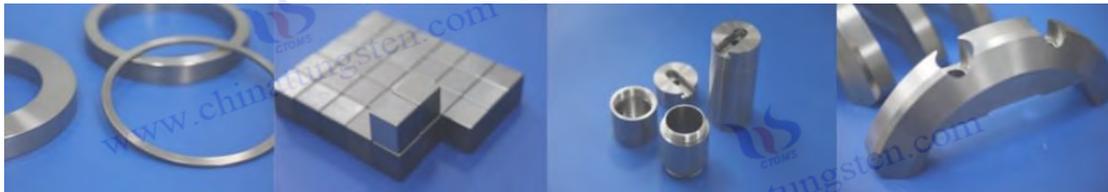


# Enzyklopädie der Wolfram-Schwerlegierungen

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)

## 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)

## Inhaltsverzeichnis

### Kapitel 1: Einführung

- 1.1 Definition und Überblick über hochdichte Wolframlegierungen
- 1.2 Bedeutung der Forschung und Anwendung hochdichter Wolframlegierungen
- 1.3 Zweck und Aufbau dieses Buches

### Kapitel 2: Grundkenntnisse über Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

- 2.1 Chemische und physikalische Eigenschaften von Wolframlegierungen mit hoher Dichte
- 2.2 Historische Entwicklung hochdichter Wolframlegierungen
- 2.3 Vergleich von hochdichten Wolframlegierungen mit anderen Materialien
- 2.4 Klassifizierung schwerer Wolframlegierungen
  - 2.4.1 Klassifizierung nach Zusammensetzung (W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Ni-Fe-Co usw.)
  - 2.4.2 Klassifizierung basierend auf Dichte und mechanischen Eigenschaften (Klasse 1 ~ Klasse 4)
  - 2.4.3 Klassifizierung nach Verwendungszweck (Militär, Luft- und Raumfahrt, Medizin, Industrie usw.)

### Kapitel 3: Leistungsanalyse von hochgewichtigen Wolframlegierungen

- 3.1 Mechanische Eigenschaften einer Wolframlegierung mit hoher Dichte
- 3.2 Physikalische Eigenschaften einer Wolframlegierung mit hoher Dichte
- 3.3 Hauptelemente und ihre Funktionen schwerer Wolframlegierungen
- 3.4 Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit schwerer Wolframlegierungen
- 3.5 Strahlenschutzfähigkeit schwerer Wolframlegierungen
- 3.6 Methoden zur Leistungsoptimierung schwerer Wolframlegierungen

### Kapitel 4: Herstellungstechnologie für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

- 4.1 Auswahl und Vorbehandlung von Rohstoffen aus hochdichten Wolframlegierungen
- 4.2 Pulvermetallurgieverfahren für hochdichte Wolframlegierungen
- 4.3 Andere Herstellungsverfahren für hochdichte Wolframlegierungen
- 4.4 Einfluss der Prozessparameter der hochdichten Wolframlegierung
- 4.5 Qualitätskontrolle und Prüfung von hochdichten Wolframlegierungen

### Kapitel 5: Verarbeitung und Nachbearbeitung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

- 5.1 Bearbeitungstechnologie für hochdichte Wolframlegierungen
- 5.2 Oberflächenbehandlung von hochdichter Wolframlegierung
- 5.3 Schweißen und Verbinden von hochdichten Wolframlegierungen

### Kapitel 6: Produktionsanlagen für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

- 6.1 Ausrüstung zur Herstellung von schwerem Wolframlegierungspulver
- 6.2 Schwere Wolframlegierungsformgeräte
- 6.3 Sinteranlage für schwere Wolframlegierungen
- 6.4 Ausrüstung zur Verarbeitung und Nachbearbeitung schwerer Wolframlegierungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 Auswahl und Optimierung der Produktionsanlagen für schwere Wolframlegierungen

## **Kapitel 7: Prüfgeräte für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht**

7.1 Dichteprüfgerät für hochdichte Wolframlegierungen

7.2 Prüfgerät für die mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungen mit hoher Dichte

7.3 Geräte zur Mikrostrukturanalyse von Wolframlegierungen mit hoher Dichte

7.4 Geräte zur Analyse der Zusammensetzung von Wolframlegierungen mit hoher Dichte

7.5 Zerstörungsfreie Prüfgeräte für hochdichte Wolframlegierungen

7.6 Auswahl und Entwicklungstrend von Prüfgeräten für hochdichte Wolframlegierungen

## **Kapitel 8: Hauptprodukte der hochspezifischen Wolframlegierung der CTIA GROUP LTD**

### **8.1 Gegengewichtsprodukte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht**

8.1.1 Gegengewicht aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht für die Luft- und Raumfahrt

8.1.2 Gegengewicht aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht für Kraftfahrzeuge

8.1.3 Gewichte für Sportgeräte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

8.1.4 Schiffsgegengewichte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

8.1.5 Aufzugsgegengewicht aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

8.1.6 Schwerer Dartschaft aus Wolframlegierung

8.1.7 Schwere Angelbleie aus Wolframlegierung

### **8.2 Militärprodukte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht**

8.2.1 Schwerer panzerbrechender Kern aus Wolframlegierung

8.2.2 Schutzpanzerplatte aus Wolframlegierung mit hoher Dichte

8.2.3 Munitionsschutzgehäuse aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

8.2.4 Komponenten für Panzerabwehrraketen aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte

8.2.5 Gegengewichte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht für Schusswaffen

8.2.6 Gegengewicht für Luftfahrt-Gyroskope aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

8.2.7 Schwere Raketendüsenbuchse aus Wolframlegierung

### **8.3 Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht – Medizinprodukte**

8.3.1 Strahlenschutzkomponenten aus schweren Wolframlegierungen

8.3.2 Behälter für schwere Wolfram-Isotope

8.3.3 Medizinische Nadel aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

8.3.4 Strahlentherapieziel aus hochdichter Wolframlegierung

8.3.5 Medizinischer Schutzschirm aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

8.3.6 Schwerer Atommüllbehälter aus Wolframlegierung

8.3.7 Schwere Wolframlegierungs-Gamma-Knife-Komponenten

### **8.4 Schwere Wolframlegierung Industrielle Werkzeuge und Komponenten**

8.4.1 Schwere Schneidwerkzeuge aus Wolframlegierungen

8.4.2 Form und Stempel aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.4.3 Schwere Schwingungsdämpfungsteile aus Wolframlegierung
- 8.4.4 Bohrwerkzeuge aus hochdichter Wolframlegierung
- 8.4.5 Schwere Lagerkomponenten aus Wolframlegierungen
- 8.4.6 Schwere Schleifhülse aus Wolframlegierung
- 8.4.7 Schwere Gegengewichte aus Wolframlegierung für schwere Werkzeugmaschinen

### **8.5 Schwere Wolframlegierungen für Elektronik und Energieprodukte**

- 8.5.1 Elektrodenmaterialien aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte
- 8.5.2 Kühlkörper (Kühler) aus hochdichter Wolframlegierung
- 8.5.3 Kernreaktorkomponenten aus schwerer Wolframlegierung
- 8.5.4 Gegengewicht für Batterien aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht
- 8.5.5 Komponenten für Solaranlagen aus schweren Wolframlegierungen
- 8.5.6 Anodentarget aus schwerer Wolframlegierung für Röntgenröhren
- 8.5.7 Gegengewicht für Windturbinen aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

### **8.6 Kundenspezifische Produkte aus schwerer Wolframlegierung**

- 8.6.1 Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht 3D-Druck von Wolframlegierungsteilen
- 8.6.2 Gegengewicht aus Wolframlegierung mit hoher spezifischer Dichte und Sonderform
- 8.6.3 Kunstwerke und Dekorationsstücke aus hochdichter Wolframlegierung
- 8.6.4 Komponenten eines Versuchsinstruments aus schwerer Wolframlegierung
- 8.6.5 Mikropräzisionsteile aus Wolframlegierung mit hoher Dichte
- 8.6.6 Kryptowährung aus schwerer Wolframlegierung
- 8.6.7 Bankkarte aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

## **Kapitel 9: Anwendungsgebiete von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht**

### **9.1 Anwendung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht in der Luft- und Raumfahrt**

- 9.1.1 Gegengewichts- und Ausgleichskomponenten für Flugzeuge
- 9.1.2 Komponenten des Antriebssystems von Raumfahrzeugen
- 9.1.3 Gyroskop und Trägheitsnavigationssystem

### **9.2 Anwendung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht in der Militärindustrie**

- 9.2.1 Panzerbrechende Projektile und Projektilkerne mit kinetischer Energie
- 9.2.2 Schutzpanzerung und Abschirmmaterialien
- 9.2.3 Raketen- und Schusswaffenkomponenten
- 9.2.4 Explosiv geformte Projektile (EFP)

### **9.3 Anwendung schwerer Wolframlegierungen im medizinischen Bereich**

- 9.3.1 Strahlenschutz und -abschirmung
- 9.3.2 Strahlentherapie- und Isotopenbehälter
- 9.3.3 Chirurgische Instrumente und Implantate

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### **9.4 Anwendung schwerer Wolframlegierungen in der Industrie und im zivilen Bereich**

- 9.4.1 Zerspanungswerkzeuge
- 9.4.2 Gegengewichte für schwere Geräte
- 9.4.3 Automobil- und Rennsportindustrie
- 9.4.4 Sport- und Unterhaltungsgeräte

#### **9.5 Anwendung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht im Bereich Elektronik und Energie**

- 9.5.1 Wärmeableitung und Abschirmung elektronischer Geräte
- 9.5.2 Komponenten der Kernenergie und erneuerbarer Energien
- 9.5.3 Halbleiter- und mikroelektronische Bauelemente

#### **9.6 Anwendung schwerer Wolframlegierungen in neuen Bereichen 9.6.1 Anwendung der additiven Fertigung (3D-Druck)**

- 9.6.2 Weltraumforschung und Tiefseeforschung
- 9.6.3 Entwicklung von Hochentropielegierungen und Verbundwerkstoffen

#### **Kapitel 10: Nationale und internationale Normen für schwere Wolframlegierungen**

- 10.1 Internationale Normen für schwere Wolframlegierungen
- 10.2 Nationale Normen für schwere Wolframlegierungen
- 10.3 Inhalt und Anforderungen der Normen für schwere Wolframlegierungen
- 10.4 Vergleich nationaler und internationaler Normen für schwere Wolframlegierungen
- 10.5 Entwicklungstrend der Normen für schwere Wolframlegierungen
- 10.6 CTIA GROUP LTD Sicherheitsdatenblatt für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

#### **Kapitel 11: Umwelt- und Wirtschaftsaspekte bei schweren Wolframlegierungen**

- 11.1 Umweltauswirkungen des Produktionsprozesses schwerer Wolframlegierungen
- 11.2 Recycling und Wiederverwendung von schweren Wolframlegierungen
- 11.3 Kostenanalyse der schweren Wolframlegierung

#### **Kapitel 12: Forschungsgrenzen hochdichter Wolframlegierungen**

- 12.1 Entwicklung neuer Werkstoffe aus hochdichten Wolframlegierungen
- 12.2 Hinweise zur Verbesserung der Leistung von hochdichten Wolframlegierungen
- 12.3 Simulation und rechnergestützte Materialwissenschaft von hochdichten Wolframlegierungen
- 12.4 KI-gestütztes Design und Anpassung von hochdichten Wolframlegierungen
- 12.5 Zusammenhang zwischen hochdichten Wolframlegierungen und wolframhaltigen Hochentropielegierungen
- 12.6 Wolframlegierung mit geringer Toxizität (Ni-frei oder Ni-arme Legierung)
- 12.7 Nanostrukturierte Wolframlegierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Anhang**

Glossar schwerer Wolframlegierungen

Referenzen für schwere Wolframlegierungen

Datenblatt zu schwerer Wolframlegierung

Patente im Zusammenhang mit Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

en.com

www.chinatungsten.com

www.ch

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 1: Einführung

### Definition und Übersicht über schwere Wolframlegierungen

Eine hochdichte Wolframlegierung ist, wie der Name schon sagt, ein Verbundwerkstoff aus Wolfram (W) als Hauptbestandteil und einer geringen Menge anderer Metallelemente (wie Nickel (Ni), Eisen (Fe), Kupfer (Cu) usw.), die durch ein spezielles Verfahren hinzugefügt werden. Diese Art von Legierung ist für ihre extrem hohe Dichte bekannt (normalerweise zwischen 17,0 und 19,3 g/cm<sup>3</sup>, nahe den 19,25 g/cm<sup>3</sup> von reinem Wolfram) und übertrifft damit herkömmliche Metalle wie Stahl (7,8 g/cm<sup>3</sup>) oder Blei (11,3 g/cm<sup>3</sup>) bei weitem. Ihre Hauptmerkmale sind nicht nur die hohe Dichte, sondern auch ihre hervorragende mechanische Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit und gute Strahlenschutzfähigkeit, was ihr einen unersetzlichen Anwendungswert in vielen Bereichen verleiht.

Chemisch betrachtet enthalten hochdichte Wolframlegierungen üblicherweise 85–99 % Wolfram. Der Rest sind Bindephasenelemente (wie Nickel und Eisen) oder Ersatzelemente (wie Kupfer). Diese zusätzlichen Elemente werden mit Wolframpulver vermischt, gepresst und pulvermetallurgisch gesintert, um eine gleichmäßige Mikrostruktur zu bilden. Die Bindephase verbessert die Zähigkeit und Bearbeitbarkeit der Legierung, da reines Wolfram trotz seiner extrem hohen Dichte zu hart und spröde ist, um den tatsächlichen Verarbeitungs- und Anwendungsanforderungen gerecht zu werden. Durch eine optimierte Formel behalten hochdichte Wolframlegierungen nicht nur die Dichteigenschaften von Wolfram bei, sondern verbessern auch seine mechanischen Eigenschaften. Dies macht sie zu einem fortschrittlichen, funktionalen und praktischen Werkstoff.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In der Materialwissenschaft gelten schwere Wolframlegierungen als Kombination aus Funktions- und Strukturwerkstoffen. Ihre hohe Dichte prädestiniert sie für Anwendungen, die geringes Volumen und hohes Gewicht erfordern, wie beispielsweise Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt und militärische Panzerungskerne. Gleichzeitig eignen sie sich aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Stabilität für extreme Umgebungen, wie beispielsweise Strahlenschutz oder Hochtemperatur-Bearbeitungswerkzeuge in der Nuklearindustrie. Diese Vielseitigkeit hat schweren Wolframlegierungen eine wichtige Stellung in der modernen Industrie und Technologie eingebracht und sie gelten als „die besten Schwermetalle“.

Historisch betrachtet begann die Entwicklung hochdichter Wolframlegierungen mit der Forschung an Wolframwerkstoffen zu Beginn des 20. Jahrhunderts, insbesondere mit der Nachfrage nach leistungsstarken militärischen Werkstoffen während des Zweiten Weltkriegs, die den technologischen Fortschritt förderte. Mit der kontinuierlichen Verbesserung von Herstellungsverfahren (wie Flüssigphasensintern, heißisostatisches Pressen usw.) und der Ausweitung der Anwendungsgebiete haben sich hochdichte Wolframlegierungen heute von ihrem ursprünglichen militärischen Einsatzbereich auf medizinische, industrielle und zivile Bereiche sowie in aufstrebende wissenschaftliche und technologische Bereiche ausgeweitet und sind zu einem wichtigen Forschungs- und Anwendungsgebiet der Materialwissenschaften geworden.

## **1.2 Die Bedeutung der Forschung und Anwendung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht**

Hochdichte Wolframlegierungen haben weitreichende wissenschaftliche Bedeutung und praktischen Nutzen, der sich in vielen Aspekten widerspiegelt. Aus wissenschaftlicher Sicht sind hochdichte Wolframlegierungen ein Modell für die Erforschung metallbasierter Verbundwerkstoffe. Durch die Anpassung des Wolfram-Element-Verhältnisses und die Optimierung des Herstellungsprozesses lässt sich der Zusammenhang zwischen Eigenschaften wie Dichte, Festigkeit und Zähigkeit systematisch erforschen. Diese Forschung fördert nicht nur die theoretische Weiterentwicklung der Materialwissenschaften, sondern liefert auch wertvolle Erfahrungen für die Entwicklung anderer Hochleistungslegierungen. Beispielsweise wurde die Mikrostrukturkontrolltechnologie hochdichter Wolframlegierungen (wie Korngrößenoptimierung und gleichmäßige Phasenverteilung) in die Forschung zu Hochentropielegierungen und Nanomaterialien übernommen.

Im industriellen Bereich verbessert der Einsatz hochdichter Wolframlegierungen direkt die Effizienz und Sicherheit vieler Branchen. In der Luft- und Raumfahrt beispielsweise ermöglichen die hohen Dichteigenschaften den Gegengewichtskomponenten von Flugzeugen und Raumfahrzeugen eine präzise Massenverteilung auf begrenztem Raum und optimieren so Flugleistung und Treibstoffeffizienz. In der Militärindustrie können panzerbrechende Geschosse aus schweren Wolframlegierungen moderne Panzerungsmaterialien effektiv durchdringen und dank ihrer hohen Härte und Dichte die Kampfkraft von Waffensystemen verbessern. Darüber hinaus machen ihre hohe Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit sie zur idealen Wahl für Hochtemperatur-Verarbeitungswerkzeuge und Tiefseeausrüstung. Sie verlängern die Lebensdauer der Ausrüstung deutlich und senken die Wartungskosten.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Anwendung im medizinischen Bereich unterstreicht den gesellschaftlichen Wert hochdichter Wolframlegierungen. Aufgrund ihrer hervorragenden Strahlenabschirmung werden hochdichte Wolframlegierungen häufig in Abschirmkomponenten von Röntgen-, CT- und Strahlentherapiegeräten eingesetzt. Im Vergleich zu herkömmlichen Bleiwerkstoffen sind Wolframlegierungen ungiftig und weisen eine höhere Dichte auf. Sie bieten gleichwertigen oder sogar besseren Schutz bei geringerem Volumen, reduzieren das Gewicht der Geräte und verbessern die Sicherheit von Patienten und medizinischem Personal. Darüber hinaus werden hochdichte Wolframlegierungen auch zur Herstellung von Behältern für medizinische Isotope und Gamma-Knife-Komponenten verwendet, um den sicheren Transport und die präzise Behandlung radioaktiver Stoffe zu gewährleisten und die Entwicklung moderner Medizintechnik zu fördern.

Im zivilen Bereich ist die Anwendung hochdichter Wolframlegierungen unverzichtbar. Beispielsweise ersetzt ihr Einsatz in Sportgeräten (wie Golfschlägergewichten, Dartstangen) und Angelgewichten giftige Bleimaterialien, was nicht nur die Produktleistung verbessert, sondern auch den Umweltschutzanforderungen entspricht. Diese breite Durchdringung von der Industrie bis zur zivilen Nutzung spiegelt das Potenzial hochdichter Wolframlegierungen zur Verbesserung der Lebensqualität und zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung wider.

Aus wirtschaftlicher Sicht haben die Forschung, Entwicklung und Anwendung hochdichter Wolframlegierungen die Entwicklung verwandter Industriezweige vorangetrieben, darunter Wolframbergbau, Herstellung von Pulvermetallurgieanlagen und Präzisionsverarbeitungstechnologie. Insbesondere angesichts der weltweit steigenden Nachfrage nach Hochleistungswerkstoffen bieten hochdichte Wolframlegierungen hervorragende Marktaussichten und bieten Unternehmen und Ländern erhebliche wirtschaftliche Vorteile. Die hohen Produktionskosten und die Ressourcenabhängigkeit (Wolfram ist ein seltenes Metall) haben Forscher jedoch dazu veranlasst, kontinuierlich effizientere Produktionsprozesse und Recyclingtechnologien zu erforschen, um eine Win-Win-Situation für Wirtschaft und Umwelt zu schaffen.

### 1.3 Zweck und Aufbau dieses Buches

Dieses Buch bietet eine umfassende und systematische Einführung in das relevante Wissen zu hochdichten Wolframlegierungen – von der Grundlagentheorie bis zur praktischen Anwendung, von der Produktionstechnologie bis zur zukünftigen Entwicklung. Es soll den Lesern fundiertes und detailliertes Referenzmaterial bieten. Zu den Hauptzielen gehören:

Erstens bietet es theoretische Unterstützung für akademische Forscher. Dieses Buch untersucht eingehend die chemischen und physikalischen Eigenschaften, Herstellungsverfahren und Methoden zur Leistungsoptimierung von hochdichten Wolframlegierungen, hilft Forschern, die Beziehung zwischen ihrer Mikrostruktur und ihren makroskopischen Eigenschaften zu verstehen und bietet Anregungen für die Entwicklung neuer Materialien auf Wolframbasis. Zweitens ist es ein praktischer Leitfaden für Ingenieure und technisches Personal. Durch die detaillierte Vorstellung von Produktionsanlagen, Prüftechnologien und spezifischen Produktanwendungen soll dieses Buch Praktikern helfen, die Verarbeitungs- und Anwendungsfertigkeiten von hochdichten Wolframlegierungen zu meistern und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Effizienz der industriellen Produktion zu verbessern. Drittens bietet es strategische Referenz für Entscheidungsträger und Manager in der Industrie. Durch die Analyse nationaler und internationaler Normen, Umweltauswirkungen und wirtschaftlicher Aspekte zeigt dieses Buch die Entwicklungstrends und Herausforderungen der Branche für hochdichte Wolframlegierungen auf und bietet eine Grundlage für politische Entscheidungen und Investitionsentscheidungen.

Die Zielgruppe dieses Buches umfasst unter anderem Wissenschaftler und Studierende der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Ingenieure in der Herstellung und Verarbeitung von Wolframlegierungen, technische Experten in der Luft- und Raumfahrt- und Rüstungsindustrie, Hersteller medizinischer Geräte sowie Praktiker mit Interesse an Hochleistungswerkstoffen. Um den unterschiedlichen Leserbedürfnissen gerecht zu werden, berücksichtigt die inhaltliche Gestaltung dieses Buches sowohl theoretische Tiefe als auch Anwendungsbreite und bietet eine systematische Übersicht über Grundlagenwissen und aktuelle Forschungsergebnisse.

Das Buch ist wie folgt gegliedert:

**Kapitel 2 bis Kapitel 5** : Legen Sie den Grundstein, stellen Sie das Grundwissen, die Leistungsanalyse, die Vorbereitungstechnologie sowie die Verarbeitungs- und Nachbearbeitungstechnologie für hochdichte Wolframlegierungen vor und schaffen Sie einen umfassenden theoretischen Rahmen für die Leser.

**Kapitel 6 bis Kapitel 7** : Der Schwerpunkt liegt auf Produktion und Prüfung. Die Produktions- und Prüfgeräte für hochdichte Wolframlegierungen werden im Detail erläutert, wobei die Hardwareunterstützung für die technische Umsetzung hervorgehoben wird.

**Kapitel 8 bis Kapitel 9** : Was die Anwendungen betrifft, werden die Hauptprodukte und breiteren Anwendungsfelder von [China Tungsten Intelligence aufgelistet](#), um den tatsächlichen Wert der hochdichten Wolframlegierung zu veranschaulichen.

**Kapitel 10 bis 11** : Konzentrieren Sie sich auf Normen und Auswirkungen, analysieren Sie nationale und internationale Standards sowie ökologische und wirtschaftliche Aspekte und liefern Sie Hintergrundinformationen zur Industrialisierung.

**Kapitel 12** : Mit Blick auf die Zukunft erörtert dieses Dokument die Forschungsgrenzen hochdichter Wolframlegierungen, einschließlich der übergreifenden Forschung zu KI-gestütztem Design und hochentropischen Legierungen.

**Anhang** : Bietet ein Glossar, Referenzen und Datentabellen, um dem Leser das Nachschlagen und die eingehende Recherche zu erleichtern.

Durch diese Struktur bietet dieses Buch einen umfassenden Überblick über hochdichte Wolframlegierungen – von der Theorie bis zur Praxis, von der Technologie bis zur Anwendung, von der aktuellen Situation bis zur Zukunft. Egal, ob Sie neu auf diesem Gebiet sind oder Ihre Forschung vertiefen möchten – dieses Buch ist Ihr zuverlässiger Partner bei der Erkundung der Welt der hochdichten Wolframlegierungen.

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

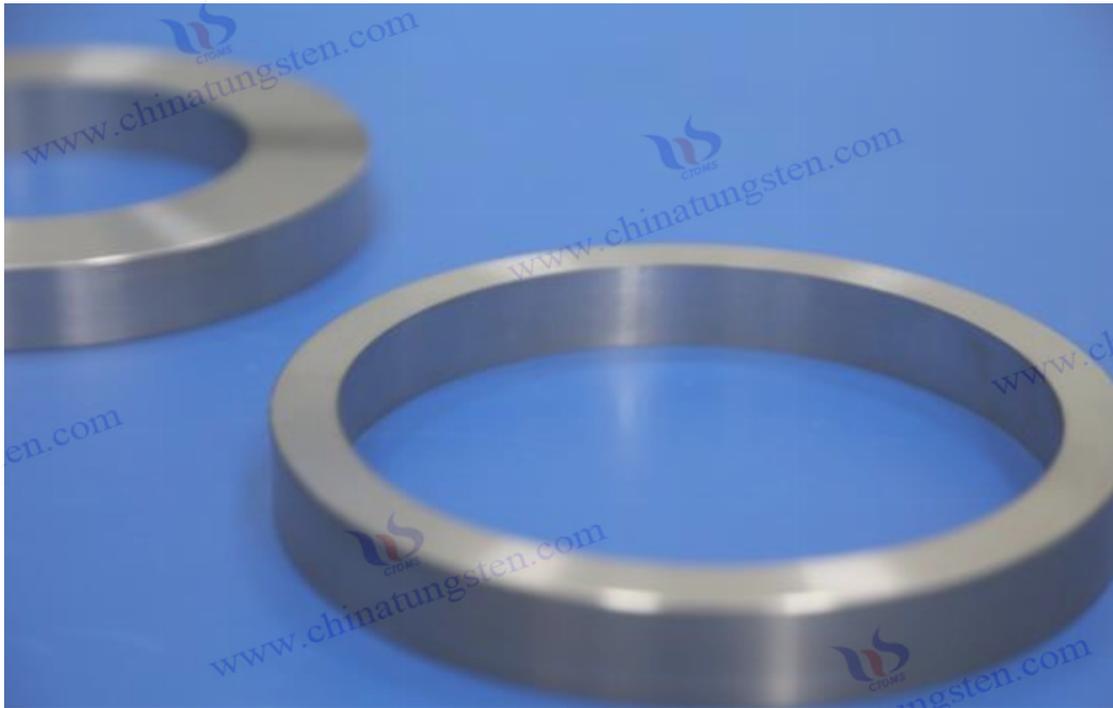
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 2: Grundkenntnisse über Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

### Chemische und physikalische Eigenschaften schwerer Wolframlegierungen

Wolframlegierungen mit hoher Dichte bilden die Grundlage für ihre breite Anwendung in der modernen Industrie und Technik. Diese Eigenschaften sind nicht nur auf die hervorragenden Eigenschaften des Wolframs selbst zurückzuführen, sondern profitieren auch von der Optimierung des Legierungsprozesses. Aus Sicht der chemischen Zusammensetzung werden Wolframlegierungen mit hoher Dichte hauptsächlich von Wolfram (W) gebildet. Der Wolframgehalt liegt üblicherweise zwischen 85 % und 99 %. Der Rest ist eine geringe Menge an Bindephase oder Zusatzelementen, einschließlich Nickel (Ni), Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Kobalt (Co) oder Molybdän (Mo). Wolfram ist ein Übergangsmetall der sechsten Periode des Periodensystems mit der Ordnungszahl 74 und einer Atommasse von 183,84 u. Es verfügt über einen extrem hohen Schmelzpunkt (3422 °C) und ist chemisch stabil. Seine elektronische Konfiguration ( $[Xe] 4f^1 5d^4 6s^2$ ) bestimmt seine hohe Dichte und Härte, während zugesetzte Elemente wie Nickel und Eisen die Sprödigkeit von Wolfram durch Bildung fester Lösungen oder intermetallischer Verbindungen (wie  $Ni_3Fe$ ) deutlich verbessern. In einer typischen Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung (W-Ni-Fe) beispielsweise beträgt der Wolframgehalt 90–97 % und das Verhältnis von Nickel zu Eisen beträgt normalerweise 7:3 oder 5:5. Durch dieses Verhältnis entsteht während des Sinterprozesses eine flüssige Phase, die die gleichmäßige Bindung der Wolframpartikel fördert und die Zähigkeit der Legierung verbessert. Andererseits wird Wolfram-Kupfer-Legierung (W-Cu) aufgrund der hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Kupfer häufig in elektronischen Geräten verwendet. Der Wolframgehalt beträgt im Allgemeinen 70–90 %, um Dichte und thermische Eigenschaften auszugleichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aus physikalischer Sicht ist die Dichte der schweren Wolframlegierung ihr größter Vorteil. Sie liegt zwischen 17,0 und 19,3 g/cm<sup>3</sup> und damit nahe an den 19,25 g/cm<sup>3</sup> von reinem Wolfram. Diese hohe Dichte ist auf die kubisch-raumzentrierte (BCC) Kristallstruktur und die hohe Atommasse von Wolfram zurückzuführen, die eine äußerst effiziente Atomanordnung pro Volumeneinheit ermöglichen. Beispielsweise kann die Dichte der Legierung W-90Ni-7Fe-3 18,5 g/cm<sup>3</sup> erreichen und ist damit deutlich höher als bei Stahl (7,85 g/cm<sup>3</sup>), Aluminium (2,7 g/cm<sup>3</sup>) und Blei (11,34 g/cm<sup>3</sup>) und nur geringfügig niedriger als bei reinem Wolfram. Diese Eigenschaft macht sie unersetzlich für Anwendungen, die geringe Größe und hohe Qualität erfordern, wie z. B. Gegengewichte in der Luftfahrt oder panzerbrechende Kerne. Obwohl der Schmelzpunkt schwerer Wolframlegierungen aufgrund der Zugabe von Elementen niedriger ist als der von reinem Wolfram, liegt er dennoch zwischen 2500 und 3000 °C. Beispielsweise liegt der Schmelzpunkt der W-95Ni-Fe-Legierung bei etwa 2800 °C und ist damit immer noch deutlich höher als bei Stahl (~1500 °C) und Blei (327 °C). Daher eignet sie sich hervorragend für Hochtemperaturumgebungen.

