen kinetischen Energiespeicherung und hervorragenden Durchschlagskraft eine äußerst wichtige Rolle in der militärischen Ausrüstung. Stäbe aus Wolframlegierungen werden hauptsächlich im militärischen Bereich zur Herstellung **panzerbrechender Projektilkerne mit kinetischer Energie verwendet**. **Gegengewichte im Heckfach der Rakete, Strukturkomponenten von Tiefbomben**,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hochexplosive Granaten und Gegengewichte für Trägheitsflugsysteme usw. Seine Leistung wirkt sich direkt auf die Schlagkraft, Flugstabilität und Kampfeffizienz des Waffensystems aus.

### 5.2.1 Wesentliche Vorteile von Wolframlegierungen für militärische Anwendungen

Wolframlegierungen im militärischen Bereich spiegeln sich in folgenden Aspekten wider:

Leistungsindikatoren	Wolframlegierung (W-Ni-Fe)	führen	Stahl	Uranlegierung (DU)
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	17,0 ~ 18,8	~11,3	~7,8	~19,1
Zugfestigkeit (MPa)	700 ~ 1000	Sehr niedrig	500 ~ 800	800 ~ 900
Thermische Stabilität	Ausgezeichnet (>1200°C ohne Erweichung)	Unterschied	Medium	exzellent
Toxizität/Umweltsicherheit	Ungiftig und umweltfreundlich	giftig	Sicherheit	Starke Radioaktivität
Bearbeitbarkeit	Gut	Leicht zu verarbeiten	Gut	Sehr schlecht (oxidiert und spröde)

Daher gilt Wolframlegierung als „ **ungiftiger Ersatzwerkstoff für abgereichertes Uran** “ und ist eine wichtige Materialgrundlage für moderne konventionelle kinetische Hochleistungswaffen.

### 5.2.2 Wolframlegierungsstab in panzerbrechenden Geschossen

#### (1) Anwendungshintergrund

Der Kinetic Energy Penetrator (KEP) nutzt kinetische Energie mit hoher Geschwindigkeit, um gepanzerte Ziele zu durchdringen. Seine Kernkomponente, der „Kern“, muss Folgendes aufweisen:

- Extrem hohe Dichte zur Erhöhung der kinetischen Energie;
- Extrem hohe Festigkeit und Härte zur Aufrechterhaltung der Durchdringungsfähigkeit;
- Gute Zähigkeit, um ein Zerbrechen im Flug oder eine Zersetzung beim Durchdringen einer Panzerung zu verhindern;
- Hervorragende dynamische Stabilität zur Reduzierung von Verformungen und Durchbiegungen.

Der Kern aus Wolframlegierung besteht normalerweise aus einem W-Ni-Fe-Schwerlegierungsstab, der durch Präzisionsformung, Wärmebehandlung und Bearbeitung zu einer Kernstruktur aus Heckkegel oder Nadel hergestellt wird.

#### (2) Kerntyp und Größenparameter

Munitionstyp	Typischer Durchmesser von Stäben aus Wolframlegierung	Seitenverhältnis	Elastische Kernstruktur

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Panzer-Hauptkanone APFSDS</b>	Φ18 ~ Φ30 mm	15 ~ 25	Langer Stab aus Wolframlegierung + Aluminiumgehäuse
<b>Panzerbrechendes Projektil mit kleinem Kaliber</b>	Φ5 ~ Φ15 mm	10 ~ 15	Massiver Wolframstab oder Stahlmantel mit Wolframkern
<b>Tief eindringender Munitionskern</b>	Φ20 ~ Φ60 mm	5 ~ 10	Solider, schwerer Kegelkopf aus Wolframlegierung

### (3) Materielle technische Anforderungen

- **Dichte** :  $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$ , vorzugsweise 18,0 ~ 18,5;
- **Zugfestigkeit** :  $\geq 950 \text{ MPa}$ ;
- **Härte** :  $\text{HRC} \geq 35$ ;
- **Dehnung** :  $\geq 10 \%$ ;
- **Mikrostruktur** : dicht und gleichmäßig, keine Poren, kontrollierte Korngröße  $\leq 10 \mu\text{m}$  ;
- **Nicht magnetisch oder schwach magnetisch** (spezielle Anforderungen an das Leitsystem);
- **Durch zerstörungsfreie Prüfungen wurde bestätigt, dass keine Defekte wie innere Risse oder Delaminationen zwischen den Schichten vorliegen .**

### (4) Überblick über den Herstellungsprozess

1. Rohstoffvorbereitung: hochreines Wolframpulver + Ni/Fe-Legierungspulvermischung;
2. Pulvermetallurgisches Pressen → Hochtemperatur-Flüssigphasensintern;
3. Wärmebehandlungstempern → Präzisionsdrehen → Polieren;
4. Oberflächenbeschichtung (Mo/Cr) oder Oxidschichtbehandlung (Hitzeschutz, Verschleißfestigkeit);
5. Ultraschalluntersuchung und CT-Untersuchung.

### 5.2.3 Wolframlegierungsstäbe in der Gegengewichtsstruktur des Raketenheckraums

#### Anwendungsbeschreibung:

- Bei taktischen Langstrecken-/Mittelstreckenraketen oder Flugabwehrraketen wird das Heckabteil (Heckkegelabschnitt) häufig verwendet, um Gegengewichte anzubringen, die die Schwerpunktverteilung zwischen Antriebsvorrichtung und Gefechtskopf ausgleichen;
- Der Wolframlegierungsstab im Heckbereich trägt auch dazu bei, **die Trägheitsstabilität des Fluges zu erhöhen, die Lenkgenauigkeit zu verbessern und die Ablenkung des Projektils zu verringern .**
- Einige hochpräzise Raketensysteme verwenden **einstellbare Gegengewichtsmodule aus Wolframstäben**, um die Abweichung des Leitalgorithmus anzupassen.

#### Struktur:

- Zylindrischer/gestufteter Stab aus massiver Wolframlegierung;
- Mit Isoliermaterial oder Keramikbeschichtung bedeckt, um elektromagnetische Störungen zu verhindern;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Durchkontaktierungsstrukturen verfügen über eingebaute Leitungen oder Gleitwellen.

#### Voraussetzungen und Features:

- **Hohe Genauigkeit der Dichtekonsistenzkontrolle (innerhalb von  $\pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ ) ;**
- **Hohe Anforderungen an die Bearbeitungsgenauigkeit** (präzise Abstimmung mit dem Heckkabinenmechanismus) ;
- Korrosionsbeständig, schlagfest und lange Lebensdauer;
- Gewichtsverhältnis und Position können entsprechend den Flugsimulationsdaten vorkonfiguriert werden.

#### 5.2.4 Weitere militärische Wolframstabanwendungen

- **Buchsen aus Wolframlegierungen für explosionsartig geformte Munition (EFP) ;**
- **Stäbe aus Wolframlegierung für hochexplosive Granaten** (zur Verbesserung der gerichteten Energie der Explosion);
- **Kreiselgewichte für militärische Trägheitssysteme ;**
- **Hochdruckfeste Wolframstab - Strukturteile für Wasserbomben ;**
- **Stäbe aus Wolframlegierung in militärischen Wärmeabsorptions/-blockierungsstrukturen** (z. B. EMP-Schutz).

#### 5.2.5 Normen und Konformitätssystem für Militärprodukte aus Wolframlegierungen

Militärische Wolframlegierungsstäbe müssen normalerweise die folgenden Normen und Systemzertifizierungen erfüllen:

Standard/System	Inhalt
<b>GJB/T 3765</b>	Technische Anforderungen an militärische Wolframlegierungen
<b>MIL-T-21014</b>	Technische Daten von Wolframlegierungsstäben für die US-Armee
<b>ASTM B777 Klasse IV</b>	Spezifikationen der Wolframlegierung mit ultrahoher Dichte
<b>Nationaler Militärstandard GJB 9001C</b>	Qualitätsmanagementsystem für die Verteidigung
<b>ISO 10204 3.2</b>	Qualitätszertifizierungsbericht von Drittanbietern in Militärqualität
<b>NADCAP / ITAR / AS9100</b>	Anforderungen an Materialien, die in militärischen Luftfahrtprodukten verwendet werden

Darüber hinaus müssen für hochwertige Produkte folgende Angaben bereitgestellt werden: Ofennummernrückverfolgbarkeit, Originalbericht zur Pulvercharge, vollständiger Bericht über die zerstörungsfreie Prüfung des Prozesses und vollständige Prüfdaten zu den mechanischen Eigenschaften.

#### Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe erfüllen in militärischer Ausrüstung die Doppelfunktion, den Kern zu durchdringen und als struktureller Stabilisierungsanker zu dienen, insbesondere bei der Anwendung in kinetischen Projektilkernen und Raketenheckkammerstrukturen. Dabei kommen die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materialvorteile wie hohe Dichte, hohe Festigkeit und thermische Stabilität voll zum Tragen. Angetrieben vom Trend, abgereichertes Uran ersetzen zu können, umweltfreundlich und ungiftig zu sein und eine kontrollierbare Präzisionsfertigung zu ermöglichen, hat sich Wolframlegierung zu einem wichtigen strategischen Material für moderne militärische Präzisionsschlag- und hochmobile Flugsysteme entwickelt.

### 5.3 Kernenergiebereich (Strahlenschutzstäbe, Neutronenabsorptionsstrukturen)

Wolframlegierungen spielen aufgrund ihrer ultrahohen Dichte, ihrer hervorragenden Hochtemperaturstabilität und ihres guten Strahlenschutzes eine wichtige Rolle im Bereich der Kernenergie. Insbesondere in Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren, Kernkraftwerken und nuklearen Abfallbehandlungssystemen werden Wolframlegierungsstäbe häufig zur Herstellung von **Strahlenschutzkomponenten verwendet** . **Neutronenabsorptionsstrukturen** , **Schutzkomponenten für die Verpackung von Kernbrennstoffen** usw. Seine Gesamtleistung ist herkömmlichen Materialien aus Blei, Stahl und Uran weit überlegen.

#### 5.3.1 Hintergrund und Anwendungsbedarf im Bereich der Kernenergie

Zu den Hauptfunktionen von Stäben aus Wolframlegierungen in Kernenergiesystemen gehören:

- **Abschirmung gegen Gamma- und Röntgenstrahlen** : Aufgrund der hohen Ordnungszahl ( $Z=74$ ) verfügt Wolfram über hervorragende Absorptionsfähigkeiten für hochenergetische Strahlen.
- **Neutronenabsorption und thermische Neutronenabschirmung** : Obwohl Wolfram selbst keinen so guten Neutroneneinfangquerschnitt wie Bor oder Cadmium hat, können Stäbe aus Wolframlegierungen Neutronenabsorber in Verbundstrukturen tragen und spielen dabei die Doppelrolle als Struktur + Abschirmung;
- **Strukturelle Stabilität und Beibehaltung der Festigkeit bei hohen Temperaturen** : Wolframlegierungen behalten ihre Dimensionsstabilität und mechanische Festigkeit in der Umgebung mit hohen Temperaturen und starker Strahlung im Kernreaktor bei , was eine wichtige Grundlage für die Strukturkomponenten des Kernenergiesystems darstellt.
- **Hohe Wärmeleitfähigkeit unterstützt das Wärmemanagement** : Die gute Wärmeleitfähigkeit von Wolfram ermöglicht eine effiziente Wärmeleitung bei Kernreaktionen und vermeidet so thermische Spannungskonzentrationen, die zu struktureller Ermüdung führen.

#### 5.3.2 Analyse der Vorteile von Strahlenschutzstäben aus Wolframlegierungen

Performance-Projekt	Wolframlegierungss	Bleischutzmaterial	Uranlegierung (DU)
	stab	ien	
Dichte ( $\text{g/cm}^3$ )	17,0–18,5	~11,3	~19,1

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Gammastrahlenabschirmungsfähigkeit</b>	Ausgezeichnet (hoher Z-Wert, hohe Dichte)	allgemein	Ausgezeichnet (etwas besser als Wolfram)
<b>Neutronenabschirmungsfähigkeit</b>	Mittel (B/Cd können in Kombination hinzugefügt werden)	Unterschied	Normal (teilweise absorbiert)
<b>Thermische Stabilität</b>	Ausgezeichnet (>1200°C stabil)	Schlecht (Erweichung bei 100 °C)	exzellent
<b>Toxizität und Radioaktivität</b>	Ungiftig und nicht radioaktiv	giftig	Radioaktiv und schwer zu recyceln
<b>Verarbeitungs- und Recyclingkapazitäten</b>	Gut	Leicht zu verformen und zu verschmutzen	Schwierige Verarbeitung, große Sicherheitseinschränkungen

**Vorteile hinsichtlich Umweltschutz, Sicherheit und mechanischer/Strahlungsbeeinflussung** zu einer idealen Lösung als Ersatz für Uranlegierungen und Bleimaterialien geworden .

### 5.3.3 Typische Bauformen von Wolframlegierungsstäben für die Kernenergie

#### 1. Abschirmstange

- Für den Kernumfang, die Kanalabschirmung usw. werden je nach erforderlicher Dicke massive oder hohle Stäbe aus Wolframlegierung verwendet.
- Wird in Kombination mit Edelstahl- und Berylliumkupferschalen verwendet ;
- Die allgemeine Dichteanforderung beträgt  $\geq 17,8 \text{ g/cm}^3$ .

#### 2. Neutronen-Verbundabsorptionsstrukturstab

- Der Kern ist ein Stab aus Wolframlegierung, die Oberfläche ist mit  $\text{B}_4\text{C}$ -,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ - und Cd-Materialien besprüht oder beschichtet;
- Integrierte Absorption thermischer Neutronen + Blockierung von Gammastrahlen;
- Wird für Reaktorsicherheitssteuerstäbe, Schnellabschaltstäbe usw. verwendet.

#### 3. Strukturstäbe mit hoher Wärmebelastung

- Die Kühlflüssigkeit fließt durch die Hohlstruktur der Wolframlegierung;
- Wird in Wärmeableitungsunterstützungssystemen von Kernkraftwerken verwendet;
- Zu den Anforderungen zählen eine hohe Wärmeleitfähigkeit, Dimensionsstabilität und Korrosionsbeständigkeit.

#### 4. Abschirmstäbe für den Transport und die Lagerung von Kernbrennstoffen

- In der Innenschicht des Verpackungsfasses/-behälters ist ein Stab aus Wolframlegierung eingebaut.
- Es erfüllt die doppelte Funktion der Gammastrahlenabschirmung und der mechanischen Stoßfestigkeit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Erfüllt die Transportsicherheitsvorschriften der IAEA.

### 5.3.4 Materialeleistungsanforderungen

Wolframlegierungsstäbe für die Kernenergie erfordern nicht nur eine hohe Dichte und Strahlungsabsorptionskapazität, sondern müssen auch in extremen Umgebungen ihre strukturelle Integrität und physikalische Stabilität bewahren:

- **Dichtekontrolle** :  $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$ , gute Gleichmäßigkeit erforderlich;
- **Dimensionsstabilität** : Keine Verformung im Dauerbetrieb bei  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- **Korrosionsbeständigkeit** : beständig gegen deionisiertes Wasser , Borsäurelösung, Dampf usw.
- **Wärmeleitfähigkeit** :  $> 90 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  , wodurch die thermische Gradientenspannung reduziert wird;
- **Festigkeitsanforderungen** : Zugfestigkeit  $\geq 700 \text{ MPa}$ , gute Schlagzähigkeit ;
- **Bestrahlungsstabilität** : Nach der Bestrahlung tritt keine Zerstörung der Gitterstruktur auf;
- **Neutroneneinfangdesign** : Bei der zusammengesetzten Dotierung mit Gd, B und Cd ist eine hohe Gleichmäßigkeit erforderlich;
- **Lebensdauer und Ermüdungsverhalten** : unterstützt langfristigen Dauereinsatz  $>10$  Jahre.

### 5.3.5 Praktische Anwendungsfälle

#### (1) Kernschutzmodul eines Kernkraftwerks

- Stäbe aus Wolframlegierung bilden die Gammastrahlen-Abschirmschicht um die Reaktorkernstruktur.
- Wird in Kombination mit Graphit, Wasserkühlung, Zirkoniumlegierung usw. verwendet.
- Bei einem inländischen Kernkraftwerksprojekt der dritten Generation wurde anstelle der Bleischicht eine Abschirmung aus Wolframlegierungen eingesetzt.

#### (2) Steuerstäbe und Sicherheitsstäbe für Forschungsreaktoren

- Als Steuerstab wird ein hohler Stab aus Wolframlegierung verwendet, der mit einer  $\text{B}_4\text{C}$ -Pulverstruktur beschichtet ist.
- Wenn die Kernreaktion schnell beendet werden muss, kann der Stab aus Wolframlegierung in den Kern eingeführt werden, um Energie zu absorbieren und Gammastrahlen zu blockieren.
- Die meisten wissenschaftlichen Forschungskernreaktoren verwenden den Verbundwerkstoff „W-Ni-Fe/ $\text{B}_4\text{C}$ “ als Sicherheitsendkomponenten.

#### (3) Auskleidungsstruktur des Trockenlagerbehälters für radioaktive Abfälle

- Schutzstäbe aus Wolframlegierung werden auf der Außenschicht des Trockentanks für Atommüll angebracht ;
- Im Vergleich zu einer Bleiauskleidung bietet es einen stärkeren Schutz ohne das Risiko eines Auslaufens.
- Es ist in der Lage, starken Erdbeben und heftigen Stößen standzuhalten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.3.6 Relevante Normen und Zertifizierungssysteme

Stäbe aus Wolframlegierungen werden im Bereich der Kernenergie verwendet und müssen die folgenden internationalen/industriellen Standards erfüllen:

Standard/System	Inhalt
ASTM B777	Klassifizierung und Leistungsanforderungen von Wolframlegierungen mit hoher Dichte
ISO 12749/BS EN 61331	Standard zur Leistungsbewertung von nuklearen Schutzmaterialien
IAEA TS-G-1.1	Sicherheitsrichtlinien für Verpackung und Transport von Kernmaterialien
GB/T 24298	für Kernenergie Wolframlegierung Materialeigenschaften und Prüfmethode
Interner Standard der CNNC/China National Nuclear Corporation	Standards für die Beschaffung und Abnahme von Materialien in Kernkraftqualität

Darüber hinaus müssen beim Export von Produkten für nukleare Zwecke auch die Kontrollbestimmungen der Nuclear Suppliers Group (NSG) eingehalten und **eine Endverbleibserklärung für nukleare Zwecke** deklariert werden .

### 5.3.7 Entwicklungstrends und Technologieausblick

- **Verbundstruktur aus Wolframlegierung** : Integrieren Sie Wolframlegierung mit B, Gd und anderen Materialien durch gemeinsames Sintern, Heißpressen, Nanobeschichtung usw., um die koordinierte Abschirmfähigkeit gegenüber Neutronen und Gammastrahlen zu verbessern.
- **Anwendung einer modularen nuklearen Abschirmstruktur** : Stäbe aus Wolframlegierung werden präzisionsgefertigt und mechanisch verbunden, um abnehmbare und rekonstruierbare Abschirmmodule zu bilden, die für mobile Kernkraftwerke und Schiffsreaktoren geeignet sind.
- **Verbesserung der Betriebsleistung bei hohen Temperaturen und hohem Druck** : Entwicklung einer Formel und eines Wärmebehandlungsverfahrens für hochtemperaturbeständige Wolframlegierungen , um den Hochenergiebedingungen zukünftiger fortschrittlicher Kernreaktoren (wie etwa Schnellreaktoren, ADS-Systeme) gerecht zu werden;
- **Kernkomponenten aus Wolframlegierung** : Mittels additiver Fertigung werden Kernkomponenten aus Wolframlegierung mit komplexer Geometrie und Hohlraumstruktur hergestellt, um das Gewicht zu reduzieren und die Wärmeableitungsleistung zu verbessern.

### Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe erfüllen in der Kernenergie vielfältige Funktionen, wie z. B. strukturelle Unterstützung, Strahlenschutz und Wärmemanagement. Dank ihrer hohen Dichte, ihres

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umweltschutzes und ihrer Sicherheit sind sie zu einem unverzichtbaren Kernmaterial im Kernenergiesystem geworden. Mit der weltweit wachsenden Nachfrage nach sauberer Kernenergie und sicheren Kernanlagen erweitern sich die Anwendungsaussichten von Wolframlegierungen in Schutzkomponenten und Neutronenkontrollelementen.

#### 5.4 Strukturstäbe mit hoher Dichte für medizinische Geräte (Strahlentherapiegeräte)

Mit der rasanten Entwicklung moderner Strahlentherapie-Technologie hat sich Wolframlegierung aufgrund ihrer hohen Dichte, hohen Absorptionsleistung und guten mechanischen Eigenschaften zu einem Schlüsselmaterial für Strahlenschutz und Dosisregulierung in medizinischen Geräten entwickelt. Der Einsatz von Stäben aus Wolframlegierungen in Strahlentherapiegeräten (wie Linearbeschleunigern, Gamma Knife, CyberKnife usw.) gewährleistet nicht nur die präzise Strahlungskontrolle der Geräte, sondern schützt auch medizinisches Personal und Patienten wirksam vor unnötigen Strahlenschäden.

##### 5.4.1 Hintergrund der Anwendung von Wolframlegierungen in Strahlentherapiegeräten

Bei der Strahlentherapie werden hochenergetische Röntgen-, Gamma- oder Elektronenstrahlen eingesetzt, um den Tumorbereich präzise zu bestrahlen. Die Abschirm- und Justierungsstrukturen der Geräte müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- **Absorbiert Strahlung effizient**, um Strahlungslecks zu vermeiden;
- **Das Material weist eine hohe Dichte auf**, wodurch eine maximale Abschirmwirkung innerhalb eines begrenzten Volumens erreicht wird.
- **Starke mechanische Stabilität**, hält Bewegungen und Vibrationen der Ausrüstung stand;
- **Eine hohe Verarbeitungspräzision** gewährleistet eine genaue Führung des Strahlenbündels;
- **Biologisch sicher**, ungiftig und harmlos, im Einklang mit medizinischen und gesundheitlichen Standards.

Wolframlegierung ( $17,0\text{--}18,8\text{ g/cm}^3$ ) machen es zu einem idealen Material zur Abschirmung von Gamma- und Röntgenstrahlen, das herkömmlichen Bleimaterialien überlegen und umweltfreundlicher ist.

##### 5.4.2 Typische Anwendungsgebiete von Stäben aus Wolframlegierungen

1. **Schutzschilde und Durchführungen für Strahlentherapiegeräte**
  - Wird rund um die Linearbeschleunigeröhre verwendet, um Streustrahlen zu blockieren;
  - Durch die Präzisionsbearbeitung wird eine gleichmäßige Form und Dosis des Strahlungsbündels gewährleistet.
2. **Gegengewicht und Lamellenstruktur in Regellamellen (Multi-Leaf Diaphragm, MLC)**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- MLC-Klingen bestehen aufgrund ihrer hohen Dichte normalerweise aus einer Wolframlegierung, die Strahlung wirksam blockieren und die Form des Behandlungsbereichs kontrollieren kann.
  - Zur Herstellung des Klingenskeletts und des Gegengewichts können Stäbe aus Wolframlegierungen verwendet werden, um eine gleichmäßige und präzise Klingenbewegung zu gewährleisten.
3. **Strahlenschutz-Abschirmwand und bewegliche Abschirmplattenverkleidung**
- Stäbe oder Platten aus hochdichter Wolframlegierung bilden eine Schutzstruktur, die das Eindringen von Strahlung blockiert.
  - Leichtbauweise, die das Gewicht reduziert und die Sicherheit verbessert.
4. **Interne Gewichtsstruktur der Dosisanpassungsvorrichtung**
- Passen Sie die Strahlendosis und -richtung an, um eine präzise Kontrolle der Behandlung zu gewährleisten.
  - Stäbe aus Wolframlegierungen erfüllen aufgrund ihrer stabilen Größe und guten Verarbeitbarkeit die hohen Anforderungen der Maschinenbaukonstruktion.

#### 5.4.3 Wesentliche Leistungsanforderungen

Wolframlegierungsstäbe für medizinische Strahlentherapiegeräte müssen die folgenden technischen Indikatoren erfüllen:

- **Dichte** :  $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$ , wodurch eine ausreichende Strahlungsabsorptionskapazität gewährleistet wird;
- **Maßgenauigkeit** :  $\pm 0,01-0,03 \text{ mm}$ , wodurch strukturelle Übereinstimmung und Strahlungsgenauigkeit gewährleistet werden ;
- **Mechanische Eigenschaften** :
  - Zugfestigkeit  $\geq 700 \text{ MPa}$ , kann der während des Gerätebetriebs entstehenden Belastung standhalten;
  - Härte  $\geq \text{HRC } 30$ , gewährleistet Verschleißfestigkeit;
- **Oberflächenqualität** :  $R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$ , um eine Beeinträchtigung der Gerätebewegung und der Strahlungsübertragung zu vermeiden ;
- **Ungiftig und harmlos** : Erfüllt die Sicherheitsstandards für medizinische Geräte und verhindert das Austreten schädlicher Elemente.
- **Umweltstabilität** : Korrosionsbeständigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit (unter normalen Arbeitsumgebungen) und keine **Verformung** nach längerem Gebrauch.

#### 5.4.4 Verarbeitungs- und Fertigungstechnik

Medizinische Wolframlegierungsstäbe werden in der Regel mittels hochreiner Pulvermetallurgie hergestellt und anschließend durch Präzisionsbearbeitung geformt. Die wichtigsten Prozessverbindungen sind:

- **Durch präzises heißisostatisches Pressen (HIP)** wird sichergestellt, dass das Material dicht und porenfrei ist.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **CNC-Drehen und -Schleifen** zum Erreichen komplexer Formen und hoher Maßgenauigkeit;
- **Polieren und Reinigen der Oberfläche** zum Entfernen von Bearbeitungsspuren und Verunreinigungen;
- **Zerstörungsfreie Prüfung** (Ultraschall, Röntgen), um sicherzustellen, dass keine inneren Defekte vorliegen;
- **Oberflächenbeschichtungen** (wie Oxidfilme oder Keramikbeschichtungen) können die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität verbessern.

#### 5.4.5 Typische Fälle

- **Lamellen aus Wolframlegierung für die Mehrlamellenblende eines Linearbeschleunigers**
  - Hergestellt aus einer W-Ni-Fe-Wolframlegierung, erreicht die Klingendichte 18,0 g/cm<sup>3</sup>;
  - Die Klingengröße wird präzise gesteuert und die millimetergenaue Anpassung kann mit dem hochpräzisen mechanischen Übertragungssystem erreicht werden;
  - Verbessern Sie die Positionierungsgenauigkeit des Behandlungszielbereichs und die Patientensicherheit erheblich.
- **Gamma Knife Kopfschutzschild**
  - aus ultrahochdichter Wolframlegierung, die Dicke beträgt nur die Hälfte des Bleischutzmaterials;
  - Durch Feinbearbeitung und Wärmebehandlung werden Langzeitstabilität und Schutzleistung gewährleistet;
  - Verbessern Sie die Tragbarkeit des Geräts und reduzieren Sie das Gesamtgewicht.

#### 5.4.6 Entwicklungstrends und Technologiegrenzen

- **Hochleistungs-Wolframlegierungsmaterialien**
  - Nanopartikel verstärken Wolframlegierungen, um Festigkeit und Zähigkeit zu verbessern und die Lebensdauer der Geräte zu verlängern.
  - Die schwach magnetische Wolframlegierung erfüllt die Anforderungen der MRT-Kompatibilität.
- **Intelligente Herstellung von Klingen aus Wolframlegierungen**
  - Nutzen Sie die additive Fertigungstechnologie (3D-Druck), um komplexe Strukturen herzustellen und das Gewicht zu reduzieren.
  - In Kombination mit der Laserbearbeitung verbessert es die Oberflächenqualität und die Fertigungseffizienz.
- **Umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Bleimaterialien**
  - Wolframlegierungen entsprechen als ungiftiges Alternativmaterial den Trends und Vorschriften im Bereich des medizinischen Umweltschutzes.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Erreichen Sie eine sichere Behandlung und Wiederverwertung von medizinischem Abfall.

## Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe sind aufgrund ihrer hohen Dichte, Präzision und hervorragenden mechanischen Eigenschaften zu einem unverzichtbaren Kernmaterial für moderne medizinische Strahlentherapiegeräte geworden. Ihre Vorteile in Bezug auf Strahlenschutz, Dosisanpassung und strukturelle Stabilität haben die Genauigkeit und Sicherheit der Strahlentherapietechnologie erheblich verbessert. Mit dem Fortschritt der Materialwissenschaft und Fertigungstechnologie wird die Anwendung von Wolframlegierungen im medizinischen Bereich umfassender und intensiver.

## 5.5 Dynamische Ausgleichsstäbe und rotierende Trägheitsteile in hochpräzisen Instrumenten

Wolframlegierungsstäbe werden aufgrund ihrer hohen Dichte, hohen Steifigkeit und guten Bearbeitungseigenschaften häufig in verschiedenen hochpräzisen Instrumenten und Geräten eingesetzt, insbesondere in rotierenden Teilen, die ein hochpräzises dynamisches Auswuchten und eine Trägheitskontrolle erfordern. Wolframlegierungsstäbe ermöglichen eine effektive Feinabstimmung der Massenverteilung und Optimierung der dynamischen Leistung sowie eine Verbesserung der Messgenauigkeit und Betriebsstabilität des Instruments.

### 5.5.1 Anwendungshintergrund und Bedeutung

Hochpräzise Instrumente wie Gyroskope, Schwungradkreisel, Navigationsgeräte für die Luft- und Raumfahrt, Präzisionsantriebssysteme und schnell rotierende Maschinen stellen extrem hohe Anforderungen an dynamisches Gleichgewicht und Trägheitsverhalten. Die Hauptfunktionen von dynamischen Ausgleichsstäben und Trägheitsteilen sind:

- Passen Sie die Massenverteilung des rotierenden Körpers an, beseitigen Sie unausgeglichenes Drehmoment und reduzieren Sie Vibrationen und Lärm.
- Verbessern Sie die Stabilität und Lebensdauer des rotierenden Körpers und vermeiden Sie Lagerverschleiß und Geräteausfälle durch Unwucht.
- Optimieren Sie die Reaktionsleistung des Instruments und die Regelgenauigkeit durch präzise Anpassung des Trägheitsmoments.

Stäbe aus Wolframlegierungen sind aufgrund ihrer hohen Dichte ( $17,0\text{--}18,8\text{ g/cm}^3$ ) und hervorragenden mechanischen Eigenschaften ideale Materialien zur Herstellung dieser Schlüsselkomponenten.

### 5.5.2 Aufbau und Design des dynamischen Ausgleichstabes

- **Materialauswahl** : Verwenden Sie hauptsächlich hochdichte Wolframlegierungen vom Typ W-Ni-Fe oder W-Ni-Cu, um eine hohe Dichte und ausreichende mechanische Festigkeit zu gewährleisten .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Formspezifikationen** : Üblicherweise zylindrische Stäbe, Stufenstäbe oder Stäbe mit speziellem Querschnitt, die sich leicht in mechanische Strukturen einbetten lassen, um die Massenverteilung anzupassen ;
- **Maßgenauigkeit** : Die Anforderungen an die Verarbeitungsgenauigkeit sind extrem hoch und die Maßtoleranz wird normalerweise innerhalb von  $\pm 0,01$  mm kontrolliert , um den dynamischen Ausgleichseffekt sicherzustellen.
- **Oberflächenbehandlung** : Verbessern Sie die Oberflächenqualität durch Polieren, Vernickeln oder Beschichten, um Reibung und Korrosion zu reduzieren .

### 5.5.3 Leistungsanforderungen an rotierende Trägheitsteile

Rotierende Trägheitsteile müssen in der Regel die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- **Hohe Dichte und Gleichmäßigkeit** gewährleisten eine genaue Berechnung des Trägheitsmoments;
- **Gute mechanische Festigkeit und Zähigkeit** , kann der bei Hochgeschwindigkeitsrotation entstehenden Zentrifugalkraft standhalten;
- **Thermische Stabilität** , um eine stabile Größe und Leistung im Langzeitbetrieb zu gewährleisten;
- **Korrosionsbeständigkeit** , verlängert die Lebensdauer, insbesondere bei hoher Luftfeuchtigkeit oder korrosiven Umgebungen .

Bei hohen Geschwindigkeiten verformen oder versagen sie nicht, wodurch die hochpräzise Funktion der Ausrüstung gewährleistet bleibt.

### 5.5.4 Typische Anwendungsfälle

#### 1. Dynamische

Ausgleichsstangen werden häufig in rotierenden Teilen von Gyroskopen in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Durch die präzise Einstellung der Massenverteilung können Nullabweichungen und eine extrem geringe Drift der Geräte erreicht werden.

#### 2. Hochgeschwindigkeitsrotationsmaschinen

werden zum dynamischen Auswuchten von Hochgeschwindigkeitsmotoren und Turbinenschaufeln verwendet, wodurch Vibrationen wirksam reduziert und die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Geräte verbessert werden.

#### 3. Englisch : [www.ilt.fraunhofer.de/eng/101221.html](http://www.ilt.fraunhofer.de/eng/101221.html) Die Teile gewährleisten einen reibungslosen Lauf und die Messgenauigkeit der rotierenden Teile von **Präzisionsmessgeräten**

wie Drehtischen von Elektronenmikroskopen oder Laserinterferometern .

### 5.5.5 Produktionsprozess und Prüfmethode

- **Herstellungsverfahren** : Stäbe aus hochdichter Wolframlegierung werden pulvermetallurgisch hergestellt und durch Präzisionsdrehen und -schleifen geformt;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Wärmebehandlung** : Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der inneren Strukturgleichmäßigkeit;
- **Oberflächenbehandlung** : Korrosionsschutzbeschichtung und Polieren zur Erhöhung der Lebensdauer ;
- **Qualitätsprüfung** : Um eine Fehlerfreiheit zu gewährleisten , werden dynamische Auswuchtprüfgeräte, hochpräzise Koordinatenmessgeräte und zerstörungsfreie Prüftechnologien eingesetzt.

### 5.5.6 Zukünftige Entwicklungstrends

- **Mikro-nanostrukturierte Wolframlegierung** : Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Ermüdungsbeständigkeit;
- **Leichtbauweise** : Reduzieren Sie die Menge an Wolframlegierung durch Strukturoptimierung, um ein geringes Gewicht und eine hohe Festigkeit zu erreichen.
- **Additive Fertigungstechnologie** : Realisierung der integrierten Herstellung dynamischer Auswuchtteile mit komplexen Formen;
- **Intelligentes dynamisches Ausgleichssystem** : In Kombination mit Sensortechnologie wird die Position der dynamischen Ausgleichsstange aus Wolframlegierung in Echtzeit angepasst, um die dynamische Leistung des Systems zu verbessern.

### Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe spielen eine Schlüsselrolle im Bereich dynamischer Ausgleichsstäbe und rotierender Trägerteile in hochpräzisen Instrumenten. Ihre hohe Dichte und ihre hervorragenden mechanischen Eigenschaften sorgen für einen reibungsloseren und präziseren Betrieb der Geräte. Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Materialtechnologie und der Herstellungsverfahren werden Wolframlegierungen in Präzisionsrotationsmaschinen und hochwertigen Instrumenten ein wachsendes Potenzial entfalten.

## 5.6 Träger- und Wärmeableitungsstrukturen in der Elektronikindustrie und bei Kommunikationsgeräten

Mit der rasanten Entwicklung elektronischer Geräte und der Kommunikationstechnologie haben Miniaturisierung, hohe Leistungsdichte und Hochgeschwindigkeitsbetrieb der Geräte höhere Leistungsanforderungen an die Materialien gestellt. Wolframlegierungsstäbe haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte, hohen Wärmeleitfähigkeit und guten mechanischen Festigkeit zu den wichtigsten Träger- und Wärmeableitungsmaterialien in der Elektronikindustrie und bei Kommunikationsgeräten entwickelt und verbessern so effektiv die Stabilität und das Wärmemanagement der Geräte.

### 5.6.1 Anwendungshintergrund

das Wärmemanagement und die mechanische Stützleistung von Materialien:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Das Gerät erzeugt beim Betrieb viel Wärme und eine schlechte Wärmeableitung führt zu Leistungseinbußen oder sogar zu Schäden.
- Die Trägerstruktur muss mechanischen und thermischen Belastungen standhalten und die Positionierungsgenauigkeit des Geräts gewährleisten.
- Das Material muss eine gute Dimensionsstabilität und elektromagnetische Verträglichkeit aufweisen.

Aufgrund ihrer hohen Dichte, hervorragenden Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten sind Stäbe aus Wolframlegierungen die ideale Wahl, um diese Anforderungen zu erfüllen.

### 5.6.2 Hauptanwendungen von Wolframlegierungen in elektronischen und Kommunikationsgeräten

1. **Wärmeableitungs-Stützstruktur für Hochleistungsgeräte**
  - Wärmeableitungsbasis und Unterstützung für Leistungsverstärker und HF-Module;
  - Wolframlegierung hilft, die vom Gerät erzeugte Wärme schnell abzuleiten;
  - Die hohe Dichte und Steifigkeit des Materials sorgen für eine stabile Struktur und reduzieren die Auswirkungen von Vibrationen.
2. **Dämpfungsgewichte in Mikrowellen- und Millimeterwellen-Kommunikationsgeräten**
  - durch Wolframlegierung Gegengewicht;
  - Kontrollieren Sie Mikrobewegungen und Positionsabweichungen von HF-Komponenten effektiv.
3. **Kühlkörpermaterialien in Halbleitergehäusen**
  - Wolframlegierungen werden als Kühlkörper für High-End-Chip-Verpackungen verwendet, was dazu beiträgt, die Wärmeableitungseffizienz des Chips zu verbessern.
  - Berücksichtigen Sie sowohl die mechanische Festigkeit als auch die Anpassung der Wärmeausdehnung, um zu verhindern, dass der Chip durch thermische Belastung beschädigt wird.
4. **Präzise mechanische Positionierungs- und Stützteile**
  - Behalten Sie die relative Position und Stabilität winziger mechanischer Teile bei.
  - Wird häufig in mechanischen Halterungen und Vorrichtungen in Glasfaser-Kommunikationsgeräten und Lasersystemen verwendet.

### 5.6.3 Wesentliche Leistungsindikatoren

- **Dichte** :  $\geq 17,0 \text{ g/cm}^3$ , gewährleistet hohe Steifigkeit und Stabilität der Struktur;
- **Wärmeleitfähigkeit** :  $\geq 120 \text{ W / ( m \cdot K )}$ , schnelle Wärmeableitung;
- **Wärmeausdehnungskoeffizient** :  $\leq 6 \times 10^{-6} / \text{K}$ , entspricht der Wärmeausdehnung von Halbleitermaterialien ;
- **Mechanische Festigkeit** : Zugfestigkeit  $\geq 800 \text{ MPa}$ , Härte  $\geq \text{HRC } 30$ ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Maßgenauigkeit** : Die Verarbeitungsgenauigkeit erreicht den Mikrometerbereich, um die Montagegenauigkeit zu gewährleisten .
- **Oberflächenrauheit** :  $Ra \leq 0,2 \mu m$  , um Spannungskonzentrationen und thermischen Widerstand zu vermeiden ;
- **Elektromagnetische Verträglichkeit** : Geringe magnetische Empfindlichkeit, wodurch Signalstörungen reduziert werden.

#### 5.6.4 Verarbeitungstechnologie und Qualitätskontrolle

- **Hochreines Wolframpulver wird durch Pulvermetallurgie hergestellt**, um sicherzustellen, dass das Material dicht und gleichmäßig ist.
- **Heißostatisches Pressen (HIP) und Hochtemperaturesintern** zur Verbesserung der mechanischen und thermischen Leitfähigkeit;
- **CNC-Bearbeitung** zum Erreichen komplexer Strukturen und hoher Maßgenauigkeit;
- **Oberflächenbearbeitung** , einschließlich Schleifen und Polieren, um Oberflächenfehler zu reduzieren ;
- **Mehrere zerstörungsfreie Prüftechnologien** (Ultraschall, Röntgen-CT) gewährleisten die innere Qualität.

#### 5.6.5 Typische Fälle

- **Wärmeableitungshalterung für HF-Leistungsmodul der 5G-Basisstation**
  - Stäbe aus Wolframlegierung stützen Hochleistungsverstärkermodule, um eine effiziente Wärmeableitung und mechanische Stabilität zu gewährleisten.
  - Verbessern Sie die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Geräte.
- **High-End-Serverchip-Kühlmodul**
  - Verwenden Sie eine Kühlkörperstruktur aus Wolframlegierung, um die Chiptemperaturregelung zu verbessern.
  - Reduzieren Sie die thermische Belastung und gewährleisten Sie einen langfristig stabilen Betrieb.
- **Lasermechanische Unterstützung**
  - Die Halterung aus Wolframlegierung gewährleistet die Stabilität des Laserpfads.
  - Das Antivibrationsdesign reduziert optische Fehler.

#### 5.6.6 Entwicklungstrends und Technologieperspektiven

- **Die Wärmemanagementleistung der nanostrukturierten Wolframlegierung wird verbessert** , wodurch eine effizientere Wärmeableitung erreicht wird.
- **Wolframlegierungen und kohlenstoffbasierte Materialien** reduzieren das Gesamtgewicht und gewährleisten gleichzeitig die Wärmeableitungsleistung;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Integrieren Sie additive Fertigungstechnologien** zur Herstellung komplexer Wärmeleitungsstrukturen und Gerätehalterungen.
- **Das intelligente Wärmeleitungssystem wird mit Wolframlegierungsmaterialien kombiniert**, um eine Echtzeit-Temperaturregelung und adaptive Wärmeableitung zu erreichen.

### Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe werden in der Stütz- und Wärmeleitungsstruktur der Elektronikindustrie und in Kommunikationsgeräten eingesetzt. Dank ihrer hohen Dichte, hohen Wärmeleitfähigkeit und mechanischen Stabilität verbessern sie die Leistung und Zuverlässigkeit der Geräte erheblich. Mit der kontinuierlichen Steigerung der Leistungsdichte elektronischer Geräte und dem Trend zur Miniaturisierung wird die Rolle der Wolframlegierung immer wichtiger und trägt zu einer effizienten und intelligenten Entwicklung der Industrie bei.

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

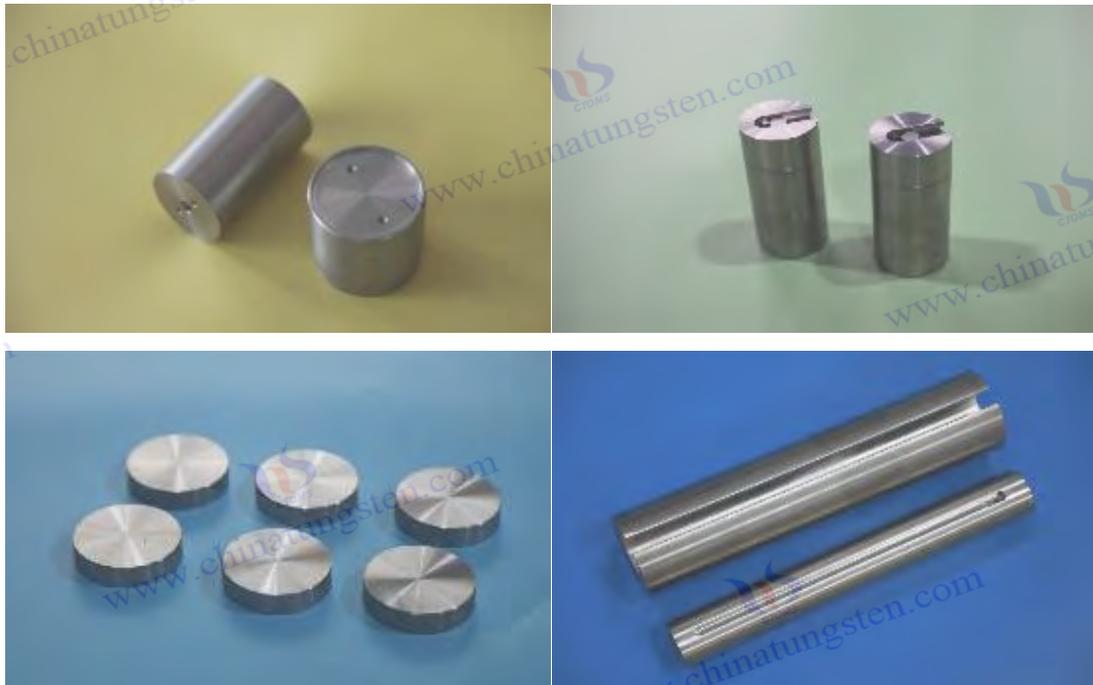
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Kapitel 6 Forschung, Entwicklung und Verbesserung von speziellen Wolframlegierungsstäben

### 6.1 Nanopartikelverstärkter Wolframlegierungsstab

Da die Herstellung hochwertiger Geräte und extreme Arbeitsbedingungen höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Wolframlegierungen stellen, werden die Schwächen herkömmlicher Wolframlegierungen hinsichtlich Festigkeit, Zähigkeit und thermischer Stabilität immer deutlicher. Die Nanopartikel-Verstärkungstechnologie ist zu einem wichtigen Weg geworden, die Leistungsgrenzen von Materialien zu überwinden. Durch die gleichmäßige Verteilung nanoskaliger Verstärkungsphasen in der Wolframlegierungsmatrix kann die Gesamtleistung des Materials effektiv verbessert und das Anwendungsspektrum von Wolframlegierungen erweitert werden.

#### Designkonzept einer nanopartikelverstärkten Wolframlegierung

Mit Nanopartikeln verstärkte Stäbe aus Wolframlegierung basieren hauptsächlich auf den folgenden Designkonzepten:

- **Verstärkungseffekt durch Nanopartikel** : Nanopartikel werden als zweite Phase gleichmäßig in der Matrix verteilt, wodurch die Korngrenzenwanderung und Versetzungsbewegung verhindert und Festigkeit und Härte verbessert werden.
- **Grenzflächenverstärkung** : Die Nanopartikel und die Wolframmatrix sind eng miteinander verbunden und bilden eine starke Grenzfläche, die die Zähigkeit und Bruchzähigkeit des Materials verbessert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Verbesserte thermische Stabilität** : Nanopartikel können Korngrenzen festlegen, das Kornwachstum bei hohen Temperaturen hemmen, die Feinkornstruktur aufrechterhalten und die Leistung bei hohen Temperaturen aufrechterhalten;
- **Verbesserte Strahlungsbeständigkeit** : Nanopartikel fungieren als Einfangpunkte für Strahlungsdefekte und erhöhen so die Lebensdauer von Wolframlegierungen in Umgebungen mit hoher Strahlung, wie beispielsweise in der Kernenergie.

### 6.1.2 Häufig verwendete nanoverstärkte Phasenmaterialien und ihre Eigenschaften

Nanopartikelmaterialien	Hauptmerkmale	Vorteile	Anwendungsschwerpunkte
<b>Oxid-Nanopartikel (wie <math>Y_2O_3</math>, <math>Al_2O_3</math>)</b>	Ausgezeichnete thermische Stabilität und chemische Inertheit	Hochtemperaturpassivierung, Kornstabilisierung	Hochtemperaturkorrosionsbeständige, hochfeste und zähe Wolframlegierung
<b>Carbid-Nanopartikel (wie WC, TiC)</b>	Hohe Härte, Verschleißfestigkeit	Deutliche Verbesserung der Härte und Verschleißfestigkeit	Werkzeugmaterialien, mechanische Teile
<b>Silikate und Verbundoxide</b>	Gute Anpassung der Wärmeausdehnung und bessere Zähigkeit	Reduzieren Sie thermische Spannungen und verbessern Sie thermomechanische Eigenschaften	Elektronische Verpackungen, thermisch stabile Strukturen
<b>Kohlenstoffnanoröhren und Graphenderivate</b>	Hohe Leitfähigkeit, hohe Festigkeit	Deutlich verbesserte Festigkeit und Leitfähigkeit	Funktionelle Wolframlegierung, elektromagnetische Anwendung

### Herstellungsprozess einer mit Nanopartikeln verstärkten Wolframlegierung

Die Herstellung nanopartikelverstärkter Wolframlegierungen erfolgt mittels hochpräziser Pulvermisch- und Formtechnologie. Die wichtigsten Prozesse umfassen:

- 1. Herstellung und Dispersion von Nanopartikelpulver**
  - Nanopartikel werden durch chemische Fällung, Sprühtrocknung, mechanisches Legieren usw. hergestellt.
  - Mithilfe von Ultraschalldispersion und Hochenergie-Kugelmahltechnologie werden Nanopartikel gleichmäßig im Wolframpulver verteilt, um eine Agglomeration zu vermeiden.
- 2. Pulvermischung und Vorbehandlung**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Nanopartikel und das Wolframpulver werden unter einer inerten Atmosphäre vollständig vermischt, um eine saubere Schnittstelle zu gewährleisten.
- Um die Fließfähigkeit des Pulvers zu verbessern, werden bei manchen Verfahren Dispergier- und Bindemittel zugesetzt.

### 3. Formen und Pressen

- Umformung durch Kaltisostatisches Pressen (CIP), Gesenkpressen oder Heißisostatisches Pressen (HIP);
- Durch heißisostatisches Pressen kann eine verdichtete Struktur mit hoher Dichte und geringer Porosität erreicht werden.

### 4. Sintern und Wärmebehandlung

- Hochtemperatur-Vakuumsintern fördert die Grenzflächenbindung zwischen Wolframmatrix und Nanopartikeln;
- Durch eine entsprechende Wärmebehandlung können Korngröße und Verstärkungsphasenverteilung reguliert werden.

### 5. Bearbeitung und Oberflächenbehandlung

- Präzisionsbearbeitung zur Erzielung der erforderlichen Größe und Form;
- Oberflächenpolitur und -beschichtung verbessern die Leistung.

## 6.1.4 Analyse des Leistungsverbesserungsmechanismus

### • Stärkungsmechanismus

- Nanopartikel wirken als Barrieren, um Versetzungsbewegungen zu verhindern und so die Zugfestigkeit und Streckgrenze deutlich zu erhöhen.
- Nanopartikel verfeinern die Körnung, erhöhen die Härte und verbessern die Zähigkeit;
- Die partikelverstärkte Schnittstelle kann die Korngrenzen wirksam fixieren und eine Kornvergrößerung bei hohen Temperaturen verhindern.

### • Thermische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit

- Die thermische Stabilität der Nanopartikel verbessert die Hochtemperaturbeständigkeit des Materials;
- Die Bildung einer Passivierungsschicht verhindert Oxidationskorrosion und verlängert die Lebensdauer.

### • Unterdrückung von Strahlenschäden

- Nanopartikel fangen durch Strahlung erzeugte Defekte ein und reduzieren so den Versetzungsschlupf und die Leerstellenaggregation.
- Verbessern Sie die Bestrahlungsstabilität von Wolframlegierungen in Umgebungen wie Kernreaktoren.

## 6.1.5 Anwendungsfälle und Wirkungsnachweis

### • Wolframlegierungsstab für Kernenergie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- hinzugefügte Nano- $Y_2O_3$ -Partikel zeigen eine bessere strukturelle Stabilität und Strahlungsbeständigkeit unter Hochtemperatur- und Bestrahlungsbedingungen ;
- ist mehr als 30 % länger als die herkömmlicher Wolframlegierungen.
- **Hochtemperatur-Flugzeugtriebwerksteile**
  - Nano- TiC verstärkte Wolframlegierung wird eine deutlich verbesserte thermische Ermüdungsbeständigkeit erreicht;
  - Die Materialfestigkeit wird um 20–40 % erhöht und die Zähigkeit deutlich verbessert.
- **Kühlkörpermaterialien für elektronische Verpackungen**
  - Mit Nano-  $Al_2O_3$  verstärkte Wolframlegierung verbessert die Wärmeleitfähigkeit und die Anpassung an die Wärmeausdehnung und reduziert so die thermische Spannung;
  - Eine verbesserte thermische Stabilität gewährleistet einen langfristig stabilen Betrieb.

### 6.1.6 Entwicklungstrends und Herausforderungen

- **Mehrkomponenten-Nanokomposit-Verstärkungssystem**
  - Kombination mehrerer Nanopartikel, um eine synergistische Verbesserung zu erreichen und die Leistungsgrenze zu erreichen;
- **Nanopartikel-Grenzflächentechnik**
  - Optimieren Sie die Grenzflächenstruktur zwischen Partikeln und Matrix und verbessern Sie die Festigkeit und Zähigkeit der Grenzflächenbindung.
- **Umweltfreundliche und kostengünstige Aufbereitungstechnologie**
  - Reduzieren Sie die Kosten der Nanopartikelherstellung und des Compoundierungsprozesses und verbessern Sie die Durchführbarkeit der Industrialisierung.
- **Präzise Kontrolle der Größe und Verteilung von Nanopartikeln**
  - Echtzeitüberwachung der Mikrostruktur für präzises Materialdesign mithilfe fortschrittlicher Charakterisierungstechniken.

### Zusammenfassung

Nanopartikelverstärkte Wolframlegierungsstäbe verbessern die Festigkeit, Zähigkeit, Hochtemperaturstabilität und Strahlungsbeständigkeit von Wolframlegierungen durch die Einführung hochleistungsfähiger nanoverstärkter Phasen deutlich und bilden eine solide Materialgrundlage für den Einsatz von Wolframlegierungen in anspruchsvollen Bereichen wie Kernenergie, Luft- und Raumfahrt und Elektronik. Dank der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Nanomaterialherstellung und der Verbundtechnologie werden nanopartikelverstärkte Wolframlegierungen künftig breitere Anwendungsaussichten und eine noch bessere Leistung bieten.

### Design- und Leistungsverbesserung von mikrolegierten Wolframlegierungsstäben

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Mikrolegierungstechnologie ist eine effektive Methode zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der thermischen Stabilität von Werkstoffen. Durch Zugabe von Spuren von Legierungselementen zur Wolframlegierungsmatrix werden feine Zweiphasenpartikel gebildet oder die Mischkristallverfestigung verbessert. Im Vergleich zum herkömmlichen Legieren hat sich die Mikrolegierung aufgrund ihrer geringen Dosierung, der geringen Kosten und der deutlichen Leistungssteigerung zu einer wichtigen Strategie zur Leistungsoptimierung von Wolframlegierungsstäben entwickelt.

### 6.2.1 Mikrolegierungs-Designkonzept

Der Kern der Mikrolegierung besteht darin, durch Zugabe von Spurenlegierungselementen folgende Ziele zu erreichen:

- **Festlösungsverfestigung** : Legierungselemente werden in Form einer festen Lösung gleichmäßig in der Wolframmatrix verteilt, was die Gitterverzerrung erhöht und die Versetzungsbewegung behindert ;
- **Ausscheidungshärtung** : Bildung kleiner und gleichmäßig verteilter Ausscheidungen der zweiten Phase, Fixierung von Versetzungen und Korngrenzen sowie Verbesserung von Festigkeit und Zähigkeit ;
- **Kornverfeinerung** : Hemmung des Kornwachstums, Optimierung der Mikrostruktur und Verbesserung der umfassenden mechanischen Eigenschaften von Materialien ;
- **die Hochtemperaturleistung** : Verbessern Sie die thermische Stabilität und Kriechfestigkeit von Materialien und verlängern Sie die Lebensdauer.
- **Optimieren Sie die Prozessanpassungsfähigkeit** : Verbessern Sie die Form- und Verarbeitungsleistung von Materialien und verringern Sie die Verarbeitungsschwierigkeiten.

### 6.2.2 Häufig verwendete Mikrolegierungselemente und ihre Wirkungsmechanismen

Legierungselemente	Wirkmechanismus	Typische Effekte
<b>Titan (Ti)</b>	Bilden stabile Carbide oder Oxide und verfeinern Körner	Verbessern Sie Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit
<b>Niob (Nb)</b>	Mischkristallverfestigung und Ausscheidungsverfestigung	Verbesserte Hochtemperaturfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit
<b>Vanadium (V)</b>	Niederschlagsverstärkung zur Bildung stabiler Partikel der zweiten Phase	Verbesserte Streckgrenze und Ermüdungsbeständigkeit
<b>Aluminium (Al)</b>	Festlösungsverfestigung, Verbesserung der Einheitlichkeit der Struktur	Verbesserte Oxidationsbeständigkeit und Zähigkeit bei hohen Temperaturen
<b>Zirkonium (Zr)</b>	Bilden stabile Oxidpartikel und fixieren die Korngrenzen	Verbessern Sie die mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen und die antioxidative Kapazität

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Kupfer (Cu)</b>	Fördern Sie die Korngrenzenverstärkung verbessern Sie die Plastizität	Sie	die und	Optimieren Sie die Verarbeitungsleistung und verbessern Sie umfassende mechanische Eigenschaften
--------------------	---	-----	---------	--

## Herstellungsprozess eines mikrolegierten Wolframlegierungsstabs

### 1. Auswahl und Zugabemethode der Legierungselemente

- Wählen Sie entsprechend der Zielleistung geeignete Elemente und deren Gehalte (normalerweise Spuren Mengen im Bereich von 0,1 % bis 2 %) aus.
- Verwenden Sie hochreines Legierungspulver oder Elementpulvergemisch, um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten.

### 2. Pulvermischen und Homogenisieren

- Um eine gleichmäßige Mischung der Legierungselemente und des Wolframpulvers zu erreichen, werden Hochenergie-Kugelmahlen, mechanisches Legieren und andere Technologien eingesetzt.
- Vermeiden Sie übermäßige Pulverisierung und Agglomeration, indem Sie die Parameter des Kugelmahlens kontrollieren.

### 3. Formen und Sintern

- Verwenden Sie kaltisostatisches Pressen, Formen und andere Methoden, um die Dichte sicherzustellen.
- Der Hochtemperatur-Sinterprozess fördert die Diffusion von Legierungselementen und die Ausfällung der zweiten Phase.

### 4. Wärmebehandlung und Bearbeitung

- Durch eine entsprechende Wärmebehandlung werden Legierungselemente aktiviert und Verstärkungsphasen gebildet;
- Durch die präzise Bearbeitung werden die endgültigen Abmessungen und die Oberflächenqualität sichergestellt.

## 6.2.4 Leistungsverbesserungseffekt

### • Deutlich verbesserte mechanische Eigenschaften

- Die Zugfestigkeit und Streckgrenze werden um 10–30 % erhöht, und einige Hochleistungsstäbe aus mikrolegierter Wolframlegierung können sogar mehr als 1000 MPa erreichen;
- Dehnung und Bruchzähigkeit werden verbessert und die Schlagfestigkeit erhöht.

### • Verbesserte thermische Stabilität und Hochtemperaturfestigkeit

- Die Ausscheidungshärtung von Mikrolegierungselementen hemmt das Kornwachstum und das Material behält bei hohen Temperaturen eine stabile Organisationsstruktur;
- Verbesserte Kriechfestigkeit, geeignet für Hochtemperaturanwendungen.

### • Verbesserte Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Bilden Sie eine stabile Passivierungsschicht, um Oxidation bei hohen Temperaturen und chemische Korrosion zu verhindern;
- Verbessern Sie die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Materialien.
- **Optimierung der Verarbeitungsleistung**
  - Mikrolegierungselemente verbessern die Fließfähigkeit und Formbarkeit des Pulvers und verringern so den Verarbeitungsaufwand und die Kosten.

### 6.2.5 Anwendungsbeispiele

- **Kernmaterial aus Wolframlegierungen im militärischen Bereich**
  - Durch die Zugabe von Spuren von Ti und Nb werden hohe Festigkeit und Zähigkeit erreicht und die panzerbrechende Wirkung verbessert.
  - Verbessern Sie die Verschleißfestigkeit und Hitzebeständigkeit des Kerns erheblich.
- **Hochtemperaturstrukturteile für die Luft- und Raumfahrt**
  - Mikrolegierte Wolframlegierungen in Hochtemperaturteilen von Motoren können die Lebensdauer verlängern;
  - Behalten Sie die Hochtemperaturfestigkeit bei und reduzieren Sie thermische Ermüdungsschäden.
- **Wolframlegierungsstäbe in medizinischen Strahlentherapiegeräten**
  - Durch Zugabe von Spuren von Zr- und V-Elementen können Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit verbessert und die Lebensdauer der Geräte verlängert werden.

### 6.2.6 Entwicklungstrends und Herausforderungen

- **Feinsteuerung des Gehalts und der Verteilung von Mikrolegierungselementen**
  - Verwenden Sie erweiterte Charakterisierungstechniken, um das Legierungsdesign zu optimieren und eine präzise Leistungskontrolle zu erreichen.
- **Studie zum Mechanismus der synergistischen Verstärkung mehrerer Elemente**
  - Erkunden Sie die Synergieeffekte zwischen mehreren Mikrolegierungselementen, um die Leistung weiter zu verbessern.
- **Grüne und umweltfreundliche Aufbereitungstechnologie**
  - Entwickeln Sie einen energiesparenden und umweltschonenden Produktionsprozess für mikrolegierte Wolframlegierungen, um den Umweltschutzanforderungen gerecht zu werden.
- **Industrialisierung und großtechnische Anwendung**
  - Lösen Sie die Probleme der Kosten und Prozesskomplexität und fördern Sie die weitverbreitete Anwendung von mikrolegierten Wolframlegierungen in mehr Bereichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## **Zusammenfassung**

Die Mikrolegierungstechnologie verbessert die mechanischen Eigenschaften, die thermische Stabilität und die Verarbeitungsleistung von Materialien durch die Zugabe von Spuren funktioneller Legierungselemente zu Wolframlegierungsstäben. Diese Technologie erweitert nicht nur den Anwendungsbereich von Wolframlegierungen, sondern eröffnet auch einen effektiven Weg für die Forschung und Entwicklung von Hochleistungswerkstoffen aus Wolframlegierungen. Mit der Vertiefung der Herstellungstechnologie und der theoretischen Forschung eröffnen mikrolegierte Wolframlegierungen künftig breitere Entwicklungsperspektiven.

## **6.3 Zusammensetzungskontrolle von hochfesten und zähen Wolframlegierungsstäben**

Wolframlegierungsstäbe werden unter extremen Bedingungen wie in der Luft- und Raumfahrt, der Rüstungsindustrie und der Kernenergie eingesetzt und müssen in der Regel sowohl hohe Festigkeit als auch hohe Zähigkeit aufweisen. Herkömmliche Wolframlegierungen zeichnen sich durch hohe Festigkeit aus, weisen aber keine Zähigkeit auf, wodurch das Material leicht bricht. Die Schlüsselstrategie zur Herstellung hochfester und zäher Wolframlegierungsstäbe besteht darin, durch präzise Steuerung der Legierungszusammensetzung eine optimale Kombination aus Matrix und zweiter Phase zu erreichen.

### **6.3.1 Grundlagen zur Steuerung der Zusammensetzung hochfester und zäher Wolframlegierungen**

#### **1. Sinnvolle Auswahl des Hauptlegierungselementverhältnisses**

- Der Anteil der Hauptelemente wie Nickel (Ni), Eisen (Fe) und Kupfer (Cu) in der Wolframmatrix bestimmt die mechanischen Eigenschaften und die Organisationsstruktur der Matrix.
- Passen Sie das Ni/Fe-Verhältnis und den Kupfergehalt angemessen an, um ein Gleichgewicht zwischen Festigkeit und Zähigkeit zu erreichen.

#### **2. Einführung mehrerer Legierungselemente zur Erzielung einer synergistischen Verstärkung**

- Durch Zugabe von Spuren von Mikrolegierungselementen wie Titan (Ti), Zirkonium (Zr) und Vanadium (V) wird eine Verstärkungsphase gebildet, um eine Feinkornverstärkung und Ausscheidungsverstärkung zu erreichen.
- Der synergistische Effekt mehrerer Elemente verbessert die Grenzflächenbindung und verbessert die Gesamtzähigkeit.

#### **3. Kontrollieren Sie den Gehalt an Verunreinigungselementen**

- Reduzieren Sie Verunreinigungen wie Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel, vermeiden Sie die Bildung spröder Phasen und verbessern Sie die Materialzähigkeit.

#### **4. Optimieren Sie das Gradientendesign der Legierungszusammensetzung**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- Durch die Verwendung einer Gradientenlegierung wird eine zonierte Verteilung von Härte und Zähigkeit erreicht und die Gesamtleistung verbessert.

### 6.3.2 Auswirkungen der Zusammensetzungsregulierung auf die Gewebestruktur

- **Mischkristallverhalten der**

**Wolframmatrix und der Legierungselemente** Die Mischkristallverstärkung der Legierungselemente in der Wolframmatrix verbessert die Festigkeit, ein übermäßiger Mischkristallgehalt verringert jedoch die Zähigkeit und der Gehalt muss genau kontrolliert werden.

- **Bildung der Ausscheidungen der zweiten Phase**

Die durch die Mikrolegierungselemente gebildeten Karbid- und Oxidpartikel wirken als Ausscheidungsphasen, verfeinern die Körner und behindern die Rissausbreitung.

- **der Korngröße und**

der Zusammensetzung der Kornverteilung wird die Korngröße beeinflusst und durch die Hemmung des Kornwachstums die Zähigkeit und das Ermüdungsverhalten verbessert.