Schwere Wolframlegierungen weisen sowohl eine hohe Festigkeit als auch eine mittlere Zähigkeit auf. Ihre Zugfestigkeit liegt je nach Zusammensetzung und Verfahren üblicherweise zwischen 700 und 1200 MPa. Beispielsweise kann die Zugfestigkeit der Legierung W-90Ni-7Fe-3 1000 MPa erreichen, während die der Legierung W-95Ni-Cu etwas niedriger sein kann, bei etwa 800 MPa. Ihre Härte (Vickershärte, HV) liegt zwischen 300 und 500 HV und ist damit niedriger als bei reinem Wolfram (350–650 HV), aber deutlich höher als bei Blei (~5 HV). Im Vergleich zur Sprödigkeit von reinem Wolfram (Dehnung <1 %) ist die Duktilität von Wolframlegierungen hoher Dichte mit einer Dehnung von 10–30 % dank des plastischen Effekts der Bindephase (z. B. Ni-Fe) deutlich verbessert. Beispielsweise weist die Legierung W-93Ni-Fe im Zugversuch eine Dehnung von 20 % auf und ist dadurch weniger anfällig für Brüche unter dynamischen Belastungen wie Explosionen. Darüber hinaus ist ihre Verschleißfestigkeit und Ermüdungsbeständigkeit hervorragend. Die Verschleißrate ist etwa 30 bis 50 % niedriger als bei Stahl, was für eine lange Lebensdauer in Schneidwerkzeugen und Bohrgeräten spricht.

Die thermischen und elektrischen Eigenschaften sind ein weiterer wichtiger Aspekt von hochdichten Wolframlegierungen. Ihre Wärmeleitfähigkeit liegt zwischen 80 und 150 W/(m·K) und ist damit niedriger als bei reinem Wolfram (173 W/(m·K)) und Kupfer (400 W/(m·K)), aber höher als bei Stahl (~50 W/(m·K)). Beispielsweise kann die Wärmeleitfähigkeit der W-80Cu-Legierung 140 W/(m·K) erreichen, was sie für den Einsatz als Kühlkörper für elektronische Geräte geeignet macht. Ihr spezifischer Widerstand beträgt etwa 5,5 bis 7,0 μΩ·cm und ist damit etwas höher als bei Kupfer (1,68 μΩ·cm) und reinem Wolfram (5,5 μΩ·cm), weist aber dennoch eine gute Leitfähigkeit auf und eignet sich als Elektrodenmaterial. Besonders hervorzuheben ist ihre Strahlenabschirmung. Aufgrund ihrer hohen Ordnungszahl (Z=74) und Dichte absorbiert Wolfram Röntgen- und Gammastrahlen äußerst effizient. Beispielsweise kann die W-95Ni-Fe-Legierung mit einer Dicke von nur 1 cm etwa 90 % der Gammastrahlen abschirmen, was Blei gleicher Dicke (etwa 70 %) bei weitem übertrifft. Außerdem ist sie ungiftig und daher ein bevorzugtes Material für die Medizin- und Nuklearindustrie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolfram selbst weist bei Raumtemperatur eine extrem hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber Säuren, Basen und Sauerstoff auf, reagiert kaum mit Salzsäure und Schwefelsäure und löst sich in stark oxidierenden Medien (wie konzentrierter Salpetersäure) nur langsam auf. Schwere Wolframlegierungen besitzen diese Eigenschaft, ihre Korrosionsbeständigkeit nimmt jedoch durch die Zugabe von Nickel und Eisen leicht ab. Beispielsweise beträgt der Massenverlust einer W-Ni-Fe-Legierung nach 100-stündigem Eintauchen in Salzsäure weniger als 0,5 %, in Salpetersäure kann er jedoch 2–3 % erreichen. Im Gegensatz dazu weist eine W-Cu-Legierung aufgrund des Kupfergehalts eine bessere Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit und Meerwasser auf, und ihre Korrosionsrate in der Meeresumwelt beträgt nur ein Zehntel der von Stahl. Diese Eigenschaften ermöglichen es schweren Wolframlegierungen, in einer Vielzahl chemischer Umgebungen stabil zu bleiben.

Um die Leistungsfähigkeit anschaulich zu demonstrieren, vergleicht die folgende Tabelle die Hauptparameter einer Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht mit Stahl, Blei und reinem Wolfram:

Leistungsparameter	Schwere Wolframlegierung	Stahl (unlegierter Kohlenstoffstahl)	führen	Reines Wolfram
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	17,0-19,3	7,85	11.34	19.25
Schmelzpunkt (°C)	2500-3000	~1500	327	3422
Zugfestigkeit (MPa)	700-1200	400-1000	~15	900-1500
Härte (HV)	300-500	120-250	~5	350-650
Dehnung (%)	10-30	20-40	>50	<1
Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))	80-150	~50	35	173
Spezifischer Widerstand (μΩ·cm)	5,5-7,0	~15	20	5.5
Korrosionsbeständigkeit	Gut (nicht oxidierende Umgebung)	Mittel (leicht zu rosten)	Gut (säurebeständig)	Exzellente
Strahlenschutzfähigkeit	Exzellente	Arm	Gut	Exzellente

Hinweis: Bei den Daten in der Tabelle handelt es sich um typische Bereiche. Die genauen Werte können je nach Zutaten und Verfahren variieren.

### Historische Entwicklung schwerer Wolframlegierungen

Die Entwicklung hochdichter Wolframlegierungen war ein langer Prozess von der grundlegenden Entdeckung über die industrielle Anwendung bis hin zur technologischen Innovation, der das kontinuierliche Streben der Menschheit nach Hochleistungsmaterialien widerspiegelt. Die Entdeckung von Wolfram begann im späten 18. Jahrhundert. 1781 vermutete der schwedische Chemiker Carl Wilhelm Scheele die Existenz von Wolfram durch Zersetzung von Wolframat (CaWO<sub>4</sub>). 1783 gewannen die spanischen Brüder Juan José und Fausto Eljuar erstmals metallisches Wolfram durch Reduktion von Wolframoxid (WO<sub>3</sub>). Sie nannten es „Wolfram“ (vom deutschen „Wolfsschaum“), weil sein Erz oft mit Zinn vergesellschaftet ist und beim Schmelzen Schaum entsteht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aufgrund der rückständigen metallurgischen Technologie lag Wolfram in der Anfangszeit in Form von Pulver oder Verbindungen vor und konnte nicht zu Massenmaterialien verarbeitet werden, was seine Anwendung einschränkte.

Im 19. Jahrhundert, mit dem Fortschreiten der Industriellen Revolution, erweiterte sich die Anwendung von Wolfram schrittweise. 1847 entwickelte der britische Wissenschaftler Robert Oxland ein Verfahren zur Herstellung von Natriumwolframat und legte damit den Grundstein für die industrielle Wolframproduktion. Ende des 19. Jahrhunderts ermöglichten Lichtbogenöfen und die Pulvermetallurgie die Wolframverarbeitung. 1904 verwendete die US-amerikanische General Electric Company erstmals Wolframfäden in Glühlampen anstelle von Kohlefäden. Aufgrund des hohen Schmelzpunkts und der hohen Haltbarkeit verlängerte sich die Lebensdauer der Lampen deutlich. Dieser Durchbruch markierte den Übergang von Wolfram aus dem Labor in die Industrie. Die Sprödigkeit von reinem Wolfram erschwerte jedoch weiterhin die Erfüllung komplexerer Anforderungen.

Hochdichte Wolframlegierungen kamen Anfang des 20. Jahrhunderts aufgrund militärischer Anforderungen auf. Im Ersten Weltkrieg (1914–1918) wurde Wolfram aufgrund seiner hohen Härte zur Herstellung von Schneidwerkzeugen und Panzerstahl (wie beispielsweise deutschem Wolframstahl) verwendet. Die schwierige Verarbeitung von reinem Wolfram veranlasste Wissenschaftler jedoch, Legierungsmethoden zu erforschen. In den 1930er Jahren versuchten deutsche Metallurgen erstmals, Wolfram mit Nickel und Eisen zu mischen, um durch Pulvermetallurgie Wolframlegierungen herzustellen. Die typische Formel dieser Zeit ist W-90Ni-10 mit einer Dichte von etwa  $17 \text{ g/cm}^3$ , einer Härte von etwa 300 HV und einer deutlich verbesserten Zähigkeit im Vergleich zu reinem Wolfram. Der Zweite Weltkrieg (1939–1945) wurde zu einem Wendepunkt in der Entwicklung schwerer Wolframlegierungen. In den 1940er Jahren entwickelte das US-Militär die Legierung W-90Ni-7Fe-3 für den panzerbrechenden Kern des M1-Panzers. Ihre Dichte ( $18,5 \text{ g/cm}^3$ ) und Durchschlagskraft übertrafen den damaligen Stahlkern bei weitem und verbesserten die Zerstörungskraft gegen deutsche Panzer deutlich. Die Technologie dieser Zeit basierte hauptsächlich auf Pressen und Hochtemperaturesintern. Obwohl das Verfahren einfach war, legte es den Grundstein für moderne hochdichte Wolframlegierungen.

Nach dem Krieg förderten das Wettrüsten und die zivile Industrialisierung während des Kalten Krieges die Weiterentwicklung von Wolframlegierungen mit hoher Dichte. In den 1950er und 1960er Jahren begann man in der Luft- und Raumfahrt, die Vorteile der hohen Dichte zu nutzen, beispielsweise bei den Gyroskop-Gegengewichten des US-amerikanischen Kampfflugzeugs F-15 und den Ausgleichsblöcken der ersten NASA-Satelliten, die eine Dichte von über  $18 \text{ g/cm}^3$  benötigten. Zur gleichen Zeit entdeckte man in der Medizin das Strahlenschutzpotenzial von Wolfram. Ab den späten 1950er Jahren fand die Legierung W-95Ni-Fe Verwendung in Abschirmkomponenten von Röntgengeräten und ersetzte nach und nach Blei. In den 1970er Jahren steigerte die ausgereifte Flüssigphasensinter-technologie die Dichte von Legierungen von 95 % auf über 99 %. Beispielsweise konnte die Porosität der Legierung W-93Ni-Fe auf unter 0,5 % gesenkt und die Leistungskonstanz deutlich verbessert werden, was die Produktion im großen Maßstab förderte.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts konzentrierte sich die Forschung und Entwicklung hochdichter Wolframlegierungen auf Leistungsoptimierung und Umweltschutz. Nach dem Jahr 2000 wurde die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nanotechnologie in die Herstellung von Wolframpulver eingeführt, wodurch die Korngröße von Mikrometern auf 50–100 nm reduziert wurde. Dadurch erhöhte sich die Zugfestigkeit der W-95Ni-Fe-Legierung von 1000 MPa auf 1200 MPa. Der Aufstieg der 3D-Drucktechnologie (wie selektives Lasersintern) ermöglichte die Herstellung komplex geformter Wolframlegierungsteile, wie beispielsweise speziell geformter Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt. Aufgrund der Bedenken hinsichtlich der Bleitoxizität wurde die W-90Ni-Cu-Legierung im zivilen Bereich (z. B. für Angelgewichte und Golfschlägergewichte) gefördert. Ihr Marktanteil stieg von 5 % im Jahr 2000 auf über 30 % im Jahr 2020. Die Forschung zu hochdichten Wolframlegierungen konzentriert sich heute auf KI-gestütztes Design und dessen Kombination mit Hochentropielegierungen. Ihre historische Entwicklung zeugt nicht nur vom technologischen Fortschritt, sondern spiegelt auch die enge Verzahnung von Materialwissenschaft und gesellschaftlichen Bedürfnissen wider.

### 2.3 Vergleich zwischen Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht und anderen Materialien

Wolframlegierungen mit hoher Dichte haben ihren Platz unter vielen anderen Materialien, aber ihre Vorteile und Nachteile müssen durch einen detaillierten Vergleich mit anderen Materialien verstanden werden. Im Folgenden finden Sie eine systematische Analyse von Wolframlegierungen mit hoher Dichte mit Stahl (gewöhnlichem Kohlenstoffstahl), Blei, Titanlegierungen (Ti-6Al-4V) und reinem Wolfram anhand von sechs Dimensionen: Dichte, mechanische Eigenschaften, thermische Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit, Verarbeitbarkeit und Kosten.

Der Hauptvorteil hochdichter Wolframlegierungen liegt in ihrer **Dichte**. **Sie liegt zwischen 17,0 und 19,3 g/cm<sup>3</sup> und damit nahe an reinem Wolfram (19,25 g/cm<sup>3</sup>). Sie übertrifft Stahl (7,85 g/cm<sup>3</sup>), Titanlegierungen (4,51 g/cm<sup>3</sup>) und Blei (11,34 g/cm<sup>3</sup>) deutlich. Beispielsweise beträgt die Dichte der W-95Ni-Fe-Legierung 18,5 g/cm<sup>3</sup>, während Stahl bei gleichem Volumen nur 40 % ihres Gewichts ausmacht.** Dies macht sie unersetzlich in Szenarien, die hohes Gewicht und geringes Volumen erfordern, wie z. B. bei Gegengewichten in der Luftfahrt und panzerbrechenden Kernen. Stahl- und Titanlegierungen eignen sich hingegen besser für Leichtbaukonstruktionen, während Blei aufgrund seiner Toxizität nur begrenzt verwendet werden kann.

**Mechanische Eigenschaften** : Die Zugfestigkeit von Wolframlegierungen mit hoher Dichte (700–1.200 MPa) liegt in derselben Größenordnung wie die von Stahl (400–1.000 MPa) und Titanlegierungen (ca. 1.100 MPa), ist jedoch viel höher als die von Blei (~15 MPa) und etwas niedriger als die von reinem Wolfram (900–1.500 MPa). Die Härte (300–500 HV) ist ebenfalls besser als die von Stahl (120–250 HV) und Blei (~5 HV), jedoch niedriger als die von reinem Wolfram (350–650 HV). Die Dehnung (10–30 %) ist erheblich besser als die von reinem Wolfram (<1 %) und liegt nahe an der von Stahl (20–40 %) und Titanlegierungen (10–15 %), wodurch die Sprödigkeit von reinem Wolfram ausgeglichen wird. Beispielsweise hält die W-90Ni-Fe-Legierung in einem Schlagversuch einer Energie von 50 J/cm<sup>2</sup> stand, während reines Wolfram nur 5 J/cm<sup>2</sup> aushält. Dieses Gleichgewicht aus Festigkeit und Zähigkeit macht sie zuverlässiger bei dynamischen Belastungen, während die sehr geringe Festigkeit von Blei seine strukturellen Anwendungen einschränkt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Thermische Eigenschaften** , Die Wärmeleitfähigkeit von schwerer Wolframlegierung (80 – 150 W/(m·K)) ist niedriger als die von reinem Wolfram (173 W/(m·K)) und Kupfer (400 W/(m·K)), aber höher als die von Stahl (~50 W/(m·K)) und Blei (35 W/(m·K)). Ihr Schmelzpunkt (2500 – 3000 °C) ist weitaus höher als der von Stahl (~1500 °C), Blei (327 °C) und Titanlegierung (~1660 °C) und wird nur von reinem Wolfram (3422 °C) übertroffen. Beispielsweise beträgt die Wärmeleitfähigkeit der W-80Cu-Legierung 140 W/(m·K), was sie für Kühlkörperanwendungen geeignet macht, während Stahl bei hohen Temperaturen leicht weich wird und Blei vollständig schmilzt.

**Korrosionsbeständig : Hochdichte Wolframlegierungen weisen eine gute Leistung in nichtoxidierenden Umgebungen auf. Beispielsweise beträgt der Massenverlust nach 1.000 Stunden Eintauchen in 10%ige Salzsäure weniger als 1 % und ist damit besser als bei Stahl (rostet leicht, Verlustrate ca. 20 %) und Blei (säurebeständig, aber nicht alkalibeständig, Verlustrate ca. 5 %). Titanlegierungen (hervorragende Korrosionsbeständigkeit, Verlustrate <0,1 %) und reines Wolfram (nahezu korrosionsfrei) schneiden etwas besser ab. W-Cu-Legierungen weisen jedoch eine gute Leistung in Meerwasser auf und korrodieren nur 1/15 der Stahlqualität, was sie für den Schiffsbau geeignet macht.**

**Die Zerspanbarkeit** ist ein wesentlicher Vorteil schwerer Wolframlegierungen. Reines Wolfram weist eine hohe Härte und Sprödigkeit auf und erfordert daher Hochtemperaturschmieden oder Spezialwerkzeuge für die Verarbeitung, was teuer ist. Schwere Wolframlegierungen werden durch Bindephasen (wie Ni-Fe) optimiert und können durch Drehen und Fräsen bearbeitet werden. Die Bearbeitungsschwierigkeit ähnelt der von Stahl (leicht zu schneiden), ist aber immer noch höher als die von Titanlegierungen (mittel) und Blei (sehr leicht zu bearbeiten). Beispielsweise kann die Schnittgeschwindigkeit der W-90Ni-Fe-Legierung 50 m/min erreichen, während die von reinem Wolfram nur 10 m/min beträgt.

**Kosten** : Wolframlegierungen mit hoher Dichte kosten etwa 30.000 bis 50.000 US-Dollar pro Tonne und sind damit deutlich teurer als Stahl (ca. 500 US-Dollar/Tonne) und Blei (ca. 2.000 US-Dollar/Tonne), vergleichbar mit Titanlegierungen (ca. 30.000 US-Dollar/Tonne), aber günstiger als reines Wolfram (ca. 60.000 US-Dollar/Tonne). Grund dafür ist die Tatsache, dass Wolfram ein seltenes Metall ist (die weltweiten Reserven betragen ca. 3,5 Millionen Tonnen, hauptsächlich in China konzentriert) und die Herstellung komplex ist (Pulvermetallurgie, Sintern). Dadurch sind Wolframlegierungen in Bereichen mit hoher Wertschöpfung (wie der Luftfahrt und Medizin) wirtschaftlicher, in Anwendungen mit niedrigerem Preisniveau kann es jedoch durch Stahl ersetzt werden.

Generell zeichnet sich hochdichte Wolframlegierung durch ihre umfassende Leistungsfähigkeit in Bezug auf Dichte, Festigkeit, Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Verarbeitbarkeit aus. Sie gleicht die Sprödigkeit von reinem Wolfram und die Toxizität von Blei aus, überwindet die Einschränkungen von Stahl- und Titanlegierungen in hochdichten Szenarien und bietet eine solide Grundlage für die nachfolgende Prozessgestaltung und Anwendungsauswahl.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Klassifizierung schwerer Wolframlegierungen

hoher Dichte (HDTA) sind Legierungen mit Wolfram (W) als Hauptbestandteil (der Gehalt beträgt in der Regel 85 % bis 97 %). Aufgrund ihrer hohen Dichte, ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften und ihrer guten Korrosionsbeständigkeit werden sie häufig in den Bereichen Militär, Luft- und Raumfahrt, Medizin, Elektronik und Industrie eingesetzt. Nach verschiedenen Klassifizierungsmethoden lassen sich Wolframlegierungen mit hoher Dichte in folgende Kategorien einteilen:

### 2.4.1 Klassifizierung nach Inhaltsstoffen

Eine hochdichte Wolframlegierung besteht aus Wolfram. Zur Optimierung der Leistung werden je nach Bedarf Nickel (Ni), Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Kobalt (Co) und weitere Elemente hinzugefügt. Je nach den unterschiedlichen Sekundärelementen in der Legierung kann diese im Wesentlichen in folgende Kategorien unterteilt werden:

#### (1) W-Ni-Fe-Legierung

**Zusammensetzungsmerkmale** : Enthält im Allgemeinen 90–97 % Wolfram und das Verhältnis von Nickel zu Eisen beträgt etwa 7:3 oder 8:2.

**Leistungsvorteile** : gute Duktilität, hohe Festigkeit **und** Härte sowie hohe magnetische Permeabilität.

**Hauptanwendungen** : Weit verbreitet in der Militärindustrie (panzerbrechender Kern), der Luft- und Raumfahrt (Gegengewicht), als industrielles Gegengewicht (Gyroskop-Gegengewicht) .

#### (2) W-Ni-Cu-Legierung

**Zusammensetzungsmerkmale** : Der Wolframgehalt beträgt normalerweise 90–95 %, und das Verhältnis von Nickel zu Kupfer liegt normalerweise nahe bei 7:3 .

**Leistungsvorteile** : Im Vergleich zur W-Ni-Fe-Legierung hat die W-Ni-Cu-Legierung eine geringere magnetische Permeabilität, fast keinen Magnetismus und **eine** gute Korrosionsbeständigkeit.

**Hauptanwendungen** : Wird in der medizinischen Strahlenabschirmung (Röntgenschutz), in der elektronischen Verpackung und in magnetempfindlichen Bereichen verwendet .

#### (3) W-Ni-Fe-Co-Legierung

**Zusammensetzungsmerkmale** : Der W-Ni-Fe-Basis wird Kobalt (Co) hinzugefügt , um die Festigkeit und Verschleißfestigkeit zu verbessern.

**Leistungsvorteile** : Höhere Festigkeit und Härte als W-Ni-Fe-Legierung und verfügt über **eine** gewisse Hochtemperaturstabilität.

**Hauptanwendungen** : Wird für Hochtemperatur-Strukturmaterialien verwendet, wie etwa Triebwerkskomponenten für die Luft- und Raumfahrt, verschleißfeste Schneidwerkzeuge **usw.**

#### (4) Sonstige Sonderlegierungen

**W-Cu -Legierung** : Wird hauptsächlich für Anwendungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit und hoher elektrischer Leitfähigkeit verwendet, beispielsweise als Elektrodenmaterial.

**W-Re (Wolfram- Rhenium) Legierung** : hat eine bessere Hochtemperaturleistung und wird häufig in der Luft- und Raumfahrt verwendet.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 2.4.2 Klassifizierung basierend auf Dichte und mechanischen Eigenschaften (Klasse 1 ~ Klasse 4)

Nach den Normen ASTM B777 und MIL-T-21014 können schwere Wolframlegierungen nach Dichte und mechanischen Eigenschaften in vier Klassen (Klasse 1 bis Klasse 4) eingeteilt werden. Verschiedene Legierungsklassen eignen sich für unterschiedliche Anwendungsszenarien:

Grad	Wolframgehalt (%)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Zugfestigkeit (MPa)	Streckgrenze (MPa)	Dehnung (%)	Magnetische Permeabilität	Typische Anwendungen
Klasse 1	90	17,0	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1,05	Luftfahrt-Gegengewicht, Industrie-Gegengewicht
Klasse 2	92,5	17,5	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1,05	Militärpanzerung, panzerbrechender Kern
Klasse 3	95	18,0	≥ 724	≥ 517	≥ 3	> 1,05	Röntgenschutz, Abschirmung gegen nukleare Strahlung
Klasse 4	97	18,5	≥ 689	≥ 517	≥ 2	> 1,05	Medizinischer Strahlenschutz, Elektronikverpackungen

**Klasse 1 und Klasse 2 :** Höhere Festigkeit und bessere Zähigkeit, geeignet für Anwendungen wie Luft- und Raumfahrt, Militär und industrielle Gegengewichte.

**Klasse 3 und Klasse 4 :** Höhere Dichte, wird normalerweise im Strahlenschutz, in der Nuklearindustrie und in hochpräzisen Gegengewichtsbereichen verwendet.

#### 2.4.3 Klassifizierung nach Nutzung

Je nach Anwendung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht in verschiedenen Bereichen können sie in die folgenden Kategorien unterteilt werden:

##### (1) Rüstungsindustrie

Es wird hauptsächlich für **panzerbrechende Kerne (wie APFSDS , ein Ersatz für abgereicherte Urangranaten), Schutzpanzerungen , explosive Metallsplitter** usw.

Anforderungen: hohe Dichte, hohe Härte, hohe Schlagfestigkeit.

Hauptmaterialien: W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co.

##### (2) Luft- und Raumfahrt

Wird für **Gegengewichte von Flugzeugen und Raumfahrzeugen verwendet . Trägheitskreisel-Gegengewichte , Hochtemperaturkomponenten des Motors** usw.

Anforderungen: hohe Dichte, hohe Temperaturbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit.

Hauptmaterialien: W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co, W-Re.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### (3) Medizinischer Bereich

Hauptsächlich für Röntgenabschirmmaterialien verwendet , Strahlenschutz (wie etwa Gammastrahlen - Abschirmblöcke), Transportbehälter für radioaktive Medikamente usw.

Anforderungen: hohe Dichte, nicht magnetisch, ungiftig, korrosionsbeständig.

Hauptmaterialien: W-Ni-Cu, W-Ni-Cu-Co.

### (4) Industrielle und zivile Bereiche

Hauptsächlich verwendet in Präzisionsgegengewichten (Pendel, Gyroskope, Rennsportgegengewichte) , Ölbohrwerkzeuge , Elektrodenmaterialien usw.

Anforderungen: hohe Dichte, Verschleißfestigkeit, gute Bearbeitbarkeit.

Hauptmaterialien: W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Cu.

### (5) Elektronik- und Halbleiterbereiche

in elektronischen Verpackungsmaterialien verwendet . Hochleistungs-Halbleiter - Kühlkörper und mikroelektronische Verbindungsmaterialien .

Anforderungen: hohe Wärmeleitfähigkeit, geringe Wärmeausdehnung, nicht magnetisch.

Hauptmaterialien: W-Cu, W-Ag (Wolfram- Silber -Legierung) .

## 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: Leistungsanalyse von hochgewichtigen Wolframlegierungen

#### 3.1 Mechanische Eigenschaften der schweren Wolframlegierung

Die mechanischen Eigenschaften hochdichter Wolframlegierungen sind der Hauptgrund für ihre Beliebtheit in technischen Anwendungen. Sie umfassen Festigkeit, Härte, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit, Dauerfestigkeit usw. Die hervorragende Leistung dieser Eigenschaften ist auf die hohe Härte des Wolframs und den synergistischen Effekt hinzugefügter Elemente zurückzuführen, der für eine gute Leistung sowohl unter statischer als auch unter dynamischer Belastung sorgt.

**Zugfestigkeit und Streckgrenze** sind die wichtigsten Kennwerte für mechanische Eigenschaften. Die Zugfestigkeit schwerer Wolframlegierungen liegt üblicherweise zwischen 700 und 1200 MPa, die Streckgrenze bei etwa 500 bis 1000 MPa. Die genauen Werte variieren je nach Zusammensetzung und Verfahren. Beispielsweise kann die Zugfestigkeit der Legierung W-90Ni-7Fe-3 (90 % Wolframgehalt, Nickel-Eisen-Verhältnis 7:3) 1050 MPa erreichen, die Streckgrenze liegt bei etwa 850 MPa. Die Zugfestigkeit von W-95Ni-Cu (95 % Wolframgehalt, Nickel-Kupfer-Verhältnis) hingegen liegt bei etwa 800 MPa. Diese Festigkeit ist vergleichbar mit hochfestem Stahl (z. B. AISI 4340, ca. 1000 MPa), liegt aber deutlich über der Bruchgrenze von Blei (~15 MPa) und reinem Wolfram (900 bis 1500 MPa). Die hohe Festigkeit beruht auf der hohen Härte der Wolframpartikel und der verstärkenden Wirkung der Bindungsphase (z. B. Ni-Fe), die bei Zugspannung Energie absorbiert und die Rissausbreitung verzögert.

**Die Härte** ist ein weiteres wichtiges Merkmal schwerer Wolframlegierungen. Die Vickershärte (HV) liegt zwischen 300 und 500 HV. Beispielsweise beträgt die Härte der W-93Ni-Fe-Legierung etwa 450 HV und liegt damit nahe an einigen Werkzeugstählen (z. B. H13, etwa 400–500 HV), ist aber niedriger

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

als die von reinem Wolfram (350–650 HV). Die Härteverteilung korreliert positiv mit dem Wolframgehalt. Je höher der Wolframgehalt, desto höher die Härte. Die Zugabe einer Bindephase verringert jedoch leicht die Härte und verbessert die Schlagzähigkeit. Beispielsweise kann die W-95Ni-Fe-Legierung im Brinellhärte-Test (HB) 400 HB erreichen, während reines Wolfram spröde ist und hohen Belastungen nicht standhält.

**Zähigkeit**, die sich in einer höheren Dehnung und Bruchzähigkeit zeigt. Die Dehnung liegt zwischen 10 % und 30 % und ist damit deutlich höher als bei reinem Wolfram (<1 %). Die Dehnung der Legierung W-90Ni-Fe beispielsweise kann bei Raumtemperatur 25 % erreichen und bleibt bei -50 °C immer noch bei über 15 %, was eine gute Tieftemperaturzähigkeit zeigt. Die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) liegt üblicherweise zwischen 20 und 40 MPa·m<sup>1/2</sup>. Die  $K_{IC}$  der Legierung W-93Ni-Fe beispielsweise beträgt ca. 30 MPa·m<sup>1/2</sup>, was nahe an niedrig legiertem Stahl (ca. 40 MPa·m<sup>1/2</sup>) liegt, während sie bei reinem Wolfram nur 5 bis 10 MPa·m<sup>1/2</sup> beträgt. Diese Zähigkeit profitiert von der plastischen Deformationsfähigkeit der Bindungsphase, die bei konzentrierter Spannung Energie absorbiert und so einen Spröbruch verhindert.

**Die Verschleißfestigkeit** hängt eng mit der Härte hochdichter Wolframlegierungen zusammen. In Verschleißtest (wie dem ASTM G65-Schleifscheibenverschleißtest) beträgt der Volumenverlust der W-95Ni-Fe-Legierung etwa 0,05 mm<sup>3</sup>/Nm und liegt damit etwa 70 % unter dem von Stahl (0,15 mm<sup>3</sup>/Nm) und nahe an Hartmetall (wie WC-Co, 0,02 mm<sup>3</sup>/Nm). Seine Verschleißfestigkeit macht es zu einem idealen Material für Bohr- und Schneidwerkzeuge. Beispielsweise kann bei der Ölförderung die Lebensdauer von Bohrern aus Wolframlegierungen zwei- bis dreimal so hoch sein wie die von Stahlbohrern.

**Die Ermüdungsfestigkeit** ist besonders bei dynamischen Anwendungen wichtig. Die Ermüdungsgrenze (10 Zyklen) hochdichter Wolframlegierungen liegt bei etwa 400–600 MPa. Beispielsweise beträgt die Ermüdungsfestigkeit der W-90Ni-Fe-Legierung unter Wechsellastspannung 500 MPa und ist damit höher als die von Blei (nahezu keine Ermüdungsfestigkeit) und reinem Wolfram (kann aufgrund von Sprödigkeit nicht getestet werden) und vergleichbar mit Stahl (ca. 400 MPa). Diese Eigenschaft macht sie hervorragend geeignet für Schwingungsdämpfungsteile und Schusswaffengegengewichte, da sie langfristigen zyklischen Belastungen standhält, ohne zu versagen.

### 3.2 Physikalische Eigenschaften einer Wolframlegierung mit hoher Dichte

Zu den physikalischen Eigenschaften einer hochdichten Wolframlegierung zählen Dichte, thermische Eigenschaften, elektrische Eigenschaften und akustische Eigenschaften, die sich direkt auf ihre Anwendbarkeit in einer bestimmten Umgebung auswirken.

**Die Dichte** ist die wichtigste physikalische Eigenschaft schwerer Wolframlegierungen und liegt zwischen 17,0 und 19,3 g/cm<sup>3</sup>. Beispielsweise kann die Dichte der W-97Ni-Fe-Legierung 19,0 g/cm<sup>3</sup> erreichen und ist damit nur geringfügig niedriger als die von reinem Wolfram (19,25 g/cm<sup>3</sup>), während die Dichte von W-85Cu etwa 17,0 g/cm<sup>3</sup> beträgt. Diese hohe Dichte ist auf die kubisch-raumzentrierte (BCC) Kristallstruktur und die hohe Atommasse (183,84 u) von Wolfram zurückzuführen, die eine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

höhere Massenspeicherkapazität pro Volumeneinheit ermöglicht. Beispielsweise wiegt 1 Kubikzentimeter der W-95Ni-Fe-Legierung etwa 18,5 g, während das gleiche Volumen an Stahl nur 7,85 g wiegt. Diese Eigenschaft verschafft ihr einen unersetzlichen Vorteil bei Gegengewichten in der Luftfahrt und im Strahlenschutz.

**den thermischen Eigenschaften** zählen Schmelzpunkt, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient. Der Schmelzpunkt schwerer Wolframlegierungen liegt zwischen 2500 und 3000 °C und ist damit niedriger als der von reinem Wolfram (3422 °C), aber deutlich höher als der von Stahl (ca. 1500 °C). Beispielsweise liegt der Schmelzpunkt der W-90Ni-Fe-Legierung bei etwa 2850 °C und hält damit den hohen Temperaturen in Raketendüsen stand. Ihre Wärmeleitfähigkeit beträgt 80–150 W/(m·K). Die W-80Cu-Legierung erreicht beispielsweise 140 W/(m·K), was niedriger ist als der von reinem Wolfram (173 W/(m·K)), aber höher als der von Stahl (50 W/(m·K)) und somit für Kühlkörperanwendungen geeignet ist. Der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt etwa  $4,5\text{--}6,0 \times 10^{-6}$  /K und liegt damit nahe an reinem Wolfram ( $4,5 \times 10^{-6}$  /K) und viel niedriger als bei Stahl ( $12 \times 10^{-6}$  /K). Zudem weist es eine bessere Dimensionsstabilität bei Temperaturänderungen auf.

**Elektrische Eigenschaften** : Der spezifische Widerstand schwerer Wolframlegierungen liegt zwischen 5,5 und 7,0  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , beispielsweise bei der W-90Ni-Fe-Legierung bei 6,0  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ . Damit ist er etwas höher als bei reinem Wolfram (5,5  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) und Kupfer (1,68  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ), aber niedriger als bei Stahl (15  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ). Obwohl seine Leitfähigkeit nicht so gut ist wie die von Kupfer, ist es unter den Elektrodenmaterialien dennoch konkurrenzfähig. Darüber hinaus eignet es sich aufgrund seines hohen Schmelzpunkts und seiner hohen Dichte gut für Elektroden zur Funkenerosion (EDM). Beispielsweise ist die Lebensdauer von W-70Cu-Elektroden etwa 50 % länger als die von Kupferelektroden.

**Akustische Eigenschaften** spielen zwar keine so große Rolle, sind aber für manche Anwendungen, beispielsweise zur Schwingungsdämpfung, von entscheidender Bedeutung. Die Schallgeschwindigkeit schwerer Wolframlegierungen beträgt etwa 4300–4500 m/s, beispielsweise 4400 m/s für die Legierung W-95Ni-Fe. Sie ist damit niedriger als die von Stahl (ca. 5000 m/s), aber höher als die von Blei (1200 m/s). Aufgrund seiner hohen Dichte und seines hohen Elastizitätsmoduls (ca. 400 GPa) zerfällt es bei der Schallwellenübertragung schneller und eignet sich daher als schwingungsdämpfendes Material. Beispielsweise können Wolframlegierungen in Gegengewichten von Werkzeugmaschinen die Schwingungsamplitude um 30–40 % reduzieren.

### 3.3 Hauptelemente und ihre Funktionen der Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

Hochdichte Wolframlegierungen (HDTA) sind Legierungen mit Wolfram (W) als Hauptbestandteil. Sie enthalten üblicherweise 85–97 % Wolfram und werden durch Zusätze von Nickel (Ni), Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Kobalt (Co) und anderen Elementen verbessert, um die mechanischen Eigenschaften, die Korrosionsbeständigkeit, die Leitfähigkeit und weitere Eigenschaften zu verbessern. Diese Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, hohen Festigkeit und hervorragenden Gesamteigenschaften breite Anwendung im Militär, der Luft- und Raumfahrt, der Medizin, der Elektronik und der Industrie.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. Wolfram (W): sorgt für hohe Dichte und Festigkeit

### (1) Grundlegende Merkmale

- **Elementsymbol** : W
- **Ordnungszahl** : 74
- **Dichte** : 19,3 g/cm<sup>3</sup>
- **Schmelzpunkt** : 3410 ° C
- **Hauptfunktion** : Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht eine extrem hohe Dichte, Härte und Festigkeit verleihen .

### (2) Rolle in Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

- Als **Massenelement weist es eine hohe Dichte (16,5–18,5 g/cm<sup>3</sup>) auf** , wodurch die Legierung beispielsweise für Gegengewichte mit hoher Masse, Strahlenschutz und panzerbrechende Projektilkerne geeignet ist.
- Aufgrund des hohen Schmelzpunkts und der Verschleißfestigkeit wird die Stabilität der Legierung in Umgebungen mit hohen Temperaturen verbessert.
- Die gute Korrosionsbeständigkeit ermöglicht den Einsatz der Legierung in extremen Umgebungen.
- Allerdings ist Wolfram selbst spröde, sodass andere Metallelemente hinzugefügt werden müssen, um die Bearbeitbarkeit und Duktilität der Legierung zu verbessern.

## 2. Nickel (Ni): Verbessert die Duktilität und Korrosionsbeständigkeit

### (1) Grundlegende Merkmale

- **Elementsymbol** : Ni
- **Ordnungszahl** : 28
- **Dichte** : 8,9 g/cm<sup>3</sup>
- **Schmelzpunkt** : 1455 ° C
- **Hauptfunktion** : Der Legierung eine gute Duktilität verleihen und ihre Korrosionsbeständigkeit verbessern .

### (2) Rolle in Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

- Als **bindendes Phasenelement kann Nickel** die gleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel fördern und die Plastizität und Bearbeitbarkeit der Legierung verbessern .
- Verbessern Sie die Duktilität der Legierung, sodass sie größeren Verformungen ohne Sprödbruch standhält.
- Es verleiht der Legierung eine hohe Korrosionsbeständigkeit und ermöglicht so einen langen Einsatz in feuchter oder saurer Umgebung.
- Während des Flüssigphasensinterprozesses hilft es, die Sintertemperatur zu senken und die Dichte der Legierung zu erhöhen.
- Es wird im Allgemeinen in Kombination mit Eisen (Fe) oder Kupfer (Cu) verwendet, um die magnetischen und mechanischen Eigenschaften der Legierung anzupassen.

## 3. Eisen (Fe): Erhöht die mechanische Festigkeit der Legierung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### (1) Grundlegende Merkmale

- **Elementsymbol** : Fe
- **Ordnungszahl** : 26
- **Dichte** : 7,87 g/cm<sup>3</sup>
- **Schmelzpunkt** : 1538 °C
- **Hauptfunktion** : Verbessern Sie die Festigkeit und Härte der Legierung und verleihen Sie ihr gleichzeitig einen gewissen Grad an Magnetismus .

#### (2) Rolle in Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

- Als Verstärkungsphase bilden Eisen und Nickel zusammen **eine W-Ni-Fe-Ternärlegierung** , die die mechanische Festigkeit und Härte der Legierung erhöht.
- Erhöht die Verschleißfestigkeit der Legierung und ermöglicht ihr, hohen Belastungen und hohen Stoßkräften standzuhalten.
- Dadurch erhält die Legierung **einen gewissen Grad an Magnetismus** und ist daher für bestimmte militärische und industrielle Anwendungen geeignet.
- Während des Flüssigphasensinterprozesses trägt es dazu bei, die Fließfähigkeit der Bindungsphase zu verbessern und die Dichte der Legierung zu erhöhen.
- W-Ni-Fe-Legierungen werden häufig in Anwendungen wie **panzerbrechenden Kernen, Gegengewichten in der Luft- und Raumfahrt und Industrieformen verwendet** .

### 4. Kupfer (Cu): reduziert Magnetismus und verbessert die Leitfähigkeit

#### (1) Grundlegende Merkmale

- **Elementsymbol** : Cu
- **Ordnungszahl** : 29
- **Dichte** : 8,96 g/cm<sup>3</sup>
- **Schmelzpunkt** : 1084,6 °C
- **Hauptfunktion** : Die Legierung unmagnetisch machen und ihre Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit verbessern.

#### (2) Rolle in Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

- Ersatz für Eisen (Fe) zur Herstellung **einer nichtmagnetischen Wolframlegierung (W-Ni-Cu)** , die für magnetisch empfindliche Anwendungen (wie medizinische Geräte, elektronische Komponenten) geeignet ist.
- Verbessert die Leitfähigkeit der Legierung und macht sie für Elektrodenmaterialien, elektronische Verpackungen und andere Bereiche geeignet.
- Die Korrosionsbeständigkeit wird weiter verbessert, sodass die Legierung in feuchter Umgebung oder **saurem Medium eine längere Lebensdauer hat**.
- Reduziert die Härte der Legierung und erleichtert so die Bearbeitung.
- W-Ni-Cu-Legierungen werden häufig in **der Röntgen- und Gammastrahlenabschirmung, in medizinischen Geräten, elektronischen Verpackungen usw. verwendet** .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5. Kobalt (Co): Verbessert die Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit

### (1) Grundlegende Merkmale

- **Elementsymbol** : Co
- **Ordnungszahl** : 27
- **Dichte** : 8,90 g/cm<sup>3</sup>
- **Schmelzpunkt** : 1495 ° C
- **Hauptfunktionen** : Verbessert die Verschleißfestigkeit, die Hochtemperaturbeständigkeit und erhöht die Festigkeit der Legierung.

### (2) Rolle in hochdichten Wolframlegierungen

- Als Verstärkungselement kann Kobalt die **Verschleißfestigkeit der Legierung verbessern** und eignet sich für hochbelastete, verschleißfeste Teile.
- Bietet eine **verbesserte Hochtemperaturbeständigkeit**, sodass die Legierung auch bei extremen Temperaturen ihre Festigkeit und Stabilität behält.
- Verbessern Sie die Härte der Legierung, sodass sie für Umgebungen mit hoher Stoß- und Belastungsbelastung geeignet ist, wie etwa panzerbrechende Kerne, Triebwerkskomponenten für die Luft- und Raumfahrt usw.
- Die W-Ni-Fe-Co-Legierung weist eine höhere Festigkeit und Härte auf als die gewöhnliche W-Ni-Fe-Legierung, die Herstellungskosten sind jedoch höher.

Die Eigenschaften schwerer Wolframlegierungen werden von ihren Hauptelementen beeinflusst. Die Funktionen der einzelnen Elemente sind wie folgt:

Element	Wirkung	Auswirkungen auf Legierungen
Wolfram (W)	Hohe Dichte, hohe Festigkeit	Verleiht der Legierung hohe Dichte, hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit
Nickel (Ni)	Duktilität, Korrosionsbeständigkeit	Erhöhen Sie die Plastizität, verbessern Sie die Korrosionsbeständigkeit und verbessern Sie die Verarbeitbarkeit
Eisen (Fe)	Mechanische Festigkeit, Härte	Verbessern Sie die Härte und Festigkeit der Legierung und machen Sie sie magnetisch
Kupfer (Cu)	Nicht magnetisch, leitfähig	Reduziert Magnetismus, verbessert Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit
Kobalt (Co)	Verschleißfestigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit	Verbesserte Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturstabilität

### 3.4 Korrosions- und Verschleißbeständigkeit von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

**Korrosionsbeständigkeit** ist eine wichtige Eigenschaft schwerer Wolframlegierungen, insbesondere in chemischen und maritimen Umgebungen. Wolfram selbst ist bei Raumtemperatur extrem beständig gegenüber Säuren, Basen und Sauerstoff und reagiert kaum mit Salzsäure und Schwefelsäure. In konzentrierter Salpetersäure oder Flusssäure löst es sich nur langsam auf. Schwere Wolframlegierungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

besitzen diese Eigenschaft, sie verändert sich jedoch leicht durch die Zugabe von Elementen. Beispielsweise beträgt der Massenverlust der W-90Ni-Fe-Legierung nach 1000-stündigem Eintauchen in 10-prozentige Salzsäure weniger als 0,5 % und in Meerwasser 0,1–0,2 %, was deutlich niedriger ist als bei Stahl (ca. 20 %). W-Cu-Legierungen sind aufgrund ihres Kupfergehalts widerstandsfähiger gegen Feuchtigkeit und Salznebel. Im Salznebeltest nach ASTM B117 beträgt die Korrosionstiefe nach 1000 Stunden nur 0,01 mm, während die von Stahl 0,5 mm erreichen kann. In einer stark oxidierenden Umgebung (wie etwa konzentrierter Salpetersäure) kann die Ni-Fe-Bindungsphase jedoch korrodieren und die Korrosionsrate steigt auf 2–3 %, was durch eine Oberflächenbeschichtung (wie etwa eine Ni-Beschichtung) verbessert werden muss.

**Die Verschleißfestigkeit** hängt eng mit Härte und Mikrostruktur zusammen. Die Verschleißfestigkeit von hochdichten Wolframlegierungen ist sowohl bei Gleit- als auch bei Schleifverschleiß hervorragend. Beispielsweise beträgt die Verschleißrate der W-95Ni-Fe-Legierung im ASTM G65-Test etwa 0,05 mm<sup>3</sup>/N·m, was 70 % niedriger ist als die von Stahl (0,15 mm<sup>3</sup>/N·m) und nahe an der von WC-Co-Hartmetall (0,02 mm<sup>3</sup>/N·m) liegt. Die Verschleißfestigkeit beruht auf der hohen Härte der Wolframpartikel (ca. 1000 HV) und der Zähigkeitsunterstützung der Bindungsphase. Beispielsweise kann bei der Ölförderung die Lebensdauer von W-90Ni-Fe-Bohrern dreimal so hoch sein wie die von Stahlbohrern, und die Verschleißtiefe beträgt nur 0,1 mm, während Stahlbohrer 0,5 mm erreichen können.

### 3.5 Strahlungsabschirmungsfähigkeit von schwerer Wolframlegierung

Die strahlenabschirmende Wirkung schwerer Wolframlegierungen ist die Grundlage für ihre breite Anwendung in der Medizin- und Nuklearindustrie. Sie beruht auf der hohen Ordnungszahl ( $Z = 74$ ) und Dichte (17,0–19,3 g/cm<sup>3</sup>) von Wolfram. Ihre Absorptionseffizienz von Röntgen- und Gammastrahlen ist weitaus höher als die herkömmlicher Materialien. Beispielsweise kann eine 1 cm dicke W-95Ni-Fe-Legierung 90 % der Gammastrahlen (Energie 1 MeV) abschirmen, während die gleiche Dicke bei Blei nur 70 % und bei Stahl lediglich 10 % beträgt. Die Abschirmungsfähigkeit wird anhand des Massenabsorptionskoeffizienten ( $\mu/\rho$ ) berechnet. Der  $\mu/\rho$  der W-95Ni-Fe-Legierung beträgt etwa 0,15 cm<sup>2</sup>/g und ist damit höher als der von Blei (0,12 cm<sup>2</sup>/g). In der Praxis kann eine 10 mm dicke Wolframlegierung die Strahlendosis von 100 mSv auf 1 mSv reduzieren, was besser ist als eine 15 mm dicke Bleiabschirmung. Darüber hinaus ist sie aufgrund ihrer Ungiftigkeit eine umweltfreundliche Alternative zu Blei. Beispielsweise kann bei CT-Geräteabschirmungen die Dicke der Wolframlegierung um 30 % und das Gewicht um 20 % reduziert werden.

### 3.6 Methoden zur Optimierung der Leistung von hochdichten Wolframlegierungen

Die Leistungsoptimierung hochdichter Wolframlegierungen ist der Schlüssel zur Verbesserung ihres Anwendungspotenzials. Dazu gehören die Anpassung der Zusammensetzung, Prozessverbesserungen und Nachbearbeitungstechnologien.

**Die Optimierung der Zusammensetzung** erfolgt durch Anpassung des Wolframgehalts und des Bindephasenverhältnisses. Beispielsweise kann durch eine Erhöhung des Wolframgehalts auf 97 % die Dichte auf 19,0 g/cm<sup>3</sup> gesteigert werden, die Zähigkeit nimmt jedoch ab; durch Zugabe von Kobalt (Co) lässt sich die Härte von 450 HV auf 500 HV steigern, während die Dehnung um 15 % erhalten bleibt.

**Prozessverbesserungen** umfassen die Herstellung von Nanopulver und das Flüssigphasensintern. Durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Verwendung von Nano-Wolframpulver (Partikelgröße 50 nm) lässt sich die Korngröße von 10 µm auf 1 µm reduzieren und die Zugfestigkeit von 1000 MPa auf 1200 MPa erhöhen. Die Flüssigphasensintertemperatur wird von 1450 °C auf 1500 °C optimiert, wodurch die Dichte von 98 % auf 99,5 % gesteigert werden kann. **Nachbearbeitungstechniken** wie Heißisostatisches Pressen (HIP) und Oberflächenhärten verbessern die Leistung zusätzlich. Beispielsweise kann eine HIP-Behandlung (200 MPa, 1400 °C) Mikroporen beseitigen und die Lebensdauer um 50 % verlängern; eine Aufkohlungsbehandlung kann die Oberflächenhärte auf 600 HV erhöhen und die Verschleißfestigkeit um 30 % verbessern.

### Liste der Eigenschaften von Wolframlegierungen mit hoher Dichte

Leistungskategorie	Schlüsselkennzahlen	Typischer Wert	Optimierungsmethoden
Mechanische Eigenschaften	Zugfestigkeit	700-1200 MPa	Zugabe von Kobalt, Nanopulverzubereitung
	Härte	300-500 HV	Erhöhung des Wolframingehalts durch Aufkohlungsbehandlung
	Verlängerung	10-30%	Optimierung des Ni-Fe-Verhältnisses
	Verschleißfestigkeit	0,05 mm <sup>3</sup> /N·m	Heißisostatisches Pressen, Einsatzhärten
	Dauerfestigkeit	400-600 MPa	HIP-Behandlung, Kornverfeinerung
Physikalische Eigenschaften	Dichte	17,0–19,3 g/cm <sup>3</sup>	Erhöhung des Wolframingehalts auf 97 %
	Schmelzpunkt	2500-3000°C	-
	Wärmeleitfähigkeit	80-150 W/(m·K)	Hinzugefügtes Kupfer (z. B. W-80Cu)
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate durch Salzsäure	<0,5 % (1000 Stunden)	Ni-Beschichtung
Verschleißfestigkeit	Verschleißrate	0,05 mm <sup>3</sup> /N·m	Verbessern Sie die Härte und optimieren Sie die Mikrostruktur
Strahlenschutzfähigkeit	Gammastrahlenabschirmung (1 cm dick)	90 % (1 MeV)	Erhöhte Dichte auf 19 g/cm <sup>3</sup>

Hinweis: Bei den Daten in der Tabelle handelt es sich um typische Bereiche. Die genauen Werte können je nach Zutaten und Verfahren variieren.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Anwendung dieser Methoden muss je nach den spezifischen Anforderungen abgewogen werden. Beispielsweise wird bei medizinischen Abschirmungen eine hohe Dichte bevorzugt, während bei Werkzeugen die Verschleißfestigkeit im Vordergrund steht. Dies liefert theoretische Hinweise für die nachfolgende Vorbereitung und Anwendung.



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

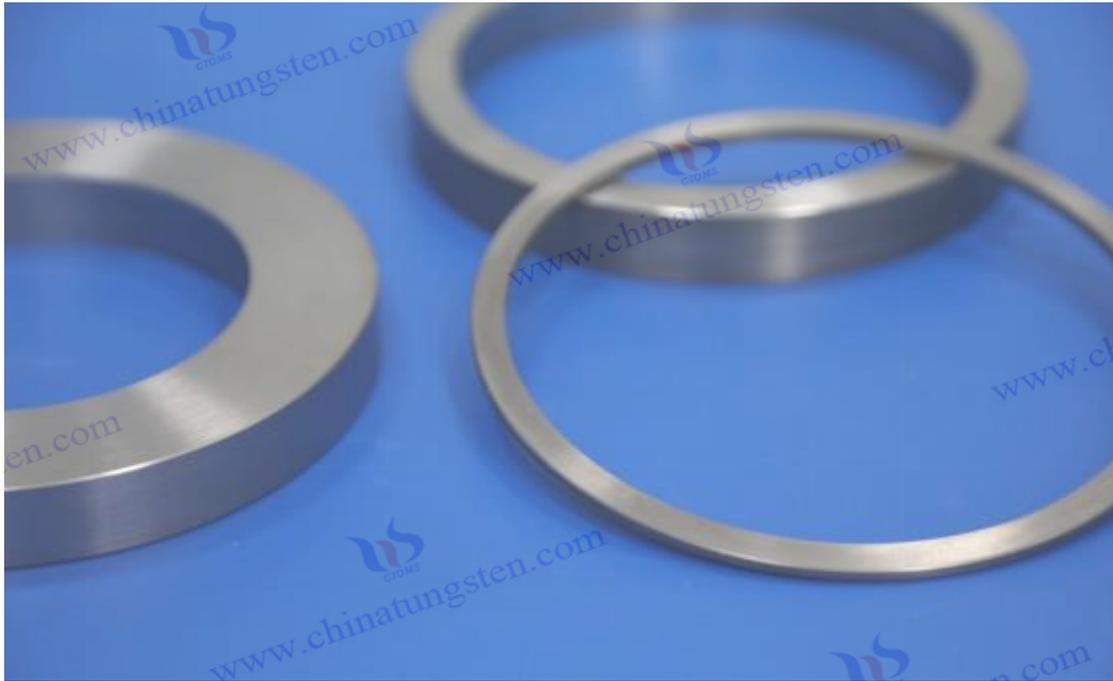
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 4: Herstellungstechnologie für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

### 4.1 Auswahl und Vorbehandlung von Rohstoffen aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte

Die Herstellung hochdichter Wolframlegierungen beginnt mit der Auswahl und Vorbehandlung der Rohstoffe, die sich direkt auf die Leistung und Konsistenz des Endprodukts auswirken. Die Rohstoffe bestehen hauptsächlich aus Wolframpulver und Bindephasenelementen (wie Nickel, Eisen, Kupfer usw.). Deren Reinheit, Partikelgröße und chemische Eigenschaften müssen streng kontrolliert werden.

**Die Auswahl des Wolframpulvers** ist der Kern der Herstellung. Wolframpulver wird üblicherweise durch Wasserstoffreduktion von Wolframoxid ( $WO_3$ ) hergestellt und die Reinheit muss  $\geq 99,9\%$  betragen, um Verunreinigungen (wie Sauerstoff und Kohlenstoff) zu vermeiden, die die Sinterqualität beeinträchtigen. Der Partikelgrößenbereich beträgt üblicherweise  $1-10\ \mu m$ . Beispielsweise beträgt die durchschnittliche Partikelgröße des von der CTIA GROUP LTD ausgewählten Wolframpulvers  $3\ \mu m$ , was eine hohe Dichte und Gleichmäßigkeit gewährleistet. Eine zu große Partikelgröße (wie  $20\ \mu m$ ) führt nach dem Sintern zu einer Erhöhung der Porosität und die Dichte sinkt auf unter  $17\ g/cm^3$ ; während eine zu kleine Partikelgröße (wie  $<0,5\ \mu m$ ) die Fließfähigkeit durch Agglomeration verringern kann, was das Pressen und Formen beeinträchtigt. Der Sauerstoffgehalt muss unter  $0,05\%$  gehalten werden, da ein zu hoher Sauerstoffgehalt beim Sintern flüchtige Oxide (wie  $WO_2$ ) erzeugt und Poren bildet.

**Die Rohstoffe für die Bindephase werden** den Anwendungsanforderungen angepasst. Zur Verbesserung der Zähigkeit werden häufig Nickel- und Eisenpulver verwendet, die eine Reinheit von  $\geq 99,5\%$  und eine Partikelgröße von  $2-5\ \mu m$  aufweisen müssen. CTIA GROUP LTD verwendet beispielsweise ein Mischpulver mit einem Nickel-Eisen-Verhältnis von 7:3 in einer W-Ni-Fe-Legierung,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einer Nickelpulver-Partikelgröße von 3  $\mu\text{m}$  und einem Eisenpulver von 4  $\mu\text{m}$ , um eine gleichmäßige Verteilung beim Flüssigphasensintern zu gewährleisten. Kupferpulver wird in Szenarien verwendet, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit erfordern, mit einer Reinheit von  $\geq 99,8\%$  und einer Partikelgröße von etwa 5  $\mu\text{m}$ , um eine Verunreinigung mit Kupferoxid ( $\text{CuO}$ ) zu vermeiden. Wenn Kobalt oder Molybdän als Zusatzelement verwendet werden, übersteigt der Gehalt normalerweise nicht 5 %, um die Härte oder Korrosionsbeständigkeit zu verbessern.

**Der Vorbehandlungsprozess** umfasst Sieben, Mischen und Reduzieren. Durch das Sieben werden zu große oder zu kleine Partikel entfernt, beispielsweise Agglomerate durch ein 200-Maschen-Sieb (ca. 74  $\mu\text{m}$ ). Das Mischen erfolgt mit einem V-Mischer oder einer Kugelmühle. China Tungsten Intelligence verwendet beispielsweise eine Planetenkugelmühle, um sechs Stunden lang bei 300 U/min zu mischen und so eine gleichmäßige Verteilung des Wolframpulvers und der Bindephase sicherzustellen, wobei die Abweichung der Mischgleichmäßigkeit  $< 1\%$  beträgt. Ist der Sauerstoffgehalt des Rohmaterials zu hoch, muss es in einer Wasserstoffatmosphäre reduziert werden, beispielsweise durch zweistündiges Reduzieren bei 800  $^{\circ}\text{C}$ , um den Sauerstoffgehalt von 0,1 % auf 0,03 % zu senken. Um eine Oxidation des Pulvers zu verhindern, müssen die vorbehandelten Rohstoffe zusätzlich unter einem Inertgas (z. B. Argon) gelagert werden.

#### 4.2 Pulvermetallurgieverfahren für schwere Wolframlegierungen

Die Pulvermetallurgie ist das wichtigste Herstellungsverfahren für hochdichte Wolframlegierungen. Sie gliedert sich in zwei Kernschritte: Pressen und Sintern. Sie ist weit verbreitet, da sie die Mikrostruktur und Leistung effektiv steuern kann.

**Beim Pressen** wird das gemischte Pulver zu einem Grünkörper gepresst, üblicherweise durch kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Formen. Beim kaltisostatischen Pressen wird mit einer Hochdruckflüssigkeit (wie Wasser oder Öl) ein gleichmäßiger Druck ausgeübt. Beispielsweise presst die CTIA GROUP LTD W-90Ni-Fe-Pulver bei 200–300 MPa, wobei die Grünkörperdichte 60–70 % der theoretischen Dichte (ca. 11–13  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) erreichen kann. Formen eignen sich für die Kleinserienproduktion bei einem Druck von 500–700 MPa. Beispielsweise dauert die Herstellung eines zylindrischen Grünkörpers mit einem Durchmesser von 50 mm etwa 30 Sekunden. Um die Festigkeit des Grünkörpers zu verbessern, kann eine kleine Menge organisches Bindemittel (z. B. 1 % Polyvinylalkohol) hinzugefügt werden, das jedoch beim anschließenden Entfetten entfernt werden muss.

**Sintern** ist ein wichtiger Schritt in der Pulvermetallurgie. Flüssigphasensintern wird üblicherweise verwendet, um den Rohling über den Schmelzpunkt der Bindephase zu erhitzen, um diese zu verflüssigen und die Lücken zwischen den Wolframpartikeln zu füllen. Die Sintertemperatur liegt üblicherweise bei 1400–1550  $^{\circ}\text{C}$ . Beispielsweise sinterte CTIA GROUP LTD die Legierung W-93Ni-Fe zwei Stunden lang bei 1480  $^{\circ}\text{C}$ . Die flüssige Nickel-Eisen-Phase schmolz bei 1350  $^{\circ}\text{C}$  und förderte die Neuordnung der Wolframpartikel. Die endgültige Dichte erreichte 18,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  und lag über 99 %. Die Sinteratmosphäre muss Wasserstoff oder Vakuum sein, um Oxidation zu verhindern. Beispielsweise beim Sintern unter einem Vakuum von  $10^{-3}$  Pa, der Sauerstoffgehalt kann auf 0,01 % reduziert werden. Sinterzeit und -temperatur müssen genau kontrolliert werden. Zu hohe Temperaturen (z. B. 1600  $^{\circ}\text{C}$ ) können zum Verlust

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Flüssigphase führen, zu niedrige Temperaturen (z. B. 1300 °C) führen zu einer unzureichenden Dichte von nur 95 %.