### 6.3.3 Typische Zusammensetzung einer hochfesten und hochzähen Wolframlegierung

Zutatensystem	Hauptmerkmale	Leistung
W-Ni-Fe-Cu-Ti-Zr	Mehrere Mikrolegierungselemente, Kornverfeinerung und Ausscheidungshärtung	Festigkeit um 20–30 % erhöht, Zähigkeit deutlich verbessert
W-Ni-Fe-Cu-V-Al	Synergistische Mischkristall- und Ausscheidungsverfestigung, ausgezeichnete Ermüdungsbeständigkeit	Verbesserte Schlagzähigkeit und verlängerte Lebensdauer
W-Ni-Cu-Spuren seltener Erdelemente	Seltene Erden verbessern die Korngrenzenbindung und verhindern Sprödbüche	Erhöhte Bruchzähigkeit und verbesserte Hitzebeständigkeit

### 6.3.4 Leistungsverbesserungsmechanismus durch die Regulierung der Inhaltsstoffe

- **Grenzflächenverstärkung und Rissfixierung**

Die winzigen Partikel der zweiten Phase erhöhen die Bindungskraft der Korngrenzen und verhindern, dass sich Risse entlang der Korngrenzen ausbreiten.

- **Die Regulierung der Kornverfeinerung und der Zusammensetzung der Versetzungshindernis**

fördert die Kornverfeinerung, erhöht den Widerstand gegen Versetzungsbewegungen und verbessert die Festigkeit und Plastizität.

- **Durch die Mischkristallverfestigung und Zähigkeitsoptimierung**

wird der Gehalt an Mischkristallelementen präzise gesteuert, um das Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit auszugleichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.3.5 Anwendungsgebiete und Wirkungsnachweis

- **Militär** Der hochfeste und zähe Stab aus Wolframlegierung **des panzerbrechenden Kernmaterials** verbessert die Durchschlagskraft und Verschleißfestigkeit erheblich und verringert das Risiko eines Sprödbruchs.
- **von hochtemperaturbeständigen Strukturteilen von Flugzeugtriebwerken** gewährleistet sowohl die Robustheit als auch die Festigkeit der Materialien in Hochtemperaturumgebungen und verbessert so die Sicherheit.
- **von strahlungsgeschützten Komponenten von Kernenergieanlagen** verlängert die Lebensdauer und senkt die Wartungskosten.

### 6.3.6 Zukünftige Entwicklungsrichtung

- **computergestützten Materialdesign** wird mithilfe computergestützter Simulation die Beziehung zwischen Zusammensetzung und Leistung genau vorhergesagt, sodass maßgeschneiderte Wolframlegierungen mit hoher Festigkeit und Zähigkeit hergestellt werden können.
- **Fortschrittliche Synthesetechnologie** kann in Kombination mit Zutatendesign, Wärmebehandlung, heißstatischem Pressen und anderen Technologien die Wirkung der Zutatenregulierung verbessern.
- **Mehrskalige Strukturregulierung** von der Nano- bis zur Makroebene zur Leistungsoptimierung.

### Zusammenfassung

Die Steuerung der Zusammensetzung hochfester und zäher Wolframlegierungsstäbe erreicht eine synergetische Verbesserung von Festigkeit und Zähigkeit durch die präzise Gestaltung der Art und des Anteils der Legierungselemente sowie die Optimierung der Mikrostruktur. Diese Strategie löst nicht nur das Problem der Sprödigkeit von Wolframlegierungen, sondern legt auch eine solide Grundlage für ihre breite Anwendung unter extremen Arbeitsbedingungen. Mit der Weiterentwicklung der Materialdesigntheorie und der Herstellungstechnologie wird die Leistung hochfester und zäher Wolframlegierungen weiter zunehmen und die technologische Weiterentwicklung verwandter Branchen fördern.

### 6.4 Studie zur Wärmebehandlung von hochtemperaturbeständigen Wolframlegierungsstäben

Wolframlegierungen werden aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts, ihrer hohen Dichte und ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften häufig in Hochtemperaturumgebungen eingesetzt. Allerdings neigen Wolframlegierungen unter extrem hohen Temperaturen zu Kornwachstum, struktureller Instabilität und Leistungseinbußen. Die Wärmebehandlung ist ein wichtiger Prozess

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zur Regulierung der Mikrostruktur und der Eigenschaften von Wolframlegierungen und ein wichtiges Mittel zur Verbesserung ihrer Hochtemperaturbeständigkeit.

#### 6.4.1 Zweck und Bedeutung der Wärmebehandlung von Wolframlegierungen

- **Verbessern Sie die organisatorische Einheitlichkeit** : Beseitigen Sie innere Spannungen und sorgen Sie durch angemessene Glüh- und Alterungsprozesse für eine einheitliche Korngröße.
- **Verbessern Sie die mechanischen Eigenschaften** : Optimieren Sie die Korngröße und die Ausscheidung der zweiten Phase, um Festigkeit und Zähigkeit zu verbessern.
- **Stabilisiert die Hochtemperaturleistung** : Hemmt das Kornwachstum, verzögert das Kriechen und Erweichen bei hohen Temperaturen;
- **Verbesserte Korrosionsbeständigkeit** : Verbessern Sie die Dichte und Stabilität des Oxidfilms durch eine Wärmebehandlung der Oberfläche.

#### 6.4.2 Häufig verwendete Wärmebehandlungsverfahren und -parameter

Prozesstyp	Temperaturbereich (°C)	Isolationszeit	Hauptfunktion
<b>Glühen</b>	800~1200	1~5 Stunden	Beseitigen Sie innere Spannungen und verfeinern Sie die Körner
<b>Altern</b>	500~900	2~10 Stunden	Fördern Sie die Ausfällung der zweiten Phase und stärken Sie die Matrix
<b>Lösungsbehandlung</b>	1200~1400	0,5 bis 3 Stunden	Lösen Sie die Phase auf und machen Sie die Zusammensetzung gleichmäßig
<b>Oberflächenwärmebehandlung (Nitrieren/Aufkohlen)</b>	900~1100	1~4 Stunden	Verbessern Sie die Oberflächenhärte und Oxidationsbeständigkeit

#### 6.4.3 Einfluss der Wärmebehandlung auf die Mikrostruktur

- **Korngrößenkontrolle:**  
Durch eine geeignete Glühtemperatur können die Körner verfeinert, übermäßiges Kornwachstum verhindert und ein Gleichgewicht zwischen Materialfestigkeit und Zähigkeit aufrechterhalten werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Die Ausfällungs- und Verteilungsalterungsbehandlung der zweiten Phase**  
fördert die feine und gleichmäßige Ausfällung der Verstärkungsphase und verbessert die Wirkung der Behinderung der Versetzungsbewegung.
- **Beseitigen Sie innere Spannungen.**  
Der Glühprozess löst verarbeitungsbedingte Restspannungen, verringert die Spannungskonzentration und mindert das Risiko eines Sprödbruchs.

#### 6.4.4 Mechanismus zur Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit

- **Durch die Kornverfeinerung wird**  
die feine und gleichmäßige Kornstruktur verstärkt, um die Kriechfestigkeit bei hohen Temperaturen und die Lebensdauer zu verbessern.
- **Die ausgefällte Phase stärkt**  
die stabilen Partikel der zweiten Phase und fixiert die Korngrenzen, wodurch die Korngrenzenwanderung behindert und die Hochtemperaturfestigkeit verbessert wird.
- **Oxidfilmschutz:**  
Durch die Wärmebehandlung der Oberfläche bildet sich ein dichter Oxidfilm, der Oxidationskorrosion blockiert und die antioxidativen Eigenschaften verbessert.

#### 6.4.5 Typische Forschungsergebnisse und Fälle

- **zur Optimierung des Hochtemperaturglühens**  
haben gezeigt, dass durch Glühen bei 1100 °C über drei Stunden die Körner deutlich verfeinert werden können, die Zugfestigkeit der Wolframlegierung um 15 % erhöht und die Dehnung um 10 % gesteigert werden kann.
- **Alterungsverfestigungseffekt:**  
Nach einer Alterung bei 650 °C für 6 Stunden scheidet sich die Verfestigungsphase gleichmäßig ab und die Hochtemperaturkriechgeschwindigkeit des Materials wird um 20 % reduziert.
- **Oberflächennitrierbehandlung** Durch die  
Oberflächennitrierbehandlung wird die Härte um 40 % erhöht, die Oxidationstemperatur um etwa 200 °C und die Oxidationsbeständigkeit deutlich verbessert.

#### 6.4.6 Strategie zur Optimierung des Wärmebehandlungsprozesses

- **Der mehrstufige Wärmebehandlungsprozess**  
kombiniert Glühen, Lösungsglühen und Altern, um die Organisationsstruktur koordiniert zu regeln.
- **Durch eine präzise Temperatur- und Atmosphärenkontrolle**  
wird ein Vakuum oder eine Schutzatmosphäre verwendet, um eine sekundäre Oxidation zu vermeiden und die Wirkung der Wärmebehandlung sicherzustellen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Die Wärmebehandlung ist mit dem Umformungsprozess verknüpft,** um den Wärmebehandlungsplan entsprechend den Eigenschaften des vorherigen Umformungsprozesses anzupassen und so Gewebeschäden zu vermeiden.

#### 6.4.7 Entwicklungstrends und Herausforderungen

- **Intelligente Wärmebehandlungstechnologie** nutzt Online-Überwachung und -Steuerung, um eine Echtzeitoptimierung des Wärmebehandlungsprozesses zu erreichen.
- **Langzeitbewertung der Betriebsleistung bei hohen Temperaturen.** Detaillierte Untersuchung des Einflusses der Wärmebehandlung auf die Kriech- und Ermüdungseigenschaften bei hohen Temperaturen.
- Entwickeln Sie mehrskalige Simulationstools **durch die Kopplung von Mikrostruktur und Leistung, um die Gestaltung des Wärmebehandlungsprozesses zu steuern.**

#### Zusammenfassung

Die Wärmebehandlungstechnologie ist das Herzstück zur Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit von Wolframlegierungsstäben. Durch wissenschaftliche und sinnvolle Gestaltung des Wärmebehandlungsprozesses kann die Mikrostruktur effektiv kontrolliert, Festigkeit, Zähigkeit und Hochtemperaturstabilität verbessert und die hohen Anforderungen an Hochtemperatur-Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie und anderen Bereichen erfüllt werden. Intelligente und digitale Wärmebehandlungstechnologie wird den Wärmebehandlungsprozess von Wolframlegierungen zukünftig auf ein höheres Niveau heben.

#### 6.5 Oberflächenbeschichtung und verschleißfester verstärkter Stab aus Wolframlegierung

Wolframlegierungsstäbe zeichnen sich durch hohe Dichte und hohe Festigkeit aus. In Umgebungen mit hoher Belastung, Reibung oder Korrosion ist die freiliegende Wolframlegierungsfläche jedoch anfällig für Verschleiß, Oxidation und Korrosion, was ihre Lebensdauer und Leistungsstabilität beeinträchtigt. Die Oberflächenbeschichtungstechnologie ist ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von Wolframlegierungen. Durch den Aufbau einer Schutzschicht wird die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit deutlich erhöht. Dies ist ein wichtiger Aspekt der Forschung und Entwicklung spezieller Wolframlegierungsstäbe.

##### 6.5.1 Verschleiß- und Korrosionsmechanismus der Wolframlegierungsfläche

- **Mechanischer Verschleiß**  
Während des Kontakt- und Reibungsprozesses der Wolframlegierung erfährt das Oberflächenmaterial aufgrund von Reibung und Scherkräften eine plastische Verformung und Ermüdungsrisse, was zu Materialablösung und Ablösen von Schleifkörnern führt.
- **Chemische Korrosion und Oxidation:**  
Unter der Einwirkung hoher Temperaturen oder korrosiver Medien bilden sich auf der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberfläche der Wolframlegierung eine Oxidschicht oder Korrosionsprodukte, die die Oberflächenfestigkeit verringern, sich leicht ablösen und den Verschleiß verschlimmern.

- **Durch Ermüdungsverleiß und** zyklische Belastung der Grenzflächen werden Mikrorisse größer, die Oberflächenbeschichtung löst sich ab und die Schutzwirkung geht verloren.

### 6.5.2 Auswahl der Oberflächenbeschichtungsmaterialien

Beschichtungstyp	Hauptmerkmale	Vorteile und Anwendungen
<b>Harte keramische Beschichtungen ( wie TiN , CrN , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> )</b>	Hohe Härte, Verschleißfestigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit	Mechanische Teile, Formen und Verschleißteile
<b>Kohlenstoffbasierte Beschichtungen (z. B. Diamant, Kohlenstoffnitrid)</b>	Extrem hohe Härte, niedriger Reibungskoeffizient	Präzisionsinstrumente, Schneidwerkzeuge
<b>Metallbasierte Verbundbeschichtungen (wie WC-Co, NiCr )</b>	Gute Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit	Hochbelastete mechanische Teile
<b>Mehrlagige Funktionsbeschichtung</b>	Kombination aus Härte, Zähigkeit und Oxidationsbeständigkeit	Umfassende Leistungsanforderungen in komplexen Serviceumgebungen

### 6.5.3 Technologie zur Oberflächenbeschichtungsvorbereitung

- **Bei der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD)** werden harte Filme durch Verdampfen oder Sputtern abgeschieden. Die Beschichtung ist dicht und weist eine starke Bindungskraft auf, was sie für hochpräzise Teile aus Wolframlegierungen geeignet macht.
- **der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD)** wird durch chemische Reaktionen eine gleichmäßige Beschichtung erzeugt, die sich für Teile mit komplexen Formen eignet und eine ausgezeichnete Hochtemperaturbeständigkeit aufweist.
- **Beim thermischen Spritzen** werden Beschichtungen durch das Aufsprühen geschmolzener Partikel aufgebracht. Es eignet sich für dicke Beschichtungen und Reparaturen und weist eine gute Zähigkeit auf.
- **Laser-Oberflächenauftragschweißen** wird Pulvermaterial mithilfe eines Lasers geschmolzen, um eine metallurgische Bindung zwischen der Beschichtung und dem Substrat herzustellen, wodurch die Beschichtung verschleißfest und korrosionsbeständig wird.
- **Galvanisieren und elektrochemische Abscheidung** eignen sich zum Aufbringen von Metallbeschichtungen zur Verbesserung der Oberflächenleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 6.5.4 Verbesserung der Leistung von Wolframlegierungen durch Oberflächenbeschichtung

- **Deutliche Verbesserung von Härte und Verschleißfestigkeit.**  
Die Beschichtung weist eine höhere Härte als das Substrat auf und verhindert so wirksam Reibung, Verschleiß und plastische Verformung der Oberfläche.
- **Verbessern Sie die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit,**  
um einen stabilen Schutzfilm zu bilden, korrosive Medien zu isolieren und den Oxidationsprozess zu verzögern.
- **Verbessern Sie die Oberflächenreibleistung**  
, senken Sie den Reibungskoeffizienten und verringern Sie die Wärmeentwicklung und den Materialverlust.
- **Verbesserte Hochtemperaturbeständigkeit.**  
Die Beschichtung weist eine hervorragende Hochtemperaturbeständigkeit auf und gewährleistet strukturelle Stabilität in Hochtemperaturumgebungen.

#### 6.5.5 Designstrategie für verschleißfeste, verstärkte Stäbe aus Wolframlegierung

- **Durch die Abstimmung von Beschichtung und Substrat**  
wird der Wärmeausdehnungskoeffizient der Beschichtung an den des Substrats angepasst, wodurch Risse und Ablösungen der Beschichtung durch thermische Spannungen bei hohen Temperaturen vermieden werden.
- **Die Mehrschicht-Verbundbeschichtungstechnologie**  
verwendet eine harte und eine zähe Schicht, um Verschleißfestigkeit und Schlagfestigkeit zu kombinieren.
- **Optimierung der Oberflächenrauheit:**  
Detaillierte Oberflächenbehandlung vor dem Beschichten zur Verbesserung der Beschichtungshaftung.
- **Kontrolle der Beschichtungsdicke und -gleichmäßigkeit:**  
Gestalten Sie die Beschichtungsdicke rational, um Leistungseinbußen durch ungleichmäßige Dicke zu vermeiden.

#### 6.5.6 Anwendungsfälle

- **Wolframlegierungsbeschichtung von Turbinenschaufeln für Luft- und Raumfahrtmotoren** TiN / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Verbundbeschichtung, die die Verschleißfestigkeit um 50 % verbessert und die Lebensdauer der Klinge deutlich verlängert.
- **Militärische panzerbrechende Kernbeschichtungstechnologie:**  
Die Hartkarbidbeschichtung erhöht die Oberflächenhärte des Kerns und verbessert die Durchdringungsfähigkeit und Verschleißfestigkeit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **auf der Oberfläche elektronischer Wärmeableitungskomponenten**  
verbessert die Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit und gewährleistet so einen langfristigen und stabilen Betrieb der Geräte.

### 6.5.7 Entwicklungstrends und Herausforderungen

- **Entwicklung nanostrukturierter Beschichtungen**  
Nanokristalline Beschichtungen sind dichter, weisen sowohl Härte als auch Zähigkeit auf und weisen eine bessere Verschleißfestigkeit auf.
- **Durch die intelligente Funktionsintegration der Beschichtung**  
werden selbstreparierende, antibakterielle, korrosionsschützende und andere Funktionen kombiniert, um den Anwendungsbereich zu erweitern.
- **Umweltfreundliche Beschichtungstechnologie und**  
umweltfreundliche Herstellungsverfahren reduzieren die Umweltbelastung und verbessern die Nachhaltigkeit der Industrie.
- **Die Optimierung der Grenzflächentechnik zwischen Beschichtung und Substrat**  
verbessert die Festigkeit der Grenzflächenbindung und verhindert ein Ablösen der Beschichtung sowie Ermüdungsbrüche.

### Zusammenfassung

Oberflächenbeschichtungstechnologie verleiht Wolframlegierungsstäben einen effizienten Verschleiß- und Korrosionsschutz und verbessert so ihre Lebensdauer und Leistungsstabilität in extremen Umgebungen erheblich. Durch die kontinuierliche Entwicklung fortschrittlicher Beschichtungsmaterialien und Herstellungsverfahren werden verschleißfeste und verbesserte Wolframlegierungsstäbe in der Luft- und Raumfahrt, der Rüstungsindustrie und der High-End-Fertigung eine immer wichtigere Rolle spielen. Die Diversifizierung und Intelligenz der Beschichtungsfunktionen wird in Zukunft eine neue Richtung der technologischen Entwicklung darstellen.

### 6.6 Funktioneller Wolframlegierungsstab: elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, antimagnetisch

Als hochdichtes, leistungsstarkes Material verfügen Wolframlegierungsstäbe nicht nur über hervorragende mechanische Eigenschaften und hohe Temperaturbeständigkeit, sondern erfreuen sich auch einer steigenden Nachfrage nach multifunktionalen Materialien in der modernen Industrie und im Hightech-Bereich. Funktionelle Eigenschaften von Wolframlegierungsstäben, wie elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und antimagnetische Eigenschaften, rücken zunehmend in den Fokus von Forschung und Entwicklung. Durch Materialdesign und Prozesskontrolle können Wolframlegierungsstäbe funktionalisiert, ihre Anwendungsbereiche erweitert und ihre Gesamtleistung verbessert werden.

### Design und Anwendung von leitfähigen Wolframlegierungsstäben

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Gestaltungsprinzipien**
  - Verbessern Sie die elektrische Leitfähigkeit der Legierung bei gleichzeitiger Beibehaltung guter mechanischer Eigenschaften.
  - Optimieren Sie die Arten und Inhalte der Legierungselemente, um die Hindernisse für die Elektronenmigration zu verringern.
  - Kontrollieren Sie die Mikrostruktur und reduzieren Sie den Einfluss von Korngrenzen und Defekten auf den Widerstand.
- **Gängige Legierungselemente**
  - Kupfer (Cu) ist ein ausgezeichnetes leitfähiges Element und wird häufig verwendet, um die Leitfähigkeit von Wolframlegierungen zu verbessern.
  - Die entsprechende Zugabe von Elementen wie Silber (Ag) und Nickel (Ni) hilft, Leitfähigkeit und mechanische Eigenschaften auszugleichen.
- **Anwendungsbereiche**
  - Elektronische Verpackungsmaterialien;
  - Elektrodenmaterialien in elektronischen Vakuumgeräten;
  - Unterstützung der Wärmeableitung für Hochfrequenzschaltungen.
- **Leistungsmerkmale**
  - Der spezifische Widerstand kann auf Mikro-Ohm-cm-Niveau reduziert werden;
  - Gleichzeitig behält es eine hohe Festigkeit und thermische Stabilität;
  - Gute Bearbeitbarkeit und Dimensionsstabilität.

## Design und Anwendung von wärmeleitenden Stäben aus Wolframlegierung

- **Designstrategie**
  - Durch Ausnutzung der hohen Wärmeleitfähigkeit von Wolfram selbst und Kombination mit Legierungselementen mit hoher Wärmeleitfähigkeit wird die Gesamtwärmeleitfähigkeit verbessert.
  - Optimieren Sie die Mikrostruktur und reduzieren Sie den Wärmewiderstand der Schnittstelle.
  - Wenden Sie Kornverfeinerung und Defektkontrollprozesse an, um Streueffekte zu reduzieren.
- **Typische Legierungssysteme**
  - Wolfram-Kupfer-Verbundlegierungen (W-Cu) werden häufig in Anwendungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit eingesetzt.
  - Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch Mikrolegierung und Nanostrukturdesign.
- **Anwendungsszenario**
  - Wärmeableitungskomponenten für elektronische Hochleistungsgeräte;
  - Brennkammern und Wärmetauscher für Flugzeugtriebwerke;
  - Wärmemanagementkomponenten in Lasern und Kernreaktoren.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Leistungsvorteile**
  - Die Wärmeleitfähigkeit ist deutlich besser als bei reinem Wolfram und erreicht über  $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;
  - Es vereint hohe Dichte, hohe Festigkeit und ausgezeichnete thermische Stabilität.

## Design und Anwendung von antimagnetischen Wolframlegierungsstäben

- **Designziele**
  - Machen Sie Wolframlegierungen in einer Umgebung mit starkem Magnetfeld nicht magnetisch oder schwach magnetisch.
  - Verhindern Sie Störungen durch magnetische Felder und gewährleisten Sie den normalen Betrieb des Geräts.
- **Kontrolle der Inhaltsstoffe**
  - Reduzieren Sie den Gehalt an ferromagnetischen Elementen wie Eisen (Fe), Kobalt (Co) und Nickel (Ni).
  - Fügen Sie nichtmagnetische Legierungselemente wie Chrom (Cr) und Mangan (Mn) hinzu.
  - Nutzen Sie die Festlösungsverstärkung und die Steuerung der zweiten Phase, um die magnetische Reaktion zu reduzieren.
- **Anwendungsbereiche**
  - Magnetresonanztomographie-Geräte (MRT);
  - Hochpräzise Magnetfeldmessgeräte;
  - Komponenten von Teilchenbeschleunigern und Kernreaktoren.
- **Leistung**
  - Die magnetische Permeabilität liegt nahe bei 1 (der magnetischen Permeabilität des Vakuums);
  - Behält gute mechanische Eigenschaften und hohe Temperaturbeständigkeit bei;
  - Hervorragende Strahlungs- und Korrosionsbeständigkeit.

## Herstellungstechnologie für funktionelle Wolframlegierungsstäbe

- **Durch präzise Pulvermetallurgie-Technologie**  
werden die Reinheit und Partikelgröße des Pulvers kontrolliert, um eine gleichmäßige Zusammensetzung sicherzustellen und Defekte zu reduzieren.
- **Fortschrittliche Wärmebehandlungstechnologie**  
reguliert die Mikrostruktur und optimiert die Funktionsleistung.
- **die Oberflächenmodifizierungstechnologie**  
werden Oberflächenfunktionen verbessert, beispielsweise durch leitfähige Beschichtung, verschleißfeste Beschichtung usw.
- **Die additive Fertigung**  
ermöglicht komplexe Strukturen und ein funktionales Gradientendesign, um multifunktionale Anforderungen zu erfüllen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.6.5 Zukünftige Entwicklungstrends

- **Das multifunktionale integrierte Design**  
berücksichtigt mehrere Funktionen wie elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und antimagnetische Eigenschaften, um komplexe Anwendungsanforderungen zu erfüllen.
- **Bei der Nanostrukturmanipulation**  
wird Nanotechnologie eingesetzt, um die Leistung weiter zu verbessern und die Stabilität zu erhöhen.
- **Entwicklung intelligenter Materialien: Entwickeln Sie intelligente**  
Wolframlegierungsmaterialien, die auf Umweltveränderungen reagieren und adaptive Leistungsanpassungen erreichen.
- **Grüne und umweltfreundliche Aufbereitungstechnologie**  
fördert energiesparende und schadstoffarme Aufbereitungsprozesse und fördert eine nachhaltige Entwicklung.

### Zusammenfassung

Funktionelle Stäbe aus Wolframlegierungen haben durch eine sinnvolle Zusammensetzung und Prozessoptimierung erfolgreich mehrere spezielle Funktionen wie elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und antimagnetische Eigenschaften erreicht, wodurch der Anwendungsbereich von Wolframlegierungen in Hightech-Bereichen erheblich erweitert wird. Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Materialwissenschaft und Fertigungstechnologie werden funktionelle Stäbe aus Wolframlegierungen in vielen Spitzenbereichen wie der Elektronik, der Luftfahrt und der Medizintechnik eine immer wichtigere Rolle spielen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 7 Compliance-System für Stäbe aus Wolframlegierungen

### 7.1 Chinesische nationale/Industriestandards (GB/T, YS/T)

Als wichtiger Hochleistungswerkstoff müssen Wolframlegierungsstäbe in der industriellen Produktion und Anwendung strenge Qualitäts- und Leistungsstandards erfüllen. Chinas nationales Standardsystem (GB/T) und Industriestandardsystem (YS/T) bilden die regulatorische Grundlage für die Herstellung, Prüfung und Anwendung von Wolframlegierungsstäben und gewährleisten so eine stabile Produktqualität und eine gesunde Entwicklung der Branche.

#### 7.1.1 Überblick über das chinesische Normensystem

- **Nationale Normen (GB/T)**

Nationale Normen werden von der staatlichen Marktregulierungsbehörde und der nationalen Standardisierungsbehörde herausgegeben. Sie decken Materialeigenschaften, Prüfmethode, technische Anforderungen usw. ab und bilden die Grundlage für die Produktion und Qualitätsprüfung von Unternehmen. Beispiele: GB/T 23789-2017 „Wolframlegierungsmaterialien mit hohem spezifischem Gewicht“ und GB/T 20211-2006 „Wolframlegierungsstäbe“.

- **Industriestandards (YS/T)**

werden von den zuständigen Industriebehörden formuliert. Sie präzisieren die Standardanforderungen entsprechend den Branchenmerkmalen und gelten für technische Spezifikationen und Bewertungen innerhalb der Branche. Beispiel: YS/T 531-2014

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

„Allgemeine technische Bedingungen für Wolframlegierungen und Wolfram-Kupfer-Legierungen“.

- **Lokale Standards und Unternehmensstandards**

Einige Regionen und Unternehmen formulieren ergänzende Standards auf der Grundlage tatsächlicher Bedürfnisse, um das Management zu verfeinern und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.

### 7.1.2 Wichtige nationale Normen (GB/T)

Standard Nr.	Standardname	Hauptinhalt und Anwendung
GB/T 23789-2017	Wolframlegierungsmaterial mit hohem spezifischem Gewicht	Klassifizierung von Wolframlegierungen, technische Anforderungen, Leistungsindikatoren usw.
GB/T 20211-2006	Wolframlegierungsstab	Prüfmethoden für die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften von Stäben aus Wolframlegierungen
GB/T 13298-2009	Prüfmethode für mechanische Eigenschaften von Wolframlegierungsmaterial	Standardisierung von Prüfnormen und Prüfmethoden für mechanische Eigenschaften
GB/T 19290-2003	Methode zur Messung der Materialdichte von Wolframlegierungen	Bestimmung und Fehleranalyse der Dichte von Wolframlegierungen

### 7.1.3 Wichtige Industriestandards (YS/T)

Standard Nr.	Standardname	Anwendungsbereich und Eigenschaften
YS/T 531-2014	Allgemeine technische Anforderungen an Wolframlegierungen und Wolfram-Kupfer-Legierungen	Detaillierte Spezifikation der technischen Anforderungen für Wolframlegierungen und Wolframkupferlegierungen
YS/T 155-2012	Produkte aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte	Herstellungsprozess und Leistungskontrolle von Wolframlegierungsprodukten
YS/T 786-2016	Prüfmethode für mechanische Eigenschaften einer Wolframlegierung	Prüfnormen für mechanische Eigenschaften zur Gewährleistung genauer Prüfdaten

### 7.1.4 Kernpunkte der Norm

- **zur Kontrolle der chemischen Zusammensetzung**

definieren den Gehaltsbereich und die Verunreinigungsgrenzen von Elementen wie Wolfram, Nickel, Eisen und Kupfer klar, um eine stabile Materialleistung zu gewährleisten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Die mechanischen Leistungsindikatoren**  
spezifizieren wichtige Leistungsindikatoren wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung, Härte usw., um unterschiedliche Anwendungsanforderungen zu erfüllen.
- **Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität**  
stellen besondere Anforderungen an die Maßtoleranz, Oberflächenrauheit und Fehlergrenze von Stäben aus Wolframlegierungen.
- **den Inspektions- und Testmethoden**  
gehören Dichtemessung, metallografische Analyse, Prüfung mechanischer Eigenschaften und zerstörungsfreie Prüfung nach technischen Standards, um sicherzustellen, dass die Produktqualität kontrollierbar ist.

### 7.1.5 Standardimplementierung und Überwachungsmanagement

- **Verantwortlichkeiten von Fertigungsunternehmen**  
Unternehmen sollten bei der Produktion und Inspektion nationale und industrielle Standards strikt einhalten, um sicherzustellen, dass die Produkte den Spezifikationen entsprechen.
- **Qualitätsüberwachungsabteilungen**  
der Qualitätsüberwachungsbehörden sind für die Überwachung der Umsetzung von Standards und die stichprobenartige Überprüfung der Produktqualität verantwortlich.
- **Zertifizierungs- und Prüfstellen**  
Unabhängige Zertifizierungsstellen führen Qualitätszertifizierungen für Unternehmen und Produkte durch, um die Marktakzeptanz zu erhöhen.

### 7.1.6 Standardaktualisierung und Entwicklungstrend

- **Zur Anpassung an die Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen und**  
mit der Weiterentwicklung der Technologie in der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie und anderen Bereichen werden die Standards ständig verfeinert, um Leistungsindikatoren und Erkennungsgenauigkeit zu verbessern.
- **Durch die Integration von Umwelt- und Sicherheitsstandards**  
werden die Leistungsspezifikationen für Umweltschutz und Sicherheit im Einklang mit den Anforderungen an umweltfreundliche Fertigung und internationale Konformität gestärkt.
- **Durch internationale Integration und Koordination**  
wird die Integration mit ISO und anderen internationalen Standards gefördert und die Internationalisierung der chinesischen Wolframlegierungsstabindustrie vorangetrieben .

### Zusammenfassung

Chinas nationales Standardsystem (GB/T) und Industriestandardsystem (YS/T) für Wolframlegierungsstäbe bieten umfassende technische Unterstützung und Qualitätssicherung für die Herstellung und Anwendung von Wolframlegierungsstäben . Mit dem technologischen Fortschritt und der veränderten Marktnachfrage verbessert sich das Standardsystem kontinuierlich

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und trägt dazu bei, dass die chinesische Wolframlegierungsstabindustrie kontinuierlich hochwertige Entwicklungen vorantreibt und international wettbewerbsfähig bleibt.

## 7.2 Amerikanisches Standardsystem (ASTM, MIL)

Als wichtiges Land in der Welt der fortschrittlichen Fertigungs- und Werkstofftechnologie haben die Vereinigten Staaten einen großen Einfluss auf die Produktion, Prüfung und Anwendung von Wolframlegierungsstäben. ASTM-Standards (American Society for Testing and Materials) und MIL-Standards (US Military Standards) bilden den Kern der US-amerikanischen Werkstoffspezifikationen für Wolframlegierungen und stellen sicher, dass die Produktleistung den strengen Anforderungen im zivilen und militärischen Bereich entspricht.

### 7.2.1 Übersicht über das ASTM-Standardsystem

- Als international renommierte Normungsorganisation **ist ASTM International für die Entwicklung einer Reihe von Normen zu Materialeigenschaften, Prüfmethoden und Qualitätskontrolle verantwortlich, um die Entwicklung der Materialwissenschaften und industrieller Anwendungen zu fördern.**
- **ASTM-Normen im Zusammenhang mit Wolframlegierungen** ASTM-Normen regeln systematisch die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften, die Prüfmethoden und die Qualitätsbewertung von Wolframlegierungen.