**Nachbehandlungen** wie das heißisostatische Pressen (HIP) können die Leistung weiter optimieren. Beispielsweise beseitigt eine einstündige Behandlung bei 200 MPa und 1400 °C Mikroporosität und erhöht die Dichte von 99 % auf 99,8 % bei einer Dichte von fast 19 g/cm<sup>3</sup>. Dieses Verfahren wird insbesondere bei der Herstellung hochwertiger Gegengewichte bei der CTIA GROUP LTD. häufig eingesetzt.

#### 4.3 Andere Herstellungsverfahren für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

Zusätzlich zur Pulvermetallurgie können hochdichte Wolframlegierungen auch mit anderen Methoden hergestellt werden, um spezielle Anforderungen zu erfüllen oder die Einschränkungen herkömmlicher Verfahren zu überwinden.

**Das Schmelz- und Gießverfahren** eignet sich für Legierungen mit niedrigem Wolframgehalt (wie W-50Cu). Kupfer wird in einem Lichtbogenofen oder Induktionsofen geschmolzen und anschließend mit Wolframpulver vergossen. Beispielsweise schmilzt und gießt die CTIA GROUP LTD die Legierung W-70Cu bei 1800 °C. Nach dem Abkühlen erreicht die Dichte 14,5 g/cm<sup>3</sup>. Da der Schmelzpunkt von Wolfram jedoch deutlich höher ist als der von Kupfer (3422 °C gegenüber 1083 °C), ist die Herstellung von Legierungen mit hohem Wolframgehalt mit diesem Verfahren schwierig. Es kommt leicht zu Entmischungen, und die Gleichmäßigkeit ist nicht so gut wie bei der Pulvermetallurgie.

**mechanischen Legieren** wird Wolframpulver durch Hochenergie-Kugelmahlen mechanisch mit Bindephasenpulver vermischt, um eine Nichtgleichgewichtslegierung zu bilden. Beispielsweise verwendet die CTIA GROUP LTD eine Planetenkugelmühle, um W-Ni-Fe-Pulver 10 Stunden lang bei 500 U/min zu mahlen, die Körner auf 50 nm zu verfeinern und anschließend durch Pressen und Sintern die Zugfestigkeit auf 1200 MPa zu erhöhen. Dieses Verfahren eignet sich für die Entwicklung neuer Hochleistungslegierungen, die Produktionseffizienz ist jedoch gering.

**Additive Fertigung (3D-Druck)** ist eine in den letzten Jahren entwickelte Herstellungstechnologie, die selektives Laserschmelzen (SLM) oder Elektronenstrahlschmelzen (EBM) nutzt. Beispielsweise schmilzt die CTIA GROUP LTD W-90Ni-Fe-Pulver mit einem 3000-W-Laser mittels SLM und druckt schichtweise komplex geformte Teile mit einer Dichte von 18 g/cm<sup>3</sup> und einer Porosität von <1 %. Dieses Verfahren eignet sich für die kundenspezifische Produktion, ist jedoch teuer: Die Kosten pro Kilogramm Teile betragen etwa das Zwei- bis Dreifache herkömmlicher Verfahren.

#### 4.4 Einfluss der Prozessparameter auf schwere Wolframlegierungen

Die Eigenschaften hochdichter Wolframlegierungen werden maßgeblich von den Prozessparametern beeinflusst, darunter die Partikelgröße des Rohmaterials, die Sintertemperatur, der Druck und die Atmosphäre.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Partikelgröße des Rohmaterials** beeinflusst Dichte und mechanische Eigenschaften. Die Partikelgröße von Wolframpulver reduziert sich von 10 µm auf 1 µm, und die Dichte nach dem Sintern steigt von 18,0 g/cm<sup>3</sup> auf 18,8 g/cm<sup>3</sup>, da die feinen Partikel dichter gepackt sind. Partikel mit einer Größe unter 0,5 µm neigen jedoch zur Agglomeration, weshalb der Mischprozess optimiert werden muss. Ist die Partikelgröße der Bindephase (z. B. Nickelpulver) zu groß (z. B. 10 µm), führt dies zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Flüssigphase und einer Verringerung der Zähigkeit um 10–15 %.

**Die Sintertemperatur** bestimmt die Bildung der flüssigen Phase und die Dichte. Beispielsweise beträgt die Dichte der bei 1450 °C gesinterten W-90Ni-Fe-Legierung 18,2 g/cm<sup>3</sup>; bei 1500 °C erreicht sie 18,6 g/cm<sup>3</sup>. Bei zu hoher Temperatur (z. B. 1600 °C) verflüchtigt sich das Nickeleisen, die Dichte sinkt auf 18,0 g/cm<sup>3</sup> und die Härte nimmt um 20 % ab. Die optimale Temperatur hängt von der Zusammensetzung ab und liegt üblicherweise 50–100 °C über dem Schmelzpunkt der Bindephase.

**Der Pressdruck** beeinflusst die Grünkörperdichte und die Sintereffizienz. Bei einer Erhöhung des kaltisostatischen Pressdrucks von 200 MPa auf 300 MPa erhöht sich die Grünkörperdichte von 11 g/cm<sup>3</sup> auf 12,5 g/cm<sup>3</sup>, wodurch sich die Endprodukt-dichte um 0,5 % erhöht. Ein zu hoher Druck (z. B. 400 MPa) kann jedoch zu Formverschleiß und höheren Kosten führen.

**Die Sinteratmosphäre** beeinflusst den Oxidationsgrad. Eine Wasserstoffatmosphäre (Flussrate 100 mL/min) kann den Sauerstoffgehalt auf 0,02 % reduzieren, während beim Sintern an Luft 0,5 % Oxid entstehen und die Dichte auf 17,5 g/cm<sup>3</sup> sinkt. Vakuumsintern (10<sup>-4</sup> Pa) ist effektiver und eignet sich für hochpräzise Teile.

#### 4.5 Qualitätskontrolle und Inspektion von schweren Wolframlegierungen

Qualitätskontrolle und -prüfung sind der Schlüssel zur Gewährleistung der stabilen Leistung der hochdichten Wolframlegierung und durchlaufen den gesamten Herstellungsprozess.

**Die Qualitätskontrolle von Rohstoffen** umfasst chemische Analysen und Partikelgrößenprüfungen. Beispielsweise verwendet die CTIA GROUP LTD ICP-MS zur Bestimmung der Reinheit von Wolframpulver (> 99,9 %) und einen Laser-Partikelgrößenanalysator zur Messung der Partikelgrößenverteilung (D50 = 3 µm), um sicherzustellen, dass Verunreinigungen (wie Fe < 0,01 %) und Partikelgröße den Standards entsprechen.

**Die Prozesssteuerung** überwacht die Press- und Sinterparameter. Der Pressdruck wird in Echtzeit von Sensoren mit einer Abweichung von <5 MPa erfasst; die Sintertemperatur wird durch Thermoelemente mit einer Genauigkeit von ±5 °C geregelt. Beispielsweise setzt die CTIA GROUP LTD im Sinterofen eine Mehrpunkt-Temperaturmessung ein, um eine Temperaturgleichmäßigkeit von <10 °C zu gewährleisten.

**Die Prüfung des fertigen Produkts** umfasst Dichte, mechanische Eigenschaften und Mikrostrukturanalyse. Die Dichte wird mit dem archimedischen Verfahren gemessen; der Zielwert für die Legierung W-95Ni-Fe beträgt beispielsweise 18,8 ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>. Zugversuche (nach ASTM E8) prüfen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Zugfestigkeit (> 1000 MPa) und die Dehnung (> 15 %). Mikroskope (z. B. SEM) beobachten die Wolframpartikelverteilung und Porosität, beispielsweise Porendurchmesser < 5 µm und Anteile < 0,5 %. Zusätzlich werden zerstörungsfreie Prüfungen (z. B. Ultraschall) eingesetzt, um innere Defekte zu prüfen und so die Teilezuverlässigkeit sicherzustellen.

Diese Maßnahmen stellen sicher, dass die Produkte der CTIA GROUP LTD die strengen Anforderungen der Luftfahrt, der Medizin und anderer Bereiche erfüllen, wie beispielsweise die Dichteabweichung von Gegengewichten <0,2 % und die Porosität von Abschirmteilen <0,1 %.

### Herstellungsprozess einer Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

Vorbereitung	Schlüsselparameter/Techniken	Typische Werte/Bedingungen	Auswirkung/Ziel
Rohstoffauswahl	Reinheit und Partikelgröße von Wolframpulver	≥99,9 %, 3 µm	Sorgen Sie für hohe Dichte und Gleichmäßigkeit
Vorverarbeitung	Mischgeschwindigkeit, Reduktionstemperatur	300 U/min, 800 °C	Gleichmäßig verteilt, Sauerstoffgehalt <0,05 %
Drücken	Kaltisostatischer Pressdruck, Formdruck	200-300 MPa, 500-700 MPa	Grünkörperdichte 60%-70%
Pulvermetallurgisches Sintern	Sintertemperatur, Atmosphäre	1480°C, Wasserstoff/Vakuum	Dichte 18,5 g/cm <sup>3</sup> , Dichte >99 %
Schmelzguss	Schmelztemperatur	1800°C	Dichte 14,5 g/cm <sup>3</sup> , geeignet für W-Cu
Mechanisches Legieren	Geschwindigkeit und Zeit des Kugelmahlens	500 U/min, 10 Stunden	Korngröße 50 nm, Festigkeit 1200 MPa
3D-Druck	Laserleistung, Porosität	3000 W, <1 %	Komplexe Form, Dichte 18 g/cm <sup>3</sup>
Prozessparameter	Partikelgröße, Temperatur, Druck	1-10 µm, 1450-1500°C, 200 MPa	Optimieren Sie Dichte und Zähigkeit
Qualitätskontrolle	Dichteabweichung, Porosität	±0,1 g/cm <sup>3</sup> , <0,5 %	Erfüllen Sie Luftfahrt- und medizinische Standards

*Hinweis: Die Daten in der Tabelle basieren auf dem typischen Prozess der CTIA GROUP LTD. Die spezifischen Werte variieren je nach Produktanforderungen.*

#### 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

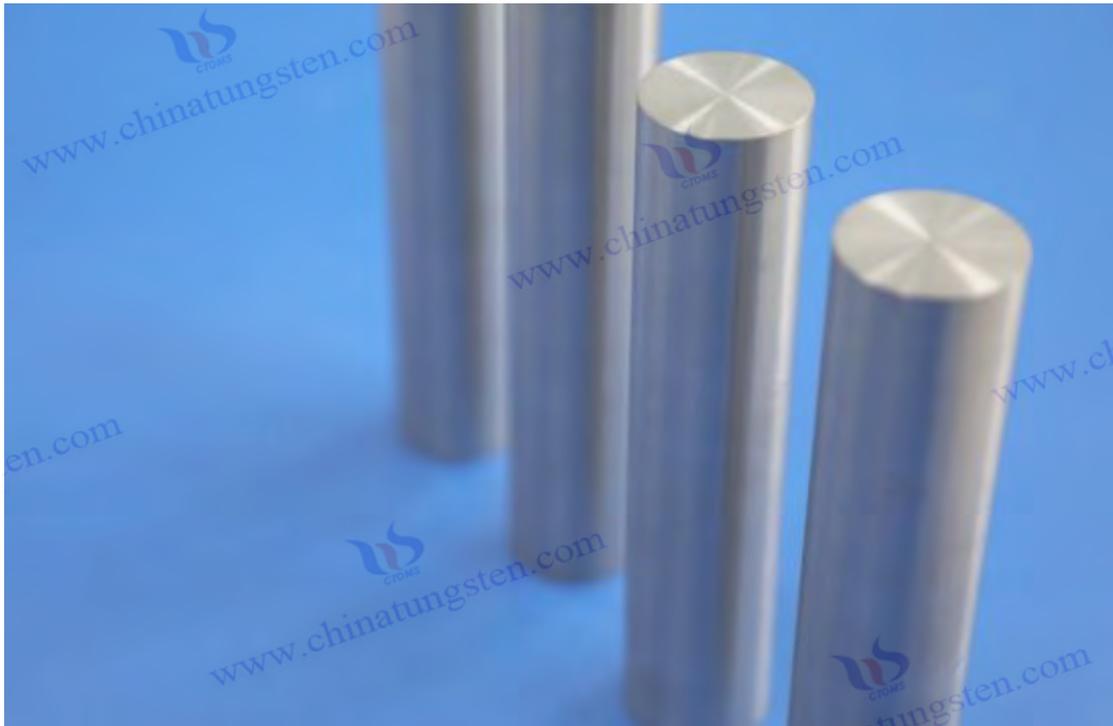
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 5: Verarbeitungs- und Nachbearbeitungstechnologie von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

### 5.1 Bearbeitungstechnologie für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

Die Bearbeitungstechnologie schwerer Wolframlegierungen ist der entscheidende Schritt bei der Umwandlung von Sinterblöcken in Präzisionsteile. Aufgrund der hohen Härte (300–500 HV) und der moderaten Zähigkeit (Dehnung 10–30 %) liegt der Bearbeitungsaufwand zwischen dem von reinem Wolfram und gewöhnlichem Stahl und erfordert Spezialwerkzeuge und eine Optimierung der Prozessparameter.

**Drehen und Fräsen** sind gängige Schneidverfahren. Die Zerspanbarkeit schwerer Wolframlegierungen profitiert von der Anwesenheit einer Bindephase (z. B. Ni-Fe), wodurch ihre Schnittfestigkeit geringer ist als die von reinem Wolfram. Beispielsweise verwendet die CTIA GROUP LTD bei der Bearbeitung der W-90Ni-Fe-Legierung Hartmetallwerkzeuge (z. B. WC-Co-beschichtete Werkzeuge) mit einer Schnittgeschwindigkeit von 40–60 m/min, einem Vorschub von 0,1–0,2 mm/U und einer Schnitttiefe von maximal 1 mm. Dadurch kann die Oberflächenrauheit unter Ra 1,6 µm gesteuert werden, was den Anforderungen von Gegengewichten in der Luftfahrt entspricht. Im Vergleich zu reinem Wolfram (Schnittgeschwindigkeit nur 10 m/min) ist die Bearbeitungseffizienz schwerer Wolframlegierungen etwa drei- bis fünfmal höher, der Werkzeugverschleiß ist jedoch immer noch 20–30 % höher als bei der Bearbeitung von Stahl, sodass die Werkzeuge regelmäßig ausgetauscht werden müssen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Bohren und Ausbohren** eignen sich zum Herstellen von Löchern oder Hohlräumen. Beispielsweise verwendet die CTIA GROUP LTD bei der Bearbeitung von Abschirmteilen aus der W-95Ni-Fe-Legierung einen 5 mm großen Bohrer aus Kobalt-Schnellarbeitsstahl mit einer Drehzahlregelung von 500–800 U/min und einem Vorschub von 0,05 mm/U, um eine Lochdurchmessertoleranz von  $\pm 0,02$  mm zu gewährleisten. Aufgrund der hohen Härte hochdichter Wolframlegierungen muss der Bohrer mit TiN oder TiAlN beschichtet werden, um seine Lebensdauer zu verlängern. Kühlmittel (z. B. eine wasserbasierte Emulsion) ist unerlässlich, um die Temperatur der Schneidzone um ca. 50 °C zu senken und das Risiko von thermischen Rissen zu verringern.

**Schleifen und Polieren** dienen der hochpräzisen Oberflächenbearbeitung. Beispielsweise verwendet die CTIA GROUP LTD bei der Bearbeitung medizinischer Teile aus der W-93Ni-Fe-Legierung Diamantschleifscheiben (120er Körnung) für den Grobschliff, anschließend Feinschliff mit 2000er Schleifpapier und abschließendes Polieren auf Ra 0,4  $\mu\text{m}$ , um die Oberflächenanforderungen von Strahlenschutzteilen zu erfüllen. Die Schleifgeschwindigkeit beträgt 20–30 m/s und der Vorschub 0,01–0,02 mm/Durchgang, um Mikrorisse durch Überhitzung zu vermeiden. Im Vergleich zu reinem Wolfram (das eine härtere Schleifscheibe erfordert und anfällig für Risse ist) ermöglicht die Zähigkeit hochdichter Wolframlegierungen das Erzielen eines Spiegeleffekts.

**den Verarbeitungsschwierigkeiten und Gegenmaßnahmen** zählen Werkzeugverschleiß und thermische Verformung. Die hohe Härte schwerer Wolframlegierungen verkürzt die Werkzeugstandzeit. Beispielsweise kann die Verschleißtiefe der Werkzeugschneide nach der Bearbeitung von 100 Teilen 0,2 mm erreichen. CBN-Werkzeuge (kubisches Bornitrid) werden anstelle von herkömmlichem Hartmetall benötigt, was die Standzeit um etwa 50 % verlängern kann. Zudem kann die Schneidwärme zu Maßabweichungen der Teile führen. Beispielsweise beträgt die Wärmeausdehnung der W-90Ni-Fe-Legierung bei einem Temperaturanstieg von 60 °C etwa 0,005 mm/cm. Die Temperatur muss durch Kühlmittel und intermittierendes Schneiden kontrolliert werden.

## 5.2 Wärmebehandlungstechnologie von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

Wärmebehandlungstechnologie wird eingesetzt, um die Mikrostruktur hochdichter Wolframlegierungen anzupassen, ihre mechanischen Eigenschaften zu verbessern oder Verarbeitungsspannungen zu eliminieren. Gängige Methoden sind Glühen, Abschrecken und Altern. Aufgrund des hohen Schmelzpunkts und der Legierungseigenschaften von Wolfram muss der Prozess jedoch speziell entwickelt werden.

**Die Glühbehandlung** dient hauptsächlich dazu, die durch Sintern oder Verarbeitung entstandenen inneren Spannungen abzubauen. Beispielsweise glühte die CTIA GROUP LTD Teile aus der W-90Ni-Fe-Legierung zwei Stunden lang in einer Wasserstoffatmosphäre bei 900 °C und einer kontrollierten Abkühlrate von 50 °C/h. Die Spannung sank von 200 MPa auf unter 50 MPa, und die Dehnung nahm um etwa 10 % zu. Die Glühtemperatur sollte nicht zu hoch ( $> 1000$  °C) sein, da sonst die Verbindungsphase erweichen und die Härte um 15–20 % abnehmen kann.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Abschrecken** wird bei hochdichten Wolframlegierungen selten angewendet, da deren Zähigkeit durch die Bindephase optimiert wurde. Unter bestimmten Anforderungen (z. B. Erhöhung der Oberflächenhärte) kann jedoch lokal abgeschreckt werden. Beispielsweise erhitze die CTIA GROUP LTD die Oberfläche der W-95Ni-Fe-Legierung schnell auf 1200 °C und kühlte sie anschließend wassergekühlt ab. Dadurch erhöhte sich die Oberflächenhärte von 450 HV auf 500 HV bei einer Tiefe von etwa 0,5 mm, die innere Zähigkeit blieb jedoch unverändert. Dieses Verfahren erfordert eine präzise Kontrolle der Abkühlgeschwindigkeit, um Risse zu vermeiden.

**Eine Alterungsbehandlung** eignet sich für Legierungen mit Kobalt oder Molybdän, um Verstärkungsphasen auszuscheiden. Beispielsweise führte die CTIA GROUP LTD eine Alterung bei 600 °C für 4 Stunden an der Legierung W-93Ni-Fe-2Co durch, um Co-basierte Verbindungen auszuscheiden. Dadurch erhöhte sich die Zugfestigkeit von 1000 MPa auf 1100 MPa und die Härte auf 480 HV. Eine zu lange Alterung (z. B. 8 Stunden) kann zu einer Überalterung mit einem Rückgang der Zähigkeit um 5–10 % führen.

**Die Wirkung der Wärmebehandlung** hängt von der Atmosphärenkontrolle ab. Wasserstoff oder Vakuum ( $10^{-3}$  Pa) können Oxidation verhindern. Beispielsweise wird im Glühofen von China Tungsten Intelligence der Sauerstoffgehalt unter 0,01 % gehalten, um sicherzustellen, dass sich keine Oxidschicht auf der Oberfläche bildet. Im Vergleich zu reinem Wolfram (das höhere Temperaturen erfordert und leicht versprödet) bieten hochdichte Wolframlegierungen ein breiteres Wärmebehandlungsfenster und eine stärkere Anpassungsfähigkeit.

### 5.3 Oberflächenbehandlungstechnologie von hochdichter Wolframlegierung

Die Oberflächenbehandlungstechnologie dient dazu, die Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit oder Ästhetik schwerer Wolframlegierungen zu verbessern. Gängige Methoden sind Plattieren, Aufkohlen und Sprühen.

**Galvanisieren** wird häufig eingesetzt, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern. Beispielsweise hat die CTIA GROUP LTD die Oberfläche von Teilen aus der Legierung W-90Ni-Fe mit einer 5 µm dicken Nickelschicht galvanisiert. Nach 1000-stündigem Einlegen in 10%ige Salzsäure sank die Korrosionsrate von 2 % auf 0,2 % – eine Verzehnfachung. Die Schichtdicke muss auf 3–10 µm begrenzt werden. Zu dicke Schichten können zum Abblättern führen. Bei elektronischen Bauteilen wird Vergolden oder Versilbern verwendet. Beispielsweise wird eine Elektrode aus der Legierung W-80Cu mit einer 2 µm dicken Goldschicht beschichtet, wodurch der spezifische Widerstand auf 4 µΩ·cm reduziert und die Leitfähigkeit um 20 % erhöht wird.

**Durch Aufkohlen** werden die Oberflächenhärte und die Verschleißfestigkeit verbessert. Beispielsweise kohlt die CTIA GROUP LTD die Oberfläche der W-95Ni-Fe-Legierung drei Stunden lang bei 950 °C auf. Dadurch erhöht sich der Kohlenstoffgehalt auf 0,5 %, die Oberflächenhärte von 450 HV auf 600 HV und die Verschleißfestigkeit um 30 %, wodurch die Legierung für Bohrwerkzeuge geeignet ist. Die Aufkohlungstiefe beträgt in der Regel 0,1–0,3 mm, um die innere Zähigkeit nicht zu beeinträchtigen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Thermisches Spritzen** wird in speziellen Umgebungen eingesetzt. Beispielsweise spritzt die CTIA GROUP LTD eine 0,2 mm dicke  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramikbeschichtung auf W-90Ni-Fe-Legierungsteile. Dies erhöht die Korrosionsbeständigkeit bei 1500 °C um 50 % und eignet sich daher für Hochtemperatur-Luftfahrtteile. Die Spritzdicke muss gleichmäßig sein und darf nicht mehr als 0,02 mm abweichen, um die Haftung zu gewährleisten.

**Die Wahl der Oberflächenbehandlung** muss je nach Anwendungsszenario abgewogen werden. Beispielsweise werden medizinische Abschirmteile vorzugsweise vernickelt, um Korrosionsbeständigkeit und Ungiftigkeit zu gewährleisten. Schneidwerkzeuge hingegen eignen sich besser zum Aufkohlen, um die Verschleißfestigkeit zu verbessern.

#### 5.4 Verbindungstechnik von hochdichten Wolframlegierungen

Die Verbindungstechnik dient dazu, schwere Wolframlegierungen mit anderen Materialien oder sich selbst zu komplexen Strukturen zusammenzufügen. Gängige Verfahren sind Schweißen, Löten und mechanisches Fügen.

**Das Schweißen** ist aufgrund des hohen Schmelzpunkts von Wolfram (3422 °C) eine Herausforderung. Hochdichte Wolframlegierungen ermöglichen jedoch dank der vorhandenen Bindephase lokales Schmelzschweißen. Beispielsweise verwendet die CTIA GROUP LTD das Elektronenstrahlschweißen (EBW) für die Legierung W-90Ni-Fe mit einer Strahlleistung von 5 kW, einer Schweißgeschwindigkeit von 1 m/min, einer Schweißtiefe von 3 mm und einem Festigkeitserhalt von ca. 90 %. Nach dem Schweißen ist ein Glühen (800 °C, 1 Stunde) erforderlich, um Spannungen abzubauen und Risse zu vermeiden.

**Löten** wird aufgrund der niedrigeren Temperaturen häufiger verwendet. Beispielsweise verwendet die CTIA GROUP LTD Ag-Cu-Lötmaterial (Schmelzpunkt 780 °C), um die W-80Cu-Legierung mit einem Kupfersubstrat zu verbinden. Die Löttemperatur beträgt 850 °C und die Verbindungsscherfestigkeit erreicht 200 MPa, was für elektronische Geräte geeignet ist. Das Lötmaterial muss mit der Verbindungsphase kompatibel sein, um Grenzflächenreaktionen zu vermeiden.

**Mechanische Verbindungen** wie Schrauben oder Nieten eignen sich für Situationen, in denen Schweißen nicht möglich ist. Beispielsweise bohrt und bohrt die CTIA GROUP LTD Löcher in Gegengewichte aus W-95Ni-Fe-Legierung und verbindet diese mit M6-Titanschrauben mit einer Tragfähigkeit von 5000 N und einfacher Demontage. Es ist zu beachten, dass Spannungskonzentrationen am Lochrand durch Anfasen oder Auffüllen verringert werden können.

**Die Schwierigkeit bei der Verbindung** liegt im Unterschied des Wärmeausdehnungskoeffizienten. Beispielsweise kann bei der Verbindung von W-90Ni-Fe ( $4,5 \times 10^{-6} /\text{K}$ ) mit Stahl ( $12 \times 10^{-6} /\text{K}$ ) ein Temperaturunterschied von 100 °C einen Verschiebungsunterschied von 0,075 mm erzeugen, der die Konstruktion eines Ausgleichsspalts oder einer flexiblen Verbindung erforderlich macht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5.5 Optimierung und Anwendung der Nachbearbeitungstechnologie für hochdichte Wolframlegierungen

Die Optimierung der Nachbearbeitungstechnologie zielt darauf ab, die Leistung weiter zu verbessern oder spezifische Anforderungen zu erfüllen. Dazu gehören Präzisionsbearbeitung, Leistungssteigerung und Funktionsverarbeitung.

**Die Optimierung der Präzisionsbearbeitung** verbessert die Genauigkeit durch CNC-Technologie. Beispielsweise verwendet die CTIA GROUP LTD fünfachsiges CNC-Werkzeugmaschinen zur Bearbeitung von W-93Ni-Fe-Legierungsteilen mit einer Toleranz von  $\pm 0,01$  mm und einer Oberflächenrauheit von Ra 0,2  $\mu\text{m}$ , die den Anforderungen von Flugzeuggyroskopen entspricht. Bearbeitungsparameter müssen in Echtzeit überwacht werden, beispielsweise eine Schnittkraftabweichung von  $< 5\%$ , um Überlastungen zu vermeiden.

**Zur Leistungssteigerung** werden Heißisostatisches Pressen (HIP) und Ionenimplantation eingesetzt. Beispielsweise hat die CTIA GROUP LTD die Legierung W-95Ni-Fe eine Stunde lang bei 200 MPa und 1400 °C heißisostatisch erhitzt, wodurch die Porosität von 0,5 % auf 0,1 % reduziert und die Lebensdauer um 50 % verlängert wurde. Durch Ionenimplantation von Stickstoff (Dosis  $10^{17}$  Ionen/cm<sup>2</sup>) kann die Oberflächenhärte auf 550 HV erhöht und die Verschleißfestigkeit um 20 % verbessert werden.

**Funktionelle Behandlungen** wie Beschichtungen oder Mikrostrukturdesign. Beispielsweise ätzt die CTIA GROUP LTD Mikroporen (50  $\mu\text{m}$  Durchmesser) per Laser in die Oberfläche der W-90Ni-Fe-Legierung und erhöht so den Reibungskoeffizienten für rutschfeste Gegengewichte um 20 %. Zusätzlich wird eine PVD- TiN- Beschichtung verwendet, um die Korrosionsbeständigkeit um 30 % zu erhöhen und sie somit für den Einsatz in Meeresumgebungen geeignet zu machen.

**Anwendungsbeispiele** sind Gegengewichte in der Luftfahrt (hohe Präzision und Dichte erforderlich), medizinische Abschirmteile (Oberflächenqualität und Korrosionsbeständigkeit erforderlich) und Bohrwerkzeuge (Verschleißfestigkeit erforderlich). Die Optimierung muss an die Zielleistung angepasst werden. Beispielsweise setzt die CTIA GROUP LTD bei medizinischen Teilen auf HIP und Vernickelung, während bei Bohrwerkzeugen Aufkohlen und Sprühen im Vordergrund stehen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Technologiekategorie	Schlüsselmethode	Typische Parameter	Ziel/Wirkung
Bearbeitung	Drehen	40-60 m/min, 0,1 mm/U	Oberflächenrauheit Ra 1,6 µm
	Schleifen	20-30 m/s, Ra 0,4 µm	Hochpräzise Oberfläche
Wärmebehandlung	Glühen	900°C, 2 Stunden	Spannung auf 50 MPa reduziert, Dehnung +10%
	Altern	600°C, 4 Stunden	Festigkeit 1100 MPa, Härte 480 HV
Oberflächenbehandlung	Vernickeln	5 µm dick	Die Korrosionsrate sank auf 0,2 %
	Aufkohlung	950°C, 3 Stunden	Härte 600 HV, Verschleißfestigkeit +30%
Anschlusstechnik	Elektronenstrahlschweißen	5 kW, 1 m/min	Schweißfestigkeit 90 %
	Löten	850°C, Ag-Cu-Lot	Scherfestigkeit 200 MPa
Nachbearbeitungsoptimierung	HÜFTE	200 MPa, 1400 °C	Porosität 0,1 %, Lebensdauer +50 %
	Laserätzen	Mikropore 50 µm	Reibungskoeffizient +20 %

Hinweis: Die Daten in der Tabelle basieren auf dem typischen Prozess der chinesischen Wolframherstellung. Die spezifischen Werte variieren je nach Anwendungsanforderungen.