### 7.2.2 Wichtige ASTM-Normen und Anwendungen

Standard Nr.	Standardname	Inhalt
ASTM B777	Spezifikationen von Wolfram- und Wolframlegierungspulvern	Anforderungen an die Pulverqualität und Prüfmethoden
ASTM B777-18	Prüfnormen für Dichte und mechanische Eigenschaften von Wolframlegierungen	Dichte-, Zugfestigkeits- und Härteprüfung von Wolframlegierungen
ASTM E8/E8M	Zugprüfnorm für Metallwerkstoffe	Standardisierung des Zugversuchsverfahrens für Wolframlegierungen
ASTM B765	Chemische Analysemethoden von Wolframlegierungsmaterialien	Spektralanalyse und Nachweismethoden der Zusammensetzung von Wolframlegierungen
ASTM E112	Korngrößenbestimmungsstandard	für die Mikrostruktur von Wolframlegierungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 7.2.3 Übersicht über das MIL-System (Military Standard)

- Das MIL-Standardsystem ist**  
 ein vom US-Verteidigungsministerium entwickelter Militärstandard, der extrem hohe Anforderungen an Leistung, Zuverlässigkeit und Sicherheit für Militärprodukte stellt. Da Wolframlegierungen eines der wichtigsten Materialien sind, umfasst der MIL-Standard Materialvorbereitung, Leistungsindikatoren und Qualitätskontrolle.
- Die Merkmale der MIL-Standards**  
 konzentrieren sich auf die Serviceleistung und die Umweltverträglichkeit von Materialien. Die Spezifikationen sind streng und praxisorientiert und finden breite Anwendung in der militärischen Munition sowie in der Luft- und Raumfahrt und der Kernenergie.

### 7.2.4 Typische MIL-Standards und ihre Anwendungen

Standard Nr.	Standardname	Hauptinhalt
MIL-T-21005	Stäbe und Produkte aus Wolframlegierungen	Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften und Maßangaben von Stäben aus Wolframlegierungen
MIL-STD-810	Umwelttechnische Überlegungen und experimentelle Teststandards	Wolframlegierungsmaterialien in rauen Umgebungen
MIL-STD-883	Materialprüfmethoden für mikroelektronische Geräte	Wolframlegierungen in mikroelektronischen Gehäusen

### 7.2.5 Kernpunkte der Norm

- Strenge Kontrolle der chemischen Zusammensetzung und Verunreinigung.**  
 MIL-Standards legen strenge Grenzen für die Legierungszusammensetzung und den Verunreinigungsgehalt fest, um sicherzustellen, dass die Materialeigenschaften konsistent sind und den hohen Standards militärischer Anwendungen entsprechen.
- Umfassende Tests der mechanischen Eigenschaften**  
 umfassen Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung, Härte und Dauerfestigkeit, um die Zuverlässigkeit von Stäben aus Wolframlegierungen unter extremen Bedingungen sicherzustellen.
- Prüfung der Anpassungsfähigkeit an Umweltbedingungen:**  
 Entwickeln Sie detaillierte Testpläne für hohe Temperaturen, niedrige Temperaturen, Feuchtigkeit, Vibration, Stöße und andere Umgebungen.
- Das Qualitätsmanagement- und Rückverfolgbarkeitssystem**  
 legt den Schwerpunkt auf die Kontrolle des Produktionsprozesses und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rückverfolgbarkeit der Produkte, um ein vollständiges Lebenszyklusmanagement der Materialqualität sicherzustellen.

## 7.2.6 Vorteile und Einfluss des US-Standardsystems

- **Hohe internationale Anerkennung:**  
ASTM- und MIL-Standards werden weltweit anerkannt und übernommen, was den internationalen Handel und die technische Zusammenarbeit bei Stäben aus Wolframlegierungen fördert.
- **Fördern Sie technologische Innovationsstandards**  
, fördern Sie die kontinuierliche Verbesserung der Materialeistung und der Prüftechnologie und treiben Sie den industriellen technologischen Fortschritt voran.
- **Gewährleisten Sie die Sicherheit kritischer Anwendungen**  
. Strenge Standards gewährleisten die sichere und stabile Verwendung von Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt, im Militär und in der Nuklearindustrie.

## Zusammenfassung

Die ASTM- und MIL-Standardsysteme in den USA bieten einen optimalen Rahmen für die Qualitätskontrolle und Leistungssicherung von Wolframlegierungsstäben und erfüllen die vielfältigen Anforderungen von zivilen bis hin zu militärischen Anwendungen. Der wissenschaftlich fundierte und strenge Standardinhalt sowie die breite industrielle Anwendbarkeit haben die Entwicklung und Anwendung von Wolframlegierungen weltweit positiv beeinflusst.

## 7.3 Internationale EU- und ISO-Normen

Angesichts des zunehmenden weltweiten Handels mit Wolframlegierungen und des zunehmenden technischen Austauschs sind die von der Europäischen Union (EU) und der Internationalen Organisation für Normung (ISO) formulierten einschlägigen Normen zu einer wichtigen Triebkraft für die Internationalisierung der Wolframlegierungsstangenindustrie und die Vereinheitlichung technischer Spezifikationen geworden. Der Schwerpunkt der EU-Normen liegt auf Umweltschutz, Sicherheit und Konformität, während sich die ISO-Normen auf die internationale Vereinheitlichung von Materialeigenschaften und Prüfmethoden konzentrieren und einen maßgeblichen technischen Rahmen für Wolframlegierungsstangen auf dem Weltmarkt bieten .

### 7.3.1 Überblick über das EU-Normensystem

- **Die EU-Normungsgremien**  
bestehen hauptsächlich aus dem Europäischen Komitee für Normung (CEN), dem Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) und dem Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI). Normen für Stäbe aus Wolframlegierungen werden in der Regel vom CEN formuliert und konzentrieren sich auf Sicherheits-, Umwelt- und Leistungsanforderungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- EU-Compliance-Rahmenwerkstoffe Wolframlegierungen**  
 müssen den EU-Umweltvorschriften wie RoHS (Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe), REACH (Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe) usw. entsprechen, um die Produktsicherheit und die Einhaltung von Umweltvorschriften zu gewährleisten.

### 7.3.2 Wichtige EU-bezogene Normen und Vorschriften

Name der Norm/Vorschrift	Hauptinhalt	Geltungsbereich
EN 12502-Reihe	Spezifikationen und Prüfverfahren für Wolfram und Wolframlegierungen	Leistungs- und Qualitätsprüfung von Wolframlegierungen
RoHS-Richtlinie (2011/65/EU)	Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten	Elektronische Komponenten und verwandte Produkte aus Wolframlegierungen
REACH-Verordnung (EG 1907/2006)	Anforderungen an die Registrierung und das Sicherheitsmanagement von Chemikalien	Umweltverträglichkeit bei der Produktion und Lieferkette von Wolframlegierungen
CE-Kennzeichnung	Prüfzeichen für Produktsicherheit und Konformität	Wolframlegierungsprodukte kommen auf den EU-Markt

### 7.3.3 Überblick über das internationale ISO-Normensystem

- Einführung in die ISO-Organisation**  
 Die Internationale Organisation für Normung (ISO) ist eine maßgebliche Organisation, die weltweit einheitliche Standards entwickelt, die viele Aspekte wie Materialeigenschaften, Testmethoden, Qualitätsmanagement usw. abdecken.
- ISO-Normen im Zusammenhang mit Wolframlegierungen**  
 Der Schwerpunkt der ISO-Normen liegt auf der Regulierung der Leistungsindikatoren, Testmethoden und des Qualitätsmanagements von Wolframlegierungsmaterialien und bietet eine einheitliche Grundlage für den internationalen Handel und die technische Zusammenarbeit.

### 7.3.4 Wichtige ISO-Normen und ihre Anwendungen

Standard Nr.	Standardname	Hauptinhalt
ISO 9001	Anforderungen an das Qualitätsmanagementsystem	Qualitätsmanagementsystem von Unternehmen zur Herstellung von Stäben aus Wolframlegierungen
ISO 16143	Metallpulvermaterial - Pulvermetallurgie Wolframlegierung	Technische Spezifikationen und Prüfmethode für Wolframlegierungspulver
ISO 4967	Methoden zur Bestimmung von Kohlenstoff und Schwefel	Prüfung der chemischen Zusammensetzung von Wolframlegierungsmaterialien

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 6892	Zugprüfverfahren für metallische Werkstoffe	Mechanische Eigenschaften von Wolframlegierungen – Zugversuchsnorm
ISO 6507	Metallhärteprüfung – Vickershärte	Internationale Normen für die Härteprüfung von Wolframlegierungen

### 7.3.5 Kernpunkte der Norm

- Einhaltung von Umwelt- und Sicherheitsvorschriften:**  
 Die Verwendung gefährlicher Substanzen wird durch EU-Normen streng eingeschränkt. Dadurch wird sichergestellt, dass Wolframlegierungsmaterialien die Umweltschutzanforderungen erfüllen und eine umweltfreundliche Herstellung fördern.
- Internationale Vereinheitlichung von Leistungstests:**  
 ISO-Normen vereinheitlichen die physikalischen und mechanischen Leistungstestmethoden von Wolframlegierungen, um die Vergleichbarkeit der Leistungsdaten von Produkten zwischen verschiedenen Ländern sicherzustellen.
- Der Aufbau eines Qualitätsmanagementsystems**  
 ermutigt die Hersteller von Wolframlegierungen, ein solides Qualitätsmanagementsystem einzuführen und die Produktions- und Managementebenen zu verbessern.
- Technischer Austausch und Marktzugang**  
 reduzieren internationale Handelsbarrieren und erleichtern den Eintritt von Wolframlegierungsstabprodukten in den Weltmarkt.

### 7.3.6 Synergien zwischen EU- und ISO-Normen

- EU-Normen werden häufig unter Bezugnahme auf internationale ISO-Normen formuliert, um die globale Einheitlichkeit technischer Normen zu fördern.
- ISO-Normen bieten Unternehmen eine Grundlage für Qualitätsmanagement und technische Spezifikationen und unterstützen die Konformitätszertifizierung gemäß EU- Vorschriften.
- Beide Seiten fördern gemeinsam die technologische Modernisierung und umweltfreundliche Entwicklung der Wolframlegierungsindustrie und fördern die internationale Zusammenarbeit.

### Zusammenfassung

Die EU- und ISO-Normensysteme bilden einen umfassenden internationalen Regulierungsrahmen für die Wolframlegierungsstabindustrie und decken verschiedene Bereiche wie Leistung, Prüfung, Umweltschutz und Qualitätsmanagement ab. Die Einhaltung dieser Normen trägt nicht nur zur Gewährleistung von Produktqualität und -sicherheit bei, sondern fördert auch die internationale Wettbewerbsfähigkeit und Marktexpansion chinesischer Wolframlegierungsunternehmen. Durch die kontinuierliche Verbesserung und Aktualisierung internationaler Normen wird die Wolframlegierungsstabindustrie künftig ein höheres Maß an Standardisierung und internationaler Entwicklung erreichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.4 Umweltschutz- und Materialsicherheitszertifizierung (RoHS, REACH, MSDS)

Da Umweltschutz und Arbeitssicherheit weltweit zunehmend an Bedeutung gewinnen, müssen die Herstellung und Anwendung von Wolframlegierungsstäben strikt den geltenden Umweltgesetzen und -vorschriften sowie den Materialsicherheitsstandards entsprechen. RoHS-, REACH- und MSDS-Zertifizierungen sind für Wolframlegierungsunternehmen zur Voraussetzung für den internationalen Markteintritt, insbesondere in der EU, geworden. Diese Zertifizierungen gewährleisten nicht nur die Umweltverträglichkeit der Materialien, sondern auch die Sicherheit von Anwendern und Umwelt.

### 7.4.1 RoHS-Richtlinie (Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe)

- **Einführung in die Richtlinie**  
Die RoHS-Richtlinie (Restriction of Hazardous Substances) wurde 2003 von der Europäischen Union erlassen, um die Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten einzuschränken und die Umwelt und die menschliche Gesundheit zu schützen.
- **Zu den wichtigsten beschränkten Stoffen**  
zählen Blei (Pb), Quecksilber (Hg), Cadmium (Cd), sechswertiges Chrom (Cr(VI)), polybromierte Biphenyle (PBB) und polybromierte Diphenylether (PBDE).
- **Auswirkungen auf Stäbe aus Wolframlegierungen**  
Wenn Wolframlegierungsmaterialien in elektronischen und elektrischen Produkten verwendet werden, muss sichergestellt werden, dass der Gehalt der oben genannten Schadstoffe den RoHS-Grenzwert einhält, um eine Überschreitung des Grenzwertes und eine Beeinträchtigung des Marktzugangs zu vermeiden.
- **Prüfung und Konformität: Unternehmen**  
sind verpflichtet, strenge Tests der Materialzusammensetzung durchzuführen und RoHS-Konformitätserklärungen und Testberichte bereitzustellen.

### 7.4.2 REACH-Verordnung (Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe)

- **Regulatorischer Hintergrund:**  
REACH ist eine umfassende Chemikalienmanagement-Verordnung der Europäischen Union, die im Jahr 2007 in Kraft trat und Hersteller und Importeure dazu verpflichtet, Chemikalien zu registrieren und ihre Sicherheit zu bewerten.
- **Registrierungspflichten für Wolframlegierungsmaterialien**  
Hersteller von Wolframlegierungen müssen ihre Produkte bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) registrieren und Sicherheitsdaten und Risikobewertungen vorlegen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Materialbewertung und -beschränkung**  
Wenn Wolfram und seine Verbindungen in der Liste der besonders besorgniserregenden Stoffe (SVHC) aufgeführt sind, müssen sie besonders verwaltet und beschränkt werden.
- **Die Verantwortung in der Lieferkette**  
erfordert von den Unternehmen Transparenz hinsichtlich chemischer Informationen in der Lieferkette und die Gewährleistung, dass die nachgelagerten Anwender über die Informationen zur Materialicherheit informiert sind.

#### 7.4.3 Sicherheitsdatenblatt (MSDS)

- **Definition und Funktion:**  
MSDS ist ein Sicherheitsdatenblatt, das die chemischen Eigenschaften, Gesundheitsgefahren, Schutzmaßnahmen und Richtlinien zur Notfallbehandlung von Stäben aus Wolframlegierungen enthält.
- **Der Inhalt muss**  
Informationen zu physikalischen und chemischen Eigenschaften, Gefahrenidentifizierung, Lagerung und Transport, Expositionskontrolle und persönlichem Schutz enthalten.
- **Pflichten des Unternehmens**  
Produktions- und Lieferunternehmen müssen Sicherheitsdatenblätter erstellen und bereitstellen, die den internationalen Standards entsprechen, um eine sichere Verwendung zu gewährleisten.

#### 7.4.4 Die Bedeutung von Umweltschutz- und Sicherheitszertifizierungen

- **Schützen Sie Umwelt und Gesundheit**  
, indem Sie die Emission gefährlicher Stoffe kontrollieren und die Umweltverschmutzung sowie Gesundheitsrisiken am Arbeitsplatz verringern.
- **Fördern Sie den Marktzugang**  
. Durch die RoHS- und REACH-Zertifizierung werden Wolframlegierungsstabprodukte von der EU und den wichtigsten globalen Märkten anerkannt.
- **Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen**  
Die Einhaltung von Umweltvorschriften ist ein wichtiger Ausdruck der sozialen Verantwortung von Unternehmen und des Rufs ihrer Marke.
- **Unterstützen Sie eine nachhaltige Entwicklung,**  
fördern Sie eine umweltfreundliche Fertigung und Kreislaufwirtschaft und fördern Sie die gesunde Entwicklung der Branche.

#### 7.4.5 Reaktionsstrategien von Wolframlegierungsunternehmen

- **Stärken Sie das Materialzusammensetzungsmanagement**  
und kontrollieren Sie den Gehalt an Schadstoffen bei der Rohstoffbeschaffung und den Produktionsprozessen streng.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Verbessern Sie das Test- und Überwachungssystem,**  
richten Sie interne Testkapazitäten ein und arbeiten Sie mit externen Zertifizierungsstellen zusammen, um Konformitätstests durchzuführen .
- **Beantragen Sie aktiv relevante Zertifizierungen,**  
um RoHS-, REACH- und andere Zertifizierungszertifikate zu erhalten und so den Kunden- und Marktanforderungen gerecht zu werden.
- **Verbessern Sie die Informationstransparenz**  
und stellen Sie umfassende Sicherheitsdatenblätter und technischen Support bereit, um eine sichere Verwendung durch die Kunden zu gewährleisten.

### **Zusammenfassung:**

Die Zertifizierung von Umweltschutz und Materialsicherheit ist für die Wolframlegierungsstabindustrie ein wichtiger Schritt auf dem internationalen Markt. Durch die strikte Einhaltung der RoHS- und REACH-Vorschriften und ein verbessertes Sicherheitsdatenblatt-Management gewährleisten Unternehmen nicht nur die Sicherheit und Konformität ihrer Produkte, sondern legen auch eine solide Grundlage für nachhaltige Entwicklung und globalen Wettbewerb. Mit der kontinuierlichen Verbesserung der Umweltschutzgesetze und -vorschriften müssen Wolframlegierungsstabhersteller auch in Zukunft ihr Umweltmanagement weiter verbessern, um den gestiegenen Markt- und gesellschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden.

## **7.5 Anforderungen an Qualitätssysteme in den Bereichen Luftfahrt, Militär und Medizin**

Als wichtiger Hochleistungswerkstoff werden Wolframlegierungsstäbe in anspruchsvollen Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der militärischen Ausrüstung und der medizinischen Ausrüstung eingesetzt, was extrem hohe Anforderungen an das Qualitätssystem stellt. Die entsprechenden Branchen wenden in der Regel strenge Qualitätsmanagementsysteme und Zertifizierungsstandards an, um die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Konsistenz der Materialien zu gewährleisten und die Serviceanforderungen unter extremen Arbeitsbedingungen zu erfüllen.

### **7.5.1 Anforderungen an Qualitätssysteme in der Luft- und Raumfahrt**

- **Industriestandards und Zertifizierungen**
  - AS9100: Standard für Qualitätsmanagementsysteme in der Luft- und Raumfahrt, basierend auf ISO 9001 und mit zusätzlichen luft- und raumfahrtspezifischen Anforderungen;
  - NADCAP: Zertifizierung spezieller Verfahren in der Luft- und Raumfahrt, die wichtige Aspekte wie Wärmebehandlung und zerstörungsfreie Prüfung abdeckt.
- **Wichtige Qualitätskontrollpunkte**
  - Chargenrückverfolgbarkeit und Konsistenz der Materialien;
  - Strenge physikalische und chemische Leistungstests;
  - Hochpräzise Größenkontrolle und Anforderungen an die Oberflächenqualität.
- **Qualitätsmanagementmaßnahmen**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- Implementieren Sie Risikomanagement und Prozesskontrollen;
- Verwenden Sie fortschrittliche Prüftechnologien (wie Röntgen, CT-Scan) für zerstörungsfreie Prüfungen.
- Führen Sie regelmäßig Lieferkettenaudits und Vor-Ort-Prüfungen durch.

### 7.5.2 Anforderungen an Qualitätssysteme in der Militärindustrie

- **Militärische Qualitätsstandards**
  - MIL-Q-9858A: Militärisches Qualitätssicherungssystem;
  - MIL-STD-105E: Militärischer Standard für Stichprobenprüfungen;
  - MIL-STD-1916: Militärischer Prozesskontrollstandard.
- **Leistungs- und Zuverlässigkeitsanforderungen**
  - Erfüllen Sie die Leistungsspezifikationen für Umgebungen mit extremen Temperaturen, Stößen und Vibrationen.
  - Hohe Reinheit und geringer Verunreinigungsgehalt gewährleisten die Lebensdauer des Materials;
  - Strenge Kontrolle der Fehlerquote und Standards für die Fehlerbehebung.
- **Qualitätssicherungsmaßnahmen**
  - Vollständiges Produktrückverfolgungssystem;
  - Verwenden Sie moderne Mess- und Prüfgeräte;
  - Legen Sie Wert auf die Schulung der Mitarbeiter und die Umsetzung von Prozessspezifikationen.

### 7.5.3 Anforderungen an Qualitätssysteme im medizinischen Bereich

- **Qualitätsstandards für Medizinprodukte**
  - ISO 13485: Qualitätsmanagementsystem-Norm für Medizinprodukte;
  - FDA 21 CFR Part 820: Qualitätsvorschriften der US-amerikanischen Food and Drug Administration für medizinische Geräte.
- **Sicherheit und Biokompatibilität**
  - Wolframlegierungsmaterialien müssen die Anforderungen an die Biokompatibilität erfüllen, um Toxizität und allergische Reaktionen zu vermeiden.
  - Strenge Reinigungs- und Sterilisationsstandards;
  - Gewährleisten Sie die Stabilität und Sicherheit von Materialien in medizinischen Umgebungen wie der Strahlentherapie.
- **Qualitätsmanagementmaßnahmen**
  - Ein umfassendes Risikomanagementsystem einrichten (ISO 14971);
  - Dokumentierte Designkontroll- und Änderungsmanagementprozesse;
  - Regelmäßige interne Audits und externe Zertifizierungen.

### 7.5.4 Gemeinsame Punkte zur Implementierung von Qualitätssystemen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Systemzertifizierung und kontinuierliche Verbesserung:**  
Unternehmen müssen die Qualitätsmanagementsystem-Zertifizierung maßgeblicher Organisationen in verwandten Bereichen bestehen und den Qualitätskontrollprozess kontinuierlich verbessern und optimieren.
- **Ein striktes Lieferkettenmanagement**  
sorgt für Qualitätskontrolle und -verfolgung während des gesamten Prozesses, von der Rohstoffbeschaffung bis zur Auslieferung des Endprodukts.
- **Bei der datengesteuerten Qualitätsüberwachung**  
werden Big Data und Informationstechnologie verwendet, um eine Echtzeitüberwachung und Frühwarnung des Produktionsprozesses durchzuführen.
- **Talentförderung und Kulturaufbau**  
konzentrieren sich auf die Förderung des Qualitätsbewusstseins und schaffen eine Qualitätsmanagementkultur unter Beteiligung aller Mitarbeiter.

### Zusammenfassung

Die Luftfahrt, das Militär und die Medizin haben extrem hohe Standards und strenge Managementanforderungen an das Qualitätssystem von Wolframlegierungsstäben gestellt. Unternehmen müssen ein umfassendes, branchenspezifisches Qualitätsmanagementsystem etablieren, um die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Materialien unter extremen Arbeitsbedingungen zu gewährleisten. Dies ist nicht nur die Grundlage für die Erfüllung der Kundenbedürfnisse, sondern auch der Schlüssel zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und zur Förderung einer qualitativ hochwertigen Entwicklung der Branche.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

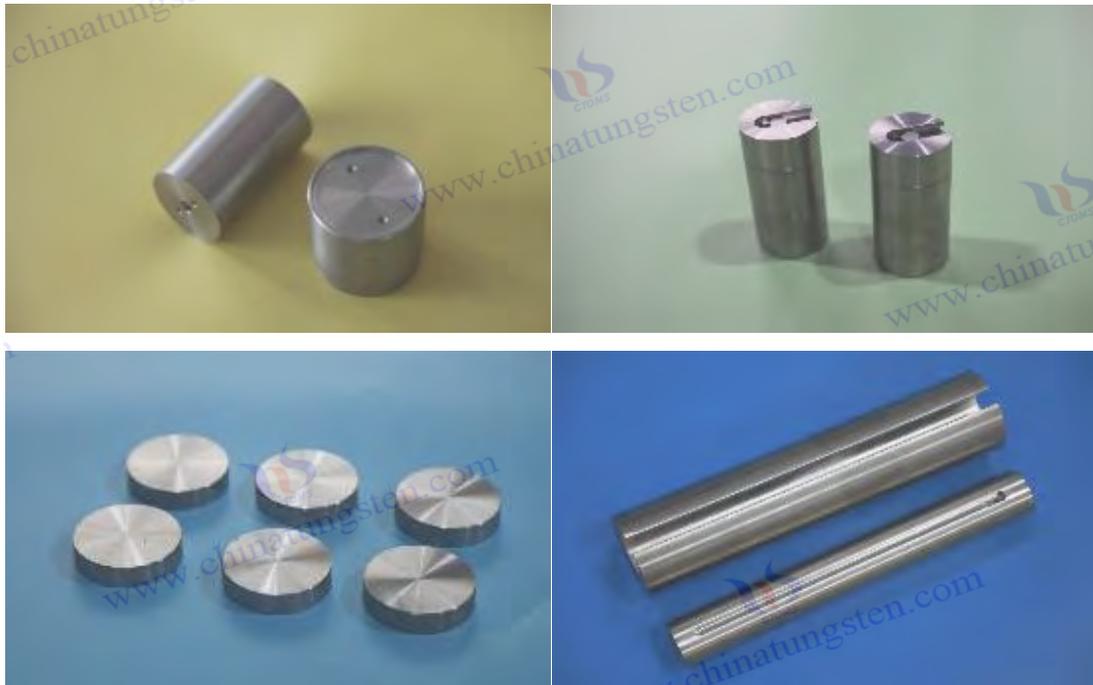
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Kapitel 8 Verpackung, Lagerung und Transport von Wolframlegierungsstäben

### 8.1 Verpackungsmethode und Schutzmaßnahmen (Vakuumverpackung, Trockenmittel)

Wolframlegierungsstäbe weisen eine hohe Dichte, hohe Härte und besondere Anwendungsanforderungen auf, daher sind Verpackungs- und Schutzmaßnahmen besonders wichtig. Ein sinnvolles Verpackungsdesign schützt das Produkt nicht nur vor mechanischen Beschädigungen, Korrosion und Umwelteinflüssen, sondern gewährleistet auch Sicherheit und Integrität während des Transports.

#### 8.1.1 Verpackung

- **Vakuumverpackung**
  - Verwenden Sie Vakuumtechnologie, um die Luft in der Verpackung abzusaugen und so die Oxidation und Korrosion der Wolframlegierungsfläche durch Sauerstoff und Feuchtigkeit zu reduzieren.
  - Geeignet für Langzeitlagerung und Exporttransport, insbesondere in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit oder großen Temperaturunterschieden;
  - Vakuumverpackungsbeutel bestehen im Allgemeinen aus mehrschichtigen Verbundmaterialien mit guter Luftdichtheit und mechanischer Festigkeit.
- **Rostfreie Papier- und Folienverpackungen**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Umwickeln Sie die Oberfläche des Wolframlegierungsstabs mit Rostschutzpapier, um eine physikalische Isolationsschicht zu bilden, die das Eindringen von Wasserdampf und korrosiven Medien verhindert.
- Die äußere Schicht wird dann mit einer Plastikfolie umwickelt, um mechanische Kratzer und Staubverschmutzung zu verhindern.
- Geeignet für kurzfristige Lagerung und Transport unter normalen Umgebungsbedingungen.
- **Verpackungen aus Holzkisten und Holzpaletten**
  - Nach der Erstverpackung werden die Stäbe aus Wolframlegierung in stabile Holzkisten gelegt, um Stöße und Vibrationen während des Transports zu verhindern.
  - Die Holzkiste ist mit Polstermaterialien wie Schaumstoff oder Perlbaumwolle ausgestattet, um das Produkt zusätzlich zu schützen;
  - Holzpaletten lassen sich leicht mit Gabelstaplern transportieren, was die Logistikeffizienz verbessert.
- **Verpackung aus Metallfässern oder Stahlflaschen**
  - Zur Verbesserung der Schutzfestigkeit werden Wolframlegierungsstäbe mit besonderen Spezifikationen oder hohem Wert, Metallfässer oder Stahlzylinder zur Verpackung verwendet;
  - Gleichzeitig lässt es sich leicht versiegeln und schützen, was den Seetransport erleichtert.

### 8.1.2 Schutzmaßnahmen

- **Verwendung von Trockenmittel**
  - Platzieren Sie ein Trockenmittel (z. B. Kieselgel oder Molekularsieb) in der Verpackung, um die Feuchtigkeit im Verpackungsraum wirksam zu absorbieren und eine durch Feuchtigkeit verursachte Oxidation zu verhindern.
  - Die Trockenmittelmenge sollte entsprechend dem Verpackungsvolumen und der Luftfeuchtigkeit der Transportumgebung angemessen bemessen sein.
  - Ersetzen Sie das Trockenmittel regelmäßig, um die Trockenheit der Verpackungsumgebung sicherzustellen.
- **Korrosionsschutzbeschichtung oder Ölfilm**
  - Tragen Sie Rostschutzöl oder eine spezielle Korrosionsschutzbeschichtung auf die Oberfläche des Wolframlegierungsstabs auf, um eine chemische Schutzschicht bereitzustellen.
  - Verhindern Sie, dass Feuchtigkeit und Salznebel die Materialoberfläche angreifen.
- **Stoßfestes Pufferdesign**
  - Entwerfen Sie eine mehrschichtige Pufferstruktur im Inneren der Verpackungsbox, um mechanische Vibrationen und Stöße während des Transports zu reduzieren.
  - Der Stab aus Wolframlegierung ist mit stoßdämpfendem Material umwickelt, um Kratzer und Verformungen auf der Oberfläche zu vermeiden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Garantierte Dichtleistung**
  - Die Verpackung sollte eine gute Versiegelung aufweisen, um das Eindringen von Luft und Staub zu verhindern.
  - Durch Vakuum- oder Stickstofffüllung kann die Versiegelungswirkung zusätzlich verbessert werden.

### 8.1.3 Kernpunkte des Verpackungsdesigns

- **Passen Sie die Verpackungsstruktur an die Größe und das Gewicht des Produkts an.**  
Stäbe aus Wolframlegierungen sind schwer, daher müssen die Verpackungsmaterialien und -strukturen eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen, um Transportschäden zu vermeiden.
- **Die Etiketten sind klar und vollständig.**  
Produktspezifikationen, Gewicht, Vorsichtsmaßnahmen und Transportrichtung sind außen auf der Verpackung angegeben, um die Logistik und Lagerverwaltung zu erleichtern.
- **Bei der Auswahl umweltfreundlicher Materialien**  
wird Wert auf umweltfreundliche und wiederverwertbare Materialien gelegt, die den Vorschriften für eine umweltfreundliche Herstellung und den Umweltschutzbestimmungen entsprechen.

### Zusammenfassung

Wissenschaftliche und sinnvolle Verpackungsmethoden und Schutzmaßnahmen sind der Schlüssel zur Gewährleistung der Qualität und des sicheren Transports von Wolframlegierungsstäben. Durch Vakuumverpackung, Trockenmittel, Korrosionsschutzbeschichtung und Pufferdesign können Oxidation, Korrosion und mechanische Beschädigungen wirksam verhindert werden. Dies bietet einen zuverlässigen Schutz für die Lagerung und den Transport von Wolframlegierungsstäben. Mit der Weiterentwicklung von Logistiktechnologien und Umweltschutzkonzepten werden die Verpackungslösungen für Wolframlegierungsstäbe kontinuierlich optimiert, um die grüne und nachhaltige Entwicklung der Branche zu unterstützen.

## 8.2 Lagerbedingungen und Vorsichtsmaßnahmen (Temperatur- und Feuchtigkeitskontrolle, Korrosionsschutz)

Während der Lagerung werden Wolframlegierungsstäbe stark von Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und chemischen Medien beeinflusst. Unsachgemäße Lagerbedingungen können zu Oberflächenoxidation und Korrosion des Materials und sogar zu einer Verschlechterung der inneren Leistung führen. Daher ist eine wissenschaftliche und sinnvolle Lagerverwaltung unerlässlich, um die Qualität von Wolframlegierungsstäben zu erhalten.

### 8.2.1 Temperatur- und Feuchtigkeitsregelung

- **Temperaturanforderungen**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Lagerumgebung sollte eine konstante und geeignete Temperatur aufweisen, normalerweise werden 15 °C bis 25 °C empfohlen, und drastische Temperaturschwankungen sollten vermieden werden.
- Hohe Temperaturen können die Oxidationsreaktion auf der Materialoberfläche beschleunigen und die Oberflächenbeschaffenheit und die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen.
- Wenn niedrige Temperaturen mit erhöhter Luftfeuchtigkeit einhergehen, kann sich Kondenswasser bilden, das Korrosion verursacht.
- **Feuchtigkeitsanforderungen**
  - Die relative Luftfeuchtigkeit sollte zwischen 40 % und 60 % liegen, um zu verhindern, dass zu viel Feuchtigkeit Rost auf der Metalloberfläche verursacht.
  - Bei zu geringer Luftfeuchtigkeit versagt das Trockenmittel schnell und muss rechtzeitig ausgetauscht werden.
  - Installieren Sie Geräte zur Luftentfeuchtung, beispielsweise einen Luftentfeuchter, um eine trockene Umgebung aufrechtzuerhalten.
- **Umweltüberwachung**
  - Lagerhallen sollten mit Geräten zur Temperatur- und Feuchtigkeitsüberwachung ausgestattet sein, um die Umgebungsparameter in Echtzeit zu überwachen.
  - Ergreifen Sie bei auftretenden Anomalien rechtzeitig Anpassungsmaßnahmen, um eine stabile Umgebung zu gewährleisten.