## 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.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**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

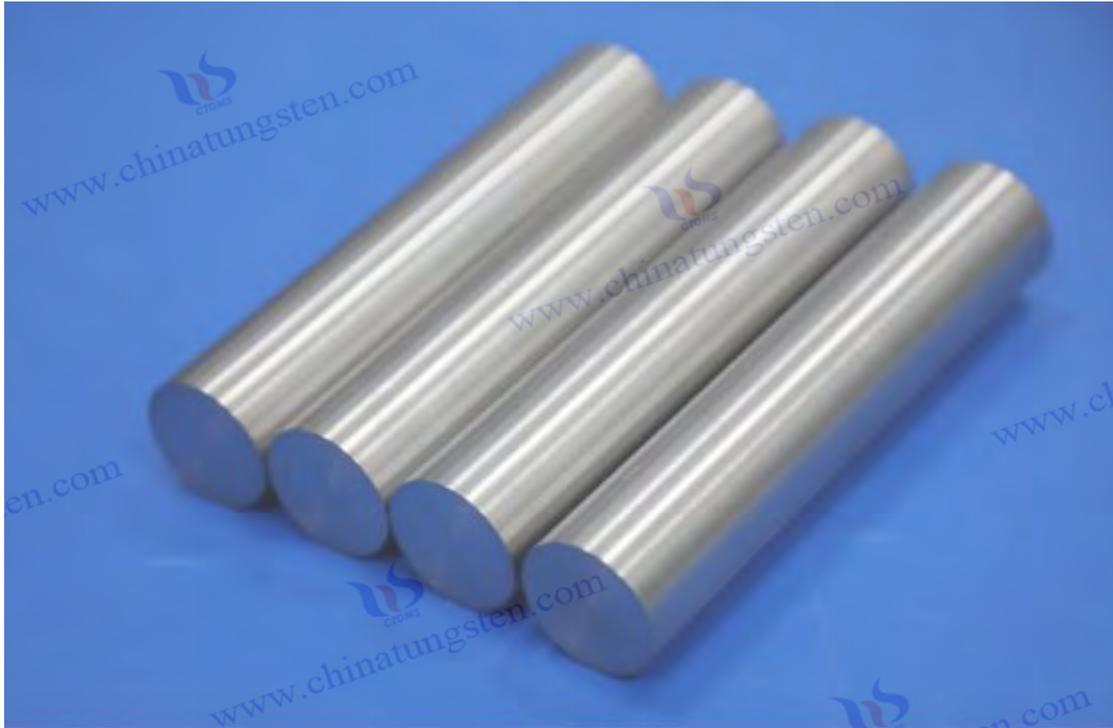
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



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: Produktionsanlagen für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

### 6.1 Rohstoffaufbereitungsanlagen

Die Herstellung hochdichter Wolframlegierungen beginnt mit der Rohstoffaufbereitung. Dazu gehören die Herstellung und Verarbeitung von Wolframpulver und Bindephasenpulver. Zur Hauptausrüstung gehören Reduktionsofen, Kugelmühle und Siebmaschine, die sich direkt auf die Reinheit, Partikelgröße und Gleichmäßigkeit der Rohstoffe auswirken.

**Wasserstoffreduktionsöfen** werden verwendet, um hochreines Wolframpulver aus Wolframoxid ( $WO_3$ ) herzustellen. Eine typische Ausrüstung ist ein Mehrrohr-Schubschiffofen mit einem Betriebstemperaturbereich von 700–1000 °C und einem Wasserstoffdurchfluss von 50–100 l/min. Beispielsweise kann  $WO_3$  durch Reduktion bei 900 °C für 4 Stunden in Wolframpulver mit einer Reinheit von  $\geq 99,9\%$  und einem Sauerstoffgehalt von  $< 0,05\%$  umgewandelt werden. Der Ofen verfügt über ein Mehrzonen-Heizdesign mit einer geregelten Temperaturdifferenz von  $\pm 5$  °C, um eine gleichmäßige Reduktion sicherzustellen. Die Anlagenkapazität reicht von 50 kg bis 500 kg pro Tag, was für die Produktion kleiner und mittlerer Chargen geeignet ist. Der Schlüssel liegt in der Kontrolle der Atmosphäre, und ein Wasserstoffreinigungssystem (wie beispielsweise ein Molekularsieb) ist erforderlich, um den Feuchtigkeitsgehalt auf unter 10 ppm zu senken.

**Kugelmühlen** werden verwendet, um Wolframpulver mit einer Bindephase (z. B. Ni, Fe) zu mischen und die Partikelgröße zu verfeinern. Planetenkugelmühlen mit einem Drehzahlbereich von 200–600 U/min und einem Kugel-Material-Verhältnis von 10:1 bis 20:1 sind eine gängige Wahl. Beispielsweise reduziert das Mahlen eines W-90Ni-Fe-Mischpulvers bei 400 U/min über 6 Stunden die Partikelgröße

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von Wolframpulver von 5  $\mu\text{m}$  auf 3  $\mu\text{m}$ , mit einer Gleichmäßigkeitsabweichung von  $<1\%$ . Die Mahlkörper bestehen meist aus Hartmetallkugeln (WC-Co) mit einem Durchmesser von 5–10 mm, um eine Kontamination durch Verunreinigungen zu vermeiden. Um eine Pulveragglomeration zu verhindern, können 0,5–1 % Prozesskontrollmittel (z. B. Stearinsäure) hinzugefügt und nach dem Mahlen durch Trocknen entfernt werden. Die Anlage muss über ein Kühlsystem verfügen, um die Temperatur im Tank auf  $<60\text{ }^\circ\text{C}$  zu regeln und die Lebensdauer der Dichtungen zu verlängern.

**Vibrationsiebe** dienen der Entfernung über- oder untergroßer Partikel, um eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung zu gewährleisten. Typische Siebe haben eine Maschenweite von 100–200 (ca. 74–150  $\mu\text{m}$ ) und eine Schwingfrequenz von 1500–3000 Schwingungen/min. Beispielsweise reduziert das 10-minütige Sieben von 3  $\mu\text{m}$  Wolframpulver den Anteil entfernter Partikel  $>10\text{ }\mu\text{m}$  von 5 % auf 0,1 %. Die Anlage ist mit Antiblockiervorrichtungen (z. B. Ultraschall-Siebreinigung) ausgestattet, um die Effizienz zu verbessern. Für eine hochpräzise Siebung sind mehrere Siebstufen, z. B. 100, 150 und 200 Maschen, in Folge erforderlich, um unterschiedliche Prozessanforderungen zu erfüllen.

Der Synergieeffekt dieser Anlagen sichert die Qualität der Rohstoffe. Beispielsweise beträgt in einer bestimmten Produktionslinie die optimierte Partikelgrößenverteilung D50 des Wolframpulvers 3  $\mu\text{m}$  und der Sauerstoffgehalt 0,03 %, was die Grundlage für das anschließende Pressen und Sintern bildet.

## 6.2 Pressgeräte

Press- und Formanlagen wandeln gemischtes Pulver in Grünkörper um, die ein wichtiges Glied im Pulvermetallurgieprozess darstellen. Zu den üblichen Anlagen gehören kaltisostatische Pressen und hydraulische Pressen.

**Kaltisostatisches Pressen (CIP)** übt gleichmäßigen Druck durch ein flüssiges Medium (wie Wasser oder Öl) aus und eignet sich daher für komplexe Formen. Der Arbeitsdruckbereich liegt zwischen 100 und 400 MPa, der Hohlraumdurchmesser zwischen 50 und 500 mm. Beispielsweise erreicht das Pressen von W-90Ni-Fe-Pulver bei 250 MPa eine Dichte des Grünkörpers von 11 bis 13  $\text{g}/\text{cm}^3$ , was 60 bis 70 % der theoretischen Dichte entspricht. Die Anlage ist mit einer Hochdruckpumpe und einem Dichtungssystem ausgestattet. Die Druckgenauigkeit liegt bei  $\pm 2\text{ MPa}$ , die Presszeit beträgt ca. 5 bis 10 Minuten. Um Pulverlecks zu vermeiden, werden Polyurethan- oder Gummiformen mit einer Druckfestigkeit von  $>300\text{ MPa}$  benötigt. Der Vorteil liegt im gleichmäßigen Druck, der sich für die Herstellung großer Teile wie Gegengewichte für Flugzeuge eignet.

**Hydraulische Pressen** werden zum Formpressen eingesetzt und eignen sich für Kleinserien oder einfach geformte Teile. Der Druckbereich liegt zwischen 200 und 1000 MPa, der Formdurchmesser zwischen 10 und 100 mm. Beispielsweise wird ein zylindrischer W-95Ni-Fe-Block mit einem Durchmesser von 50 mm bei 600 MPa gepresst. Die Formzeit beträgt 30 Sekunden, und die Blockdichte erreicht 12  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Die Anlage muss mit Präzisionsformen (z. B. Stahlformen mit einer Härte von  $>60\text{ HRC}$ ) ausgestattet sein. Zur Reibungsreduzierung wird regelmäßig ein Trennmittel (z. B. Graphitemulsion) aufgetragen. Im Vergleich zum kaltisostatischen Pressen sind hydraulische Pressen effizienter, weisen jedoch eine etwas schlechtere innere Spannungsverteilung im Block auf.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Zusatzgeräte** wie Vakuumverpackungsmaschinen werden verwendet, um das Pulver vor dem Einfüllen in die Form zu entgasen und so Blasenbildung während des Pressvorgangs zu vermeiden. Beispielsweise kann das Verpacken bei einem Vakuum von  $10^{-2}$  Pa die Porosität des Rohlings um 0,5 % reduzieren. Die Auswahl dieser Geräte muss an die Teilegröße und das Produktionsvolumen angepasst werden. Beispielsweise bevorzugt die CTIA GROUP LTD bei der Herstellung medizinischer Abschirmteile kaltisostatische Pressen, um die Gleichmäßigkeit zu gewährleisten.

### 6.3 Sinteranlage

Sinteranlagen sind das Herzstück der Produktion schwerer Wolframlegierungen. Sie dienen der Umwandlung des Grünkörpers in hochdichte Fertigprodukte. Sie umfassen hauptsächlich Flüssigphasen-Sinteröfen und heißisostatische Pressöfen.

**Flüssigphasensinteröfen** verwenden hohe Temperaturen, um die Bindephase zu schmelzen und die Lücken zwischen den Wolframpartikeln zu füllen. Häufig werden Widerstandsheizöfen mit einem Temperaturbereich von 1300–1600 °C und einer Genauigkeit von  $\pm 5$  °C verwendet. Beispielsweise erhöht das Sintern eines W-93Ni-Fe-Rohlings bei 1480 °C für 2 Stunden die Dichte von 12 g/cm<sup>3</sup> auf 18,5 g/cm<sup>3</sup>, bei einer Dichte von >99 %. Der Ofen besteht meist aus Aluminiumoxid oder Molybdän und hat eine Temperaturbeständigkeit von >1700 °C. Die Atmosphäre kann Wasserstoff (Flussrate 100 ml/min) oder Vakuum ( $10^{-3}$  Pa) sein und der Sauerstoffgehalt wird auf unter 0,01 % geregelt. Die Anlage ist mit einer mehrstufigen Programmtemperaturregelung ausgestattet, beispielsweise einer Heizrate von 5 °C/min und Abkühlung auf 50 °C/h nach der Isolierung, um thermische Spannungsrisse zu vermeiden. Für die Produktion im großen Maßstab können kontinuierliche Sinteröfen mit einer täglichen Produktionskapazität von 1–2 Tonnen eingesetzt werden.

**Heißisostatisches Pressen (HIP):** Wird zur Nachbearbeitung verwendet, um Mikroporen weiter zu entfernen. Die Arbeitsbedingungen liegen bei 100–200 MPa und 1300–1500 °C. Beispielsweise erhöhte sich die Dichte der W-95Ni-Fe-Legierung bei 200 MPa und 1400 °C für eine Stunde von 99 % auf 99,8 %, während die Porosität auf 0,1 % sank. Der Ofenkörper besteht aus einem mit Graphit oder Molybdän ausgekleideten Hochdruckstahlmantel und ist mit einem Argon-Booster-System ausgestattet. Die Druckschwankungen liegen unter 1 MPa. Der Vorteil liegt in der deutlich verbesserten Leistung, die Kosten pro Behandlung sind jedoch relativ hoch, was den Ofen für hochwertige Produkte wie Flugzeugteile geeignet macht.

**den Zusatzsystemen** gehören Vakuumpumpen und Gasrückgewinnungsanlagen. Beispielsweise kann die Vakuumpumpe den Druck im Ofen auf  $10^{-4}$  Pa reduzieren, und das Rückgewinnungssystem recycelt den Wasserstoff, wodurch die Kosten um etwa 20 % gesenkt werden. Die Effizienz und Stabilität der Sinteranlage bestimmen direkt die Qualität des Endprodukts. Beispielsweise liegt die optimierte Ofentemperaturgleichmäßigkeit bei <10 °C, wodurch die Dichteabweichung von Charge zu Charge innerhalb von  $\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup> gehalten wird.

### 6.4 Nachbearbeitungsgeräte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zur Weiterverarbeitung, Wärmebehandlung und Oberflächenbehandlung werden Nachbearbeitungsgeräte eingesetzt, darunter vor allem CNC-Werkzeugmaschinen, Wärmebehandlungsöfen und Beschichtungsanlagen.

**CNC-Maschinen** werden für die Präzisionsbearbeitung eingesetzt. Typischerweise handelt es sich um fünfachsiges Bearbeitungszentren mit einer Spindeldrehzahl von 5000–15000 U/min und einer Positioniergenauigkeit von  $\pm 0,005$  mm. Beispielsweise beträgt die Schnittgeschwindigkeit bei der Bearbeitung von Teilen aus der W-90Ni-Fe-Legierung 50 m/min und die Oberflächenrauheit Ra 0,4  $\mu\text{m}$ . Die Maschine ist mit Diamant- oder CBN-Werkzeugen und einem Kühlsystem mit einem Durchfluss von 10 l/min ausgestattet, um eine stabile Bearbeitung zu gewährleisten. Sie eignet sich für komplexe Teile wie Gyroskop-Gegengewichte.

**Wärmebehandlungsöfen** werden zum Glühen oder Altern eingesetzt. Gängige Widerstandsöfen in Kastenbauweise bieten einen Temperaturbereich von 500–1200 °C und eine Genauigkeit von  $\pm 3$  °C. Beispielsweise reduziert das Glühen eines W-93Ni-Fe-Teils bei 900 °C für 2 Stunden die Spannung um 80 % und erhöht die Dehnung um 10 %. Die Ofenatmosphäre besteht aus Wasserstoff oder Stickstoff, ist mit einem Umluftgebläse ausgestattet, und die Temperaturdifferenz beträgt  $< 5$  °C. Durchlauföfen eignen sich für die Großserienproduktion und können bis zu 500 kg pro Tag verarbeiten.

**Beschichtungsanlagen** wie Galvanikbecken und PVD-Maschinen eingesetzt. Galvanikbecken verwenden Nickel oder Gold als Beschichtungslösung bei einer Stromdichte von 1–5 A/dm<sup>2</sup>. Beispielsweise dauert es 30 Minuten, um eine 5  $\mu\text{m}$  dicke Nickelschicht aufzubringen, die die Korrosionsbeständigkeit um das Zehnfache erhöht. PVD-Maschinen verwenden Magnetronsputtern, um TiN-Beschichtungen mit einer Dicke von 2–5  $\mu\text{m}$  und einer Härte von bis zu 550 HV abzuschneiden, die für verschleißfeste Teile geeignet sind. Die Anlage muss mit einem Vakuumsystem ( $10^{-5}$  Pa) ausgestattet sein, um eine gleichmäßige Beschichtung zu gewährleisten.

Diese Geräte müssen regelmäßig kalibriert werden. Beispielsweise werden CNC-Werkzeugmaschinen einmal im Monat kalibriert und der Temperatursensorfehler von Wärmebehandlungsöfen beträgt  $< 2$  °C, um Verarbeitungsgenauigkeit und Leistungskonsistenz zu gewährleisten.

## 6.5 Automatisierung und Intelligenz von Produktionsanlagen

Mit der Entwicklung von Industrie 4.0 ist die Automatisierung und Intelligenz von Produktionsanlagen für schwere Wolframlegierungen zum Trend geworden, was die Effizienz und Qualitätsstabilität verbessert.

**Die Automatisierungstechnik** umfasst Roboter und Fördersysteme. Beispielsweise kann der Sechachs-Roboter im Pressprozess Formen automatisch mit einer Geschwindigkeit von 20 Stück/min be- und entladen, wodurch manuelle Bedienfehler um 30 % reduziert werden. Der Sinterofen ist mit einem automatischen Be- und Entladesystem ausgestattet, verfügt über eine Förderbandgeschwindigkeit von 0,5 m/min und eine Tagesleistung von 2 Tonnen. Die Automatisierungsausrüstung muss in eine SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) integriert werden, um eine Echtzeit-Parameteranpassung, beispielsweise bei Druckschwankungen  $< 2$  MPa, zu ermöglichen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Das intelligente System** optimiert die Produktion durch Sensoren und Datenanalyse. Temperatursensoren (Genauigkeit  $\pm 1$  °C) und Drucksensoren ( $\pm 0,5$  MPa) überwachen den Sinterprozess in Echtzeit. Die Daten werden in das MES (Manufacturing Execution System) hochgeladen, das bei Abweichungen automatisch Alarm schlägt. So konnte beispielsweise eine Produktionslinie die Ausschussrate durch intelligente Überwachung von 2 % auf 0,5 % reduzieren. KI-Algorithmen können die Wartungszyklen von Anlagen vorhersagen. So kann beispielsweise durch die Analyse der Vibrationsdaten einer Kugelmühle eine frühzeitige Warnung zum Lageraustausch 30 Tage im Voraus erfolgen, wodurch Ausfallzeiten um 50 % reduziert werden.

**Integrationsbeispiele** zeigen, dass in einer intelligenten Produktionslinie Kaltisostatpressen, Sintern und CNC-Bearbeitung über Förderbänder in Reihe geschaltet sind und Sensordaten an die zentrale Leitwarte zurückgemeldet werden. Der Produktionszyklus verkürzt sich von 15 auf 10 Tage, und die Qualifikationsquote der fertigen Produkte erreicht 99,5 %. Intelligenz erfordert hohe Anfangsinvestitionen (etwa doppelt so viel wie herkömmliche Anlagen), reduziert aber die langfristigen Betriebskosten um etwa 20 %.

**Produktionsanlagen für schwere Wolframlegierungen**

Gerätekategorie	Hauptausrüstung	Schlüsselparameter	Funktion/Ziel
<b>Rohstoffaufbereitung</b>	Wasserstoffreduktionsofen	900°C, 50 L/min	Reinheit des Wolframpulvers $\geq 99,9\%$ , Sauerstoff $< 0,05\%$
	Kugelmühle	400 U/min, 6 Stunden	Partikelgröße $3\ \mu\text{m}$ , Gleichmäßigkeit $< 1\%$
<b>Drücken</b>	Kaltisostatische Presse	250 MPa, 5-10 min	Grünkörperdichte $11-13\ \text{g/cm}^3$
	Hydraulische Presse	600 MPa, 30 Sekunden	Hocheffizientes Formteil, Dichte $12\ \text{g/cm}^3$
<b>Sintern</b>	Flüssigphasen-Sinterofen	1480°C, 2 Stunden	Dichte $18,5\ \text{g/cm}^3$ , Dichte $> 99\%$
	Heißisostatischer Pressofen	200 MPa, 1400 °C	Porosität $0,1\%$ , Leistungsoptimierung
<b>Nachbearbeitung</b>	CNC-Werkzeugmaschinen	50 m/min, Ra $0,4\ \mu\text{m}$	Hochpräzise Bearbeitung
	Wärmebehandlungsofen	900°C, 2 Stunden	Stressreduzierung um $80\%$
<b>Automatisierung und Intelligenz</b>	Roboter	20 Stück/min	Verbesserte Effizienz, Fehler $< 30\%$
	Intelligente Überwachung	Temperatur $\pm 1^\circ\text{C}$ , Ausschussrate $0,5\%$	Stabile Qualität, vorhersehbare Wartung

Hinweis: Bei den Daten in der Tabelle handelt es sich um typische Bereiche. Die spezifischen Parameter variieren je nach Prozessanforderungen.

## 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

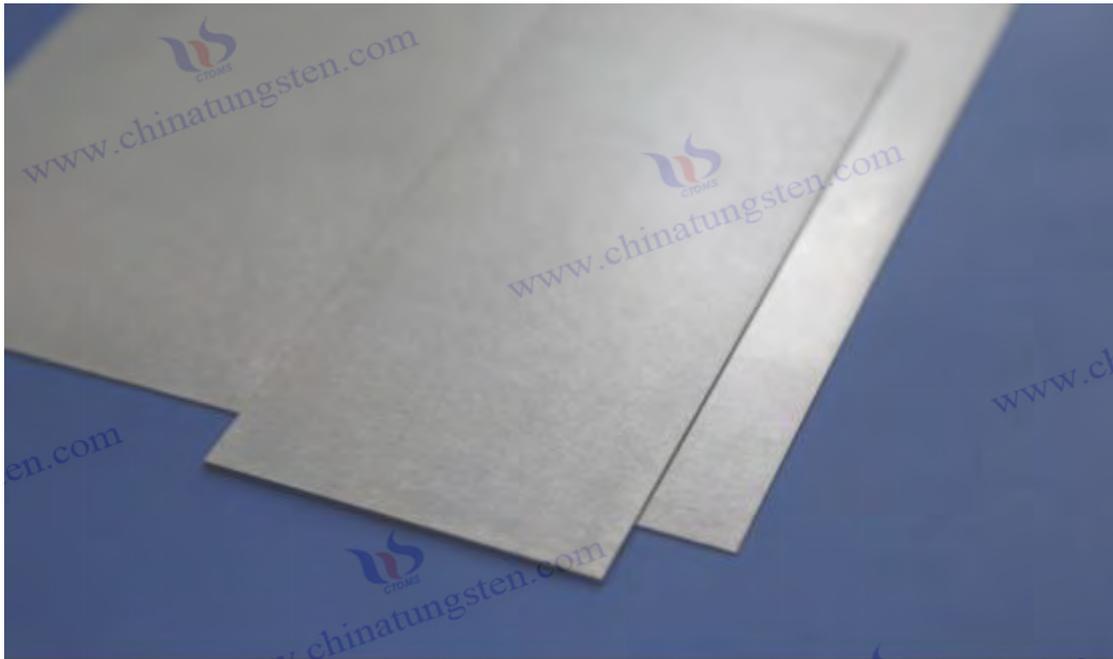
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 7: Prüfgeräte für schwere Wolframlegierungen

### 7.1 Geräte zur Analyse der chemischen Zusammensetzung

Die hochdichte Wolframlegierung beeinflusst ihre Leistung direkt. Prüfgeräte stellen sicher, dass der Wolframgehalt und das Verhältnis der Bindungsphasenelemente (wie Ni, Fe und Cu) den Konstruktionsanforderungen entsprechen. Zu den gängigen Geräten gehören Spektrometer und chemische Analysegeräte.

**Das optische Emissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)** ist das wichtigste Gerät zur Bestimmung des Elementgehalts. Das Funktionsprinzip besteht darin, Probenatome durch Plasma anzuregen und die Intensität des emittierten Lichts bei einer bestimmten Wellenlänge zu messen. Beispielsweise kann es den Wolframgehalt ( $90 \pm 0,5 \%$ ), Nickel ( $7 \pm 0,2 \%$ ) und Eisen ( $3 \pm 0,2 \%$ ) in der Legierung W-90Ni-Fe mit einer Nachweisgrenze von nur  $0,001 \%$  und einer Genauigkeit von  $\pm 0,1 \%$  ermitteln. Die Probe muss zunächst in einer Säure (z. B. einer Mischung aus Salpetersäure und Fluorwasserstoffsäure) gelöst werden. Jede Analyse dauert etwa 5 Minuten. Das Gerät ist mit einem Hochfrequenzgenerator (Leistung 1–2 kW) und einem Mehrkanaldetektor ausgestattet, der für die Batchanalyse geeignet ist und 10–20 Elemente gleichzeitig messen kann.

**Die Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFA)** bietet eine zerstörungsfreie Prüfmöglichkeit. Die Probenoberfläche wird durch Röntgenstrahlen angeregt, und die Zusammensetzung wird durch Analyse der Fluoreszenzwellenlänge bestimmt. Beispielsweise beträgt die Abweichung des Wolframgehalts bei der Prüfung der Oberfläche der W-95Ni-Fe-Legierung  $<0,3 \%$ , ohne dass eine Probenvorbehandlung erforderlich ist, und die Analysezeit beträgt etwa 1 Minute. Die Detektionstiefe tragbarer RFA-Geräte beträgt etwa  $0,1 \text{ mm}$  und eignet sich somit für eine schnelle Prüfung. Allerdings ist die Empfindlichkeit gegenüber leichten Elementen (wie C und O) gering und muss in Kombination mit anderen Methoden

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

überprüft werden. Desktop-RFA weist eine höhere Genauigkeit ( $\pm 0,05$  %) auf und eignet sich für Laboranalysen.

**Nasschemische Analysegeräte** dienen der hochpräzisen Verifizierung. Sie umfassen ein Titrationsgerät und ein Spektralphotometer. Beispielsweise wird der Nickelgehalt mittels EDTA-Titration mit einem Fehler von  $< 0,01$  % und einem Zeitaufwand von ca. 30 Minuten bestimmt. Diese Methode eignet sich zum Nachweis von Verunreinigungselementen (wie S und P) mit einer Nachweisgrenze von ppm, ist jedoch aufwendig und wird nur für die Schiedsanalyse verwendet.

Diese Geräte müssen regelmäßig kalibriert werden. Beispielsweise wird ICP-OES monatlich mit Standardproben (99,99 % Wolframreinheit) kalibriert, um die Genauigkeit zu gewährleisten. Die Analyse der chemischen Zusammensetzung gewährleistet die Qualität von Rohstoffen und Fertigprodukten. Beispielsweise kontrolliert eine Produktionslinie die Zusammensetzungsabweichung innerhalb von  $\pm 0,2$  % durch XRF-Screening und ICP-Bestätigung.

## 7.2 Prüfgeräte für physikalische Eigenschaften

hochdichten Wolframlegierungen gemessen, um sicherzustellen, dass sie den Anwendungsanforderungen entsprechen.

**Densitometer** basieren auf dem archimedischen Prinzip und ermitteln die Legierungsdichte. Elektronische Densitometer sind gängige Geräte mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,01$  g/cm<sup>3</sup>. Beispielsweise beträgt der Messwert bei der Prüfung der Legierung W-95Ni-Fe  $18,8 \pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>. Die Prüfung dauert etwa 2 Minuten. Die Probenoberfläche muss sauber sein, um Blasenbildung zu vermeiden. Die Temperatur des flüssigen Mediums (z. B. Wasser oder Ethanol) sollte bei  $20 \pm 1$  °C liegen. Zur Verbesserung der Genauigkeit kann eine hochpräzise Waage (0,0001 g) in Kombination mit der Wasserverdrängungsmethode eingesetzt werden. Diese eignet sich für anspruchsvolle Anwendungen wie z. B. Gegengewichte in der Luftfahrt.

**Das Wärmeleitfähigkeitsmessgerät** nutzt die Laser-Flash-Methode (LFA), um die Temperaturleitfähigkeit zu messen und anschließend die Wärmeleitfähigkeit zu berechnen. Beispielsweise beträgt die Wärmeleitfähigkeit der Legierung W-80Cu  $140$  W/(m · K) bei 25 °C mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  %. Die Probendicke muss 1–5 mm betragen. Das Gerät ist mit einer Laserquelle (Leistung 10 W) und einem Infrarotdetektor ausgestattet. Der Messbereich liegt zwischen 20 und 2000 °C und eignet sich für die Überprüfung von Hochtemperaturanwendungen. Jede Messung dauert etwa 5 Minuten. Zur Vermeidung von Oxidation ist eine Stickstoffbegasung erforderlich.

**Der Widerstandsprüfer** nutzt eine Vier-Sonden-Methode zur Messung elektrischer Eigenschaften. Beispielsweise beträgt der Widerstand der Legierung W-90Ni-Fe  $6,0 \pm 0,1$   $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , der Sondenabstand 1 mm und der Strombereich 1–100 mA. Das Gerät benötigt eine konstante Umgebungstemperatur ( $25 \pm 0,5$  °C), um Störungen durch thermoelektrische Effekte zu vermeiden. Hochpräzise Modelle messen bis zu  $0,01$   $\mu\Omega \cdot \text{cm}$  und eignen sich daher für die Prüfung von Elektrodenmaterialien.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Diese Geräte arbeiten zusammen. Beispielsweise verwendete ein Labor ein Dichtemessgerät und ein Wärmeleitfähigkeitsmessgerät, um die Legierung W-97Ni-Fe zu überprüfen. Dabei stellte sich heraus, dass die Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$  und die Wärmeleitfähigkeit  $120 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  betragen und damit den Konstruktionspezifikationen entsprechen.

### 7.3 Prüfgeräte für mechanische Eigenschaften

Geräte zur Prüfung mechanischer Eigenschaften bewerten die Festigkeit, Härte und Zähigkeit schwerer Wolframlegierungen und bilden das Herzstück der Qualitätskontrolle.

**Universalprüfmaschinen** werden zur Prüfung von Zugfestigkeit und Dehnung eingesetzt. Elektronische Zugprüfmaschinen sind weit verbreitet und verfügen über einen Zugbereich von 10–500 kN und eine Genauigkeit von  $\pm 0,5 \%$ . Beispielsweise wird die Legierung W-90Ni-Fe nach ASTM E8 mit einer Zugfestigkeit von 1050 MPa, einer Dehnung von 25 % und einer Klemmggeschwindigkeit von 0,5–5 mm/min geprüft. Die Probe muss in eine Standardhantelform (6 mm Durchmesser) gebracht werden. Die Prüfzeit beträgt etwa 10 Minuten. Das Gerät ist mit einem Dehnungsmessstreifen ausgestattet, um Spannungs-Dehnungs-Kurven aufzuzeichnen und Streckgrenzen sowie Bruchverhalten zu analysieren.