## 8.2.2 Korrosionsschutzmaßnahmen

- **Rostschutzmittel und Beschichtungsschutz**
  - Beschichten Sie die Oberfläche des Wolframlegierungsstabs mit Rostschutzfett oder einer speziellen Korrosionsschutzbeschichtung, um eine Isolierschicht zu bilden, die den direkten Kontakt zwischen Sauerstoff und Feuchtigkeit verhindert.
  - Überprüfen Sie regelmäßig die Unversehrtheit der Beschichtung und reparieren oder überziehen Sie sie erneut, wenn Schäden festgestellt werden.
- **Isolierverpackung**
  - Um den direkten Luftkontakt zu reduzieren, verwenden Sie zum Einwickeln des Produkts Rostschutzpapier oder Plastikfolie.
  - Geben Sie ein Trockenmittel in die Verpackung, um die Feuchtigkeit zu absorbieren und die Bildung einer feuchten Umgebung im Inneren zu verhindern.
- **Lagerumgebungsmanagement**
  - Vermeiden Sie den direkten Kontakt von Stäben aus Wolframlegierung mit nassem Boden und lagern Sie sie über Kopf.
  - Verhindern Sie, dass chemische ätzende Gase (wie Sulfide und Chloride) in die Lagerumgebung eindringen.
  - Lüften Sie regelmäßig, um die Ansammlung schädlicher Gase in geschlossenen Räumen zu vermeiden.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.2.3 Hinweise zur Speicherverwaltung

- **Stapelmethode**
  - Stäbe aus Wolframlegierungen sind schwer und sollten ordnungsgemäß gestapelt werden, um Verformungen durch hohen Stapeldruck zu vermeiden .
  - Zur einfachen Verwaltung und Entnahme gemäß den Spezifikationen in Stapeln gestapelt.
- **Schutzlogo**
  - Der Lagerbereich sollte deutlich mit Sicherheitshinweisen wie „feuchtigkeitsbeständig, feuerbeständig und druckbeständig“ gekennzeichnet sein.
  - Für kritische Materialien sollten eigene Lagerbereiche eingerichtet werden, um eine Vermischung und Kreuzkontamination zu vermeiden.
- **Regelmäßige Inspektion und Wartung**
  - Richten Sie ein Lagerinspektionssystem ein, um die Verpackungsintegrität, den Rostschutz und die Umweltparameter zu überprüfen.
  - Auf festgestellte ungewöhnliche Situationen sollte umgehend reagiert werden, um eine Ausweitung der Qualitätsprobleme zu verhindern.

### Zusammenfassung

Eine angemessene Temperatur- und Feuchtigkeitskontrolle sowie wissenschaftlich fundierte Korrosionsschutzmaßnahmen bilden die Grundlage für die Lagerqualität von Wolframlegierungsstäben. Durch die Einhaltung geeigneter Umgebungsparameter, kombiniert mit einem effektiven Verpackungsschutz und Lagermanagement, kann die Produktlebensdauer maximiert werden, um sicherzustellen, dass das Material vor der Verwendung seine hervorragenden physikalischen und mechanischen Eigenschaften behält. Unternehmen sollten auf die Lagerung achten, Managementsysteme implementieren und eine sichere und stabile Lagerung von Wolframlegierungsstäben gewährleisten .

## 8.3 Internationale Transportvorschriften und Richtlinien zur Deklaration gefährlicher Güter

Da es sich bei Wolframlegierungsstäben um ein hochdichtes Metallmaterial handelt, unterliegt der internationale Transport den Vorschriften und Zollbestimmungen vieler Länder. Die strikte Einhaltung der geltenden Vorschriften ist notwendig, um Transportsicherheit, Konformität und eine reibungslose Zollabfertigung zu gewährleisten. Insbesondere bei der Deklaration gefährlicher Güter sollten Unternehmen die Produkteigenschaften genau prüfen und vollständige Transportdokumente erstellen.

### 8.3.1 Überblick über die internationalen Transportvorschriften

- **Internationaler Code für die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen (IMDG-Code)**

Der von der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (IMO) festgelegte Internationale

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Code für die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen regelt die Klassifizierung, Verpackung, Kennzeichnung und Deklaration gefährlicher Güter während des Seetransports.

- **Die Gefahrgutvorschriften der International Air Transport Association (IATA)**  
regeln die Anforderungen für den Transport gefährlicher Güter auf dem Luftweg und umfassen Verfahren zur Verpackung, Deklaration, Kennzeichnung und Handhabung.
- **Die Empfehlungen der Vereinten Nationen für den Transport gefährlicher Güter (UN-Empfehlungen)**  
vereinheitlichen die weltweiten Standards für die Klassifizierung und Kennzeichnung gefährlicher Güter und bilden die Grundlage für die Vorschriften zum Transport gefährlicher Güter in verschiedenen Ländern.
- **Zoll- und Transportbehörden verschiedener Länder**  
haben spezifische Anforderungen für den Transport von Stäben aus Wolframlegierungen in verschiedene Länder, und die entsprechenden Gesetze der Import- und Exportländer müssen befolgt werden.

### 8.3.2 Transportklassifizierung und Gefahrgutdeklaration von Stäben aus Wolframlegierungen

- **ein Stab aus Wolframlegierung ein gefährlicher Gegenstand?**
  - Generell handelt es sich bei Stäben aus reiner Wolframlegierung nicht um Gefahrgut und sie weisen keine besonders gefährlichen chemischen Eigenschaften auf.
  - Wenn die Oberfläche des Stabs aus Wolframlegierung jedoch mit brennbarem Fett beschichtet ist oder andere gefährliche Chemikalien enthält, muss dies gemäß der entsprechenden Kategorie deklariert werden.
- **Bewerbungsprozess**
  - Erstellen Sie Produktdatenblätter und Sicherheitsdatenblätter (MSDS);
  - Füllen Sie das Formular zur Gefahrgutdeklaration entsprechend der Transportart aus und geben Sie die Verpackungskategorie und das Etikett an.
  - Sorgen Sie für Verpackungen und Kennzeichnungen, die den Standards entsprechen.
  - Informieren Sie den Spediteur und die zuständigen Aufsichtsbehörden und holen Sie die Genehmigung ein.

### 8.3.3 Verpackungs- und Kennzeichnungsanforderungen

- **Verpackungen, die den Transportstandards entsprechen**
  - Die Verpackungsmaterialien müssen den Festigkeits- und Dichtigkeitsanforderungen von IMDG und IATA entsprechen.
  - Stellen Sie sicher, dass die Verpackung Vibrationen, Druckbelastungen und Klimaveränderungen während des Transports standhält.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Gefahrgutschilder und -etiketten**
  - Ungefährliche Güter benötigen keine besondere Kennzeichnung, sollten aber mit Angaben zu Gewicht, Größe und Zerbrechlichkeit versehen sein.
  - Sind gefährliche Stoffe enthalten, müssen die entsprechenden Gefahrgutkennzeichen und Transportkennzeichen angebracht sein.
- **Gefahrgutverpackungscode**
  - Auf der Verpackungsschachtel sollten die UN-Nummer, der Verpackungstyp und das Leistungsprüfzeichen angegeben sein.

### 8.3.4 Vorsichtsmaßnahmen für den internationalen Transport

- **Genauere Klassifizierung**
  - Überprüfen Sie die Eigenschaften des Produkts und der zugehörigen Materialien sorgfältig, um falsche Angaben zu vermeiden, die zu Lieferverzögerungen oder Bußgeldern führen können.
- **Datei abgeschlossen**
  - Bereiten Sie vollständige Versanddokumente vor, einschließlich Handelsrechnung, Packliste, Gefahrguterklärung, Sicherheitsdatenblatt und relevante Lizenzen.
- **Wählen Sie einen konformen Spediteur**
  - Wählen Sie einen erfahrenen Logistik- und Zollagenten, um sicherzustellen, dass der Transportplan den gesetzlichen Anforderungen entspricht.
- **Versandversicherung**
  - Schließen Sie eine entsprechende Frachttransportversicherung ab, um Transportrisiken vorzubeugen.
- **Notfallplan**
  - Entwickeln Sie Notfallpläne für Transportunfälle und stellen Sie sich mit den notwendigen Notfallvorräten aus.

### Zusammenfassung

Transport von Wolframlegierungsstäben unterliegt komplexen Vorschriften und Verfahren. Genaue Kenntnisse der Transportklassifizierung und Deklarationsanforderungen sowie die Verwendung standardisierter Verpackungen und Kennzeichnungen sind entscheidend für Transportsicherheit und reibungslose Zollabfertigung. Unternehmen sollten ein umfassendes Transport-Compliance-System einrichten, das Management verbessern, Transportrisiken reduzieren und einen reibungslosen weltweiten Verkehr von Wolframlegierungsstäben gewährleisten.

### 8.4 Zollaufsicht und Lizenzanforderungen für den Export von Stäben aus Wolframlegierungen

Da es sich um ein strategisches Metallmaterial handelt, unterliegt der Export von Wolframlegierungsstäben vielen Regierungen strengen Auflagen. Exportierende Unternehmen müssen die geltenden nationalen Gesetze und Vorschriften einhalten, die erforderlichen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exportlizenzen beantragen, Zollerklärungspflichten erfüllen und sicherstellen, dass die Produkte reibungslos exportiert werden und den Anforderungen des Importlandes entsprechen.

#### 8.4.1 Überblick über die zollamtliche Überwachungs politik

- **Strategisches Ressourcenmanagement:**

Da Wolfram ein seltenes Metall ist, wird es im Land üblicherweise als strategische Ressource aufgeführt, die ein Schlüsselmanagement erfordert, und es werden Quotenverwaltung und ein Lizenzsystem für den Export eingeführt.

- **Anforderungen an die Zollanmeldung:**

Der Export von Stäben aus Wolframlegierungen muss gemäß den Zollbestimmungen angemeldet werden und muss die genaue Warennummer (HS-Code), das Spezifikationsmodell, die Menge und den Wert sowie weitere Informationen enthalten.

- **Exportbeschränkungen und -kontrollen**

In einigen Ländern und Regionen gelten besondere Beschränkungen für den Export von Wolframlegierungen, wie z. B. technische Sensibilitätskontrollen, Antidumpinguntersuchungen usw. Unternehmen müssen sich im Voraus über die entsprechenden Richtlinien informieren.

#### 8.4.2 Antragsverfahren für Exportlizenzen

- **Die Lizenz**

wird im Allgemeinen vom nationalen Handelsministerium oder der Abteilung für Metallmaterialverwaltung ausgestellt.

- **Bewerbungsunterlagen**

- Gewerbeschein und Qualifikationsnachweis des Unternehmens;
- Produkttestberichte und Qualitätszertifizierungsdokumente;
- Vertrags- und Auftragsnachweis;
- Zollerklärung und zugehörige Versanddokumente.

- **Genehmigungsprozess**

1. Antragsunterlagen bei der zuständigen Behörde einreichen;
2. Die zuständigen Abteilungen überprüfen die Produktqualität und -konformität.
3. Nach der Genehmigung wird die Ausfuhr genehmigt;
4. Mit der Lizenz müssen Unternehmen die Zollformalitäten für den Export erledigen.

- **Gültigkeitsdauer und Erneuerung**

Exportlizenzen haben im Allgemeinen eine begrenzte Gültigkeitsdauer und Unternehmen müssen sie rechtzeitig erneuern, um weitere Exporte sicherzustellen.

#### 8.4.3 Wichtige Punkte der Zollanmeldung und -überwachung

- **Genauere HS-Kodierung:**

Stäbe aus Wolframlegierungen sollten die international anerkannte Kodierung des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Harmonisierten Systems (HS) verwenden, um eine genaue Zollklassifizierung und Besteuerung zu gewährleisten.

- **den Zollabfertigungsdokumenten**  
zählen unter anderem Rechnungen, Packlisten, Ausfuhrgenehmigungen, Verträge, Versandpapiere, Ursprungszeugnisse etc., um die Vollständigkeit aller Unterlagen sicherzustellen.
- **Zollinspektion und Stichprobenprüfung:**  
Stäbe aus Wolframlegierungen können beim Export einer Prüfung unterzogen werden. Die Unternehmen müssen bei der Bereitstellung von Proben und Prüfberichten kooperieren.
- **Steuerpolitik:**  
Machen Sie sich mit der Politik der Exportsteuerrückerstattung und den damit verbundenen Vorteilen vertraut und planen Sie den Exportprozess vernünftig.

#### 8.4.4 Vorsichtsmaßnahmen und Risikoprävention und -kontrolle

- **Compliance-Risiken vermeiden illegale Aktivitäten wie falsche Angaben und illegale Exporte**, um Strafen und Reputationsverluste zu vermeiden.
- **Richtlinienänderungen**  
Achten Sie auf nationale und internationale Handelsrichtlinien und Exportkontrolltrends und passen Sie Ihre Exportstrategien rechtzeitig an.
- **Die Einhaltung der Vorschriften für den grenzüberschreitenden Handel erfordert** die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen des Einfuhrlandes und die Durchführung der erforderlichen Zertifizierungs- und Inspektionsverfahren.
- **Durch die Koordination der Lieferkette**  
wird die Kommunikation mit Logistik-, Zollerklärungs- und Inspektionsbehörden gestärkt, um einen reibungslosen Exportprozess zu gewährleisten.

#### Zusammenfassung:

Der Export von Wolframlegierungsstäben erfordert eine komplexe Zollaufsicht und ein umfassendes Genehmigungsverfahren. Unternehmen müssen die geltenden Gesetze, Vorschriften und Verfahren vollständig verstehen und strikt einhalten. Ein wissenschaftlich fundiertes Exportmanagement gewährleistet nicht nur die Einhaltung der Vorschriften, sondern trägt auch zur Verbesserung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und der Marktexpansionsfähigkeit von Unternehmen bei. Es wird empfohlen, ein spezielles Team für Handels-Compliance einzurichten, das Risikomanagement zu stärken und die positive Entwicklung des Exportgeschäfts zu fördern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 9 Marktstruktur und Entwicklungstrend von Wolframlegierungsstäben

### 9.1 Überblick über die globale Wolfram-Ressourcen und Legierungsstäbe Industriekette

Wolfram ist ein seltenes und wichtiges strategisches Metall und wird aufgrund seines hohen Schmelzpunkts, seiner hohen Dichte und seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften häufig in anspruchsvollen Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der Rüstungsindustrie, der Elektronik und der Medizin eingesetzt. Als wichtiges Produkt der Tiefenverarbeitung von Wolframressourcen wächst die Marktnachfrage nach Wolframlegierungsstäben stetig. Das industrielle Kettensystem ist komplex und weist deutliche globale Merkmale auf.

#### 9.1.1 Globale Wolfram-Ressourcenverteilung

- **Die Hauptproduktionsgebiete konzentrieren sich auf**  
die weltweiten Wolframvorkommen, die vor allem in China, Russland, Kanada, Vietnam, Portugal, Österreich und anderen Ländern verteilt sind.
  - China ist der weltweit größte Wolframhersteller und deckt mehr als 80 % der weltweiten Produktion ab. Das Land verfügt über reiche Wolframreserven und eine ausgereifte Bergbautechnologie.
  - Auch Russland und Kanada verfügen über große Wolframvorkommen und haben einen gewissen Einfluss auf dem internationalen Markt;
  - Vietnam und Portugal sind Produktionsgebiete mit relativ konzentrierten Wolframressourcen und größerem Potenzial.
- **Ressourcentypen**  
Wolfram kommt hauptsächlich in Form von Chalkanthit ( $\text{CaWO}_4$ ), Wolframit ( $\text{FeWO}_4$ )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4) und Scheelit ( $WO_3$ ) . Die Erzqualität und der Schwierigkeitsgrad des Abbaus beeinflussen die Effizienz der Ressourcenentwicklung.

- **Ressourcen- und Umweltherausforderungen**

: Der Wolframbergbau ist mit Umweltbelastungen und der Gefahr der Ressourcenerschöpfung konfrontiert, was die Branche dazu veranlasst, sich in Richtung effizienter Ressourcennutzung und Kreislaufwirtschaft zu entwickeln.

### 9.1.2 Aktueller Stand der Wolfram-Ressourcengewinnung und -verarbeitung

- **Die Bergbautechnologie**

kombiniert Tagebau und Untertagebau und wird flexibel an die unterschiedlichen Bedingungen der Erzlagerstätten angepasst. Moderne Maschinen und Automatisierungstechnik werden schrittweise eingeführt, um die Effizienz und Sicherheit im Bergbau zu verbessern.

- **Primärschmelze und Konzentratherstellung**

Wolframerz wird aufbereitet, geröstet und chemisch ausgelaugt, um hochreines Wolframkonzentrat zu erhalten. Die Qualität des Konzentrats wirkt sich direkt auf die Leistung des nachfolgenden Wolframlegierungspulvers und der Wolframprodukte aus.

- **Fortschritte in der Schmelztechnologie**

Kontinuierliche Innovationen in der Wolframschmelztechnologie, darunter thermische Kohlenstoffreduktion, Wasserstoffreduktion und chemische Gasphasenabscheidung, haben die Produktion von hochreinem Wolfram ermöglicht.

### 9.1.3 Wolframlegierungsstab-Industriekettenstruktur

Die Industriekette für Stäbe aus Wolframlegierungen umfasst hauptsächlich die folgenden Glieder:

1. Wolframerz, Wolframkonzentrat und Wolframpulver sind die Grundrohstoffe für die Herstellung von Stäbe aus Wolframlegierung.

Die Qualität und stabile Versorgung mit Rohstoffen hängen mit der Produktkonsistenz und Kostenkontrolle zusammen.

2. **Pulvermetallurgie und Legierungsherstellung:**

Im pulvermetallurgischen Verfahren wird Wolframpulver gleichmäßig mit Legierungselementen (wie Nickel, Eisen und Kupfer) vermischt, gepresst und gesintert. Dieser Schritt bestimmt die Organisationsstruktur und die Leistungsindikatoren von Wolframlegierungsstäben.

3. **Die Formgebungsverarbeitung**

umfasst die Bearbeitung, Wärmebehandlung und Oberflächenbehandlung, um sicherzustellen, dass das Produkt die Konstruktionsgrößen- und Leistungsanforderungen erfüllt.

4. **Leistungstests und Qualitätskontrolle**

Strenge physikalische, chemische und mechanische Leistungstests gewährleisten die Produktqualität.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5. Vertrieb und Anwendung:

Stäbe aus Wolframlegierungen werden häufig in der Luft- und Raumfahrt, beim Militär, in der Medizin, in der Elektronik und in anderen Bereichen eingesetzt und die Marktnachfrage steigt ständig.

### 9.1.4 Merkmale der Globalisierung der Industriekette

- **Transnationale Zusammenarbeit in der Lieferkette**

Die Verteilung der Wolframerzressourcen und der nachgelagerten Verarbeitungskapazitäten überschneidet sich nicht vollständig, was zur Bildung eines transnationalen Kooperationsmusters in der Industriekette für Wolframlegierungsstäbe geführt hat. China verfügt über die Vorteile mineralischer Ressourcen und großer Schmelzkapazitäten, während Europa, die Vereinigten Staaten, Japan, Südkorea und andere Länder sich auf High-End-Verarbeitung und Präzisionsfertigung konzentrieren.

- **Doppelantrieb für Technologie und Markt:**

Der technologische Fortschritt fördert die Leistungsverbesserung von Stäben aus Wolframlegierungen, während die Diversifizierung der Marktnachfrage die Anpassung der Industriekette fördert.

- **Handelsströme:**

Rohstoffreiche Länder exportieren Wolframrohstoffe hauptsächlich, während verarbeitete Produkte auf dem internationalen Markt gehandelt werden. Da es sich um ein Produkt mit hoher Wertschöpfung handelt, nimmt die Handelsaktivität von Stäben aus Wolframlegierungen allmählich zu.

### Zusammenfassung

Obwohl die globalen Wolframressourcen relativ konzentriert sind, ist die Industriekette für Wolframlegierungsstäbe stark internationalisiert und komplex. Das Verständnis der Ressourcenverteilung und der Struktur der Industriekette bildet die Grundlage für das Verständnis des Marktmodells und der Entwicklungstrends von Wolframlegierungsstäben. Zukünftig wird sich die Industriekette für Wolframlegierungsstäbe durch den technologischen Fortschritt und die Förderung umweltfreundlicher Fertigungskonzepte weiter perfektionieren und die qualitativ hochwertige Entwicklung der Branche fördern.

## 9.2 Wolframlegierungsstab Marktgrößen- und Wachstumstrendanalyse

Als Hochleistungsfunktionsmaterial werden Stäbe aus Wolframlegierungen häufig in der Luft- und Raumfahrt, in militärischen Geräten, medizinischen Geräten, High-End-Elektronik, der Kernenergietechnik usw. eingesetzt. Mit der Transformation und Modernisierung der globalen Fertigungsindustrie und dem Aufstieg neuer Industrien hat sich der Markt für Stäbe aus Wolframlegierungen stetig erweitert und weist bedeutende Merkmale wie Nachfragewachstum, regionale Ballungsräume und diversifizierte Anwendungen auf.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 9.2.1 Aktuelle globale Marktgröße

- Nach Angaben der **International Tungsten Industry Association (ITIA)** und Marktforschungsinstituten (wie MarketsandMarkets und Grand View Research) beträgt der Gesamtmarktwert von Wolframlegierungen weltweit im Jahr 2024 etwa **1,3 bis 1,5 Milliarden US- Dollar**. Davon entfallen etwa 30 % bzw. **400 bis 500 Millionen US- Dollar** auf Stäbe aus Wolframlegierungen. Es wird erwartet, dass dieser Wert bis 2030 die Marke von **800 Millionen US- Dollar** überschreiten wird.
- **Regionale Verteilung von Produktion und Verbrauch**
  - **China** : Der weltweit größte Produzent und Verbraucher von Stäben aus Wolframlegierungen mit einer vollständigen industriellen Kette und umfangreichen Fertigungskapazitäten, der mehr als 50 % des Marktes ausmacht;
  - **Nordamerika und Europa** : Hauptsächlicher Fokus auf High-End-Anwendungen, mit Schwerpunkt auf Qualität und Leistung, mit einem hohen Importanteil;
  - **Andere Regionen im asiatisch-pazifischen Raum** (wie Südkorea, Japan und Indien): aufstrebende Wachstumsmärkte mit starker Technologieorientierung und schnell wachsender Verbrauchernachfrage;
  - **Naher Osten und Afrika** : Derzeit in begrenztem Umfang, aber mit Wachstumspotenzial durch Investitionen in Kernenergie und medizinische Geräte.

### 9.2.2 Marktwachstumstreiber

1. **Rasante Entwicklung der High-End-Fertigungsindustrie**
  - Mit der rasanten Entwicklung von Branchen wie der Luft- und Raumfahrt, Raketensystemen und hochpräzisen Instrumenten wächst die Nachfrage nach hochdichten, hochfesten Wolframlegierungsstäben weiter.
  - Die Entwicklung intelligenter Fertigungsverfahren, fortschrittlicher Waffensysteme und neuer Energietechnologien hat die Marktnachfrage nach Wolframlegierungen weiter angekurbelt.
2. **Erweiterung der Anwendungen im medizinischen und nuklearen Bereich**
  - Stäbe aus Wolframlegierungen werden häufig in Strahlentherapiegeräten, Strahlenschutzvorrichtungen, Gammamessern usw. verwendet und profitieren von der alternden Weltbevölkerung und den gestiegenen Investitionen in die Medizin.
  - Die Kernenergieerzeugung und die Fusionsforschung haben die Anwendung von Stäben aus Wolframlegierungen in den Bereichen Neutronenabsorption und Hochtemperaturkomponenten vorangetrieben.
3. **Förderung von Lieferketten- und Sicherheitsstrategien**
  - Die Länder stärken ihre Kontrolle über strategische Metalle, erhöhen den Anteil der lokalen Fertigung und fördern die Ausweitung der Produktionskapazitäten für Wolframlegierungsstäbe auf verschiedene Regionen.
  - Obwohl die weltweite Suche nach alternativen Materialien fortgesetzt wird, gibt es kurzfristig noch keinen gleichwertigen Ersatz für Wolframlegierungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Technologischer Fortschritt steigert den Produktmehrwert

- o Durch die Entwicklung von Technologien wie Nanoverbesserung, Hochreinheitskontrolle und intelligenter Fertigung wurde die Leistung von Stäben aus Wolframlegierungen kontinuierlich verbessert und der Anwendungsbereich erweitert.

#### 9.2.3 Prognose des Branchenwachstumstrends (2025–2030)

Jahre	Bewertung des globalen Marktes für Wolframlegierungsstäbe (Milliarden USD)	Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR)
2025	5.2	—
2026	5.6	7,7 %
2027	6.1	8,0 %
2028	6.7	9,0 %
2029	7.4	10,0 %
2030	8.1	10,3 %

Hinweis: Die Prognose basiert auf der Annahme, dass die Investitionen in die High-End-Fertigung und die medizinische Kernenergie weiterhin steigen. Sollten Rohstoffpreise schwanken oder Durchbrüche in der alternativen Materialtechnologie erzielt werden, kann die Wachstumskurve angepasst werden.

#### 9.2.4 Marktentwicklungsmerkmale

- **Für die Aufrüstung vom Low-End- zum High-End-Segment**  
hat sich die Entwicklung von Stäben aus Wolframlegierungen für die herkömmliche Bearbeitung zu High-End-Produkten mit hoher Dichte, hoher Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und hervorragender Leistung bei hohen Temperaturen verschoben.
- **regionalen Konkurrenz** immer noch eine beherrschende Stellung einnimmt, **bauen Europa, die USA und Japan ihre lokalen** Kapazitäten zur Verarbeitung von Wolframressourcen aus, um den Herausforderungen hinsichtlich der Lieferkettensicherheit zu begegnen.
- **Es zeichnen sich grüne und nachhaltige Trends ab.**  
Das Recycling von Wolframressourcen ist zu einem neuen Wachstumspunkt geworden, und die Technologie und Politik für recycelte Wolframlegierungsstäbe entwickeln sich rasant.

#### 9.2.5 Herausforderungen

- **Die Rohstoffpreise schwanken.**  
Der Preis für Wolframkonzentrat wird stark von Ressourcenbeschränkungen,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umweltschutzrichtlinien und spekulativen Faktoren beeinflusst, und die Kostenkontrolle ist für Unternehmen zu einem schwierigen Punkt geworden.

- **Internationale Handelshemmnisse**  
, Exportbeschränkungen, technische Blockaden, Antidumpinguntersuchungen und andere Handelsprobleme können den grenzüberschreitenden Verkehr von Stäben aus Wolframlegierungen beeinträchtigen.
- **Technische Barrieren im High-End-Markt:**  
In einigen High-Tech-Bereichen wie der Luftfahrt und der Kernenergie gibt es bei inländischen Stäben aus Wolframlegierungen immer noch Prozesslücken und Zertifizierungsbarrieren.

### Zusammenfassung

Der Markt für Wolframlegierungsstäbe befindet sich in einer rasanten Wachstumsphase und profitiert von der Entwicklung der globalen High-End-Fertigung sowie der Medizin- und Energiebranche. Gleichzeitig steht er jedoch vor Herausforderungen wie Rohstoffabhängigkeit, technologischem Fortschritt und Handelsrisiken. In den nächsten Jahren wird der Markt für Wolframlegierungsstäbe mit der Verbesserung der Fertigungskapazitäten und der Ausweitung der Anwendungsfelder weiter wachsen. Um strategische Chancen zu nutzen, sollten sich Industrieunternehmen auf die drei Hauptrichtungen High-End-Produkte, globales Layout und grüne Transformation konzentrieren.

### 9.3 Mainstream-Hersteller und Wettbewerb (China, Europa, Amerika, Japan und Südkorea)

Die Wolframlegierungsstabindustrie zeichnet sich durch ihre Technologieintensität und Ressourcenabhängigkeit aus. Der Weltmarkt wird hauptsächlich von Ländern mit reichen Wolframvorkommen oder führenden Verarbeitungstechnologien dominiert, wie China, Europa, den USA, Japan und Südkorea. Unternehmen in verschiedenen Regionen weisen deutliche Unterschiede in der Ressourcenkontrolle, den Technologiepfaden, der Produktpositionierung und den Marktstrategien auf, die zusammen das aktuelle multipolare Wettbewerbsmuster der Wolframlegierungsstabindustrie ausmachen.

#### 9.3.1 Chinesische Unternehmen: Schwerpunkt auf Ressourcenvorteilen und Massenproduktion

Als weltweit größtes Wolfram-Ressourcenland und Wolfram-Verarbeitungszentrum verfügt China über eine breite Unternehmensbasis und eine komplette Industriekette im Bereich der Wolframlegierungsstäbe. Die Merkmale chinesischer Unternehmen sind große Produktionskapazitäten, große Vielfalt und strenge Kostenkontrolle.

- **Repräsentative Unternehmen**
  - **CTIA GROUP LTD**, starke Kontrolle über Ressourcen und starke Unterstützungskapazitäten der Industriekette.
- **Wettbewerbsvorteil**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Hoher Selbstversorgungsgrad mit Rohstoffen, um eine stabile Versorgung zu gewährleisten;
- Starke Kostenkontrolle und wettbewerbsfähige Produktpreise;
- Schnelle Reaktion auf individuelle Kundenwünsche und kurze Lieferzyklen.
- **Entwicklungsengpass**
  - Zwischen China und Europa, den USA und Japan besteht hinsichtlich hochpräziser Verarbeitung und extremer Leistungskontrolle immer noch eine Lücke.
  - Der Einfluss auf den internationalen Markt ist relativ gering und der Aufbau eines High-End-Zertifizierungssystems ist noch im Gange.

### 9.3.2 Europäische und amerikanische Unternehmen: Technologische Barrieren und High-End-Anwendungen dominieren

Europäische und amerikanische Unternehmen beschäftigen sich seit langem intensiv mit Hochleistungslegierungen. Dank ihrer technologischen Vorteile in der Pulvermetallurgie, bei Hochtemperaturlegierungen und Kernenergiematerialien usw. haben sie eine führende Position im High-End-Anwendungsbereich von Wolframlegierungsstäben eingenommen.

- **Repräsentative Unternehmen**
  - **Plansee Group (Österreich)** : Ein weltweit führender Hersteller von Wolfram- und Molybdänlegierungen, dessen Produkte in der Luftfahrt, in Halbleitern und in medizinischen Geräten breite Anwendung finden;
  - **HC Starck Tungsten (Deutschland/USA)** : Konzentriert sich auf hochreines Wolfram und Hochleistungswolframlegierungen und beherrscht fortschrittliche Technologien der Pulvermetallurgie und Atmosphärenkontrolle;
  - **Global Tungsten & Powders Corp (GTP, USA)** : Das Unternehmen verfügt über ausgereifte Technologie zur Herstellung von hochreinem Wolframpulver und Legierungsstäben und hat ein globales Vertriebsnetz.
- **Wettbewerbsvorteil**
  - Wir verfügen über umfassende technische Kenntnisse und besitzen eine Reihe unabhängiger Patente und Kerntechnologien.
  - Hat High-End-Zertifizierungssysteme wie AS9100 und NADCAP bestanden und ist in die Lieferketten der Luftfahrt und des Militärs eingetreten.
  - Die Markenwirkung ist stark und das Unternehmen bietet High-End-Kunden in Europa und den USA stabile Dienste.
- **Herausforderungen und Trends**
  - Hohe Kosten, lange Lieferzeiten und schwache Wettbewerbsfähigkeit im mittleren und unteren Marktsegment;
  - Angesichts des Drucks durch Umweltschutzbestimmungen und steigender Energiekosten werden einige Produktionskapazitäten nach Osteuropa oder Südostasien verlagert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 9.3.3 Japanische und koreanische Unternehmen: getrieben von Präzisionsbearbeitung und elektronischen Anwendungen

Japanische und koreanische Unternehmen verfügen über einzigartige Vorteile bei der ultrapräzisen Verarbeitung und Hochreinheitskontrolle von Wolframlegierungsstäben und ihre Produkte finden breite Anwendung in der Mikroelektronik, der medizinischen Behandlung und bei Präzisionsinstrumenten.