**Härteprüfer** messen die Oberflächenhärte. Weit verbreitet sind Vickers-Härteprüfer (HV) mit einer Belastung von 5–50 kgf. Beispielsweise beträgt die Härte der Legierung W-93Ni-Fe bei 10 kgf  $450 \pm 10 \text{ HV}$ , und die Messgenauigkeit der Eindruckdiagonale beträgt  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Brinell-Härteprüfer (HB) eignen sich für große Teile mit einer Belastung von 3000 kgf. Das Prüfergebnis der Legierung W-95Ni-Fe beträgt 400 HB. Jeder Test dauert etwa 30 Sekunden, und die Probenoberfläche muss auf  $\text{Ra } 0,8 \mu\text{m}$  poliert werden.

**Schlagprüfmaschinen** bewerten die Zähigkeit. Pendel-Charpy-Schlagmaschinen sind weit verbreitet und verfügen über einen Energiebereich von 50–300 J. Beispielsweise beträgt die Schlagenergie der Legierung W-90Ni-Fe  $50 \text{ J/cm}^2$  bei Raumtemperatur und  $40 \text{ J/cm}^2$  bei niedrigen Temperaturen ( $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Die Probe ist eine Kerbprobe mit den Abmessungen  $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$ . Um zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten, muss das Gerät den Nullpunkt des Pendels mit einer Genauigkeit von  $\pm 1 \text{ J}$  kalibrieren.

Diese Geräte erfordern eine regelmäßige Wartung. Beispielsweise sollte die Zugprüfmaschine einmal jährlich kalibriert und der Diamanteindringkörper des Härteprüfers nach Verschleiß ausgetauscht werden, um die Konsistenz des Tests sicherzustellen.

### 7.4 Geräte zur Mikrostrukturanalyse

Mithilfe von Geräten zur Mikrostrukturanalyse werden Korngröße, Phasenverteilung und Defekte hochdichter Wolframlegierungen beobachtet, was die Grundlage für die Leistungsoptimierung bildet.

**Das Rasterelektronenmikroskop (REM)** ermöglicht hochauflösende Analysen der Oberflächenmorphologie und -zusammensetzung. Die Betriebsspannung beträgt 5–30 kV, die Vergrößerung 50- bis 10.000-fach. Beispielsweise beträgt die durchschnittliche Größe der Wolframpartikel in der W-95Ni-Fe-Legierung  $5 \mu\text{m}$ , und die Bindungsphase ist gleichmäßig verteilt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ausgestattet mit einem energiedispersiven Spektrometer (EDS) kann das lokale Elementverhältnis (z. B. W:Ni :Fe = 95:4:1) mit einer Fehlertoleranz von  $\pm 0,5$  % gemessen werden. Die Probe muss poliert und geätzt werden (Salpetersäurelösung). Die Analysezeit beträgt ca. 30 Minuten.

**Die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)** analysiert Nanostrukturen. Beschleunigungsspannung: 200 kV, Auflösung: 0,2 nm. Beispielsweise wird die Korngrenze der W-90Ni-Fe-Legierung nach dem Sintern detektiert. Die Korngröße ist auf 1  $\mu\text{m}$  reduziert, die Versetzungsdichte beträgt ca.  $10^{10}/\text{cm}^2$ . Die Probe muss in dünne Scheiben geschnitten werden (Dicke  $< 100$  nm). Die Präparation ist aufwendig, und eine Analyse dauert 2–3 Stunden. Geeignet für die Untersuchung der Wirkung von Nanopulvern.

**Röntgendiffraktometer (XRD)** bestimmen die Kristallstruktur und die Phasenzusammensetzung. Cu-Ziel-K $\alpha$ -Strahl, Scanbereich 10–90°, Schrittweite 0,02°. Beispielsweise zeigt Wolfram bei der Analyse der W-93Ni-Fe-Legierung eine BCC-Struktur mit einem geringen Ni-Fe-Mischkristallpeak. Die berechnete Korngröße (Scherrer-Formel) beträgt ca. 10  $\mu\text{m}$ . Die Prüfdauer beträgt ca. 1 Stunde. Die Probe benötigt keine spezielle Behandlung und ist daher für Chargenprüfungen geeignet.

Diese Geräte werden kombiniert eingesetzt. Beispielsweise werden SEM und XRD zur Analyse einer W-97Ni-Fe-Legierung eingesetzt. Es zeigt sich, dass die Porosität  $< 0,5$  % beträgt und die Körner gleichmäßig sind, was eine Grundlage für die Prozessoptimierung bietet.

### 7.5 Zerstörungsfreie Prüfeinrichtungen

Zerstörungsfreie Prüfgeräte (ZfP) werden eingesetzt, um innere Defekte von schweren Wolframlegierungen zu prüfen und so die Zuverlässigkeit der Teile sicherzustellen. Zu den gängigen Geräten gehören Ultraschallprüfgeräte und Röntgenprüfgeräte.

**Die Ultraschallprüfung (UT)** erkennt innere Risse oder Poren durch Schallwellenreflexion. Die Betriebsfrequenz beträgt 1–10 MHz und der Sondendurchmesser 5–20 mm. Beispielsweise beträgt die Schallgeschwindigkeit bei der Prüfung von Teilen aus der Legierung W-95Ni-Fe 4400 m/s. Es werden Defekte mit einem Durchmesser von  $> 0,2$  mm gefunden, und die reflektierte Signalintensität liegt bei  $> 50$  %. Das Gerät ist mit einer Tauchsonde oder einer Kontaktsonde mit einer Empfindlichkeit von  $\pm 0,1$  mm ausgestattet, die für die Abnahme von Luftfahrtteilen geeignet ist. Die Prüfzeit beträgt ca. 5 Minuten pro Stück.

**Röntgenprüfgeräte** nutzen die Durchdringung von Strahlung zur Erkennung innerer Strukturen. Die Röhrenspannung beträgt 100–300 kV und die Belichtungszeit 1–5 Minuten. Beispielsweise beträgt die Porosität bei der Prüfung von Gegengewichten aus W-90Ni-Fe-Legierung  $< 0,1$  % und die Auflösung 0,1 mm. Tragbare Geräte eignen sich für die Inspektion vor Ort, und das Bildgebungssystem kann die Fehlerstelle digital anzeigen. Für einen sicheren Betrieb ist Strahlenschutz erforderlich.

**Magnetpulverprüfgeräte (MT) eignen sich für eisenhaltige Legierungen (wie W-Ni-Fe). Die Magnetfeldstärke beträgt 1000–3000 A/m und ermöglicht die Erkennung von Oberflächenrissen.**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beispielsweise zeigt eine Oberflächenrisslänge der W-93Ni-Fe-Legierung >0,5 mm Phosphoraggregation, hohe Empfindlichkeit und eine Prüfzeit von ca. 3 Minuten. Das Gerät ist auf ferromagnetische Materialien beschränkt und nicht für W-Cu-Legierungen geeignet.

Diese Geräte müssen regelmäßig kalibriert werden. Beispielsweise wird die Ultraschallsonde monatlich mit einem Standardprüfblock kalibriert. Die Genauigkeit wird bei  $\pm 0,05$  mm gehalten, um eine zuverlässige Erkennung zu gewährleisten.

#### Liste der Prüfgeräte

Erkennungskategorie	Hauptausrüstung	Schlüsselparameter	Funktion/Ziel
Chemische Zusammensetzung	ICP-OES	Nachweisgrenze 0,001 %, $\pm 0,1$ %	Wolframgehalt $90 \pm 0,5$ %
	RFA	Abweichung <0,3 %, 1 Minute	Zerstörungsfreies Schnellscreening
Physikalische Eigenschaften	Dichtemessgerät	$\pm 0,01$ g/cm <sup>3</sup>	Dichte $18,8 \pm 0,1$ g/cm <sup>3</sup>
	Wärmeleitfähigkeitsmessgerät	140 W / ( m · K ) , $\pm 2$ %	Überprüfung der thermischen Leistung
Mechanische Eigenschaften	Universalprüfmaschine	1050 MPa, $\pm 0,5$ %	Festigkeits- und Dehnungstests
	Härteprüfgerät	450 $\pm$ 10 HV	Oberflächenhärteanalyse
Mikrostruktur	Rasterelektronenmikroskop (SEM)	5 $\mu$ m Partikel, $\pm 0,5$ %	Morphologie und Zusammensetzungsverteilung
	XRD	10 $\mu$ m Körnung	Bestätigung der Kristallstruktur
Zerstörungsfreie Prüfung	Ultraschalldetektor	Schallgeschwindigkeit 4400 m/s, >0,2 mm	Interne Defekterkennung
	Röntgen-Fehlerdetektor	Auflösung 0,1 mm	Porosität <0,1 %

Hinweis: Bei den Daten in der Tabelle handelt es sich um typische Bereiche. Die spezifischen Werte können je nach Proben und Prozessen variieren.

#### 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: Hauptprodukte der hochspezifischen Wolframlegierung der CTIA GROUP LTD

### 8.1 Gegengewichtsprodukte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

Gegengewichte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht werden aufgrund ihrer hohen Dichte ( $17,0\text{--}19,3\text{ g/cm}^3$ ), ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften und ihrer guten Verarbeitbarkeit in vielen Bereichen eingesetzt, um den Schwerpunkt zu korrigieren, die Masse auszugleichen oder die Stabilität von Geräten zu verbessern. Im Vergleich zu herkömmlichen Gegengewichtsmaterialien wie Stahl ( $7,85\text{ g/cm}^3$ ) oder Blei ( $11,34\text{ g/cm}^3$ ) bieten Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht ein höheres Gewicht bei geringerem Volumen und sind gleichzeitig ungiftig, korrosionsbeständig und hochfest. Zu den gängigen Gegengewichten zählen Gegengewichte für die Luft- und Raumfahrt, Automobile, Sportgeräte, Schiffe, Aufzüge, Dartstangen und Angelgewichte. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Einführung zu den einzelnen Gegengewichtsprodukten.

#### 8.1.1 Gegengewicht aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht für die Luft- und Raumfahrt

##### Produktübersicht:

Gegengewichte in der Luft- und Raumfahrt werden verwendet, um den Schwerpunkt und die Massenverteilung von Luftfahrzeugen (wie Flugzeugen, Raumfahrzeugen, Satelliten) anzupassen und so den Anforderungen der Aerodynamik und des Strukturdesigns gerecht zu werden. Aufgrund des begrenzten Platzes und der extrem hohen Anforderungen an die Qualitätskontrolle ist die hohe Dichte schwerer Wolframlegierungen ihr Hauptvorteil. Beispielsweise hat ein Gegengewicht aus der Legierung W-95Ni-Fe mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 20 mm eine Dichte von  $18,8\text{ g/cm}^3$

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und wiegt etwa 740 g. Im Vergleich zu Stahl gleichen Gewichts ist sein Volumen um etwa 60 % reduziert, was den Platzbedarf deutlich reduziert. Diese Eigenschaft ermöglicht eine breite Anwendung in Tragflächen, Heckflossen, Fahrwerken oder Raumfahrzeugkabinen.

### Materialien und Eigenschaften

Gegengewichte für die Luft- und Raumfahrt bestehen üblicherweise aus den Legierungen W-95Ni-Fe oder W-97Ni-Fe mit Wolframgehalten von 95 % bzw. 97 % und einem Nickel-Eisen-Verhältnis von 7:3 bzw. 5:5. W-95Ni-Fe hat eine Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup>, eine Zugfestigkeit von 1000 MPa, eine Dehnung von 15 % und eine Vickershärte von 450 HV; W-97Ni-Fe hat eine höhere Dichte (19,0 g/cm<sup>3</sup>), eine etwas höhere Festigkeit von 1050 MPa und eine Härte von 460 HV. Diese Eigenschaften stellen sicher, dass das Gegengewicht auch bei Hochgeschwindigkeitsflügen (> Mach 2) oder hoher Überlastung (> 10 G) nicht versagt. Es verfügt über einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $4,5-5,0 \times 10^{-6}/K$ ) und eine Verformung von <0,01 mm im Bereich von -50 °C bis 150 °C, wodurch es die Stabilitätsanforderungen in großen Höhen oder im Weltraum erfüllt. Es ist gut korrosionsbeständig und weist in einer Umgebung mit 10 % Salzsprühnebel über 1000 Stunden einen Masseverlust von <0,2 % auf.

### Herstellungsverfahren:

Das Herstellungsverfahren nutzt die Technologie der Pulvermetallurgie. Wolframpulver (Partikelgröße 3–5 µm, Reinheit  $\geq 99,9\%$ ) wird mit Nickelpulver und Eisenpulver vermischt und in einer Planetenkugelmühle 6 Stunden lang bei 300 U/min mit einer Gleichmäßigkeitsabweichung von < 1 % gemahlen. Es wird durch eine kaltisostatische Presse (CIP) bei 250–300 MPa zu einem Grünkörper mit einer Dichte von 11–13 g/cm<sup>3</sup> gepresst. Durch Sintern in einem Wasserstoffsinterofen bei 1480 °C für 2 Stunden wird die Dichte auf 18,8 g/cm<sup>3</sup> mit einer Dichte von > 99 % erhöht. Hochwertige Produkte werden einer heißisostatischen Pressung (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 Stunde) unterzogen, um die Porosität auf 0,1 % zu verringern.

Die Nachbearbeitung umfasst eine fünfachsigige CNC-Bearbeitung mit einer Schnittgeschwindigkeit von 50 m/min, einer Oberflächenrauheit von Ra 0,8 µm und einer Toleranz von  $\pm 0,05$  mm. Die Oberfläche wird mit einer 5 µm dicken Nickelschicht überzogen, was die Korrosionsbeständigkeit um das Zehnfache erhöht. Dynamische Auswuchttests stellen sicher, dass die Gewichtsabweichung  $\leq \pm 2$  g beträgt.

### Anwendungsszenarien und -fälle

: In Verkehrsflugzeugen (wie der Boeing 737) werden im Fahrwerksbereich Gegengewichte mit einem Gewicht von jeweils 1 kg eingebaut, was das Volumen um 30 % reduziert und die Treibstoffeffizienz um 5 % verbessert. In Militärflugzeugen (wie der F-35) werden sie verwendet, um den Schwerpunktversatz bei Hochgeschwindigkeitsflügen anzupassen und einer Überlastung von 15 G standzuhalten. In Satelliten (wie dem Starlink-Projekt) gewährleistet das W-97Ni-Fe-Gegengewicht (Gewicht 950 g) mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 50 mm und einer Dicke von 20 mm die Stabilität beim Start und im Orbitalbetrieb. Die Lageabweichung im Test betrug <0,1°, und das Volumen wurde im Vergleich zum Bleigegengewicht um 40 % reduziert.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Dichtekonsistenz und Bearbeitungsgenauigkeit. Die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dichteabweichung von Charge zu Charge muss  $\leq \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  betragen, und Sintertemperatur (Abweichung  $< 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und Atmosphäre (Sauerstoffgehalt  $< 0,01 \%$ ) müssen optimiert werden. Hohe Härte führt zu Werkzeugverschleiß (0,2 mm nach der Bearbeitung von 100 Teilen). Stattdessen werden CBN-Werkzeuge verwendet, was die Werkzeugstandzeit um 50 % erhöht. Komplexe Formen werden mittels SLM (Laserleistung 3000 W) mit einer Porosität von  $< 1 \%$  gedruckt.

### 8.1.2 Gegengewicht aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht für Kraftfahrzeuge

#### Produktübersicht

Automobil Gegengewichte dienen dem Gewichtsausgleich der Fahrzeugkarosserie, der Optimierung des Fahrverhaltens und der Verbesserung der Stabilität, insbesondere bei Hochleistungsfahrzeugen und Elektrofahrzeugen. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Gegengewicht mit einer Länge von 80 mm, einer Breite von 30 mm und einer Dicke von 15 mm eine Dichte von  $18,5 \text{ g/cm}^3$  und wiegt etwa 665 g, was 55 % weniger ist als ein Stahlteil. Es dient der Anpassung der Lastverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse.

#### Materialien und Eigenschaften:

Häufig verwendete W-90Ni-Fe-Legierung mit 90 % Wolframanteil, Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1000 MPa, Dehnung 20 %, Härte 400 HV. Die Dauerfestigkeit beträgt 500 MPa, und die Legierung übersteht  $10^7$  Zyklen ohne Risse. Sie ist daher für Fahrzeuge mit lang anhaltenden Vibrationen geeignet. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt  $130 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , die Legierung ist temperaturbeständig ( $> 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und stabil bei hohen Temperaturen im Motorraum. Korrosionsbeständigkeit: Der Feuchtigkeitsverlust über 1000 Stunden beträgt  $< 0,5 \%$ , kein zusätzlicher Schutz erforderlich.

#### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße  $5 \text{ } \mu\text{m}$ ) wird mit Nickel-Eisen-Pulver (7:3) gemischt und mit einer hydraulischen Presse bei 600 MPa gepresst. Die Dichte des Grünkörpers beträgt  $12 \text{ g/cm}^3$ . Nach dem Sintern in Wasserstoff bei  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$  für 2 Stunden beträgt die Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , was einer Dichte von 98,5 % entspricht. CNC-Fräsen, Schnittgeschwindigkeit  $60 \text{ m/min}$ , Toleranz  $\pm 0,1 \text{ mm}$ , Oberflächenrauheit  $Ra 1,6 \text{ } \mu\text{m}$ . Einige Produkte werden mit einer  $0,1 \text{ mm}$  dicken  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung besprüht, wodurch die Hochtemperaturbeständigkeit auf  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  erhöht wird.

#### Anwendungsszenarien und -fälle

: Bei Sportwagen (wie dem Porsche 911) befindet sich das 500 g schwere Gegengewicht an der Vorderseite des Fahrgestells. Es optimiert das Achslastverhältnis von 50:50 und verbessert die Kurvenstabilität. Bei Elektrofahrzeugen (wie dem Tesla Model S) befindet es sich in der Nähe des Akkus, wiegt 1 kg und gleicht so die Gewichtsverteilung aus. Dadurch verlängert sich die Lebensdauer der Federung um 20 %. Ein Rennteam verwendet ein W-90Ni-Fe-Gegengewicht (100 mm lang, 1,2 kg), das das Handling um 15 % verbessert.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Kosten und Bauraum. Der Preis für Wolframlegierungen ( $40.000\text{--}$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

70.000 US-Dollar/Tonne) ist höher als der für Stahl (500 US-Dollar/Tonne). Durch Pulverrecycling lassen sich die Kosten um 20 % senken. Kleine Räume erfordern spezielle Formen, die im 3D-Druckverfahren mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,05$  mm hergestellt werden. Vibrationsermüdung wird mit HIP behandelt, um die Lebensdauer um 30 % zu verlängern.

### 8.1.3 Gewichte für Sportgeräte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

#### Produktübersicht:

Gewichte für Sportgeräte wie Golf- und Tennisschläger dienen der Gewichtsverteilung und verbessern das Spielerlebnis. Beispielsweise werden Gewichte aus der Legierung W-93Ni-Fe mit einem Volumen von  $5 \text{ cm}^3$  ( $20 \times 10 \times 25 \text{ mm}$ ), einer Dichte von  $18,5 \text{ g/cm}^3$  und einem Gewicht von 92 g am Schlägerkopf angebracht, um die Schwungstabilität zu verbessern.

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-93Ni-Fe-Legierung (93 % Wolfram), Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 420 HV, Dehnung 18 %. Die Verschleißfestigkeit ist 50 % höher als die von Stahl, und die Legierung hat eine lange Lebensdauer bei wiederholter Stoßbelastung. Die hohe Oberflächengüte ( $Ra 0,2 \mu\text{m}$ ) ist angenehm anzufassen und beständig gegen Schweißkorrosion (Masseverlust  $< 0,1 \%$  nach 1000 Stunden).

#### Herstellungsverfahren :

Wolframpulver gemischt mit Nickel-Eisen-Pulver, kalisostatisches Pressen bei 250 MPa, Sintern bei  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ , Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ . CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05 \text{ mm}$ , Polieren auf  $Ra 0,2 \mu\text{m}$ , Vernickeln  $5 \mu\text{m}$  zur Verbesserung der Optik. Massenproduktion mit Formgebung, Effizienzsteigerung um 30 %.

#### Anwendungsszenarien und -fälle

: Bei Golfschlägern wird ein 50–100 g schwerer Gewichtsblock auf den Schlägerkopf gelegt, der die Schwunggeschwindigkeit um 10 % erhöht. Bei Tennisschlägern wird ein 20 g schwerer Gewichtsblock auf den Schlägerahmen gelegt, der die Schlagkraft um 15 % steigert. Eine bestimmte Schlägermarke verwendet W-93Ni-Fe-Gewichte (80 g). Anwender berichten von einer um 20 % verbesserten Stabilität und einem um 10 % gestiegenen Marktanteil.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen:

Zu den Herausforderungen gehören Gewichtsgenauigkeit und Optik. Die kundenspezifische Fertigung kleiner Chargen erfordert eine Genauigkeit von  $\pm 1 \text{ g}$ , die durch eine hochpräzise Waage kalibriert wird. Die Optik erfordert einen Spiegeleffekt durch mehrstufige Polier- und Beschichtungsverfahren. Die Haltbarkeit wird durch Aufkohlen mit einer Härte von 500 HV erreicht.

### 8.1.4 Schiffsgegengewichte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

#### Produktübersicht

Schiffsballast dient der Regulierung der Balance und Stabilität eines Schiffes, beispielsweise durch Ballastgewicht. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Ballast mit einer Länge von 200 mm, einer Breite

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von 50 mm und einer Dicke von 30 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und wiegt 2,78 kg. Er ist 55 % kleiner als Stahlteile und wird in kleinen Schiffen oder U-Booten verwendet.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Korrosionsrate <0,1 % in Seewasser über 1000 Stunden, Salzsprühbeständigkeit 10-mal besser als Stahl. Dauerfestigkeit 500 MPa, kein Versagen bei Wellenschlag.

#### **Herstellungsverfahren:**

Hydraulische Presse (600 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,1 mm, Oberflächenbeschichtung mit 0,2 mm Keramikbeschichtung, Temperaturbeständigkeit 1500 °C, Korrosionsbeständigkeit um 50 % erhöht. Große Gegengewichte werden mit SLM gedruckt, um Schweißarbeiten zu reduzieren.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Bei Yachten wird ein 5 kg schweres Gegengewicht auf dem Bootsboden platziert, was die Stabilität um 20 % verbessert. Bei U-Booten passt ein 10 kg schweres Gegengewicht den Auftriebsschwerpunkt an und erhöht die Taucheffizienz um 15 %. Ein Fischerboot verwendet ein W-90Ni-Fe-Gegengewicht (3 kg), das den Wind- und Wellenwiderstand um 25 % verbessert.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen Zu den Herausforderungen zählen die Seewasserkorrosionsbeständigkeit**

und die Gewichtsverteilung. Korrosionsprobleme lassen sich durch Vernickeln oder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Besprühen lösen. Große Gewichte müssen gleichmäßig sein, und die Dichteabweichung darf durch Mehrpunktpressen und HIP- Behandlung <0,1 g/cm<sup>3</sup> nicht überschritten werden.

#### **8.1.5 Aufzugsgegengewicht aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht**

##### **Produktübersicht:**

Gegengewichte gleichen das Gewicht der Kabine aus und reduzieren die Belastung des Motors. Beispielsweise hat ein Gegengewicht aus W-90Ni-Fe mit einer Länge von 300 mm, einer Breite von 100 mm und einer Dicke von 50 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und wiegt 13,9 kg. Damit ist es 55 % kleiner als ein Stahlblock und wird in Hochhausaufzügen verwendet.

##### **Materialien und Eigenschaften**

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dauerfestigkeit 500 MPa, 10<sup>7</sup> Zyklen standhaltend. Temperaturbeständigkeit 500 °C, hohe Betriebsstabilität. Die Oberflächenverschleißfestigkeit ist 50 % höher als bei Stahl.

##### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>. CNC-Bearbeitungstoleranz

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,2$  mm, Oberflächenrauheit Ra 1,6  $\mu$  m. Aufsprühen einer 0,1 mm dicken Schutzschicht, Korrosionsbeständigkeit um 30 % erhöht.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: In gewerblichen Aufzügen wird ein Gegengewicht von 10–20 kg auf den Gegengewichtsrahmen gelegt, wodurch der Energieverbrauch um 15 % gesenkt wird. In Lastenaufzügen erhöht ein Gegengewicht von 50 kg die Ladeeffizienz um 20 %. In einem Gebäude wird ein Gegengewicht aus W-90Ni-Fe (15 kg) verwendet, wodurch das Betriebsgeräusch um 10 dB reduziert wird.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen Kosten und Installation. Recyclingpulver reduziert die Kosten um 20 %. Große Gegengewichte müssen gespießt werden, und die Lötverbindungsfestigkeit erreicht 200 MPa, um die Sicherheit zu gewährleisten.

### **8.1.6 Dartschaft aus hochdichter Wolframlegierung**

#### **Produktübersicht**

Dartschäfte werden aus hochdichter Wolframlegierung gefertigt, um Gewicht und Haptik zu verbessern. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Dartschaft mit einer Länge von 50 mm und einem Durchmesser von 6 mm eine Dichte von 18,0 g/cm<sup>3</sup> und wiegt 25 g, was 50 % weniger ist als ein Stahlschaft.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften**

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,0 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 950 MPa, Härte 380 HV, Dehnung 20 %. Hohe Verschleißfestigkeit, Oberfläche poliert auf Ra 0,2  $\mu$  m, ausgezeichnete Haptik, Schweißkorrosionsbeständigkeit <0,1 %.

#### **Herstellungsverfahren:**

Pressen bei 500 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,0 g/cm<sup>3</sup>. CNC-Drehtoleranz  $\pm 0,02$  mm, Polieren mit 5  $\mu$ m Nickelbeschichtung, verbesserte Ästhetik. Die Chargenproduktionseffizienz erreicht 1000 Stück/Tag.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Beim professionellen Darts verbessert ein Schaft mit einem Gewicht von 20–30 g die Wurfgenauigkeit um 15 %. Eine bestimmte Marke verwendet W-90Ni-Fe-Schäfte (mit einem Gewicht von 26 g) mit einem Marktanteil von 25 %, und das Benutzerfeedback zeigt, dass sich das Gefühl um 30 % verbessert.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen Präzision und Optik. Die Gewichtsabweichung liegt unter  $\pm 0,5$  g und wird durch hochpräzises Pressen behoben. Die Oberfläche muss makellos sein, und mehrstufige Polier- und Beschichtungsprozesse gewährleisten die Qualität.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.1.7 Angelbleie aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

#### **Produktübersicht:**

Angelbleie bestehen aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht anstelle von Blei und bieten so Umweltschutz und hohe Dichte. Beispielsweise hat ein W-95Ni-Fe-Blei mit einem Durchmesser von 10 mm eine Dichte von  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , wiegt 9,8 g und ist 20 % kleiner als ein Bleiblei.

#### **Materialien und Eigenschaften**

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Wasserkorrosionsbeständigkeit  $<0,1 \%$ . Ungiftig, erfüllt Umweltstandards, Verschleißfestigkeit 5-mal höher als bei Blei.

#### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 250 MPa, Sintern bei  $1480 \text{ °C}$ , Dichte  $18,8 \text{ g/cm}^3$ . CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05 \text{ mm}$ , Oberflächenpolitur Ra  $0,4 \text{ μm}$ , Farbbeschichtung zur Steigerung der Attraktivität.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Beim Meeresangeln sinken Senkbleie mit einem Gewicht von 5–20 g 30 % schneller. Eine bestimmte Marke verwendet Senkbleie aus W-95Ni-Fe (Gewicht 10 g), der Umsatz steigt um 20 % und die Erfolgsquote bei der Umweltzertifizierung liegt bei 100 %.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen:**

Zu den Herausforderungen zählen Kosten und Optik. Recyclingpulver senkt die Kosten um 15 %. Durch 3D-Druck werden vielfältige Formen erreicht, um individuelle Anforderungen zu erfüllen.

## 8.2 Militärprodukte aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

Die hohe Dichte ( $17,0\text{--}19,3 \text{ g/cm}^3$ ), die hervorragende mechanische Festigkeit ( $700\text{--}1200 \text{ MPa}$ ), die hervorragende Durchschlagskraft und die hervorragende Strahlenschutzwirkung machen schwere Wolframlegierungen im Militärbereich zu einem idealen Material für die Herstellung von panzerbrechenden Kernen, Schutzpanzerplatten, Munitionsabschirmschalen, Panzerabwehrraketekomponenten, Geschützgegengewichten, Fluggyroskop-Gegengewichten und Raketendüsenbuchsen. Diese Produkte spielen eine Schlüsselrolle in der modernen Kriegsführung und verbessern die Angriffskraft, den Schutz und die Stabilität von Waffen. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Einführung zu jedem Militärprodukt.

### 8.2.1 Schwerer panzerbrechender Kern aus Wolframlegierung

#### **Produktübersicht**

Der panzerbrechende Kern aus einer hochdichten Wolframlegierung ist die Kernkomponente panzerbrechender Projektil mit kinetischer Energie (APFSDS), die ihre hohe Dichte und Härte nutzen, um eine starke Durchdringung gepanzerter Ziele zu erreichen. Beispielsweise kann ein Kern aus einer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W-93Ni-Fe-Legierung mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Länge von 100 mm, einer Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und einem Gewicht von etwa 580 g eine 600 mm dicke gewalzte homogene Panzerung (RHA) mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 2000 m/s durchdringen, was 50 % tiefer ist als die eines Stahlkerns.

### Materialien und Eigenschaften

Panzerbrechende Kerne werden üblicherweise aus den Legierungen W-93Ni-Fe oder W-95Ni-Fe mit einem Wolframgehalt von 93 % bzw. 95 % und einem Nickel-Eisen-Verhältnis von 7:3 hergestellt. W-93Ni-Fe hat eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup>, eine Zugfestigkeit von 1100 MPa, eine Härte von 480 HV und eine Dehnung von 15 %; W-95Ni-Fe hat eine Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup>, eine Festigkeit von 1150 MPa und eine Härte von 500 HV. Diese Eigenschaften stellen sicher, dass der Kern bei Hochgeschwindigkeitsaufprall seine Integrität behält. Seine Bruchzähigkeit (K<sub>IC</sub>) beträgt etwa 30 MPa·m<sup>1/2</sup> und ist damit höher als die von reinem Wolfram (5 – 10 MPa·m<sup>1/2</sup>), wodurch das Bruchrisiko verringert wird. Die hohe Temperaturbeständigkeit (Schmelzpunkt > 2800 °C) verhindert ein Erweichen bei Erwärmung durch Reibung (> 1000 °C).