- **Repräsentative Unternehmen**
  - **Mitsui Mining & Smelting** : Entwicklung einer Vielzahl feinkörniger, verstärkter Wolframlegierungen für die Elektronikverpackungs- und Medizinindustrie;
  - **Tosoh aus Japan** : verfügt über umfassende Technologie zur Feinverarbeitung von Wolframpulver und zur Entwicklung hochdichter Legierungen.
  - **HEMC Co., Ltd. aus Südkorea** : Konzentriert sich auf die kundenspezifische Produktion von hochpräzisen Stäben und Sonderformteilen aus Wolframlegierungen und verfügt über eine starke F&E-Abteilung sowie schnelle Reaktionsmöglichkeiten.
- **Technische Highlights**
  - Hervorragende Fähigkeiten bei der Herstellung hochreiner Materialien;
  - Führend in der Mikrostrukturkontrolle und Nanoverbesserung;
  - Chargen- und stabile Verarbeitung komplexer kleiner Teile aus Wolframlegierungen.
- **Marktpositionierung**
  - Zielen auf Märkte der mittleren bis oberen Preisklasse wie Elektronik, Anzeigeräte und Laserkomponenten;
  - Der Produktstückpreis ist hoch, die Servicefähigkeit stark und es überzeugt durch Qualität und Technologie.

### 9.3.4 Zusammenfassung der globalen Wettbewerbslandschaft und Trends

Bereich	Unternehmensmerkmale	Technisches Niveau	Marktpositionierung	Vorteile	Nachteile
China	Ressourcenorientierte + großtechnische Fertigung	Mittelklasse und High-End koexistieren	Fokus auf die Mittelklasse, Durchbruch ins High-End	Niedrige Kosten und stabile Versorgung	Unzureichendes High-End-Zertifizierungssystem
Europa und Amerika	Technologieorientiert + markenführend	Spitzenführung	Luftfahrt, Militär, Medizin	Starke Technik und perfekte Standards	Hohe Kosten und hoher Preis

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Japanisch und Koreanisch</b>	Präzision + Anpassung	Hohe Reinheit und feine	Elektronik und medizinische Anwendungen	Hohe Verarbeitungsgenauigkeit	Geringe Produktionskapazität
---------------------------------	-----------------------	-------------------------	---	-------------------------------	------------------------------

### Zusammenfassung

Der globale Markt für Wolframlegierungsstäbe präsentiert sich in einem wettbewerbsintensiven Umfeld: China dominiert mit seiner Produktionskapazität, Europa und die USA dominieren das High-End-Segment, während Japan und Südkorea stark auf Präzision setzen. Mit der Entwicklung neuer Werkstofftechnologien, der verstärkten Lokalisierung der Lieferketten und der Verschärfung des Wettbewerbs im High-End-Segment werden Unternehmen in verschiedenen Regionen ihre strategische Positionierung weiter optimieren. Wollen chinesische Unternehmen den Wandel von „groß“ zu „stark“ vollziehen, müssen sie weiterhin intensiv an Materialdesign, Präzisionsverarbeitung und Zertifizierungssystemen arbeiten. Europäische und amerikanische Unternehmen müssen dem Kostendruck und dem Umbau ihrer Lieferketten standhalten und ihre technologische Führungsrolle behaupten. Japanische und koreanische Unternehmen werden ihre Marktsegmente weiter ausbauen und ihre Vorteile bei Produkten mit hoher Wertschöpfung behaupten.

### 9.4 Rohstoffpreisschwankungen und Kostenstrukturanalyse

Wolframlegierungsstäben hängt stark vom Rohstoffpreis ab, insbesondere von den Preisschwankungen bei Wolframkonzentrat, Wolframpulver und Legierungselementen (wie Ni, Fe, Cu) usw., die die Stabilität und Rentabilität der gesamten Industriekette stark beeinflussen. Die weltweiten Wolframreserven sind begrenzt, der Markt ist stark konzentriert und unterliegt zyklischen Preisschwankungen, die von Angebot und Nachfrage, Politik, Umweltschutz, Geopolitik und anderen Faktoren bestimmt werden.

### Struktur von Wolframlegierungsstäben

Stäbe aus Wolframlegierung bestehen hauptsächlich aus den folgenden Teilen:

Kostenkategorie	Anteil (Referenzbereich)	veranschaulichen
<b>Kosten des Wolfram-Rohmaterials</b>	50 % bis 65 %	Einschließlich Wolframkonzentrat, Ammoniumparawolframat (APT), Wolframpulver usw. haben Preisschwankungen den größten Einfluss auf die Gesamtkosten
<b>Kosten der Legierungselemente</b>	10 % bis 15 %	Wie Ni, Fe, Cu, die Preisschwankungen sind kleiner als bei Wolfram, aber immer noch volatil

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Energie und Hilfsstoffe</b>	8 % bis 12 %	Strom, Wasserstoff, Schutzgas, Formmaterialien usw. werden von der Energieverbrauchsstruktur und der Regionalpolitik beeinflusst.
<b>Arbeits- und Verwaltungskosten</b>	5 % bis 10 %	Einschließlich Gehälter, Fabrikmiete, Verwaltungskosten usw.
<b>Ausrüstungs- und Abschreibungskosten</b>	3 % bis 5 %	Große Sinter- und Pressanlagen und deren Wartungskosten
<b>Umweltschutz- und Sicherheitskosten</b>	2 % bis 5 %	Vor allem in China und der EU steigen die Investitionen in den Umweltschutz weiter an

Hinweis: Die Kostenstruktur variiert je nach Verfahren, Herkunft, Produktionsumfang und Produktspezifikationen.

#### 9.4.2 Schwankungstrend der Wolfram-Rohstoffpreise

Wolfram wird von vielen komplexen Faktoren beeinflusst. Im Folgenden sind die Preisschwankungen der wichtigsten Wolframrohstoffe in den letzten Jahren aufgeführt:

##### (1) Preisentwicklung für Wolframkonzentrat ( $WO_3 \geq 65\%$ )

- **2020–2022** : Der Preis wird sich bei etwa **95.000 bis 110.000 RMB pro Tonne stabilisieren** ;
- **2022–2023** : Aufgrund des Investitionsbooms im Bereich neuer Energien, der knappen Versorgung und der Umweltschutzbeschränkungen **steigt** der Preis auf **über 125.000 Yuan/Tonne** .
- **2024** : Unter dem Einfluss der innenpolitischen Regulierung und der weltweiten Konjunkturabschwächung werden die Preise zurückgehen und zwischen **113.000 und 120.000 Yuan pro Tonne schwanken** .

##### (2) Preise für APT (Ammoniumparawolframat) und Wolframpulver

- **175.000 bis 190.000 RMB pro Tonne** Mitte 2024;
- Die Preisstabilität von Wolframpulver ist etwas gering. Aufgrund des großen Einflusses der Verarbeitungstechnologie und der Partikelgrößenspezifikationen schwankt der Preis häufig zwischen **240.000 und 280.000 Yuan pro Tonne** .

##### (3) Preise für Legierungselemente

- Die Nickelpreise (Ni) schwanken stark. Beeinflusst durch die neue Energie- und Edelstahlindustrie überstiegen sie **2023 einmal die Marke von 200.000 Yuan/Tonne** und stabilisierten sich 2024.
- Die Preise für Kupfer (Cu) und Eisen (Fe) schwanken relativ wenig, werden aber dennoch in gewissem Maße von Veränderungen der internationalen Handelssituation beeinflusst.

#### 9.4.3 Einfluss von Rohstoffschwankungen auf den Geschäftsbetrieb

Wirkungsdimension	Spezifische Manifestationen
-------------------	-----------------------------

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Kostenkontrolle wird schwieriger</b>	Wolfram-Rohstoffe haben die Bruttogewinne insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen gedrückt
<b>Häufige Preisschwankungen</b>	Der Einkaufszyklus der nachgelagerten Kunden entspricht nicht den Preisschwankungen der Rohstoffe, was die Auftragsunsicherheit erhöht
<b>Risiken in der Bestands- und Beschaffungsstrategie nehmen zu</b>	Die Festlegung des Rohstoffpreises im Voraus kann zu Preisinkongruenzen führen, die den Cashflow und den Lagerbestandswert beeinträchtigen.
<b>Leitfähigkeitsdifferenzierung</b>	Führende Unternehmen können den Kostendruck durch Technologieprämien weitergeben, während kleine Unternehmen über eine schwache Verhandlungsmacht verfügen

#### 9.4.4 Reaktionsstrategien und Trendbeurteilung

##### (1) Aufbau eines Preissicherungs- und Absicherungsmechanismus

- Unternehmen können Termingeschäfte oder langfristige Verträge nutzen, um die Einkaufspreise für Rohstoffe festzulegen.
- Stärken Sie die Zusammenarbeit mit Rohstofflieferanten und etablieren Sie stabile Beschaffungskanäle.

##### (2) Produktstrukturoptimierung und Transformation mit hoher Wertschöpfung

- Verbessern Sie die Bruttogewinnspanne pro Einheit durch die Entwicklung von Wolframlegierungsstäben mit besonderen Eigenschaften wie hoher Festigkeit und hoher Temperaturbeständigkeit.
- Absicherung gegen Rohstoffkostenschwankungen durch Prozessdifferenzierung .

##### (3) Stärkung der Energieeinsparung und Kostenkontrolle im Produktionsprozess

- Reduzieren Sie den spezifischen Energieverbrauch durch energiesparende Verfahren wie isostatisches Pressen und Lasersintern.
- Implementieren Sie ein schlankes Produktionsmanagement, um die Ausbeute und die Rohstoffauslastung zu verbessern.

##### (4) Grünes Recycling und Nutzung recycelter Wolframlegierungen

- Ein Recyclingsystem für Wolframmaterialien einrichten und eine Technologie für recyceltes Wolframpulver entwickeln;
- Die Kosten für recyceltes Wolfram sind deutlich niedriger als die für die Erzgewinnung, was es zu einer wichtigen Möglichkeit macht, künftig Kosten zu senken.

#### Zusammenfassung

Die Produktion von Wolframlegierungsstäben ist extrem empfindlich gegenüber Rohstoffpreisen, insbesondere den Preisschwankungen von Wolframpulver und Legierungselementen, die sich direkt auf die Rentabilität von Unternehmen auswirken. Angesichts globaler Ressourcenstrategie ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

strengerer Umweltschutzrichtlinien und des anhaltenden Wachstums im Bereich hochwertiger Anwendungen könnten starke Schwankungen der Rohstoffkosten zur neuen Normalität werden. Unternehmen müssen künftig ihr Risikomanagement stärken, dem Kostendruck standhalten und durch diversifizierte Rohstoffstrategien, hochwertige Produkte und umweltfreundliche Fertigung eine nachhaltige Entwicklung erreichen.

## 9.5 Interpretation der Industriepolitik und der Exportsituation

Als seltenes Metallprodukt mit hohem Technologiegehalt und hoher Wertschöpfung unterliegen Wolframlegierungsstäbe stark der Industriepolitik und internationalen Exportkontrollen. Insbesondere im Kontext globaler Ressourcenstrategien und der Lokalisierung der Lieferketten haben Regierungen verschiedener Länder entsprechende Richtlinien eingeführt, um die Sicherheit ihrer wichtigsten Rohstofflieferketten zu gewährleisten und die Handelsaufsicht für Schlüsselmetalle zu stärken. Unternehmen müssen die Trends politischer Veränderungen unter der Prämisse der Compliance genau erfassen, um ihre Risikoresistenz und globale Wettbewerbsfähigkeit zu stärken.

### 9.5.1 Chinas politische Ausrichtung der Wolframindustrie

#### (1) Ressourcenschutz und Gesamtmengenkontrolle

- Wolfram ist als staatlich geschütztes Schlüsselmineral aufgeführt und es gilt eine obligatorische vollständige Produktionskontrolle.
- Seit 2002 wird für Wolframminen ein Plan zur Kontrolle des gesamten Abbauvolumens umgesetzt, und die vorgeschriebene Produktion von Wolframkonzentrat (WO<sub>3</sub>-Gehalt 65 %) beträgt im Jahr 2024 etwa **110.000 Tonnen** ;
- Das Land kontrolliert den illegalen Bergbau streng und geht hart gegen den illegalen Rohstoffhandel vor.

#### (2) Industrielle Modernisierung und grüne Transformation

- Der „Entwicklungsplan für die Seltenerdmetallindustrie“ und die „Leitlinien zur Entwicklung der Neuwerkstoffindustrie“ fördern die Umwandlung von Wolframressourcen in Hochleistungslegierungen, fortschrittliche Strukturwerkstoffe und Funktionswerkstoffe.
- von High-End-Produkten wie Pulvermetallurgie, hochdichten Legierungen und Verbundwerkstoffen auf Wolframbasis und Beseitigung von stark umweltbelastenden und ineffizienten Produktionskapazitäten;
- Verbessern Sie die technologischen Durchbrüche und Fähigkeiten zur Lokalisierung von Geräten im Bereich der Wolframlegierungen und bilden Sie eine vollständige Kette von „Ressourcen-Produkten-Anwendungen“.

#### (3) Exportmanagement und -beschränkungsrichtlinien

- Stäbe aus Wolframlegierungen und deren Ausgangsmaterialien sind sensible Produkte auf der „Dual-Use-Items and Technologies Export Control List“ und erfordern gemäß dem Gesetz eine Ausfuhrgenehmigung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Das Handelsministerium und die Allgemeine Zollverwaltung beaufsichtigen gemeinsam, und Exportunternehmen müssen über entsprechende Qualifikationen und Managementsysteme verfügen.
- Es ist verboten, die Exportaufsicht durch das Verbergen von Erklärungen oder die Änderung von Produktnamen durch Dritte zu umgehen. Verstöße werden mit Geldstrafen und dem Entzug der Exportgenehmigungen geahndet.

## 9.5.2 Veränderungen im internationalen Exportumfeld

### (1) Stärkung der „Zwei-Wege-Kontrolle“ zwischen Europa und den Vereinigten Staaten

- Die Vereinigten Staaten und Europa haben Wolframlegierungen in die Liste der „kritischen Mineralien“ oder „strategischen Materialien“ aufgenommen und die Überprüfung importierter Wolframprodukte verstärkt.
- Einführung bestimmter Handelsbeschränkungen für chinesische Wolframprodukte (einschließlich Stäbe aus Wolframlegierungen), einschließlich Anforderungen an die technische Rückverfolgbarkeit und einer Überprüfung der Dual-Use-Verwendung;
- Die Vereinigten Staaten geben dem Kauf einiger militärischer Wolframprodukte Vorrang bei inländischen Lieferanten oder „befreundeten Ländern“, was eine technische Barriere darstellt.

### (2) Die japanischen und koreanischen Märkte sind relativ offen, weisen aber hohe Markteintrittsbarrieren auf

- Südkorea und Japan haben extrem hohe Anforderungen an die technische Überprüfung und die Leistungsstandards der Produkte, insbesondere bei hochpräzisen Anwendungen wie Medizin, Elektronik und Halbleitern, und legen technische Schwellenwerte fest, beispielsweise für die Anpassung und Mikrostrukturkontrolle von Stäben aus Wolframlegierungen.
- Unternehmen müssen ISO-, JIS-, MIL- und andere Standardzertifizierungen bestehen und sich außerdem strengen Prozessen wie Fabrikaudits der Kunden und der Überprüfung der Chargenstabilität unterziehen.

### (3) Das Marktpotenzial der Länder entlang der Belt and Road Initiative steigt

- Der Ausbau des Infrastrukturbaus und der Energieinvestitionen in Ländern entlang der „Neuen Seidenstraße“ wie Zentralasien, dem Nahen Osten und Osteuropa hat eine neue Nachfrage nach hochdichten Gegengewichten und Strahlenschutzprodukten aus Wolframlegierungen geschaffen.
- Richtlinien unterstützen Unternehmen bei der Erschließung neuer Märkte durch Instrumente wie Exportkreditversicherungen, grenzüberschreitende RMB-Zahlungsabwicklungen und Steuerabkommen.

## 9.5.3 Exportsituation und Risikoprävention und -kontrolle

Hauptrisikoarten	Erklärung und Gegenmaßnahmen
------------------	------------------------------

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Handelskonflikte eskalieren</b>	Um möglichen „Antidumpinguntersuchungen“ und einer Politik der „Herkunftslanddiskriminierung“ in Märkten wie den Vereinigten Staaten zu begegnen, können Produktdifferenzierung und die Gestaltung von Vermeidungswegen (wie etwa Reexporthandel) eingeführt werden.
<b>Einschränkungen bei den Zertifizierungsschwellen</b>	Beschleunigen Sie den Aufbau internationaler Standardsystem-Zertifizierungsfunktionen wie AS9100 (Luftfahrt), NADCAP (Wärmebehandlung) usw., um in die High-End-Lieferkette einzusteigen
<b>Verzögerungen bei der Exportgenehmigung</b>	Die Verlängerung des Exportlizenzyklus kann sich auf die Lieferung auswirken. Es wird empfohlen, dass Unternehmen den Zollabfertigungszyklus im Voraus planen und ihre internen Compliance-Vorbereitungskapazitäten verbessern.
<b>Geopolitische Volatilität</b>	Diversifizierung der Kundenmärkte, um eine übermäßige Abhängigkeit von einem einzelnen Land zu vermeiden; Stärkung der Zusammenarbeit mit lokalen Partnern zur Risikostreung

### 9.5.4 Politische Empfehlungen und Reaktionsstrategien der Unternehmen

#### 1. Die Überwachung politischer Maßnahmen und die Frühwarnmechanismen für Informationen sollten gestärkt werden.

Unternehmen sollten Vollzeitteams einrichten, die die politischen Entwicklungen der Nationalen Entwicklungs- und Reformkommission, des Handelsministeriums, des Zolls und internationaler Industrieverbände verfolgen und sich proaktiv an regulatorische Änderungen anpassen.

#### 2. Bauen Sie ein konformes Exportsystem und Qualifikationsmanagementfunktionen auf

- Beantragen Sie die erforderlichen Qualifikationen wie „Lizenz für Güter mit doppeltem Verwendungszweck“ und „Ausfuhrregistrierungszertifikat“.
- Richten Sie ein Produktrückverfolgungssystem und einen Mechanismus zur vollständigen Archivierung von Zollerklärungsdokumenten ein.

#### 3. Beteiligen Sie sich aktiv an der Entwicklung internationaler Standards

und wirken Sie gemeinsam mit wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen an der Formulierung neuer ISO/ASTM-Standards mit, um die internationale Stimme zu stärken und die Entwicklung von Produktqualitätssystemen zu verbessern.

#### 4. Ausbau diversifizierter internationaler Märkte

- Intensive Pflege von High-End-Kunden in Europa, Amerika und Japan;
- Gleichzeitig werden wir Schwellenmärkte wie den Nahen Osten, Indien und Südostasien erschließen, um das Risiko einer geopolitischen Konzentration zu verringern.

### Zusammenfassung

Als strategischer Werkstoff wird die Exportsituation von Wolframlegierungsstäben stark von politischen Vorgaben und internationalen Umweltschwankungen beeinflusst. China setzt auf Ressourcenkontrolle und eine Transformationsstrategie mit hoher Wertschöpfung, Europa und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

USA stärken Technologie- und Handelsbarrieren, und Japan und Südkorea fördern den Produktmarkteintritt durch Technologiezertifizierungen. Unternehmen sollten diese politischen Vorgaben genau verstehen und sich darauf einstellen und durch die Verbesserung technischer Inhalte, optimierter Compliance-Systeme und den Ausbau diversifizierter Märkte ihre internationale Wettbewerbsposition stärken.

## 9.6 Prognose der zukünftigen Nachfrage nach Wolframlegierungsstäben in der High-End-Fertigung

Die globale Fertigungsindustrie schreitet in eine neue Ära der Hochleistungs-, Leichtbau-, intelligenten und umweltfreundlichen Fertigung voran. Dies führt zu höheren Standards und vielfältigen Anforderungen an die Werkstoffe. Wolframlegierungsstäbe haben sich aufgrund ihrer hervorragenden Dichte, ihres hohen Schmelzpunkts, ihrer starken mechanischen Eigenschaften, ihrer Strahlungsbeständigkeit und ihrer thermischen Stabilität zu einem unverzichtbaren Schlüsselwerkstoff in anspruchsvollen Fertigungsbereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie, der Rüstungsindustrie und der Medizinelektronik entwickelt. Die Weiterentwicklung dieser Branchen wird auch in Zukunft die Nachfrage nach Wolframlegierungsstäben, die Leistungsanforderungen und die Anwendungsvielfalt weiter steigern.

### 9.6.1 Überblick über Entwicklungstrends in der High-End-Fertigung

Branchenrichtung	Entwicklungstrend	Anforderungen an Stäbe aus Wolframlegierungen
<b>Luft- und Raumfahrt</b>	Entwicklung hin zu einem höheren Schub-Gewichts-Verhältnis und stärkerer Lastresistenz	Hohes spezifisches Gewicht + hohe Zähigkeit + kontrollierbare Trägheitsstrukturteile
<b>Hyperschallwaffen</b>	Hochgeschwindigkeitsflug + Hochtemperatur-Schockumgebung	Thermoschockbeständigkeit + Thermische Stabilität + Kavitationsermüdungsbeständigkeit
<b>Kernfusion/Kernspaltung</b>	Extreme Temperaturen + hohe Strahlungsintensität	Strahlungsbeständigkeit + Hochtemperaturfestigkeit + Neutronenabsorption
<b>Medizinische Geräte</b>	Miniaturisierung und Präzision	Hohe Dichte + Verarbeitbarkeit + Materialbiokompatibilität
<b>Halbleiter- und Elektronikverpackungen</b>	Hohe Leistungsdichte + Herausforderungen beim Wärmemanagement	Wärmeleitfähigkeit + Verpackungsstärke + Kleine Präzisionsstruktur
<b>Präzisionsmaschinen und Robotik</b>	Hochdynamische Steuerung + kundenspezifische Trägheitskomponenten	Hohe Dichte + Fähigkeit zur geometrischen Präzisionssteuerung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9.6.2 Prognose der zukünftigen Nachfrage in Schlüsselbereichen

### (1) Luft- und Raumfahrt- und Trägheitskontrollkomponenten

- Mit der beschleunigten Entwicklung von **Satellitenkonstellationen** Bei **wiederverwendbaren Raketen** und **Verkehrsflugzeugen** ist die Nachfrage nach Stäben aus Wolframlegierungen für Gegengewichte und Trägheitskontrollteile erheblich gestiegen .
- Die neue Flugzeuggeneration stellt höhere Anforderungen an die Maßgenauigkeit, mechanische Festigkeit und Zuverlässigkeit der Materialien.
- Schätzungen zufolge wird die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate der Nachfrage nach Stäben aus Wolframlegierungen im Luft- und Raumfahrtbereich bis 2030 bei **10 bis 12 % liegen** .

### (2) Kernenergie- und Fusionsenergietechnik

- Wolframmaterialien werden in Kernfusionsprojekten wie ITER und CFETR immer häufiger eingesetzt, und die Anwendung von Stäben aus Wolframlegierungen in Strahlenschutz- und Steuerabstrukturen nimmt weiter zu.
- Auch bei der vierten Generation von Kernspaltungsreaktoren (Schnellneutronenreaktoren, Salzschnmelzreaktoren) werden Wolframlegierungen als Kandidaten für Strukturmaterialien aufgeführt;
- China, die Europäische Union, die Vereinigten Staaten, Japan und andere Länder haben allesamt Projekte zur Entwicklung von Kernmaterialien auf Wolframbasis eingeleitet.
- Bis 2035 wird die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von Stäben aus Wolframlegierungen im Bereich der Kernenergie voraussichtlich **über 13 % liegen** .

### (3) Hochwertige medizinische Geräte

- Medizinische Wolframlegierungsstäbe werden in Strahlentherapiebeschleunigern **verwendet** , **Gammastrahlenmesser** , **Strahlenquellenschutzstrukturen** usw.
- Die alternde Bevölkerung und die schnell wachsende Nachfrage nach Geräten zur Krebsbehandlung;
- Insbesondere im Bereich der medizinischen **Wolframstäbe mit hoher Dichte und geringer Verunreinigung** beschleunigen chinesische Unternehmen den Durchbruch der europäischen und amerikanischen Standardbarrieren .
- Es wird prognostiziert, dass der weltweite Markt für medizinische Wolframlegierungsstäbe bis **2030 ein Volumen von über 300 Millionen US-Dollar erreichen wird** .

### (4) Intelligente Fertigung und High-End-Werkzeugmaschinen

- Hochgeschwindigkeits- und Trägheitswerkzeug-Gegengewichte, automatisierte Werkzeugvorrichtungen usw. verwenden zunehmend hochdichte Wolframlegierungen als Ersatz für herkömmlichen Stahl.
- Wolframlegierungsstäbe für CNC-Werkzeugmaschinen und hochpräzise Spindelkomponenten sind zu einem neuen Wachstumspunkt geworden;
- **Jahren eine geschätzte Wachstumsrate von 8–10 % erwartet wird** .

### (5) Nationale Verteidigung und Hyperschallwaffensysteme

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Da taktische Waffen immer schneller durchschlagen, ihre Spur anpassen und immer kleiner werden, werden Stäbe aus Wolframlegierungen immer häufiger in Geschosskernen, ausbalancierten Heckkammern usw. verwendet .
- bei **panzerbrechenden Projektilen und kinetischen Waffen** wird der Schwerpunkt auf der Aufrüstung auf nanoverstärkte, hochdichte und hochfeste Materialien liegen;
- Bei Stäben aus Wolframlegierungen in Militärqualität wird mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von **8–9 % gerechnet** .

### 9.6.3 Leistungstechnologietrends

Leistungsindikatoren	Entwicklungsrichtung	Beispiel für einen Technologiepfad
<b>Genauigkeit der Kontrolle des spezifischen Gewichts</b>	Innerhalb von $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$	Zielpressen + CNC-Strangpressen
<b>Thermoschockbeständigkeit</b>	Temperaturschock von über $1000 \text{ }^\circ\text{C}$	Zugabe von ZrC / $\text{La}_2\text{O}_3$ - Kompositkeramikpartikeln
<b>Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur</b>	Die Korngröße wird auf $5 \text{ }\mu\text{m}$ genau kontrolliert	Nanopulver + Vakuumsintern
<b>Verarbeitungsgenauigkeit</b>	$\phi \pm 0,005 \text{ mm}$ , Oberfläche Ra $< 0,1 \text{ }\mu\text{m}$	Feinkornverdichtung + Feinstmahlung
<b>Strahlungsresistenz</b>	Verbesserung der Neutronenabsorption/des Gammastrahlenschutzes	B/C und andere Elemente Beschichtung/Co-Sintern

### 9.6.4 Vorschläge zur Unternehmensentwicklung und zukunftsorientiertes Layout

1. **Die Produktstruktur entwickelt sich in Richtung leistungsstarker Anpassung und** entwickelt Produktreihen für unterschiedliche Anwendungen, wie etwa Serien von Trägheitsgegengewichten für die Luft- und Raumfahrt, Serien von Abschirmungen für medizinische Strahlentherapie, Serien von Wärmeableitungsprodukten für Halbleiter usw., um die Kundenbindung zu erhöhen.
2. **Richten Sie ein High-End-Kundenzertifizierungssystem ein,** planen Sie AS9100, ISO13485, MIL und andere Qualitätssysteme im Voraus und erweitern Sie den globalen Kundenstamm im High-End-Bereich.
3. **Bei Investitionen in umweltfreundliche und Recycling-Produktionssysteme** stehen das Recycling von Wolframlegierungspulver, das grüne Sintern und kohlenstoffarme Technologien im Mittelpunkt, um neue Vorteile in der zukünftigen Lieferkette zu schaffen .
4. **Durch die Nutzung intelligenter Fertigung und digitaler Überwachung** führen wir das Konzept der Industrie 4.0 ein, realisieren eine digitale und datengesteuerte Überwachung im gesamten Materialvorbereitungsprozess und verbessern Konsistenz und Ertrag.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Zusammenfassung

Wolframlegierungsstäbe eröffnen im nächsten Jahrzehnt neue Entwicklungsmöglichkeiten im High-End-Bereich, segmentiert und globalisiert. Die Luft- und Raumfahrt, die Kernfusion, der medizinische Schutz, die Präzisionsfertigung und die Verteidigungsindustrie werden weiterhin die Haupttreiber der Nachfrage sein. Nur durch kontinuierliche Anstrengungen in den Bereichen Materialinnovation, Qualitätssystem, Marktexpansion und technologische Weiterentwicklung können Unternehmen in dieser High-End-Fertigungswelle die Entwicklungsinitiative gewinnen.

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

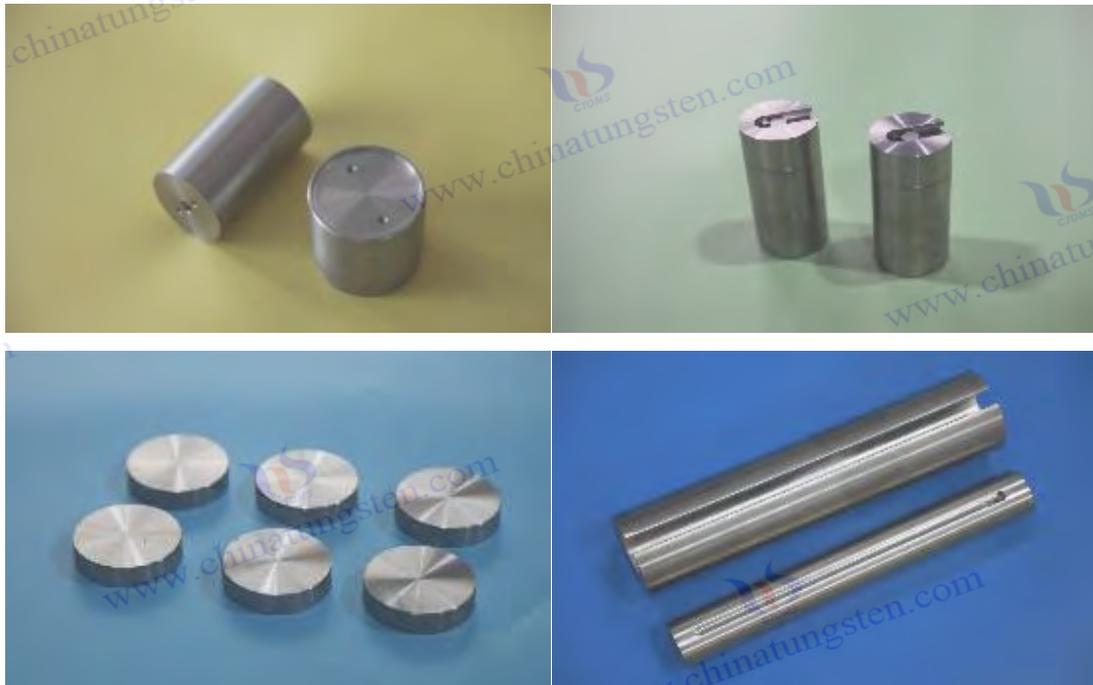
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Kapitel 10 Forschungsschwerpunkte und Spitzentechnologien für Stäbe aus Wolframlegierungen

### 10.1 Untersuchung des Verdichtungsprozesses von hochdichten Wolframlegierungsstäben

Die Dichte von Wolframlegierungsstäben beeinflusst maßgeblich deren mechanische Eigenschaften, Wärmeleitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Lebensdauer. Das Erreichen von Wolframlegierungsstäben **mit einer Dichte nahe der theoretischen Dichte (> 98,5 %) oder sogar nahe der maximalen Dichte** ist ein wichtiger Forschungsschwerpunkt in der Werkstofftechnik und Pulvermetallurgie. Die Qualität des Verdichtungsprozesses bestimmt direkt die strukturelle Integrität, die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur und die Zuverlässigkeit des Produkts in High-End-Anwendungen (z. B. Strukturteile für die Kernfusion, Raketenausgleichsteile und Hochleistungs-Elektronik-Kühlkörper).

#### 10.1.1 Grundprinzipien und Kennwertanforderungen der Verdichtung

Unter Verdichtung versteht man den Vorgang, bei dem die Poren zwischen den Partikeln allmählich geschlossen werden, die Partikelgrenzflächen verbunden werden und die Körner durch die Einwirkung von Temperatur, Druck oder anderer Energie auf den Pulverpressling effektiv gestapelt und verteilt werden.

**Schlüsselkennzahlen:**

- **Rohdichte  $\geq 18,5 \text{ g/cm}^3$  (W-Gehalt > 90 % Legierung)**
- **Porosität  $\leq 1,5 \%$**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Keine offensichtlichen Einschlüsse, Risse oder Porenkonzentrationsbereiche**
- **Die Korngröße kann unter 20 µm kontrolliert werden**

### 10.1.2 Traditionelle Sinterverdichtungstechnologie

#### (1) Konventionelles Vakuumsintern

- Typische Prozesstemperatur: **1450–1550 °C**
- Anwendbar auf W-Ni-Fe-, W-Ni-Cu-Systeme
- Vorteile: ausgereifte Technologie, geeignet für die Serienproduktion
- Nachteile: Poren lassen sich nur schwer vollständig entleeren, und zur Förderung der Verdichtung ist eine flüssige Phase erforderlich

#### (2) Flüssigphasenunterstütztes Sintern

- Die Bildung einer kritischen Flüssigphase durch Ni oder Cu fördert die Neuordnung der Partikel bei der Sintertemperatur
- Kann die Gewebegleichmäßigkeit und Bindungsfähigkeit verbessern
- Es besteht die Gefahr einer „Flüssigphasensegregation“ und eines „Kornwachstums“, und das Flüssigphasenverhältnis muss streng kontrolliert werden

#### (3) Mehrstufiges Sintern und verzögertes Sintern

- Mehrstufiges Erhitzen oder Halten verschiedener Temperaturzonen für eine bestimmte Zeit hilft beim Ausheizen und Kontrollieren der Korngröße
- Besonders effektiv für ultrafeine Pulver oder Nanopulver

### 10.1.3 Technologiepfad für erweiterte Verdichtung

#### (1) Heißisostatisches Pressen (HIP)

- Wenden Sie bei hoher Temperatur isotropen Gasdruck (100–200 MPa) an, um die inneren Mikroporen zum Kollabieren zu bringen
- Kann die Dichte auf >99,5 % erhöhen
- Nachteile: Teure Ausrüstung, langer Zyklus, geeignet für die Nachbearbeitung von High-End-Teilen

#### (2) Funkenplasmasintern (SPS)

- Schnelle Verdichtung durch hohen Stromimpuls + axialen Druck
- Schnelle Heizrate (bis zu 100 °C/min) und kurze Sinterzeit (innerhalb weniger Minuten)
- Kann Nanokörner erhalten und übermäßiges Wachstum hemmen
- Nachteile: Die Produktgröße ist durch die Form begrenzt, geeignet für kleine hochwertige Materialien

#### (3) Mikrowellensintern

- Durch die Absorption von Mikrowellen durch Wolfram wird eine gleichmäßige Erwärmung des Inneren erreicht
- Hoher thermischer Wirkungsgrad und schnelle Verdichtungsrate, aber Lichtbogen- und Hotspot-Probleme müssen gelöst werden

#### (4) Lasergestützte Verdichtung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Wolframlegierungsstäbe mit speziell geformten Strukturen oder mehrschichtigen Verbundstrukturen.
- Die Technologie befindet sich noch im Forschungs- und Versuchsstadium, und für die Industrialisierung sind weitere Durchbrüche erforderlich.

#### 10.1.4 Einfluss stofflicher Faktoren auf die Verdichtung

- **Pulverpartikelgröße** : Je kleiner die **Partikelgröße** (insbesondere  $<1 \mu\text{m}$ ), desto niedriger die Verdichtungstemperatur und desto höher die Geschwindigkeit, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit eines abnormalen Sinterhalswachstums höher.
- **Pulvermorphologie** : Kugelförmiges Pulver weist leichter eine Dichte auf, während flockiges oder eckiges Pulver beim Sintern eher zur Bildung von Hohlraumansammlungen neigt.
- **Verunreinigungen und Sauerstoffgehalt** : Verunreinigungen wie Si, O und C neigen dazu, Zwischenschichten oder zweite Phasen an der Schnittstelle zu bilden, was den Verdichtungsprozess behindert.
- **Verteilung der Legierungselemente** : Eine gleichmäßige Verteilung von Ni/Cu kann den Diffusionspfad der Flüssigphase optimieren und die Dichte verbessern.

#### 10.1.5 Mikroskopische Verdichtungsmechanismen

- **Diffusionsmechanismus** : Volumendiffusion und Korngrenzendiffusion sind vorherrschend, und die Zugabe aktiver Elemente (wie La und Zr) kann die Nahbereichsdiffusion fördern;
- **Theorie der Partikelumordnung** : In Gegenwart einer flüssigen Phase neigen Partikel zur Konfiguration mit minimaler Energie und bilden eine dichte Stapelstruktur.
- **Porenwanderung und -kontraktion** : Kleine Poren sammeln sich zu großen Poren hin oder schließen sich unter der Einwirkung der thermisch-mechanischen Kopplung, um einen vollständig dichten Körper zu bilden.
- **Hemmung des Kornwachstums** : Kontrollieren Sie die Heizrate und fügen Sie Korngrenzeninhibitoren (wie Seltenerdoxide) hinzu, um eine feinkörnige Struktur aufrechtzuerhalten.

#### 10.1.6 Anwendungsbeispiele und Forschungsstand

- **Institut für Metallforschung, Chinesische Akademie der Wissenschaften** : Durch Verwendung von SPS wurde eine W-5Ni-2Fe-Legierungsdichte von 99,4 % und eine durchschnittliche Korngröße von  $6,2 \mu\text{m}$  erreicht;
- **Plansee, Österreich** : Die kommerzielle HIP+isothermische Schmiedetechnologie wird auf hochdichte Wolframstäbe für die Luft- und Raumfahrt mit einer Porosität von weniger als 0,3 % angewendet;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **China Tungsten High- Tech** : Entwicklung eines Flüssigphasen- und Mikrowellen-Verdichtungsverfahrens zur Erhöhung der Dichte von W-Ni-Cu-Stäben auf über 18,9 g/cm<sup>3</sup>, die häufig in militärischen Projektilkernen verwendet werden.

### 10.1.7 Zukünftige Entwicklungstrends und Herausforderungen

Entwicklungsrichtung	Technischer Pfad	Herausforderung
<b>Nanoskalige Pulververdichtung</b>	Ultraschnelles Sintern und Kaltsintern	Pulveragglomeration und Oxidationshemmung sind schwierig
<b>Verdichtung großer Stäbe aus Wolframlegierungen</b>	Mehrstufige HIP- und Warmschmiedekombination	Kontrolle der thermischen Belastung, Kostenkontrolle
<b>Entwurf dichter Verbundstrukturen</b>	Kern-Schale-Pulver, Materialien mit Gradientenstruktur	Prozesspräzision und Kapazitätsbeschränkungen der Ausrüstung
<b>Intelligente Sinterprozessüberwachung</b>	Online-Dichtebewertung + Rückkopplungskontrolle	Es ist schwierig, Wahrnehmungstechnologie und KI-Algorithmen zu integrieren

#### Zusammenfassung

Die Herstellung von hochdichten Wolframlegierungsstäben ist ein komplexes System der Materialwissenschaft, das Pulvertechnik, thermodynamische Steuerung, Grenzflächenphysik und Verarbeitungstechnologie integriert. Mit **der kontinuierlichen Verbesserung der Nachfrage nach High-End-Anwendungen, der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Verdichtungstechnologie und der umfassenden Integration intelligenter Fertigungskonzepte** wird sich der Verdichtungsprozess von Wolframlegierungsstäben in Zukunft in Richtung Präzision, Umweltfreundlichkeit und Personalisierung weiterentwickeln .

### 10.2 Intelligente Fertigung und automatisierte Produktionslinie für Wolframlegierungsstäbe

Mit dem Wandel der globalen Fertigungsindustrie hin zu „hochwertigen, intelligenten und umweltfreundlichen“ Produkten vollzieht sich auch in der Produktion von Wolframlegierungsstäben allmählich der Übergang vom traditionellen Massenproduktionsmodell zur **intelligenten Fertigung** . Durch die Einführung von Fertigungstechnologien der neuen Generation wie cyber-physischen Systemen (CPS), dem industriellen Internet der Dinge ( IIoT ), künstlicher Intelligenz (KI) und digitalen Zwillingen ist die Schaffung intelligenter Fabriken **mit hohem Automatisierungsgrad, hoher Qualitätskonsistenz und hoher Reaktionsflexibilität** zur zentralen strategischen Ausrichtung fortschrittlicher Wolframwerkstoffunternehmen geworden.

#### 10.2.1 Notwendigkeit der intelligenten Herstellung von Wolframlegierungsstäben

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Treiber	veranschaulichen
<b>Diversifizierte Produktspezifikationen</b>	Die Nachfrage nach kundenspezifischen Produkten mit unterschiedlichen Größen, Legierungszusammensetzungen und Organisationsstrukturen steigt
<b>Kosten- und Effizienzdruck</b>	Steigende Arbeitskosten, Energieverbrauchskontrolle und Qualitätsschwankungen stellen die Produktion vor Herausforderungen
<b>Anforderungen an die Qualitätsstabilität</b>	In der Luftfahrt, der Kernenergie, der Medizin und anderen Bereichen werden extrem hohe Anforderungen an die Chargenkonsistenz gestellt.
<b>Compliance- und Rückverfolgbarkeitsdruck</b>	Internationale Zertifizierungssysteme erfordern eine lückenlose Prozessrückverfolgbarkeit und vollständige Produktionsdatenaufzeichnungen
<b>Sicherheits- und Umweltschutzanforderungen</b>	Pulverprozesse sind entflammbar und explosiv, Automatisierung trägt zur Verbesserung der Sicherheit bei

### 10.2.2 Schlüsselmodule der Smart Manufacturing-Produktionslinie

Intelligente Produktionslinien für Stäbe aus Wolframlegierungen decken normalerweise die komplette Prozesskette von **der Pulveraufbereitung** → **Formgebung** → **Sintern** → **Wärmebehandlung** → **Verarbeitung** → **Prüfung und Verpackung ab und integrieren Automatisierungsgeräte und Informationssysteme**, um eine durchgängige kollaborative Steuerung zu erreichen.

#### (1) Automatisches Pulvermisch- und Vermengungssystem

- Kontrollieren Sie genau den Anteil verschiedener Wolframpulver und Zusatzelemente.
- Ausgestattet mit automatischer Waage, Vakuumzufuhrsystem, geschlossener Kugelmühle und Trocknungssystem;
- Arbeiten Sie mit dem MES-System zusammen, um die Verwaltung von Formel- und Chargendaten zu realisieren.

#### (2) Intelligente Presseinheit (Formpressen/isostatisches Pressen)

- Formen: Automatische Presse mit Servohydrauliksystem und Positionsregelung;
- Isostatisches Pressen: Intelligentes Autoklaven-Steuerungssystem mit Fernvoreinstellung und Prozesskurvenverwaltung;
- Realisieren Sie die Integration des automatischen Ladens, Pressens und Entformens.

#### (3) Automatische Linie zum Sintern und zur Kontrolle der Atmosphäre

- Automatischer temperatur- und gasgeregelter Vakuumofen oder Wasserstoffofen;
- Ausgestattet mit einem Schienenfördersystem für Materialgestelle, um ein kontinuierliches Sintern zu erreichen;
- Fernsteuerung der Prozessparameter und Echtzeitüberwachung der Atmosphärenqualität (Online- Analyse des O<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>- Gehalts) .

#### (4) Integrierte Steuerung der Wärmebehandlung und Verdichtung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Ausgestattet mit einem automatischen Be- und Entladesystem für heißisostatisches Pressen (HIP);
- Arbeiten Sie mit Hochtemperaturschmiede- oder Extrusionsverfahren zusammen, um eine Verarbeitungsfähigkeit mit hoher Dichte und gleichmäßiger Organisation zu erreichen.
- Die Temperatur- und Druckverläufe werden automatisch geregelt und Prozessdatensätze in die Cloud hochgeladen.

#### (5) CNC-Bearbeitung und Online-Testsystem

- CNC-Drehmaschinen, Schleifmaschinen und Polierlinien sind an das MES-System angeschlossen;
- CCD-Vision- und Laser-Durchmessermessgerät überwachen die Größenabweichung in Echtzeit;
- Die Bearbeitungsparameter werden automatisch angepasst, um eine adaptive Bearbeitung zu unterstützen.

#### (6) Automatische Verpackung und Etikettierung

- Intelligente Verpackungslinie realisiert Vakuum, Trockenmittelfüllung und Antivibrationspufferkonfiguration;
- Barcode/QR-Code + RFID-System zum automatischen Drucken von Etiketten und zur Rückverfolgbarkeit.

### 10.2.3 Digitalisierung und Informationssystemunterstützung

Systemtyp	Funktion
MES (Manufacturing Execution System)	Realisieren Sie Produktionsplanungsmanagement, Geräteplanung, Chargenrückverfolgbarkeit und Überwachung der Prozessausführung
SCADA-System	Echtzeiterfassung wichtiger Parameter wie Temperatur, Atmosphäre, Druck, Strom usw. und visuelle Anzeige
QMS (Qualitätsmanagementsystem)	Etablierung eines prozessübergreifenden Qualitätskontrollprozesses zur Gewährleistung einer Fehlerwarnung und statistischen Prozesskontrolle (SPC)
ERP-Systemanbindung	Integrieren Sie Bestellungen, Beschaffung, Lagerbestand und Fertigung zu einem geschlossenen Managementkreislauf
KI-gestützte Entscheidungsfindungsmaschine	Analysieren Sie mehrere Datenstapel, optimieren Sie die Parametereinstellungen und verbessern Sie die Erfolgsquote beim ersten Versuch
Digitales Zwillingssystem	Erstellen Sie ein virtuelles Produktionsmodell, um Prozessoptimierung, vorausschauende Gerätewartung und Simulation zu erreichen

### 10.2.4 Aktuelle Engpässe und zukünftige Entwicklungen

Zentrale Herausforderungen	Leistung	Entwicklungsrichtung
----------------------------	----------	----------------------

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Hohe Kostenschwelle</b>	Die anfängliche Investition in Automatisierungsgeräte ist groß	Großserienfertigung + staatliche Unterstützung + schrittweise Investitionen
<b>Schlechte Anpassungsfähigkeit an speziell geformte Werkstücke</b>	Die meisten der vorhandenen Geräte sind Standard-Bar-Spezifikationen	Entwicklung modularer intelligenter Einheiten zur Anpassung an die Verarbeitung mehrerer Formen
<b>Datensystem-Silos</b>	Inkonsistente Schnittstellen zwischen Informationssystemen	Förderung offener Standards und der Vereinheitlichung industrieller Protokolle (wie OPC UA)
<b>Unzureichende Mensch-Maschine-Zusammenarbeit</b>	Menschliches Eingreifen ist in wichtigen Verbindungen weiterhin erforderlich	Stärkung der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit und der Virtual-Reality-integrierten Fertigung

### 10.2.5 Ausblick auf zukünftige Technologietrends

1. **Edge Computing und KI-Edge- Bereitstellung** : Setzen Sie intelligente KI-Terminals in wichtigen Prozessverbindungen ein, um eine Echtzeit-Edge-Überwachung, Parameter-Selbstanpassung und Gerätestatusvorhersage zu erreichen.
2. **Analyse der Datenfusion aus mehreren Quellen** : Fusion mehrerer Sensordaten wie Bilder, Akustik, Wärmebilder, Vibration usw., um eine umfassende Beurteilung der Produktqualität und der Fehlerlokalisierung zu erreichen.
3. **System zur CO<sub>2</sub>-armen Herstellung und Verfolgung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks** : Bewerten Sie die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Stäben aus Wolframlegierungen während ihres gesamten Lebenszyklus und richten Sie ein System zur Bewertung der umweltfreundlichen Herstellung ein.
4. **Cloud-Fertigung und flexibles kollaboratives Netzwerk** : Durch 5G+Industrial Internet werden vor- und nachgelagerte Fertigungsressourcen verbunden, um eine kollaborative Produktionsplanung mehrerer Fabriken und eine Remote-Prozesskonfiguration zu erreichen.

### Zusammenfassung

Die Herstellung von Wolframlegierungsstäben befindet sich in einer kritischen Phase des Übergangs von der Teilautomatisierung zur vollständigen Prozessintelligenz. Durch die umfassende Digitalisierung der Kernprozessparameter, die Verbesserung der Geräteintelligenz und die Vernetzung und Integration von Managementsystemen wird die Herstellung von Wolframlegierungsstäben zukünftig schrittweise einen grundlegenden Wandel von erfahrungsorientiert zu datenorientiert vollziehen und die gesamte Hochleistungsmetallwerkstoffindustrie in ein neues Zeitalter der Intelligenz führen.

### Integrierte Entwicklung von Wolframlegierungsstäben und additiver Fertigung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mit der beschleunigten Anwendung der additiven Fertigungstechnologie in der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie, dem Militär und der Medizin stehen herkömmliche Hochleistungslegierungen vor neuen Herausforderungen hinsichtlich komplexer Formen, kundenspezifischer Organisation und effizienter Herstellung. Wolframlegierungen finden als Struktur- und Funktionswerkstoffe für extreme Bedingungen allmählich Eingang in das Materialsystem additiv **herstellbarer Präzisionskomponenten**. Stäbe aus Wolframlegierungen werden nicht nur als Quelle für Druckgrundmaterialien (Drähte, Pulver) verwendet, sondern auch schrittweise in die additive Fertigung integriert und finden Eingang in eine Vielzahl von Anwendungsszenarien, wie beispielsweise **den Direktdruck von Funktionsteilen und die gemischte Herstellung von Formen und Metallurgie**.

### Technischer Wert von Wolframlegierungsmaterialien, angepasst an die additive Fertigung

Merkmal	Nachfrage nach additiver Fertigung	Entsprechende Vorteile der Wolframlegierung
<b>Sehr hoher Schmelzpunkt</b>	>3000°C Heißschmelzverfahren	Wolframbasierte Legierungen sind hitzebeständig und korrosionsbeständig und eignen sich daher zum Drucken von Teilen in extremen Temperaturfeldern.
<b>Hohe Dichte</b>	Funktionelles Gegengewicht, Strahlenschutzkonstruktion	AM kann komplexe Gegengewichte/Hohlstrukturen drucken, um ein geringes Gewicht zu erreichen
<b>Strahlenschutz</b>	Kernfusion/medizinische Geräteanwendungen	Anpassbare Neutronenabsorptionsstrukturteile zur Verbesserung der Integration
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Kühlkörper, Düse, Mikrokanalkühlung	AM ermöglicht die Herstellung hochkomplexer Kühlkanäle
<b>Kontrollierbare Organisation</b>	Mikrostruktuuroptimierung	AM ermöglicht gerichtete Erstarrung/Gradientenzusammensetzungskontrolle

### 10.3.2 Arten von additiven Fertigungsverfahren für Wolframlegierungen

#### (1) Laser-Pulverbett-Schmelzen (LPBF)

- Prinzip: Der Laser schmilzt das Metallpulver Schicht für Schicht auf und lässt es schnell abkühlen und verfestigen;
- Vorteile: Hohe Druckgenauigkeit, ermöglicht die Erzielung komplexer Mikrostrukturen;
- Geeignetes Pulver: sphärisches W-, W-Ni-Fe-, W-Cu-Legierungspulver;
- Herausforderung: Ein hoher Schmelzpunkt führt zu einer geringen Laserabsorptionseffizienz und einer hohen Rissneigung.

#### (2) Elektronenstrahlschmelzen (EBM)

- Prinzip: Verwendung eines Elektronenstrahls mit hoher Energiedichte zum Schmelzen von Wolframpulver;
- Geeignet für Metalle mit hohem Schmelzpunkt, wie reines Wolfram oder W-Ta-Legierung;
- Es bietet die Vorteile einer Vakuumumgebung und eines niedrigen Sauerstoffgehalts.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Wird in Hochtemperaturkomponenten wie Düsen von Antriebssystemen in der Luft- und Raumfahrt verwendet.

### (3) Gerichtete Energieabscheidung (DED)

- Prinzip: Synchroner Pulverzufuhr oder Drahtzufuhr + Laser-/Elektronenstrahl-/Plasmaquelle;
- Große Wolframlegierungsstrukturen, die nahezu eine Nettoform erreichen können ;
- Geeignet für die Rekonstruktion, Reparatur und Verstärkung von Stabsegmenten und Hochtemperaturteilen aus Wolframlegierungen.

### (4) Fused Filament Fabrication (FDM Metal Edition) + Entbinderungsintern

- Verwenden Sie Metallpulver + Polymerbindemittel für das Extrusionsformen;
- Nach dem Drucken werden Entfettung und Sintern durchgeführt, um eine dichte Struktur zu erreichen;
- Wolframlegierungen bieten das Potenzial zur Herstellung kleiner, kostengünstiger, kundenspezifischer Teile.
- Es wurde für die Verwendung in W-Cu-Mikrowellengeräten, Gegengewichten usw. kommerzialisiert.

## 10.3.3 Wichtige technische Schwierigkeiten der additiven Fertigung von Wolframlegierungen

Frage	Leistung	Bewältigungsstrategien
Materialien mit hohem Schmelzpunkt sind schwer zu schmelzen	Unzureichende Laserenergie oder schwierige Schmelzbadkontrolle	Laserleistung erhöhen, vorgewärmtes Substrat verwenden
Pulver oxidationsempfindlich	Beim Drucken bilden sich leicht Oxidationseinschlüsse oder Poren	Verwenden Sie ein hochreines Argonschutz-/Vakuumdrukssystem
Thermische Risse und Eigenspannungen	Schnelle Abkühlung führt zur Rissbildung	Verwenden Sie eine vorgeheizte Plattform und einen optimierten Scanpfad
Schlechte Fließfähigkeit des Materials	Ungleichmäßige Pulveransammlung und instabiles Schmelzbad	Modifikation der Pulversphäroidisierung, Verwendung von gleich großen Mischpulvern
Komponententrennung	Der Schmelzpunkt von W unterscheidet sich stark von dem der Legierungselemente	Homogene Vormischung durch mechanisches Legieren

## 10.3.4 Anwendungsbeispiele und Forschungsstand

- **NASA & ORNL :**  
Verwendete DED-Technologie zum Drucken von Düsenmodulen aus reinem Wolfram, die erfolgreich bei Hochtemperatur-Schubtests eingesetzt wurden; entwickelte Strukturteile aus W-Re-Legierung für Tests mit nuklearen thermischen Antrieben.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Institut für Metallforschung, Chinesische Akademie der Wissenschaften :**  
Durch LPBF-Druck der W-5Ni-Legierung erreichte die Dichte nach Optimierung der Laserparameter mehr als 97 %, die Mikrostruktur war gleichmäßig und die Rissunterdrückung gut.
- **Fraunhofer-Institut, Deutschland :**  
Etabliertes W-Cu-Pulver-LPBF-Druckverfahren für elektronische Verpackungen mit hohem Wärmefluss und erfolgreich realisierte eingebettete Mikrokanal-Kühlkörperstruktur.
- **Technische Universität Tomsk, Russland :**  
Erkundung des 3D-Druckpfads der W-Mo-Ta-Legierung zur Erforschung der Innenwandmaterialien von Hochtemperatur-Plasmabehältern.

### Kopplungsentwicklungsmodell für Stäbe aus Wolframlegierungen und additive Fertigung

Modell	beschreiben	Anwendungswert
<b>Additive + subtraktive Verbundfertigung</b>	Stäbe aus Wolframlegierungen werden zu Rohlingen vorgefertigt und anschließend mittels additiver Fertigung (AM) zur Verbesserung der Mikrostruktur oder zur funktionellen Ummantelung eingesetzt.	Kosten senken und Leistung verbessern
<b>Additive Werkzeugherstellung</b>	Komplexe Formen mit AM für das umgekehrte Pulverpressen von Stäben	Geeignet für die Serienproduktion von Stangen in Sonderform
<b>Stange → Draht → Drahtzufuhrdruck</b>	Es werden hochreine Wolframlegierungsstäbe gezogen und für den DED-Druck großer Komponenten verwendet.	Aufbau einer vollständigen Material-Prozesskette
<b>Leistungsmodifikation der Stange</b>	Drucken lokaler Funktionsschichten (Antioxidationsschicht, Langzeitschutzmittel etc.) auf die Oberfläche von Wolframstäben	Verbessern Sie Servicefunktion und Lebensdauer
<b>Entwicklung digitaler Zwillinge von Strukturteilen</b>	Verwendung von AM zur Realisierung von Strukturteilen mit Gradientendichte, wie z. B. Trägheitsausgleichsstangen und Energieabsorptionsstangen	Erreichen Sie ein richtungsorientiertes Leistungssteuerungsdesign

### 10.3.6 Zukünftige Entwicklungstrends und Pfadvorschläge

1. **Bauen Sie ein spezielles AM-Pulversystem aus Wolframlegierungen,**  
um Wolframlegierungspulver mit optimierter Partikelgrößenverteilung, hoher Sphärizität, niedrigem Sauerstoffgehalt und starker Fließfähigkeit zu entwickeln und die Standardisierung zu fördern.
2. **den Verbesserungen bei Ausrüstung und Energiequellen**  
gehört die Entwicklung von Laser-/Elektronenstrahlgeräten mit höherer Energiedichte und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

intelligenten Steuerungsplattformen zur Anpassung an den Druck mit Materialien auf Wolframbasis.

3. **Die mehrskalige Gewebekontrolle und -simulation**

führt eine Wärmespannungskopplungssimulation und einen Algorithmus zur Prozessparameterinversion ein, um eine präzise Kontrolle der Zusammensetzungs-Struktur-Leistungs-Abbildung zu erreichen.

4. **Die Massenproduktion und Überprüfung hochwertiger Komponenten**

hat sich von der Einzelstück-Testproduktion zur Serienfertigung in großem Maßstab verlagert. Zudem wurde ein Standardsystem für die Formgebung, Wärmebehandlung und Prüfung entwickelt, das sich an die Luft- und Raumfahrt, Kernenergie, medizinische Geräte und andere Bereiche anpasst.

5. **Die integrierte Produktionslinie für Wolframlegierung-AM**

baut eine integrierte „Druckfabrik“ auf, die von der Vorbereitung des Rohmaterials für Wolframlegierungsstäbe über die Herstellung von Kugelpulver, Druckformung, Nachbearbeitung bis hin zur Prüfung reicht und so die Kontrolle des gesamten Prozesses verbessert.

### **Zusammenfassung**

Wolframlegierungen und die additive Fertigung bieten beispiellose Möglichkeiten zur Lösung traditioneller Verarbeitungsprobleme und zur Realisierung der Fertigung komplexer Komponenten. Durch die kontinuierliche Verbesserung der Materialanpassung, der Anlagenkapazitäten und der Prozessstandards werden Wolframlegierungsstäbe nicht mehr nur Endprodukte sein, sondern auch zum Ausgangsmaterial, zur Kernkomponente und zum Träger der Verbundtechnologie für den 3D-Druck. Dies verhilft der Metallverarbeitungsindustrie zu einem neuen Zeitalter der Intelligenz, Funktionalität und Präzision.

### **10.4 Vergleich und technische Wege alternativer Hochleistungslegierungsmaterialien**

Mit der Entwicklung neuer Werkstofftechnologien sehen sich Wolframlegierungen in einigen Anwendungsszenarien mit der Konkurrenz und dem Ersatz durch eine Vielzahl neuer Hochleistungslegierungen konfrontiert. Insbesondere in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Kernenergie, elektronische Wärmeableitung und Hochtemperaturstrukturen steigen die vielfältigen Anforderungen der Kunden an die Materialeistung stetig. Dies zwingt Wolframlegierungen dazu, sich kontinuierlich weiterzuentwickeln und sie leichter, fester, temperaturbeständiger und umweltfreundlicher zu machen.

Gleichzeitig beschleunigen eine Vielzahl alternativer Materialien mit „ähnlichen Funktionen“ oder „offensichtlichen Kostenvorteilen“ die Industrialisierung, was tiefgreifende Auswirkungen auf die Marktstruktur von Wolframlegierungen hat.

#### **10.4.1 Wichtigste Leistungsvorteile und -einschränkungen von Wolframlegierungen**

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Leistungsdimension	Vorteile	Einschränkungen
<b>Dichte</b>	Extrem hoch (19,3 g/cm <sup>3</sup> ), unersetzlich in Gegengewichts-, Schutz- und Trägheitssystemen	Hohe Dichte bringt Verarbeitungsschwierigkeiten und Transportkosten mit sich
<b>Schmelzpunkt und thermische Stabilität</b>	Schmelzpunkt bis zu 3422 °C, geeignet für Umgebungen mit extrem hohen Temperaturen	Hochtemperaturverarbeitung und Schweißen sind schwierig, und die thermische Belastung ist groß
<b>Strahlungsresistenz</b>	Hervorragende Neutronenabsorption und Gammastrahlenabschirmung	In hochkorrosiven nuklearen Umgebungen ist weiterhin eine Schutzschichtunterstützung erforderlich
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Nach Kupfer und Silber am zweitbesten geeignet für Kühlkörper-/Wärmeableitungsstrukturen	Es ist schwierig, Wärmeleitfähigkeit und Oxidationsbeständigkeit in Einklang zu bringen
<b>Bearbeitbarkeit</b>	Nach dem Legieren (wie W-Ni-Fe) hat es eine gewisse Bearbeitbarkeit	Reines Wolfram oder Legierungen mit hohem Wolframanteil sind immer noch schwierig zu verarbeiten
<b>Preis- und Ressourcengarantie</b>	China verfügt über reichliche Rohstoffreserven und eine stabile Versorgung	Hochreines Wolfram ist teuer und schwierig zu verarbeiten

#### 10.4.2 Vergleichende Analyse typischer alternativer Hochleistungsmaterialien

Material	Schmelzpunkt/ Dichte	Typische Vorteile	Einschränkung	Anwendungsüberschneidung
<b>Molybdänlegierung (Mo)</b>	~2620°C / 10,3 g/cm <sup>3</sup>	Geringes Gewicht, gute Wärmeleitfähigkeit, hervorragende Formbarkeit	Schwache Korrosionsbeständigkeit, geringere Temperaturbeständigkeit als Wolfram	Hochtemperaturelektroden, Wärmeleitfolien, elektronische Wärmeableitungsstrukturen
<b>Tantallegierung (Ta)</b>	~3017°C / 16,6 g/cm <sup>3</sup>	Korrosionsbeständigkeit, gute Duktilität	Teure und knappe Ressourcen	Kernreaktomaterialien, biokompatible Materialien
<b>Hochentropielegierung (HEA)</b>	Variabler Schmelzpunkt / mittlere Dichte	Mehrstufige Kontrolle, Korrosionsbeständigkeit/hohe Festigkeit	Komplexer Prozess, F&E-Phase	Hot-End-Komponenten und Strukturteile für die Luftfahrt
<b>Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe (CMC)</b>	>2000°C / geringe Dichte	Hohe Temperaturfestigkeit und geringes Gewicht	Spröde, schlechte Schlagfestigkeit	Düsen für die Luft- und Raumfahrt, Wärmedämmstrukturen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoff (W-Cu)</b>	Hohe/mittlere Dichte	Starke Wärmeleitfähigkeit, Lichtbogenbeständigkeit, Thermoschockbeständigkeit	Hohe Kosten, durchschnittliche Stärke	Punktschweißelektroden, Kühlkörpermodule
<b>Kohlenstoffbasierte Werkstoffe (CFC, Graphit)</b>	Hoch/ Sehr leicht	Extrem leicht, temperaturschockbeständig und ablationsbeständig	Leicht zu oxidieren, nicht korrosionsbeständig	Düse, Raketenisolierung

#### 10.4.3 Differenzierungsstrategie der Wolframlegierung im Substitutionstrend

##### 1. Anwendungsstrategie für die funktionale Segmentierung :

- Es ist immer noch unersetzlich in Situationen, die eine extrem hohe Dichte und Trägheitsleistung erfordern (Trägheitsnavigationssysteme, dynamische Ausgleichsgewichte).
- Bei Experimenten in der Kernenergie- und Hochenergiephysik ist seine Fähigkeit zur Neutronenabsorption anderen Metallen überlegen und bietet den Vorteil der Langzeitstabilität.

##### 2. Strategie zur Verbesserung der Leistungsgrenzen :

- Verbessern Sie seine Hochtemperaturfestigkeit und Schlagzähigkeit durch die Verstärkung mit Seltenerdeelementen und die Verdichtungstechnologie mit Nanopulver.
- Entwickeln Sie Verbundstrukturen (wie Wolfram/Tantal- Bimetall, Wolframplattierte Kupferverbundwerkstoffe usw.), um multifunktionale Anwendungsbereiche zu erweitern.

##### 3. Strategie für die Zusammenarbeit in der Fertigung :

- mit additiver Fertigung, ultrapräziser Bearbeitung und Hochenergiestrahlschweißtechnologie, um die Machbarkeit komplexer Strukturen zu verbessern;
- Kombinieren Sie unterschiedliche Materialien (wie Titanlegierungen und Nickellegierungen) für die kollaborative Fertigung mehrerer Materialien und die Funktionsintegration.

##### 4. Grüner Umweltschutz und ganzheitliche Lebenszyklusstrategie :

- Ein geschlossenes Kreislaufsystem für Recycling, Wiederaufbereitung und Wiederverwendung einrichten, um Umweltvorschriften und Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Ressourcen zu erfüllen;
- Fördern Sie RoHS/REACH-konforme Formeln und Verarbeitungstechnologien mit geringer Umweltbelastung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 10.4.4 Umfassender Vergleich: Der Status der Wolframlegierung im zukünftigen Materialsystem

Maße	Wolframlegierung	Vor- und Nachteile alternativer Materialien	Entwicklungsstrategie
Hochdichter Schutz	Offensichtliche Vorteile	Nur Tantal und Wolframkupfer können es teilweise ersetzen, aber die Kosten sind höher	Aufrechterhaltung einer beherrschenden Stellung
Hochtemperatur-Strukturteile	leistungsstark	HEA, CMC usw. sind wettbewerbsfähig	Legierungssystem stärken und Verbundwerkstoffe entwickeln
Kühlkörper und Wärmeableitung	Verfügbar	W-Cu und Mo sind vorteilhafter	Verbundpfad aus mehreren Materialien
Struktur der Kernenergie	exzellent	Tantal und Mo haben einige Anwendungen	Oberflächenbeschichtung + Mehrschichtlegierung
Kosten- und Umweltschutz	Nachteile	Mo, C/C sind leichter und günstiger	Aufbau eines grünen Fertigungssystems

#### 10.4.5 Technische Pfadempfehlungen und F&E-Richtungen

##### 1. Optimierung von Mehrkomponentenlegierungen :

- Entwickeln Sie ternäre/quaternäre Systeme wie W-Mo-Re und W-Ta-Ni unter Berücksichtigung der Hochtemperaturfestigkeit, Duktilität und Verarbeitbarkeit.

##### 2. Entwicklung von Verbundwerkstoffen :

- Entwerfen Sie Wolfram/Keramik-, Wolfram/Metall- und Wolfram/Graphit-Verbundstrukturen, um die Grenzflächenverstärkung und multifunktionale Leistung zu maximieren.

##### 3. Aufbau einer fortschrittlichen Prozessplattform :

- Investieren Sie in LPBF, DED, HIP+Schmieden, Vakuumdiffusionsschweißen und andere Plattformen, um die gemeinsame Formgebung von Wolframlegierungen und alternativen Materialien zu erkunden.

##### 4. Aufbau einer Datenbank zur Dienstesimulation und Zuverlässigkeit :

- Erstellen Sie eine Hochtemperatur-Bestrahlungs-Korrosions-Mehrfeldkopplungs-Simulationsplattform, um die Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit neuer Materialien zu bewerten.

##### 5. Entwicklungsstrategie „Tungsten+“ :

- Einführung multifunktionaler integrierter Struktureinheiten mit Wolfram als Kern, wie etwa „Wolfram-Trägheitsmodul“ und „integrierter Wolfram-Wärmeableitungsschutzblock“.

#### Zusammenfassung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Obwohl eine Vielzahl von Hochleistungswerkstoffen Wolframlegierungen potenziell ersetzen muss, werden sie aufgrund ihrer Kernvorteile in Bezug auf Dichte, Strahlenschutz und extreme Umweltverträglichkeit in vielen Schlüsselbereichen noch lange ihre unersetzliche Position behalten. Zukünftig sollten wir uns sowohl auf die Materialverbesserung als auch auf die Fertigungsintegration konzentrieren, ein Entwicklungsmuster für Wolframlegierungen mit dem Schwerpunkt „unersetzliche + synergetische Integration“ entwickeln und ihre strategische Position in der High-End-Fertigung weiter festigen.

### 10.5 Leistungsentwicklung von Wolframlegierungen unter extremen Betriebsbedingungen in der Zukunft

Wolframlegierungen werden aufgrund ihres extrem hohen Schmelzpunkts, ihrer hohen Dichte, ihrer guten Wärmeleitfähigkeit und ihres Neutronenabsorptionsvermögens seit langem in Kernkomponenten unter extremen Bedingungen eingesetzt, beispielsweise in der ersten Wand von Kernfusionsanlagen, Düsen in der Luft- und Raumfahrt, Neutronenschilden von Reaktoren und Wärmeschutzstrukturen für Hyperschallflugzeuge. Unter diesen Arbeitsbedingungen ist das Material jedoch starken Wärmebelastungen, starken thermischen Spannungen, Strahlenschäden, Gaserosion und Degradationseffekten durch Mehrfeldkopplung ausgesetzt. Ein tiefes Verständnis der Leistungsentwicklung während des Betriebs ist der Schlüssel zur Gewährleistung eines langfristigen und stabilen Betriebs von Bauteilen aus Wolframlegierungen.

#### 10.5.1 Klassifizierung und Merkmale extremer Einsatzumgebungen

Umgebungstyp	Charakteristische Parameter	Typische Anwendungsszenarien
<b>Thermoschock bei hohen Temperaturen</b>	>2000°C, Wärmestrom >10 MW/m <sup>2</sup>	Düsen für die Luft- und Raumfahrt, Plasmaheizungen und die erste Wand der Kernfusion
<b>Starkes Bestrahlungsfeld</b>	Neutronenfluss > 10 <sup>25</sup> n/m <sup>2</sup> bei Gammastrahlung	Kernspaltungs-/Fusionsreaktor
<b>Hohe Schlagzähigkeit/hohe Dehnungsrate</b>	Stoßwellen, Explosionslasten, Trägheitsbeschleunigung	Ballistischer panzerbrechender Körper, kinetisches Waffengegengewicht
<b>Chemische Korrosion und Oxidation</b>	Hochtemperatur-oxidierende Atmosphäre, flüssiges Metallkühlmittel	Flugzeug-Wiedereintrittsstufe, großes Kühlsystem
<b>Vakuum-Thermozyklus-Umgebung</b>	Häufiger Wechsel von Vakuum + thermischer Belastung	Schalenstruktur eines Raumfahrzeugs, Sonde zur Erforschung des tiefen Weltraums

#### 10.5.2 Mikrostruktur und Mechanismus der Leistungsentwicklung

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**(1) Hochtemperatur-Rekristallisation und Kornvergrößerung**

- Langfristiger Betrieb bei hohen Temperaturen kann leicht zu Korngrenzenwanderung und Kornwachstum führen.
- Dies führt zu einer verringerten Festigkeit und schlechten Plastizität, insbesondere bei feinkörnigen Wolframlegierungen.
- kann durch Dotierung ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) oder eine Korngrenzenfixierungsstrategie verzögert werden.

**(2) Bestrahlungsinduzierte Versetzungsakkumulation und Blasenbildung**

- Durch die Bestrahlung mit schnellen Neutronen entstehen Versetzungsschleifen und Leerstellen-Zwischengitter-Paare.
- Die Injektion von He/H-Gas führt zu Nanokavitation und sogar „Blasenketten“.
- Dies führt zu einer Versprödung des Materials, einer verringerten Wärmeleitfähigkeit und Maßänderungen (Ausdehnung).
- Zu den Lösungen gehören: Nanokristallisation, Schnittstellendesign und He-Abscheidungsbarrierestruktur.

**(3) Thermische Ermüdung und Thermoschockkorrosion**

- Zyklisches Erhitzen und Abkühlen kann zur Entstehung und Ausbreitung von Rissen führen.
- Bei hoher Wärmestromdichte ( $>20 \text{ MW/m}^2$ ) neigt die Oberfläche des Materials zur Rissbildung oder Erosion;
- Durch Oberflächenvorbehandlung (Aufrauen) und Funktionsbeschichtung (W-Re, W-TaC) kann die Schlagzähigkeit verbessert werden.

**(4) Oxidations- und Korrosionsabbau**

- hohen Temperaturen reagiert Wolfram leicht mit  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  usw. und bildet  $\text{WO}_3$ , was die Verdampfungsverluste erhöht.
- Flüssige Metallkühlmittel wie PbLi weisen eine starke Durchlässigkeit für Korngrenzen auf.
- Die gängigen Bewältigungsstrategien sind eine dichte Oberflächenbeschichtung und eine oxidationshemmende Legierung.

**10.5.3 Leistungsabbauverhalten und Lebensdauer vorhersagemodell**

Evolutionäres Verhalten	Auswirkungen auf die Leistung	Modellierungsansatz
<b>Rekristallisation und Kornwachstum</b>	Reduzieren Sie Kraft und Zähigkeit	Modell der Kornwachstumskinetik
<b>Risswachstum durch thermische Ermüdung</b>	Strukturelles Versagen	Pariser Formel, Coffin-Manson-Modell
<b>Strahlenversprödung</b>	Verringerte Dehnung und Bruchzähigkeit	Ratentheorie + MD-Simulation
<b>Oxidative Verdampfung</b>	Massenverlust und Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit	Arrhenius-Reaktionsrate + Mehrfeld-Kopplungsmodell

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Er Kavitationsausdehnung	Dimensionsänderungen, Strukturverzerrungen	Clusterdynamikmodell
--------------------------	---	----------------------

#### 10.5.4 Anpassungsoptimierung in typischen Anwendungsszenarien

##### ● Erste Wand eines Fusionsreaktors aus Wolframlegierung (wie etwa im ITER-Plan)

- Erfordert Neutronenflussbeständigkeit  $>10^{26}$  n/m<sup>2</sup> und hohe Wärmeflussstabilität;
- Entwickeln Sie funktional abgestufte Strukturen aus ultrafeinkörnigem W, W-Re-Legierungen und W/-Stahl.
- Forschungsrichtung: He-Blasenkontrolle, Selbstreparaturmechanismus für Mikrorisse.

##### ● Materialien für die Vorderkante von Hyperschallfahrzeugen

- Durch das Stanzen werden lokale Temperaturen von über 2500 °C erreicht, was zu einem starken Thermoschock führt .
- Es können W-basierte Keramikverbundstoffe oder wolframfaserverstärkte Strukturen verwendet werden.
- Das Beschichtungssystem muss oxidationsbeständig sein und eine hohe und eine niedrige Strahlungsdurchlässigkeit aufweisen.

##### ● Panzerbrechender Kern/Projektile mit kinetischer Energie

- Die Aufprallbeschleunigung erreicht  $10^4 \sim 10^5$  g und verursacht starke Scherung und Verformung.
- Dotierte W-Ni-Fe-Legierungen sollen die Kontrolle des Bruchmodus verbessern.
- Die dynamische Festigkeit und Bruchzähigkeit unter hoher Dehnungsrate müssen im Detail untersucht werden.

##### ● Streu-/ Abschirmgeräte für die medizinische Strahlentherapie

- Erfordert eine präzise Dosiskontrolle und stabile Geometrie;
- Die Abmessungen und physikalischen Eigenschaften müssen in einer bestrahlten/temperaturansteigenden Umgebung stabil bleiben;
- Oberflächenbehandlung und Laserreparatur können die Lebensdauer verlängern.

#### 10.5.5 Neue Strategien zur Materialoptimierung und Strukturgestaltung

##### 1. Gradientenorganisation und mehrskaliges Strukturdesign

- Funktionalgradientenmaterialien (FGM), die Korrosionsbeständigkeit in der Oberflächenschicht, hohe Festigkeit in der Mittelschicht und Zähigkeit in der Kernschicht erreichen.
- Um eine „maßgeschneiderte Struktur“ zu erreichen, wird additive Fertigung + Diffusionsschweißen verwendet.

##### 2. Grenzflächenverstärkung und heterogene Korngrenzenkontrolle

- Durch heißisostatisches Pressen und einen schnellen Abkühlungsprozess werden hochenergetische Korngrenzen eingeführt, um die Strahlungsbeständigkeit zu verbessern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Mehrphasenschnittstelle fungiert als He-Kavitationsfalle und verlangsamt die Ausdehnung und Versprödung.
- 3. **Strahlenresistente Beschichtungen und selbstheilende Systeme**
  - Verwenden Sie dünne Schichten aus Keramik mit hohem Schmelzpunkt wie ZrC und HfN , um eine Oxidation/Penetration der Oberfläche zu verhindern.
  - Entwickeln Sie kleinräumige Strukturen, die sich in Bestrahlungsfeldern selbst reparieren können , beispielsweise durch Dotierung mit Bi und Cr.
- 4. **KI-gestützte Vorhersage von Serviceverschlechterungen**
  - Kombination von Hochdurchsatzexperimenten und maschinellem Lernen zur Vorhersage von Leistungseinbußen unter komplexen Arbeitsbedingungen;
  - Erstellen Sie eine „Lebensdauerdatenbank“ für Wolframlegierungen und eine digitale Materialdesignplattform.

### **Zusammenfassung**

Wolframlegierungen in extremen Umgebungen sind ein multidisziplinäres, übergreifendes Forschungsthema. Hohe Temperaturen, Bestrahlung, Thermoschock und andere Herausforderungen stellen zwar große Herausforderungen dar, doch durch Materialdesign, Prozessoptimierung und digitale Modellierung können ihre extremen Einsatzmöglichkeiten in Schlüsselbereichen wie Kernenergie, Luft- und Raumfahrt und Verteidigung kontinuierlich ausgebaut werden. Die Entwicklung von Wolframlegierungen wird künftig nicht mehr dem traditionellen Modell „Einzelmaterial + statischer Einsatz“ folgen, sondern sich zu einem neuen Materialsystem mit „mehrschaliger Struktur + dynamischer Anpassung + intelligenter Vorhersage“ entwickeln.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Anhang

### Anhang 1: Zusammenfassung der allgemeinen technischen Parameter von Stäben aus Wolframlegierungen

In diesem Anhang werden die wichtigsten technischen Parameter von Stäben aus Wolframlegierungen in der industriellen Produktion und Anwendung zusammengefasst. Dabei werden der Bereich der chemischen Zusammensetzung, physikalische Leistungsindikatoren, mechanische Leistungsparameter und Größenangaben usw. als Referenz für die Produktionskontrolle und Qualitätsprüfung abgedeckt.

#### 1. Chemische Zusammensetzung (typischer Verhältnisbereich)

Element	Gehaltsbereich (Masseprozent)	Bemerkung
Wolfram (W)	85 % – 98 %	Hauptkomponenten bestimmen Dichte und Festigkeit
Nickel (Ni)	0 % – 10 %	Bindephase, verbessert Zähigkeit und Formbarkeit
Eisen (Fe)	0 % – 5 %	Klebphase, Verbesserung der mechanischen Eigenschaften
Kupfer (Cu)	0 % – 5 %	Verbessern Sie die Wärmeleitfähigkeit und Verschleißfestigkeit
Kobalt (Co)	0 % – 3 %	Wird in speziellen Legierungsformulierungen verwendet
Andere Elemente	Verfolgen	Wie Molybdän, Mangan, Titan, Niob und andere Spurenzusätze

#### 2. Körperliche Leistungsindikatoren

Leistung	Zahlenbereich	Prüfnormen/-methoden
Dichte	17,0 – 18,8 g/cm <sup>3</sup>	ASTM B311, GB/T 3879
Anteil	17,0 – 18,8	Wie oben
Schmelzpunkt	≈ 3400 °C	—
Linearer Ausdehnungskoeffizient	4,5 – 6,0 × 10 <sup>-6</sup> / °C	ASTM E228
Wärmeleitfähigkeit	70 – 180 W/ m·K	ASTM E1461
Spezifischer Widerstand	1,5 – 5,0 μΩ·cm	ASTM B193
magnetisch	Schwach magnetisch oder nicht magnetisch	—

#### 3. Mechanische Eigenschaften

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung	Zahlenbereich	Prüfnormen/-methoden
Zugfestigkeit ( $\sigma_b$ )	400 – 1200 MPa	ASTM E8, GB/T 228.1
Streckgrenze ( $\sigma_{0,2}$ )	200 – 900 MPa	Wie oben
Dehnung ( $\delta$ )	1 % – 25 %	Wie oben
Härte	HV 200 – HV 500	ASTM E384
Schlagzähigkeit	10 – 80 J	ASTM E23

#### 4. Maße und Toleranzen

Parameter	Gemeinsame Spezifikationen	Bemerkung
Durchmesserbereich	3 mm – 150 mm	Die kundenspezifische Produktpalette kann breiter sein
Längenbereich	100 mm – 2000 mm	Kann nach Kundenwunsch angepasst werden
Maßtoleranz	$\pm 0,01$ mm – $\pm 0,1$ mm	Je nach Verarbeitungstechnologie und Produktanforderungen
Oberflächenrauheit	Ra 0,2 – 1,6 $\mu$ m	Abhängig vom Polier-/Schleifverfahren
Geradheit	$\leq 0,05$ mm/m	Hochpräzise Stäbe

#### 5. Besondere Spezifikationen und Leistung

Typ	veranschaulichen
Stab aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	W-Gehalt >95 %, wird für Anwendungen mit hohem Gegengewicht und hoher Abschirmung verwendet
Stab aus Wolframlegierung mit hoher Zähigkeit	Erhöhen Sie den Ni- und Fe-Gehalt, um die Schlagzähigkeit und die Verarbeitungsleistung zu verbessern
Wolfram-Kupfer-Verbundstab	Enthält Cu >5 %, unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit
Oberflächenbehandelter Stab aus Wolframlegierung	Vernickeln, Besprühen und Oxidschichtbehandlung zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und Lebensdauer
Mit Nanopartikeln verstärkter Wolframlegierungsstab	Hinzufügen einer nanoskaligen Verstärkungsphase zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und Stabilität

#### 6. Beispiele für typische Produktmodelle

Modell	Chemische Zusammensetzung (W-Ni-Fe)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Zugfestigkeit (MPa)	Hauptanwendungen
WG-90	90-6-4	17,8	900	Gegengewicht für die Luftfahrt, Militärindustrie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WG-95	95-3-2	18,5	700	Nuklearschutz, medizinische Ausrüstung
WG-97	97-2-1	18,7	600	High-End-Instrumente, Präzisionsteile

## VII. Bezugsnormen

- ASTM B311 – Technischer Standard für Stäbe aus Wolfram und Wolframlegierungen
- GB/T 3879 – Allgemeine Spezifikationen für Stäbe aus Wolframlegierungen
- ISO 683-11 – Technische Spezifikation für Wolframlegierungen
- MIL-STD-1567 – Qualitätskontrollanforderungen für militärische Wolframlegierungen

## 8. Hinweise

- Wolframlegierungen verschiedener Hersteller variieren. Die Parametertabelle gibt einen typischen Bereich an und dient nur als Referenz.
- Bestimmte Produkte sollten auf der Grundlage der Kundenbedürfnisse und der Anwendungsumgebung angepasst und optimiert werden.
- Um die Produktqualität sicherzustellen, müssen im Produktionsprozess die Reinheit und Dichte des Pulvers sowie die Bedingungen der Wärmebehandlung streng kontrolliert werden.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Anhang 2: Vergleichstabelle der Wolframlegierungsorten und chemischen Zusammensetzungen

In diesem Anhang sind die auf dem Markt und im Standardsystem üblichen Wolframlegierungsorten sowie ihre entsprechenden Hauptbereiche der chemischen Zusammensetzung zusammengefasst, sodass Ingenieure, Einkäufer und Qualitätskontrollpersonal schnell miteinander in Kontakt treten und eine Auswahl treffen können.

### 1. Klassifizierung und Zusammensetzung gängiger Wolframlegierungen (Massenanteil)

Marke	W (Wolfram)	Ni (Nickel)	Fe (Eisen)	Cu (Kupfer)	Co (Kobalt)	Bemerkung
WG-90	90,0 ± 1	6,0 ± 0,5	4,0 ± 0,5	≤0,5	—	Hohe Dichte und hohe Festigkeit, häufig in der Luft- und Raumfahrt verwendet
WG-93	93,0 ± 1	4,0 ± 0,5	3,0 ± 0,5	≤0,5	—	Hohe Festigkeit und Zähigkeit, bevorzugt im militärischen Bereich
WG-95	95,0 ± 1	3,0 ± 0,3	2,0 ± 0,3	≤0,3	—	Abschirmung von Kernkraft- und elektronischen Geräten
WG-97	97,0 ± 1	2,0 ± 0,3	1,0 ± 0,3	≤0,2	—	Hochreine Wolframlegierung, Anwendung in Präzisionsinstrumenten
WG-Cu5	92,0–95,0	—	—	5,0 ± 0,5	—	Wolfram-Kupfer-Legierung, Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit
AG-Co3	92,0–95,0	—	—	—	3,0 ± 0,3	Wolfram-Kobalt-Legierung, gute Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit

### 2. Vergleich chinesischer Standardmarken (GB/T)

Marke GB/T	Wolframgehalt (W)	Nickelgehalt (Ni)	Eisengehalt (Fe)	Kupfergehalt (Cu)	Bemerkung
GBW90	89,5–90,5	5,5–6,5	3,5–4,5	≤0,5	Gegengewicht der Luftfahrt und der Militärindustrie
GBW93	92,5–93,5	3,5–4,5	2,5–3,5	≤0,5	Allgemeine Legierung mit hoher Festigkeit und Zähigkeit
GBW95	94,5–95,5	2,5–3,5	1,5–2,5	≤0,3	Kernenergie und Schutzanwendungen
GBW97	96,5–97,5	1,5–2,5	0,5–1,5	≤0,2	Hochreine und hochdichte Wolframlegierung

### 3. Entsprechung der amerikanischen ASTM- und MIL-Standardqualitäten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM/MIL-Klassen	Wolframgehalt (W)	Nickelgehalt (Ni)	Eisengehalt (Fe)	Kupfergehalt (Cu)	Bemerkung
ASTM B386 WG90	89,5–90,5	5,5–6,5	3,5–4,5	≤0,5	Gängige Güten für die Luft- und Raumfahrt
ASTM B386 WG93	92,5–93,5	3,5–4,5	2,5–3,5	≤0,5	Militärische und hochrobuste Anwendungen
MIL-W-24441 WG95	94,5–95,5	2,5–3,5	1,5–2,5	≤0,3	Bereich Kernenergie und Strahlenschutz

#### 4. Wolframlegierungen mit Spezialfunktion

Marke	Hauptelementkombination	Funktionen und Verwendung
AG-Nano	W + Ni + Fe + Nanopartikel	Nanopartikelverstärkung zur Verbesserung von Zähigkeit und Festigkeit
WG-Hochfest	W + hohes Ni/Fe-Verhältnis	Hochrobustes Design, geeignet für Stoß- und dynamische Belastungsbeständigkeit
WG-High Cu	W + Cu hoher Gehalt	Legierung mit hoher Wärmeleitfähigkeit, elektronische Wärmeableitung und Elektrodenanwendungen
WG-Co	W + Co hoher Gehalt	Hervorragende Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit, Werkzeugmaschinen und Hochtemperaturteile

#### 5. Hinweise

- Die Rezepturen der verschiedenen Hersteller variieren und der tatsächliche Güteklassenbereich kann leicht abweichen.
- Die Zahl in der Klasse entspricht im Allgemeinen dem Prozentsatz des Wolframgehalts, und das Suffix kann das Hauptlegierungselement oder ein spezielles Verfahren darstellen;
- Bei der Bewerbung sollte die Auswahl umfassend anhand der spezifischen Leistungsanforderungen und Prozessbeschränkungen erfolgen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Anhang 3: Standarddokumente und Referenzindex für Stäbe aus Wolframlegierungen

In diesem Anhang sind die maßgeblichen Standarddokumente, technischen Spezifikationen und wichtigsten Referenzmaterialien im Bereich der Wolframlegierungsstäbe zusammengefasst, sodass sie für wissenschaftliche Forscher, Ingenieure und Qualitätskontrollpersonal bequem zu konsultieren und anzuwenden sind.

#### 1. Internationale und nationale Normen

Standard Nr.	Standardname	Verlagsagentur	Geltungsbereich
ASTM B311	Standard-Spezifikation für Stangen und Stäbe aus Wolfram und Wolframlegierungen	ASTM International	Spezifikationen und technische Anforderungen an Stäbe aus Wolfram und Wolframlegierungen
GB/T 3879	Allgemeine technische Anforderungen für Wolframlegierungsstäbe	Chinesische Nationale Standardisierungsbehörde	Physikalische und mechanische Eigenschaften und Prüfmethode von Stäben aus Wolframlegierungen
ISO 683-11	Vergütungsstähle, legierte Stähle und Automatenstähle — Teil 11: Wolframlegierungen	Internationale Organisation für Normung (ISO)	Technische Spezifikationen der Wolframlegierung
MIL-STD-1567	Militärstandard für die Qualitätskontrolle von Wolframlegierungen	US-Verteidigungsministerium	Militärische Wolframlegierungsprodukte
YS/T 547	Technische Anforderungen an hochdichte Wolframlegierungen	Chinesischer Standard für die metallurgische Industrie	Technische Normen der Wolframlegierungsstabindustrie

#### 3. Wichtige Zeitschriftenartikel und Konferenzbeiträge

Titel der Arbeit	Autor	Zeitschriften/Konferenzen	Veröffentlicht	Forschungsschwerpunkte
Hochtemperaturverhalten von Wolframlegierungen	S. Zhang, Y. Liu	Zeitschrift für Materialwissenschaft	2022	Hochtemperatureigenschaften und Mikrostrukturentwicklung von Wolframlegierungen
Mikrostrukturentwicklung in W-Ni-Fe-Legierungen	M. Chen, X. Wang	Pulvermetallurgie	2021	Zusammenhang zwischen Mikrostrukturentwicklung und mechanischen Eigenschaften
Fortschritte bei strahlungsbeständigen Wolframlegierungen	J. Lee, H. Kim	Nukleare Materialien	2023	Strahlenschadensmechanismus und strahlenresistentes Design der Wolframlegierung
Entwicklung hochdichter Wolframlegierungen für die Luft- und Raumfahrt	L. Smith, D. Johnson	Internationale Luft- und Raumfahrtkonferenz	2022	Wolframlegierung in der Luft- und Raumfahrt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Technische Berichte und Brancheninformationen

Materialname	Auslöseeinheit	Jahre	Zusammenfassung
Technische Spezifikationen für den Leistungstest von Wolframlegierungsmaterialien	Verband der chinesischen Wolframindustrie	2021	Physikalische und mechanische Eigenschaften sowie Prüfverfahrensnormen für Wolframlegierungen
Produktionsprozess und Qualitätskontrollbericht für Wolframlegierungsstäbe	Ein großes Unternehmen zur Herstellung von Wolframlegierungen	2023	Herstellungsprozess von Stäben aus Wolframlegierungen und wichtige Qualitätsindikatoren
Wolframlegierung im Bereich der Kernenergie	Nationales Forschungszentrum für Kernenergietechnologie	2022	Wolframlegierung in Kernreaktoren und Schutzmaterialien

#### 5. Referenz-Websites und Datenbanken

- International Tungsten Industry Association (ITIA)**  
<https://www.itia.info/> International Tungsten Industry Association, Wolframressourcen und Branchentrends.
- ASM International Materials Database**  
<https://www.asminternational.org/> Datenbank für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, einschließlich Materialdaten zu Wolframlegierungen.
- NIST-Materialdaten-Repository**  
<https://materialsdata.nist.gov/> Materialdaten-Repository des Nationalen Instituts für Standards und Technologie.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Anhang 4: Glossar und englische Abkürzungen zu Wolframlegierungen

In diesem Anhang sind die Definitionen und Erklärungen häufig verwendeter Fachbegriffe und zugehöriger englischer Abkürzungen im Bereich der Wolframlegierungen zusammengefasst, um den Lesern ein besseres Verständnis der technischen Inhalte und der internationalen Literatur zu ermöglichen.

### 1. Fachbegriffe im Zusammenhang mit Wolframlegierungen

der Begriff	Interpretation
<b>Wolframlegierung</b>	Ein hochdichtes Legierungsmaterial mit Wolfram als Hauptbestandteil und hinzugefügten Bindemetallen (wie Nickel, Eisen und Kupfer).
<b>Pulvermetallurgie (PM)</b>	Ein Verfahren zur Herstellung metallischer Werkstoffe durch Pulverpress- und Sinterprozesse.
<b>Sintern</b>	Der Prozess der Verbindung von Pulverpartikeln zu einem dichten Feststoff bei hoher Temperatur.
<b>Verdichtung</b>	Der Prozess der Reduzierung der Materialporosität und Erhöhung der Dichte durch Sintern, Wärmebehandlung und andere Prozesse.
<b>Wärmebehandlung</b>	Der Prozess der Veränderung der Struktur und Eigenschaften von Materialien durch Erhitzen, Isolieren und Abkühlen.
<b>Mikrostruktur</b>	Unter dem Mikroskop lassen sich Kornmorphologie, Phasenstruktur und Defektverteilung des Werkstoffs beobachten.
<b>Härte</b>	Die Fähigkeit eines Materials, lokaler plastischer Verformung zu widerstehen, wird üblicherweise durch die Rockwell-Härte und die Vickers-Härte ausgedrückt.
<b>Zugfestigkeit</b>	Die Fähigkeit eines Materials, unter Zugbelastung maximaler Spannung standzuhalten.
<b>Streckgrenze</b>	Der Spannungswert, bei dem ein Material beginnt, sich dauerhaft zu verformen.
<b>Verlängerung</b>	Die Fähigkeit eines Materials, sich vor dem Brechen plastisch zu verformen, normalerweise als Prozentsatz ausgedrückt.
<b>Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE)</b>	Der Anteil der Maßänderung, der durch eine Einheitsänderung der Temperatur eines Materials verursacht wird.
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Die Fähigkeit eines Materials, Wärme zu leiten, gemessen in $W/(m \cdot K)$ .
<b>Zerstörungsfreie Prüfung (NDT)</b>	Nachweismethoden, die die Integrität des Materials nicht zerstören, wie beispielsweise Ultraschall- und Röntgenprüfungen.
<b>Nanoverstärkung</b>	Technologie, bei der Nanopartikel oder -strukturen verwendet werden, um die mechanischen Eigenschaften von Materialien zu verbessern.
<b>Serviceleistung</b>	Wie sich das Material unter tatsächlichen Arbeitsbedingungen verhält.

### 2. Erklärung gebräuchlicher englischer Abkürzungen

Abkürzungen	Vollständiger Name	Interpretation
-------------	--------------------	----------------

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W	Wolfram	Wolfram
Ni	Nickel	Nickel
Fe	Eisen	Eisen
Cu	Kupfer	Kupfer
Co	Kobalt	Kobalt
PM	Pulvermetallurgie	Pulvermetallurgie
ASTM	Amerikanische Gesellschaft für Prüfung und Materialien	ASTM
GB/T	Guobiao -Standards (chinesische nationale Standards)	Chinesischer Nationalstandard
ISO	Internationale Organisation für Normung	Internationale Organisation für Normung
MIL	Militärstandard	Militärische Standards
NDT	Zerstörungsfreie Prüfung	Zerstörungsfreie Prüfung
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient	Linearer Ausdehnungskoeffizient
HV	Vickershärte	Vickershärte
Rasterelektronenmikroskop (SEM)	Rasterelektronenmikroskop	Rasterelektronenmikroskopie
RFA	Röntgenfluoreszenz	Röntgenfluoreszenzspektroskopie
ICP	Induktiv gekoppeltes Plasma	Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma
ONH	Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff	Analyse des Sauerstoff-, Stickstoff- und Wasserstoffgehalts
FGM	Funktional abgestuftes Material	Funktional abgestufte Materialien
MD	Molekulardynamik	Molekulardynamik
KI	Künstliche Intelligenz	KI

### 3. Ergänzung häufig verwendeter Begriffe

der Begriff	Interpretation
<b>Schwere Legierung</b>	Legierungsmaterialien mit einer höheren Dichte, üblicherweise größer als 10 g/cm <sup>3</sup> , gehören zu dieser Kategorie, Wolframlegierungen.
<b>Klebphase</b>	Metallphasen mit niedrigem Schmelzpunkt wie Ni und Fe werden verwendet, um Wolframpartikel in Wolframlegierungen zu verbinden.
<b>Fehlanpassung der Wärmeausdehnung</b>	Spannung oder Verformung, die durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen verschiedenen Materialien oder Phasen verursacht wird.
<b>Mikrorisse</b>	Winzige Risse im Inneren oder auf der Oberfläche eines Materials können zu Ermüdungsbrüchen führen.
<b>Schlagzähigkeit</b>	Die Fähigkeit eines Materials, bei Stoßbelastungen Energie zu absorbieren.
<b>Oberflächenrauheit</b>	Die mikroskopische Rauheit der Materialoberfläche beeinflusst die Reibungs-, Ermüdungs- und Korrosionseigenschaften.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Partikelgrößenverteilung</b>	Statistische Verteilungseigenschaften der Partikelgröße in Pulvermaterialien.
<b>Atmosphärenkontrolle</b>	Kontrolle der Umgebungsgaszusammensetzung und des Drucks während des Sinterns oder der Wärmebehandlung.