### Der Herstellungsprozess

nutzt Pulvermetallurgie und mechanisches Legieren. Wolframpulver (Partikelgröße 1–3 µm, Reinheit ≥99,9 %) wird mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt und in einer Hochenergie-Kugelmühle 10 Stunden bei 500 U/min gemahlen, um die Körner auf 50 nm zu verfeinern. Anschließend wird die kaltisostatische Presse bei 300 MPa zu einem Grünkörper mit einer Dichte von 13 g/cm<sup>3</sup> gepresst. Vakuumsintern (10<sup>-3</sup> Pa) bei 1500 °C für 2 Stunden ergibt eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und eine Dichte von >99 %. Zur Leistungssteigerung wird heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1,5 Stunden) angewendet, um die Porosität auf 0,1 % zu reduzieren.

Die Bearbeitung erfolgte durch CNC-Drehen mit einer Schnittgeschwindigkeit von 40 m/min, einer Toleranz von ±0,02 mm und einer Oberflächenrauheit von Ra 0,8 µm. Die Spitze wurde aufgekohlt (950 °C, 3 Stunden), um die Härte auf 600 HV und die Verschleißfestigkeit um 30 % zu erhöhen.

### Anwendungsszenarien und -fälle:

In Panzerkanonen, wie der 120-mm-Hauptkanone des M1A2 Abrams, durchdringt der W-93Ni-Fe-Kern 700 mm RHA und erhöht die Trefferquote um 20 %. In Panzerabwehrwaffen, wie dem kinetischen Sprengkopf der Dow-Rakete, durchdringt der W-95Ni-Fe-Kern (Gewicht 600 g) Verbundpanzerung und erhöht die Zerstörungskraft um 30 %. In einem Militärtest durchdrang der W-93Ni-Fe-Kern 650 mm bei 2500 m/s, was 15 % besser ist als bei kobaltbasierten Legierungen.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen die gleichmäßige Penetration und die Herstellungskosten. Die Korngröße muss <5 µm betragen, um die Zähigkeit zu gewährleisten. Diese wird durch Nanopulver und das HIP-Verfahren erreicht. Die hohen Kosten (50.000 \$/Tonne) werden durch optimierte Pulverrückgewinnung um 20 % reduziert. Die Selbstschärfung bei Hochgeschwindigkeitsaufprall wird durch die Zugabe von Kobalt (2 %) verbessert, und der Bruchmodus ist gleichmäßiger.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8.2.2 Schutzpanzerplatte aus Wolframlegierung mit hoher Dichte

### Produktübersicht:

Schutzpanzerplatten werden in gepanzerten Fahrzeugen oder Bunkern zum Schutz vor Granatsplittern und Strahlung eingesetzt. Beispielsweise kann eine 10 mm dicke Panzerplatte aus der Legierung W-95Ni-Fe mit einer Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup> und einem Gewicht von etwa 18,8 kg/m<sup>2</sup> 90 % der 1-MeV-Gammastrahlen abschirmen. Sie ist dünner als Bleiplatten (15 mm) und ungiftig.

### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Dehnung 20 %, Härte 450 HV. Der Massenabsorptionskoeffizient beträgt 0,15 cm<sup>2</sup>/g, die Abschirmwirkung ist fünfmal höher als die von Stahl. Dauerfestigkeit 500 MPa, widersteht Explosionsschocks (> 1000 J/cm<sup>2</sup>) ohne Risse. Korrosionsbeständigkeit: Massenverlust < 0,2 % in Meerwasser über 1000 Stunden, geeignet für verschiedene Umgebungen.

### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver wird mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt, bei 300 MPa kaltisostatisch gepresst, bei 1480 °C gesintert und erreicht eine Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup>. Durch HIP-Behandlung (200 MPa, 1400 °C) werden Mikroporen eliminiert und eine Dichte von 99,9 % erreicht. CNC-Fräsen, Toleranz ±0,1 mm, Oberflächenbeschichtung mit 0,2 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung, Temperaturbeständigkeit bis 1500 °C und um 50 % erhöhte Korrosionsbeständigkeit. Große Platten werden mit einer Lötfestigkeit von 200 MPa verbunden.

### Anwendungsszenarien und -fälle:

In gepanzerten Fahrzeugen (wie dem Leopard 2) werden 10 mm dicke Panzerplatten im Cockpit zum Schutz vor Splittern und Strahlung eingesetzt. Sie sind 20 % leichter als Stahlplatten. In Munitionsdepots schützen W-95Ni-Fe-Platten radioaktive Stoffe und erhöhen die Sicherheit um 30 %. Ein Militärfahrzeug verwendet diese Panzerplatte (1 m<sup>2</sup>, 18,8 kg schwer) und erzielt damit 25 % mehr Schutz bei 15 % weniger Volumen.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen gehört die Balance zwischen Gewicht und Schutz. Großflächige Paneele müssen leicht sein, und das Gewicht lässt sich durch eine Wabenstruktur um 10 % reduzieren. Die Festigkeit der Spleißverbindungen wird durch Elektronenstrahlschweißen (5 kW) auf 90 % des Grundmaterials erhöht. Die hohe Temperaturbeständigkeit wird durch eine Keramikbeschichtung erreicht, und die Haltbarkeit erhöht sich um 30 %.

## 8.2.3 Munitionsschutzgehäuse aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

### Produktübersicht

Munitionsabschirmhüllen werden zur Lagerung oder zum Transport radioaktiver Munition verwendet, um Strahlungslecks zu verhindern. Beispielsweise kann eine zylindrische Hülle aus W-97Ni-Fe mit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einem Außendurchmesser von 100 mm und einer Höhe von 150 mm, einer Dichte von  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , einer Wandstärke von 5 mm und einem Gewicht von etwa 2,2 kg 95 % der Gammastrahlen (1 MeV) abschirmen.

#### **Materialien und Eigenschaften**

W-97Ni-Fe-Legierung, Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 460 HV, Dehnung 12 %. Die hohe Ordnungszahl ( $Z=74$ ) sorgt für hervorragende Abschirmeigenschaften, Massenabsorptionskoeffizient  $0,16 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Temperaturbeständig bis  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , schmilzt nicht in explosionsgefährdeten Umgebungen. Hohe Dichtheit, Leckrate  $<10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ .

#### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Vakuumsintern bei  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , HIP-Behandlungsporosität  $<0,1 \%$ . CNC-Bearbeitung, Hohlraumtoleranz  $\pm 0,02 \text{ mm}$ , Oberflächenpolitur Ra  $0,4 \mu\text{m}$ , Gewindedeckeldesign zur Gewährleistung der Abdichtung. Vernickelung  $5 \mu\text{m}$ , 10-fach erhöhte Korrosionsbeständigkeit.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle:**

Bei der Lagerung von Nuklearmunition schirmt die W-97Ni-Fe-Hülle (Gewicht 2,5 kg) die Strahlung ab und reduziert die Dosis auf unter 1 mSv. Beim Transport schützt die Hülle mit einer Wandstärke von 8 mm radioaktive Isotope und erhöht die Sicherheit um 40 %. Ein bestimmtes Militär verwendet diese Hülle (Wandstärke 6 mm) mit einer Strahlenschutzrate von 96 % und einem um 15 % geringeren Gewicht als die Bleihülle.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

Zu den Herausforderungen zählen Dichtheit und Gewicht. Die Gewindebearbeitung muss eine Genauigkeit von  $\pm 0,01 \text{ mm}$  aufweisen, die durch eine 5-achsige CNC-Bearbeitung erreicht wird. Das Gewicht wird durch optimierte Wandstärken (mindestens 5 mm) kontrolliert, und das HIP-Verfahren sorgt für Festigkeit. Die Schlagfestigkeit wird durch die Zugabe von Kobalt erhöht, die Zähigkeit um 10 %.

#### **8.2.4 Komponenten für Panzerabwehrraketen aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte**

##### **Produktübersicht:**

Komponenten von Panzerabwehrraketen wie Gegengewichte oder panzerbrechende Auskleidungen nutzen eine hohe Dichte, um Flugstabilität und Durchschlagskraft zu verbessern. Beispielsweise wiegt ein ringförmiges Gegengewicht aus der Legierung W-90Ni-Fe mit einem Außendurchmesser von 80 mm, einer Dicke von 20 mm und einer Dichte von  $18,5 \text{ g/cm}^3$  etwa 1,2 kg und optimiert die Flugbahn der Rakete.

##### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Hohe Temperaturbeständigkeit bis  $2800 \text{ }^\circ\text{C}$ , kein Schmelzen bei Explosionseinwirkung. Dauerfestigkeit 500

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MPa, hält Startüberlastungen ( $> 20$  G) stand. Die Oberflächenhärte erreicht nach dem Aufkohlen 550 HV, die Verschleißfestigkeit erhöht sich um 30 %.

#### **Herstellungsverfahren:**

Hydraulische Presse (600 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>. SLM-Druck komplexer Formen, Porosität  $< 1$  %, CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05$  mm. Aufkohlungsbehandlung (950 °C, 3 Stunden) zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit. Oberflächenaufspritzen mit Keramikbeschichtung, Temperaturbeständigkeit 1500 °C.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Bei der Javelin-Rakete stabilisiert das W-90Ni-Fe-Gegengewicht (1 kg) den Flug und erhöht die Trefferquote um 15 %. Im panzerbrechenden Gefechtskopf erhöht der 500-g-Ring die Durchschlagskraft um 20 %. Eine Rakete durchdringt mit einem W-90Ni-Fe-Bauteil (1,5 kg) eine 800-mm-Verbundpanzerung und ist damit 30 % besser als Stahlteile.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

Zu den Herausforderungen zählen die Formkomplexität und die hohe Temperaturbeständigkeit. 3D-Druck ermöglicht Sonderformen mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,03$  mm. Die hohe Temperaturbeständigkeit wird durch Keramikbeschichtung und HIP-Behandlung um 25 % erhöht. Die Gewichtsverteilung wird durch dynamische Auswuchttests mit einer Exzentrizität  $< 5$   $\mu$ m optimiert.

### **8.2.5 Gegengewichte aus Wolframlegierung mit hoher Dichte**

#### **– Produktübersicht:**

Gegengewichte dienen zum Ausbalancieren des Waffenkörpers und zur Reduzierung des Rückstoßes. Beispielsweise hat ein Gegengewicht aus W-90Ni-Fe mit einer Länge von 50 mm, einer Breite von 20 mm und einer Dicke von 10 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und ein Gewicht von 185 g. Es wird am Schaft oder Lauf montiert.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %, Dauerfestigkeit 500 MPa, hält Dauerfeuer ( $> 1000$  Schuss) stand. Die Verschleißfestigkeit ist 50 % höher als bei Stahl, die Oberflächenkorrosionsbeständigkeit bei Schweiß über 1000 Stunden, Masseverlust  $< 0,1$  %.

#### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen (250 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>. CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05$  mm, Oberflächenrauheit Ra 1,6  $\mu$ m, Vernickelung 5  $\mu$ m zur optischen Verbesserung. Massenproduktion mit Formgebung, Effizienzsteigerung um 30 %.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Bei Scharfschützengewehren (wie dem M24) wird ein 200 g schweres Gegengewicht am Schaft

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

angebracht, um den Rückstoß um 20 % zu reduzieren. Bei Maschinenpistolen verbessert ein 150 g schweres Gegengewicht die Stabilität bei Dauerschüssen um 15 %. Eine bestimmte Pistole verwendet ein W-90Ni-Fe-Gegengewicht (180 g), das die Schussgenauigkeit um 10 % erhöht.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen gehören Gewichtsgenauigkeit und Montage. Gewichtsabweichungen  $< \pm 2$  g werden durch hochpräzises Pressen gelöst. Die Montage erfolgt durch Verschrauben (Scherfestigkeit 3000 N), optimiert durch Titanschrauben. Die Haltbarkeit wird durch Aufkohlen erreicht, die Härte wird auf 500 HV erhöht.

## 8.2.6 Gegengewicht für Luftfahrt-Gyroskope aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

### Produktübersicht

Kreiselgewichte für die Luft- und Raumfahrt werden in Navigationssystemen verwendet, um eine Trägheitsmasse bereitzustellen, wie beispielsweise das W-97Ni-Fe-Gewicht mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Höhe von 20 mm, einer Dichte von  $19,0 \text{ g/cm}^3$  und einem Gewicht von 265 g, das eine hochpräzise Rotation unterstützt.

### Werkstoffe und Eigenschaften

W-97Ni-Fe-Legierung, Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 12 %. Dauerfestigkeit 500 MPa, Drehzahl  $> 10000 \text{ U/min}$ . Wärmeausdehnungskoeffizient  $4,5 \times 10^{-6} /\text{K}$ , Verformung  $< 0,01 \text{ mm}$ , Wärmeleitfähigkeit  $120 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Vakuumsintern bei  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , HIP-Behandlungsporosität  $< 0,2 \%$ . Fünfachsiges CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,01 \text{ mm}$ , Oberfläche Ra  $0,2 \text{ } \mu\text{m}$ , Vergoldung  $2 \text{ } \mu\text{m}$ , spezifischer Widerstand auf  $4 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$  reduziert. Exzentrizität der dynamischen Balance  $< 5 \text{ } \mu\text{m}$ .

### Anwendungsszenarien und Beispiele

: Bei Drohnen ermöglicht ein 200 g schweres Gegengewicht eine INS-Genauigkeit von  $0,01\%$ . Bei Kampffjets (wie der F-22) hält ein 250 g schweres Gegengewicht einer Überlast von 15 G stand und hat eine Lebensdauer von 5.000 Stunden. Eine Rakete verwendet ein W-97Ni-Fe-Gegengewicht (270 g) mit einem Winkelgeschwindigkeitsfehler von  $< 0,005\%$ .

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen dynamisches Auswuchten und Mikrolöcher. Das dynamische Auswuchten wird durch hochpräzise Formen und Prüfmaschinen korrigiert. Mikrolöcher werden durch HIP (250 MPa) eliminiert und die Lebensdauer um 50 % erhöht. Die Schneidtemperatur wird durch Wasserkühlung unter  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  gehalten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8.2.7 Schwere Raketendüsenbuchse aus Wolframlegierung

### Produktübersicht

Raketendüsenbuchsen halten hohen Temperaturen und hohem Luftdruck stand, wie beispielsweise die W-95Ni-Fe- Buchse mit einem Innendurchmesser von 50 mm und einer Länge von 80 mm, einer Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup> und einem Gewicht von etwa 1,1 kg, und bieten strukturelle Unterstützung und Wärmeschutz.

### Werkstoffe und Eigenschaften

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Schmelzpunkt >2800°C. Wärmeleitfähigkeit 140 W/(m · K), hohe Thermoschockbeständigkeit, Dauerfestigkeit 500 MPa. Korrosionsbeständigkeit: Masseverlust <0,5 % in Verbrennungsprodukten über 1000 Stunden.

### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1480 °C, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsdichte 99,9 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberflächenspritzen 0,3 mm ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 2000 °C. SLM-Druck komplexer Hohlräume, Porosität <1 %.

### Anwendungsszenarien und -fälle:

In Feststoffraketen kann eine 1,5 kg schwere Buchse einem 3000 °C heißen Luftstrom standhalten und ihre Lebensdauer um 20 % erhöhen. In Flüssigkeitsraketen erhöht eine 1 kg schwere Buchse die Einspritzeffizienz um 10 %. Eine Rakete verwendet eine W-95Ni-Fe-Buchse (1,2 kg schwer), die die Schubstabilität um 15 % erhöht.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen hohe Temperaturbeständigkeit und Bearbeitungsgenauigkeit. ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung und HIP-Behandlung erhöhen die Temperaturbeständigkeit um 30 %. Komplexe Formen werden durch 3D-Druck mit einer Genauigkeit von ±0,03 mm erreicht. Die thermische Spannung wird durch Glühen (900 °C) um 80 % reduziert.

## 8.3 Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht – Medizinprodukte

Schwere Wolframlegierungen werden im medizinischen Bereich aufgrund ihrer hohen Dichte (17,0–19,3 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Strahlenschutzwirkung, ihrer Ungiftigkeit und ihrer guten mechanischen Eigenschaften bevorzugt eingesetzt. Sie eignen sich daher ideal als Bleiersatz. Zu [den medizinischen Produkten aus schweren Wolframlegierungen](#) gehören Strahlenschutzkomponenten, Isotopenbehälter, medizinische Nadeln aus Wolframlegierungen, Strahlentherapietargets, medizinische Schutzschirme, Atommüllbehälter und Gamma-Knife-Komponenten. Diese Produkte werden häufig in der Diagnose, Behandlung und im Umgang mit radioaktivem Material eingesetzt, wobei Effizienz und Sicherheit gleichermaßen berücksichtigt werden. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Einführung zu jedem medizinbezogenen Produkt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.3.1 Strahlenschutzkomponenten aus schweren Wolframlegierungen

#### Produktübersicht

Strahlenschutzkomponenten werden in Röntgengeräten, CT-Geräten und Strahlentherapiegeräten verwendet, um Patienten und medizinisches Personal vor ionisierender Strahlung zu schützen. Beispielsweise kann eine Abschirmplatte aus der Legierung W-95Ni-Fe mit einer Dicke von 8 mm, einer Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup> und einem Gewicht von etwa 1,5 kg/m<sup>2</sup> 90 % der 100-kV-Röntgenstrahlen abschirmen. Sie ist 33 % kleiner und 20 % leichter als eine Bleiplatte (12 mm).

#### Materialien und Eigenschaften:

W-95Ni-Fe-Legierung (95 % Wolfram, 7:3 Nickel-Eisen), Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %. Die hohe Ordnungszahl ( $Z = 74$ ) bietet hervorragende Abschirmeigenschaften. Der Massenabsorptionskoeffizient beträgt 0,15 cm<sup>2</sup>/g und ist damit 15 % höher als Blei (0,13 cm<sup>2</sup>/g). Hohe Korrosionsbeständigkeit, Massenverlust <0,1 % in Feuchtigkeit über 1000 Stunden, ungiftig, entspricht medizinischen Standards. Wärmeausdehnungskoeffizient  $4,5 \times 10^{-6} /K$ , Verformung <0,01 mm, geeignet für den Langzeitgebrauch.

#### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße 3–5 µm, Reinheit ≥ 99,9 %) wird mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt und mittels kalisostatischer Pressung (CIP) bei 300 MPa gepresst. Die Rohlingsdichte beträgt 13 g/cm<sup>3</sup>. Nach dem Sintern in Wasserstoff bei 1480 °C für 2 Stunden beträgt die Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup> und liegt über 99 %. Durch heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 Stunde) werden Mikroporen eliminiert, die Porosität liegt unter 0,1 %.

CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberflächenpolitur auf Ra 0,4 µm, Vernickelung 5 µm verbessert die Korrosionsbeständigkeit um das Zehnfache. Komplexe Formen werden per SLM gedruckt, Porosität <1 %, Genauigkeit ±0,03 mm.

#### Anwendungsszenarien und -fälle

: In CT-Geräten werden W-95Ni-Fe-Abschirmplatten (10 mm dick) um den Detektor gelegt. Dies erreicht eine Abschirmrate von 92 % und reduziert das Gerätegewicht um 10 %. In Röntgengeräten schützt eine 5 mm dicke Abschirmung das Bedienpersonal und reduziert die Strahlendosis auf unter 0,5 mSv. Ein Krankenhaus verwendet diese Abschirmplatte (1 m<sup>2</sup>, 18,8 kg schwer), die die Patientensicherheit um 15 % verbessert und 25 % weniger Volumen als Bleiplatten hat.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen die Gleichmäßigkeit der Abschirmung und die Bearbeitungsgenauigkeit. Dichteabweichungen  $< \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  werden durch HIP-Verfahren und Mehrzonensintern (Temperaturdifferenz  $< 5 \text{ °C}$ ) erreicht. Hohe Härte erfordert CBN-Werkzeuge, die die Lebensdauer um 50 % verlängern. Die Oberflächengüte wird durch mehrstufiges Polieren erreicht, um Strahlungsstreuung zu vermeiden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.3.2 Behälter für schwere Wolfram-Isotope

#### Produktübersicht

Isotopenbehälter werden zur Lagerung und zum Transport radioaktiver Isotope (wie Tc-99m, I-131) verwendet, um Strahlungslecks zu verhindern. Beispielsweise hat ein W-97Ni-Fe-Behälter mit einem Außendurchmesser von 50 mm und einer Höhe von 100 mm eine Dichte von 19,0 g/cm<sup>3</sup>, eine Wandstärke von 5 mm und wiegt etwa 1,1 kg. Er schirmt 95 % der 1-MeV-Gammastrahlen ab.

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-97Ni-Fe-Legierung (97 % Wolfram), Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 460 HV, Dehnung 12 %. Massenabsorptionskoeffizient 0,16 cm<sup>2</sup>/g, Abschirmwirkung 20 % höher als bei Blei. Temperaturbeständig bis 1500 °C, kein Schmelzen in explosionsgefährdeten Bereichen. Extrem hohe Dichte, Leckrate <10<sup>-6</sup> Pa · m<sup>3</sup> /s, ungiftig, entspricht den Anforderungen der Nuklearmedizin.

#### Herstellungsverfahren

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Vakuumsintern bei 1500°C (10<sup>-3</sup> Pa), Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. Fünfachsiges CNC-Bearbeitung, Hohlraumtoleranz ±0,02 mm, Oberfläche Ra 0,4 µm, Gewindedeckeldesign zur Gewährleistung der Abdichtung. Vernickelung 5 µm oder Aufsprühen einer 0,1 mm dicken TiN-Beschichtung, Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht.

#### Anwendungsszenarien und -fälle

: In der Nuklearmedizin lagern W-97Ni-Fe-Behälter (6 mm dick, 1,5 kg schwer) Tc-99m mit einer Abschirmrate von 96 % und einer Dosisreduktion von unter 1 mSv. Beim Transport schützen 8 mm dicke Behälter I-131 und erhöhen die Sicherheit um 40 %. Ein Labor verwendet diesen Behälter (1,2 kg schwer) mit einer Strahlungsleckrate von <0,01 % und ist damit 10 % leichter als ein Bleibehälter.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Dichte und Gewichtsoptimierung. Die Gewindegengenauigkeit beträgt ±0,01 mm und wird durch CNC- und Ultraschallprüfung sichergestellt. Das Gewicht wird durch die Wandstärkengradienten (mindestens 4 mm) um 15 % reduziert, und das HIP-Verfahren sorgt für Festigkeit. Die Schlagzähigkeit wird durch die Zugabe von Kobalt (2 %) verbessert, die Zähigkeit um 10 % erhöht.

### 8.3.3 Medizinische Nadel aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

#### Produktübersicht

Medizinische Nadeln aus Wolframlegierungen werden für die Implantation radioaktiver Seeds (z. B. zur Behandlung von Prostatakrebs) verwendet, um radioaktive Quellen präzise zu verabreichen. Beispielsweise hat eine W-95Ni-Fe-Nadel mit einem Durchmesser von 1 mm und einer Länge von 20 mm eine Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup> und wiegt etwa 0,3 g. Dies bietet hohe Genauigkeit und Abschirmung.

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Starke Abschirmung, 5 mm Dicke, schirmt 90 % der  $\beta$ -Strahlen ab. Korrosionsbeständigkeit: Massenverlust  $<0,1$  % in physiologischer Kochsalzlösung über 1000 Stunden, ungiftig. Die Spitzenhärte erreicht nach dem Aufkohlen 600 HV, und die Durchstoßkraft erhöht sich um 20 %.

#### Herstellungsverfahren

: Nach dem Mischen des Wolframpulvers wird mit einer hydraulischen Presse (500 MPa) ein schlanker Block gepresst und bei 1480 °C gesintert. Dichte: 18,8 g/cm<sup>3</sup>. CNC-Drehtoleranz:  $\pm 0,01$  mm, Spitzenwinkel: 30°, Oberflächenpolitur: Ra 0,2  $\mu$ m. Aufkohlen (950 °C, 2 Stunden). Verschleißfestigkeit um 30 % erhöht. Vergoldung: 2  $\mu$ m, verbessert die Biokompatibilität.

#### Anwendungsszenarien und -fälle

: Bei der Seed-Implantation verabreicht die W-95Ni-Fe-Nadel (25 mm lang) I-125 mit einer Positioniergenauigkeit von  $\pm 0,5$  mm und erhöht so den therapeutischen Effekt um 15 %. Bei der Tumorbioptie punktiert eine 0,4 g schwere Nadel das Gewebe und reduziert den Schaden um 20 %. Ein Krankenhaus verwendet diese Nadel (1,2 mm Durchmesser) und erzielt eine Implantationserfolgsrate von 98 %.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen Feinheit und Festigkeit. Durchmesser  $<1$  mm erfordern hochpräzise Formen, die durch SLM-Druck hergestellt werden, und eine Porosität  $<0,5$  %. Die Spitze bricht leicht, was durch Aufkohlen und Glühen (800 °C) verstärkt wird, wodurch die Bruchrate auf 0,1 % reduziert wird. Die Oberfläche muss steril sein, mehrstufiges Polieren und UV-Desinfektion gewährleisten dies.

### 8.3.4 Strahlentherapieziel aus hochdichter Wolframlegierung

#### Produktübersicht Strahlentherapie

Targets werden in Linearbeschleunigern zur Erzeugung hochenergetischer Röntgenstrahlung eingesetzt. Beispielsweise hat ein W-95Ni-Fe-Target mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 5 mm eine Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup> und wiegt etwa 370 g. Bei Beschuss mit einem Elektronenstrahl kann es eine Strahlung von 10 MV erzeugen.

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Schmelzpunkt  $> 2800$  °C. Wärmeleitfähigkeit 140 W/(m · K), hohe Temperaturwechselbeständigkeit, Abschirmvermögen: 90 % der Streustrahlung absorbiert. Die Verschleißfestigkeit ist fünfmal höher als bei Stahl, und die Oberflächenstabilität ist gut.

#### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1480 °C, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität  $<0,1$  %. CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05$  mm, Oberfläche Ra 0,4  $\mu$ m, aufgespritzte 0,2 mm ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 2000 °C. Zieloberfläche auf Ra 0,1  $\mu$ m poliert, um Streuung zu reduzieren.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: In Strahlentherapiegeräten erzeugt ein W-95Ni-Fe-Target (6 mm dick) eine Strahlung von 12 MV und erhöht so die Behandlungstiefe um 20 %. In der Protonentherapie erhöht ein 400 g schweres Target die Strahlungsintensität um 15 %. Ein Krankenhaus nutzte dieses Target (60 mm Durchmesser) und steigerte die Genauigkeit der Tumorbestrahlung um 10 %.

### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen hohe Temperaturbeständigkeit und Strahlungskonsistenz. ZrO<sub>2</sub> - Beschichtung und HIP-Behandlung erhöhen die Temperaturbeständigkeit um 25 %. Die angestrebte Oberflächenebenheit <0,01 mm wird durch ultrapräzise Bearbeitung erreicht. Die Streuung wird durch Beschichtungsoptimierung um 5 % reduziert.

## **8.3.5 Medizinischer Schutzschirm aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht**

### **Produktübersicht**

Medizinische Schutzscheiben werden in Operationssälen oder Radiologieabteilungen zum Schutz des medizinischen Personals eingesetzt. Beispielsweise hat eine W-95Ni-Fe-Schutzscheibe mit einer Länge von 500 mm, einer Breite von 300 mm und einer Dicke von 5 mm eine Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup>, wiegt etwa 14 kg und schirmt 90 % der 100-kV-Röntgenstrahlen ab.

### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %. Massenabsorptionskoeffizient 0,15 cm<sup>2</sup>/g, Korrosionsbeständigkeit: Massenverlust <0,1 % in Desinfektionsmittel über 1000 Stunden. Dauerfestigkeit 500 MPa, stoßfest.

### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1480 °C, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. CNC-Schneidtoleranz ±0,1 mm, Oberflächenpolitur Ra 0,8 µm, Vernickeln 5 µm oder Aufsprühen einer Klarlackschicht, Ästhetik um 20 % verbessert.

### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: In der Röntgenchirurgie wird der W-95Ni-Fe-Schutzschirm (6 mm dick) auf dem Operationstisch platziert, wodurch die Dosis auf 0,2 mSv reduziert wird. Im Strahlentherapiebereich schützt der 20 kg schwere Schutzschirm die Techniker mit einer Abschirmrate von 92 %. Ein Krankenhaus nutzt diesen Schutzschirm (500 × 400 mm) und erhöht die Sicherheit um 15 %.

### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen Gewicht und Transparenz. Eine Gewichtsreduzierung wird durch eine Hohlkonstruktion erreicht, die das Gewicht um 10 % reduziert. Bei Bedarf an Teiltransparenz wird Bleiglas eingelegt, um eine Abschirmung von 90 % zu gewährleisten. Die Haltbarkeit wird durch HIP und Beschichtung verbessert, wodurch sich die Lebensdauer um 30 % erhöht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.3.6 Schwerer Atommüllbehälter aus Wolframlegierung

#### Produktübersicht:

Atommüllbehälter dienen der Lagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle, um Strahlungslecks zu verhindern. Beispielsweise hat ein W-97Ni-Fe-Behälter mit einem Außendurchmesser von 200 mm und einer Höhe von 300 mm eine Dichte von 19,0 g/cm<sup>3</sup>, eine Wandstärke von 10 mm und ein Gewicht von etwa 11 kg. Er schirmt 98 % der Gammastrahlen (2 MeV) ab.

#### Werkstoffe und Eigenschaften

W-97Ni-Fe-Legierung, Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 460 HV, Dehnung 12 %. Massenabsorptionskoeffizient 0,16 cm<sup>2</sup>/g, Temperaturbeständigkeit 1500 °C, Korrosionsbeständigkeit (Masseverlust in Säurelösung nach 1000 Stunden <0,2 %). Dichtheit <10<sup>-7</sup> Pa · m<sup>3</sup>/s.

#### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Vakuumsintern bei 1500 °C, Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, Porosität <0,05 % nach HIP-Behandlung. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberfläche Ra 0,4 μm, Schweißnahtfestigkeit 300 MPa. Aufsprühen einer 0,3 mm dicken Keramikbeschichtung, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

#### Anwendungsszenarien und -fälle:

In Kernkraftwerken lagern W-97Ni-Fe-Behälter (Wandstärke 12 mm) Co-60-Abfälle mit einer Abschirmrate von 99 %. Beim Abfalltransport schützt der 15-kg-Behälter die Umwelt und erhöht die Sicherheit um 50 %. Eine Anlage nutzt diesen Behälter (Gewicht 12 kg) und reduziert die Strahlung auf 0,1 mSv.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Dichtheit und Langlebigkeit. Es kommt Elektronenstrahlschweißen (5 kW) zum Einsatz, wobei die Festigkeit 95 % des Grundmaterials beträgt. Langzeitkorrosion wird durch Keramikbeschichtung und HIP-Behandlung verhindert, wodurch die Lebensdauer um 40 % erhöht wird. Durch Optimierung der Wandstärke wird das Gewicht um 10 % reduziert.

### 8.3.7 Schwere Wolframlegierungs-Gamma-Knife-Komponenten

#### Produktübersicht

Gamma-Knife-Komponenten wie Kollimatoren dienen der Fokussierung von Gammastrahlen zur Behandlung von Tumoren. Ein W-90Ni-Fe-Kollimator beispielsweise hat eine Apertur von 2–5 mm, eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup>, wiegt etwa 500 g und schirmt 92 % der Co-60-Strahlen ab.

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Massenabsorptionskoeffizient  $0,14 \text{ cm}^2/\text{g}$ , Temperaturbeständigkeit  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , Leitfähigkeit durch Vergoldung um 20 % erhöht. Dauerfestigkeit 500 MPa, widersteht hochfrequenten Vibrationen.

#### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 250 MPa, Sintern bei  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ , Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , Porosität durch HIP-Behandlung  $<0,1 \%$ . Fünfachsiges CNC-Bearbeitung, Lochdurchmessertoleranz  $\pm 0,02 \text{ mm}$ , Oberfläche  $Ra 0,2 \text{ } \mu\text{m}$ , Vergoldung  $2 \text{ } \mu\text{m}$ , spezifischer Widerstand auf  $4 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$  reduziert. Exzentrizität beim dynamischen Unwuchttest  $<5 \text{ } \mu\text{m}$ .

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Im Gamma Knife fokussiert der W-90Ni-Fe-Kollimator (Gewicht 600 g) die Strahlung und erhöht die Genauigkeit um 15 %. Bei der Behandlung von Hirntumoren steigert die 3-mm-Aperturkomponente die Bestrahlungseffizienz um 20 %. Ein Krankenhaus setzt diese Komponente (Gewicht 550 g) ein und erzielt damit eine um 10 % höhere Behandlungserfolgsrate.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

Zu den Herausforderungen zählen die Genauigkeit des Lochdurchmessers und die Haltbarkeit. Fünfachsiges Bearbeiten und Laserbohren gewährleisten eine Genauigkeit von  $\pm 0,01 \text{ mm}$ . Die Verschleißfestigkeit wird durch die TiN-Beschichtung um 20 % verbessert. Die Streuung wird durch die optimierte Lochform um 5 % reduziert.

### **8.4 Schwere Wolframlegierung Industrielle Werkzeuge und Komponenten**

Die hohe Dichte ( $17,0\text{--}19,3 \text{ g/cm}^3$ ), die hervorragende Verschleißfestigkeit (Härte  $400\text{--}600 \text{ HV}$ ), die hohe Festigkeit ( $700\text{--}1200 \text{ MPa}$ ) und die hervorragende Stabilität machen schwere Wolframlegierungen im industriellen Bereich zu einem idealen Werkstoff für die Herstellung von Industriewerkzeugen und -komponenten wie Schneidwerkzeugen, Matrizen und Pressenköpfen, schwingungsdämpfenden Teilen, Bohrwerkzeugen, Lagerkomponenten, Schleifhülsen und Gegengewichten für schwere Werkzeugmaschinen. Diese Produkte werden häufig in der mechanischen Bearbeitung, der Ölförderung, in Fertigungsanlagen und anderen Bereichen eingesetzt, um Effizienz und Haltbarkeit zu verbessern. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Einführung zu den einzelnen Industriewerkzeugen und -komponenten.

#### **8.4.1 Schwere Schneidwerkzeuge aus Wolframlegierungen**

##### **Produktübersicht:**

Schwere Schneidwerkzeuge aus Wolframlegierungen werden zur Bearbeitung harter Werkstoffe (wie Stahl und Titanlegierungen) eingesetzt und zeichnen sich durch ihre hohe Härte und Verschleißfestigkeit aus. Beispielsweise hat ein Bohrer aus der Legierung W-95Ni-Fe mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 50 mm eine Dichte von  $18,8 \text{ g/cm}^3$  und wiegt etwa 74 g. Er ist 70 % verschleißfester als herkömmliche Hartmetallwerkzeuge und hat eine doppelt so lange Lebensdauer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-95Ni-Fe-Legierung (Wolfram 95 %, Nickel-Eisen 7:3), Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %. Nach dem Aufkohlen erreicht die Härte 600 HV, und die Verschleißfestigkeit ist fünfmal höher als die von Stahl. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 140 W/(m · K), die Temperaturbeständigkeit 1000 °C, und die Legierung erweicht beim Schneiden nicht. Die Bruchzähigkeit (K<sub>IC</sub>) beträgt ca. 30 MPa·m<sup>1/2</sup>, und die Legierung weist eine hohe Schlagzähigkeit auf.

### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße 3–5 µm, Reinheit ≥ 99,9 %) wird mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt und mittels kalisostatischer Pressung (CIP) bei 300 MPa gepresst. Die Rohlingsdichte beträgt 13 g/cm<sup>3</sup>. Nach dem Sintern in Wasserstoff bei 1480 °C für 2 Stunden beträgt die Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup> und liegt über 99 %. Durch heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 Stunde) werden Mikroporen eliminiert, die Porosität liegt unter 0,1 %.

CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,02 mm, Schneidenwinkel 60°, Oberflächengüte Ra 0,4 µm. Aufkohlen (950 °C, 3 Stunden) erhöht die Verschleißfestigkeit um 30 %. Einige Werkzeuge sind mit einer 0,1 mm dicken TiN-Beschichtung versehen, wodurch die Härte auf 650 HV erhöht wird.

### Anwendungsszenarien und -fälle

: In der Luftfahrtindustrie können W-95Ni-Fe-Bohrer (12 mm Durchmesser) Titanlegierungen mit einer Lebensdauer von 300 Stunden bearbeiten – doppelt so lang wie Hartmetallwerkzeuge. In der Automobilindustrie kann ein 100-g-Fräser die Effizienz beim Schneiden von Stahlteilen um 20 % steigern. Eine Fabrik nutzte dieses Werkzeug (60 mm lang) und konnte so die Bearbeitungskosten um 15 % und die Ausschussrate um 10 % senken.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen die Kantenhaltbarkeit und die thermische Stabilität. Die Kantenausbrüche werden durch HIP- und Aufkohlungsprozesse auf 0,5 % reduziert. Die Hochtemperaturerweichung wird durch TiN-Beschichtung und Kühlmittel (Durchflussrate 10 l/min) bei einer Temperatur <200 °C kontrolliert. Die Korngleichmäßigkeit wird durch Nanopulver (Partikelgröße <1 µm) verbessert, und die Verschleißfestigkeit wird um 20 % erhöht.

## 8.4.2 Form und Stempel aus Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

### Produktübersicht:

Schwere Matrizen und Stempel aus Wolframlegierungen werden in Stanz-, Schmiede- und Extrusionsprozessen eingesetzt, um hohem Druck und Verschleiß standzuhalten. Beispielsweise hat eine Matrize aus W-93Ni-Fe mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 50 mm und einer Dicke von 20 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup>, ein Gewicht von etwa 925 g und eine Druckfestigkeit von 2000 MPa.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Materialien und Eigenschaften

W-93Ni-Fe-Legierung (93 % Wolfram), Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 420 HV, Dehnung 18 %. Die Verschleißfestigkeit ist viermal höher als bei Stahl, die Dauerfestigkeit 550 MPa und übersteht 10<sup>7</sup> Zyklen ohne Risse. Temperaturbeständigkeit 1200 °C, Verformung <0,05 mm. Oberflächenkorrosionsbeständigkeit: Massenverlust <0,2 % bei Ölverschmutzung über 1000 Stunden.

### Herstellungsverfahren:

Nach dem Mischen des Wolframpulvers, hydraulisches Pressen (600 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Porosität durch HIP-Behandlung <0,1 %. CNC-Frästoleranz ± 0,05 mm, Oberfläche Ra 0,8 µm, Aufkohlungsbehandlung (950 °C, 3 Stunden), Härte auf 550 HV erhöht. Aufsprühen einer 0,2 mm dicken Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 1500 °C.

### Anwendungsszenarien und -fälle:

Beim Stanzen von Stahlplatten kann die W-93Ni-Fe-Matrize (Gewicht 1 kg) 1 Million Mal verschleißfrei stanzen und hat eine dreimal längere Lebensdauer als Stahlmatrizen. Beim Schmieden kann ein 1,5 kg schwerer Stempel Aluminiumlegierungen mit einer um 25 % höheren Effizienz verarbeiten. Eine Fabrik verwendete diese Matrize (100 × 60 mm), wodurch die Produktionsgenauigkeit um 15 % gesteigert und die Wartungskosten um 20 % gesenkt wurden.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen Druckfestigkeit und Oberflächenverschleiß. Die Druckfestigkeit wird durch HIP und Kobaltzugabe (2 %) verbessert, die Festigkeit um 10 % erhöht. Verschleiß wird durch Aufkohlen und Keramikbeschichtung behoben, die Lebensdauer um 30 % erhöht. Komplexe Formen werden mittels SLM mit einer Genauigkeit von ±0,03 mm gedruckt.

### 8.4.3 Schwere Schwingungsdämpfungsteile aus Wolframlegierung

#### Produktübersicht

Schwingungsdämpfende Teile werden verwendet, um die Vibration von Werkzeugmaschinen oder Geräten zu reduzieren und die Laufstabilität zu verbessern. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Dämpfungsblock mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 20 mm und einer Dicke von 10 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und ein Gewicht von 370 g. Seine Dämpfungsrate ist 40 % höher als die von Stahl.

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Elastizitätsmodul 400 GPa, Schallgeschwindigkeit 4400 m/s, Dämpfungskoeffizient 30 % höher als bei Stahl. Temperaturbeständigkeit 500 °C, Korrosionsbeständigkeit, Masseverlust <0,1 % in Feuchtigkeit über 1000 Stunden.

#### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen bei 250 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,1 mm, Oberfläche Ra 1,6 µm, aufgesprüht mit 0,2 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturbeständigkeit 1500 °C. Mikroporendesign (Durchmesser 50  $\mu$  m ) erhöht die Energiedissipation und die Dämpfungsrate um 10 %.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: In CNC-Werkzeugmaschinen reduziert ein 500 g schwerer Dämpfungsblock die Vibration um 40 % und erhöht die Bearbeitungsgenauigkeit um 10 %. In Stanzpressen reduziert ein 1 kg schweres Dämpfungsstück den Lärm um 5 dB und erhöht die Lebensdauer um 20 %. Eine Fabrik verwendete dieses 120 mm lange Stück und erhöhte die Gerätestabilität um 15 %, wobei die Amplitude auf 2 mm reduziert wurde.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen:**

Zu den Herausforderungen gehören Dämpfungseffizienz und Installation. Hochfrequente Schwingungen (>1000 Hz) werden durch Mikrobohrungen optimiert, wodurch die Dämpfungsrate um 15 % erhöht wird. Installationsscherkräfte (>5000 N) werden durch Titanschrauben ausgeglichen. Haltbarkeit: Durch HIP-Behandlung wird die Ermüdungslebensdauer um 25 % erhöht.

#### **8.4.4 Bohrwerkzeuge aus hochdichter Wolframlegierung**

##### **Produktübersicht**

Bohrwerkzeuge werden in der Öl-, Gas- und Geothermieförderung eingesetzt und sind für ihre Verschleißfestigkeit und ihr geringes Gewicht bekannt. Beispielsweise hat ein W-95Ni-Fe-Bohrer mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Länge von 200 mm eine Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup>, wiegt etwa 3,7 kg und hat eine dreimal längere Lebensdauer als ein Stahlbohrer.

##### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, 600 HV nach Aufkohlung. Die Verschleißfestigkeit ist fünfmal höher als die von Stahl, die Dauerfestigkeit beträgt 500 MPa und die Temperaturbeständigkeit 1000 °C. Korrosionsbeständigkeit: Der Massenverlust im Schlamm nach 1000 Stunden beträgt weniger als 0,5 %.

##### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1480 °C, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05$  mm, Kantenaufkohlen (950 °C, 3 Stunden), Aufsprühen einer 0,2 mm dicken TiN-Beschichtung, Härte 650 HV. SLM-Druck komplexer Strukturen, Genauigkeit  $\pm 0,03$  mm.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Beim Tiefbohren durchbohrt der W-95Ni-Fe-Bohrer (Gewicht 4 kg) 5000 m Gestein und hat eine Lebensdauer von 300 Stunden. Bei Offshore-Bohrungen erhöht sich die Verschleißfestigkeit eines 5 kg schweren Werkzeugs um 40 %. Auf einem Ölfeld wird dieser Bohrer (Durchmesser 60 mm) eingesetzt, wodurch die Bohrleistung um 20 % steigt und die Kosten um 15 % sinken.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Verschleißfestigkeit und hohe Temperaturen. Aufkohlung und TiN-Beschichtung verbessern die Haltbarkeit um 30 %. Hohe Temperaturen werden durch Optimierung der Wärmeleitfähigkeit und des Kühlmittels auf <300 °C kontrolliert. Das Gewicht wird durch Strukturoptimierung um 10 % reduziert.

### 8.4.5 Schwere Lagerkomponenten aus Wolframlegierungen

#### Produktübersicht

Lagerkomponenten werden in Schwermaschinen eingesetzt und bieten eine hohe Dichte und Verschleißfestigkeit. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Lagerring mit einem Außendurchmesser von 80 mm, einem Innendurchmesser von 40 mm und einer Dicke von 20 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup>, ein Gewicht von etwa 1,8 kg und eine um 50 % höhere Tragfähigkeit als Stahl .

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Die Verschleißfestigkeit ist viermal höher als bei Stahl, Dauerfestigkeit 500 MPa, Temperaturbeständigkeit 800 °C. Reibungskoeffizient 0,3, hohe Korrosionsbeständigkeit.

#### Herstellungsverfahren:

Hydraulische Presse (600 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Porosität durch HIP-Behandlung <0,1 %. CNC-Drehtoleranz ±0,02 mm, Oberfläche Ra 0,4 μ m, Härte durch Aufkohlungsbehandlung 550 HV. Aufsprühen einer 0,1 mm dicken MoS<sub>2</sub>-Beschichtung, Reibungsreduzierung 20 %.

#### Anwendungsszenarien und -fälle

: In Baggern hält ein 2 kg schwerer Lagerring einer Belastung von 100 Tonnen stand, wodurch sich seine Lebensdauer um 30 % erhöht. In Windkraftanlagen reduziert ein 1,5 kg schweres Bauteil den Verschleiß um 20 %. Eine Fabrik verwendet dieses Lager (Außendurchmesser 100 mm), wodurch sich seine Betriebsstabilität um 15 % erhöht.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen:

Reibung und Präzision sind Herausforderungen. MoS<sub>2</sub>-Beschichtung und Polieren reduzieren die Reibung um 15 %. Toleranz <±0,01 mm wird durch 5-Achs -Bearbeitung erreicht. HIP und Aufkohlen verbessern die Haltbarkeit , die Lebensdauer erhöht sich um 25 %.

### 8.4.6 Schwere Schleifhülse aus Wolframlegierung

#### Produktübersicht

Schleifhülsen werden in Schleifgeräten verwendet, um Gewicht und Verschleißfestigkeit zu erhöhen. Beispielsweise hat eine W-93Ni-Fe-Hülse mit einem Innendurchmesser von 30 mm, einem

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Außendurchmesser von 50 mm und einer Länge von 100 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup>, wiegt etwa 1,4 kg und weist eine viermal höhere Verschleißfestigkeit als Stahl auf.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-93Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 420 HV, Dehnung 18 %. Hohe Verschleißfestigkeit, Dauerfestigkeit 550 MPa, Temperaturbeständigkeit 1000 °C. Korrosionsbeständigkeit: Masseverlust <0,2 % im Schleifmittel über 1000 Stunden.

#### **Herstellungsverfahren**

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Porosität <0,1 % nach HIP-Behandlung. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberfläche Ra 0,8 µm, Aufkohlungshärte 550 HV. Aufsprühen 0,2 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 1500 °C.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: In einer Mühle schleift eine 1,5 kg schwere Hülse Keramik und erhöht deren Lebensdauer um 30 %. Bei der Erzaufbereitung erhöht eine 2 kg schwere Hülse die Verschleißfestigkeit um 40 %. Eine Fabrik nutzt diese Hülse (120 mm lang) und steigert so die Effizienz um 15 % und verlängert die Wartungszyklen um 20 %.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

Zu den Herausforderungen zählen die Verschleißfestigkeit der Innenwände und die Wärmeausdehnung. Aufkohlen und Beschichten verbessern die Haltbarkeit um 25 %. Durch Glühen (900 °C) wird die Wärmeausdehnung um 80 % reduziert, die Verformung beträgt <0,01 mm. Präzision wird durch hochpräzise Bearbeitung erreicht.

### **8.4.7 Schwere Gegengewichte aus Wolframlegierung für schwere Werkzeugmaschinen**

#### **Produktübersicht**

Hochleistungs-Gegengewichte für Werkzeugmaschinen werden verwendet, um große Geräte auszubalancieren und Vibrationen zu reduzieren. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Gegengewichtsblok mit einer Länge von 300 mm, einer Breite von 100 mm und einer Dicke von 50 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und ein Gewicht von 13,9 kg, was 55 % weniger ist als ein Stahlblock.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften**

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Dauerfestigkeit 500 MPa, 10<sup>7</sup> Zyklen standhalten. Temperaturbeständigkeit 500 °C, Korrosionsbeständigkeit 1000 Stunden, Massenverlust bei Ölverschmutzung <0,1 %.

#### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,2 mm, Oberflächen-Ra 1,6 µm, Aufsprühen einer 0,1 mm dicken

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schutzschicht, Korrosionsbeständigkeit um 30 % erhöht. Große Gegengewichte sind gespleißt, Lötfestigkeit 200 MPa.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Bei Drehmaschinen reduziert ein 20 kg schweres Gegengewicht die Vibrationen um 40 % und erhöht die Präzision um 10 %. Bei Fräsmaschinen verbessert ein 15 kg schweres Gegengewicht die Stabilität um 15 %. Eine Fabrik verwendet dieses Gegengewicht (18 kg Gewicht), wodurch die Verarbeitungsgeräusche um 10 dB reduziert und die Lebensdauer um 20 % erhöht werden.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

Zu den Herausforderungen gehörten Gewichtsverteilung und Kosten. Dichtegleichmäßigkeit wurde durch Mehrpunktpressen und HIP mit einer Abweichung von  $<0,1 \text{ g/cm}^3$  erreicht. Kostensenkung um 20 % durch Pulverrecycling. Optimierte Montage durch flexible Dichtungen mit einer auf 5000 N erhöhten Scherkraft.

### **8,5 Schwere Wolframlegierungen für Elektronik und Energieprodukte**

Die hohe Dichte ( $17,0\text{--}19,3 \text{ g/cm}^3$ ), die ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit ( $120\text{--}180 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ), die hohe Festigkeit ( $700\text{--}1200 \text{ MPa}$ ), die hohe Temperaturbeständigkeit (Schmelzpunkt  $> 2800 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und die gute Strahlenschutzwirkung machen schwere Wolframlegierungen im Elektronik- und Energiebereich zum bevorzugten Material für die Herstellung von Elektrodenmaterialien, Kühlkörpern, Kernreaktorcomponenten, Batteriegegengewichten, Solaranlagencomponenten, Röntgenröhren-Anodentargets und Windkraftanlagengegengewichten. Diese Produkte spielen eine Schlüsselrolle in elektronischen Geräten, Energieumwandlungs- und Stromerzeugungssystemen und verbessern Leistung und Zuverlässigkeit. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Einführung zu jedem Elektronik- und Energieprodukt.

#### **8.5.1 Elektrodenmaterialien aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte**

##### **Produktübersicht:**

Elektrodenmaterialien aus schweren Wolframlegierungen werden für Funkenerosion (EDM), Widerstandsschweißen und Plasmaschneiden verwendet und sind für ihre hohe Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit bekannt. Beispielsweise hat eine Elektrode aus der Legierung W-80Cu mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 50 mm eine Dichte von  $17,0 \text{ g/cm}^3$  und wiegt etwa 67 g. Ihre Leitfähigkeit ist 20 % höher als die von reinem Kupfer und ihre Verschleißfestigkeit fünfmal höher als die von Stahl.

##### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-80Cu-Legierung (80 % Wolfram, 20 % Kupfer), Dichte  $17,0 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 700 MPa, Härte 380 HV, Dehnung 10 %. Elektrische Leitfähigkeit 45 % IACS (International Annealed Copper Standard), Wärmeleitfähigkeit  $180 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , Temperaturbeständigkeit  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hohe Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion, der Masseverlust nach 1000 Entladungen beträgt weniger als 0,5 %. Korrosionsbeständigkeit: Der Masseverlust in Feuchtigkeit über 1000 Stunden beträgt weniger als 0,2 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße 3–5  $\mu\text{m}$ , Reinheit  $\geq 99,9\%$ ) wird mit Kupferpulver vermischt und mittels kaltisostatischer Pressung (CIP) bei 250 MPa gepresst. Die Rohlingsdichte beträgt 11  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Nach dem Sintern in Wasserstoff bei 1350  $^{\circ}\text{C}$  für 2 Stunden schmilzt die Kupferphase und infiltriert die Wolframmatrix mit einer Dichte von 17,0  $\text{g}/\text{cm}^3$  und einer Dichte von  $> 98\%$ . Durch heißisostatisches Pressen (HIP, 150 MPa, 1300  $^{\circ}\text{C}$ , 1 Stunde) werden Mikroporen eliminiert, die Porosität liegt unter 0,1 %.

CNC-Drehtoleranz  $\pm 0,02$  mm, Oberflächenpolitur Ra 0,4  $\mu\text{m}$ , Vergoldung 2  $\mu\text{m}$ , spezifischer Widerstand auf 3  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$  reduziert. Die Elektrodenspitze ist karburiert (900  $^{\circ}\text{C}$ , 2 Stunden) und die Härte auf 450 HV erhöht.

### Anwendungsszenarien und -fälle

: Beim Funkenerosionsschweißen können W-80Cu-Elektroden (12 mm Durchmesser) Formstahl mit einer Lebensdauer von 500 Stunden bearbeiten, was dreimal länger ist als bei Kupferelektroden. Beim Widerstandsschweißen kann eine 100-g-Elektrode Aluminiumplatten mit einer um 25 % höheren Effizienz schweißen. Eine Fabrik nutzte diese Elektrode (60 mm lang), um die Bearbeitungsgenauigkeit um 15 % zu erhöhen und den Lichtbogenverlust um 20 % zu reduzieren.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen gehört die Balance zwischen Leitfähigkeit und Verschleißfestigkeit. Der Kupfergehalt wird auf 20–30 % optimiert, die Leitfähigkeit um 10 % erhöht und die HIP-Behandlung die Festigkeit um 15 % steigern. Die Lichtbogenerosion wird durch Vergolden und Aufkohlen um 30 % reduziert. Die Oberflächenrauheit wird durch mehrstufiges Polieren kontrolliert und die Wärmeableitungseffizienz um 10 % gesteigert.

## 8.5.2 Kühlkörper (Kühler) aus hochdichter Wolframlegierung

### Produktübersicht

Kühlkörper werden verwendet, um Wärme von elektronischen Geräten mit hoher Leistung (wie CPUs und LEDs) abzuleiten und so das Wärmemanagement mit hoher Wärmeleitfähigkeit und Dichte zu optimieren. Beispielsweise hat ein Kühlkörper aus der Legierung W-85Cu mit einer Länge von 50 mm, einer Breite von 50 mm und einer Dicke von 5 mm eine Dichte von 17,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  und wiegt etwa 219 g. Seine Wärmeableitungseffizienz ist 50 % höher als die von Aluminium.

### Werkstoffe und Eigenschaften

W-85Cu-Legierung (85 % Wolfram, 15 % Kupfer), Dichte 17,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ , Zugfestigkeit 800 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 8 %. Wärmeleitfähigkeit 170  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , etwas niedriger als bei reinem Wolfram (174  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), jedoch bessere Verarbeitbarkeit. Temperaturbeständigkeit 1500  $^{\circ}\text{C}$ , Wärmeausdehnungskoeffizient  $6,5 \times 10^{-6}/\text{K}$ , passend zu Silizium-Chips ( $4,2 \times 10^{-6}/\text{K}$ ), Verformung  $< 0,01$  mm.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Herstellungsverfahren:

Wolfram- und Kupferpulver werden gemischt, kalisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1350 °C, Dichte 17,5 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. CNC-Frästoleranz ±0,05 mm, Oberflächen-Ra 0,8 µm, Mikrokanaldesign (Breite 0,5 mm) erhöht die Wärmeableitungsfläche um 20 %. Vernickelung 5 µm, Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht.

### Anwendungsszenarien und -fälle

: In Server-CPU's bietet der W-85Cu-Kühlkörper (Gewicht 250 g) eine Wärmeableitungsleistung von 200 W und eine Temperaturreduzierung von 15 °C. Bei Hochleistungs-LEDs kann ein 150 g schwerer Kühlkörper die Lebensdauer der LED um 30 % verlängern. Eine Elektronikfabrik verwendete diesen Kühlkörper (50 × 50 mm), und die Chip-Betriebstemperatur sank auf 60 °C, bei gleichzeitiger Leistungssteigerung von 10 %.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen gehören die Anpassung der Wärmeausdehnung und die effiziente Wärmeableitung. Der Kupferanteil wird auf 15–20 % eingestellt, die Abweichung der Wärmeausdehnung liegt unter 10 %. Mikrokanäle werden durch Laserbearbeitung erzeugt, wodurch die Wärmeableitung um 25 % erhöht wird. Das Gewicht wird durch die Hohlkonstruktion um 15 % reduziert, und das HIP-Verfahren sorgt für Stabilität.

## 8.5.3 Kernreaktorkomponenten aus schwerer Wolframlegierung

### Produktübersicht:

Kernreaktorkomponenten wie Abschirmblöcke oder Steuerstabhülsen zeichnen sich durch hohe Dichte und Strahlenschutz aus. Beispielsweise hat ein W-97Ni-Fe-Abschirmblock mit einer Länge von 200 mm, einer Breite von 50 mm und einer Dicke von 20 mm eine Dichte von 19,0 g/cm<sup>3</sup>, wiegt etwa 1,9 kg und schirmt 98 % der Gammastrahlen (2 MeV) ab.

### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-97Ni-Fe-Legierung, Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 460 HV, Dehnung 12 %. Massenabsorptionskoeffizient 0,16 cm<sup>2</sup>/g, Temperaturbeständigkeit 1500 °C, Korrosionsbeständigkeit: Masseverlust <0,2 % im Kühlmittel über 1000 Stunden. Dauerfestigkeit 500 MPa, thermoschockbeständig.

### Herstellungsverfahren

Kalisostatisches Pressen 300 MPa, Vakuumsintern bei 1500°C (10<sup>-3</sup> Pa), Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, Porosität <0,05 % nach HIP-Behandlung. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberfläche Ra 0,4 µm, aufgespritzte 0,3 mm ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 2000 °C. Lötfestigkeit der verbundenen Teile 300 MPa.

### Anwendungsszenarien und -fälle:

In einem Druckwasserreaktor wird der W-97Ni-Fe-Abschirmblock (Gewicht 2 kg) außerhalb des Kerns

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

platziert, wodurch die Strahlung auf 0,1 mSv reduziert wird. In einem schnellen Neutronenreaktor schützt das 3 kg schwere Gehäuse die Steuerstäbe, wodurch die Lebensdauer um 20 % erhöht wird. In einem Kernkraftwerk wird dieses Bauteil (200 × 60 mm) eingesetzt, was die Sicherheit um 15 % erhöht und den Wartungszyklus um 25 % verlängert.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Strahlungsbeständigkeit und hohe Temperaturen. ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung und HIP-Behandlung erhöhen die Haltbarkeit um 30 %. Mikrorisse werden durch Glühen (900 °C) um 80 % reduziert. Das Gewicht wird durch optimierte Struktur um 10 % reduziert, ohne die Festigkeit zu verringern.

#### 8.5.4 Gegengewicht für Batterien aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

##### Produktübersicht

Batteriegegengewichte werden in Elektrofahrzeugen oder Energiespeichersystemen eingesetzt, um die Gewichtsverteilung auszugleichen. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Gegengewicht mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 30 mm und einer Dicke von 10 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und wiegt etwa 555 g. Damit ist es 55 % weniger als ein Stahlgegengewicht.

##### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Dauerfestigkeit 500 MPa, Temperaturbeständigkeit 500 °C, Korrosionsbeständigkeit (Masseverlust <0,1 % im Elektrolyten über 1000 Stunden). Wärmeleitfähigkeit 130 W/(m·K), gute Wärmeableitung.

##### Herstellungsverfahren:

Hydraulische Presse (600 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung, Porosität <0,1 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,1 mm, Oberflächen-Ra 1,6 µm, Aufsprühen einer 0,1 mm dicken Schutzschicht, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht. Sonderformteile werden mittels SLM mit einer Genauigkeit von ±0,05 mm gedruckt.

##### Anwendungsszenarien und -fälle

: Bei Elektrofahrzeugen wird ein 1 kg schweres Gegengewicht auf dem Batteriepaket platziert, um das Achslastverhältnis auszugleichen und die Lebensdauer der Federung um 20 % zu erhöhen. Bei Energiespeicherschränken verbessert ein 2 kg schweres Gegengewicht die Stabilität um 15 %. Ein Automobilhersteller verwendete dieses Gegengewicht (800 g) und verbesserte dadurch das Handling um 10 % und senkte den Energieverbrauch um 5 %.

##### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen Kosten und Installation. Recyclingpulver reduziert die Kosten um 20 %. Der Bauraum wird durch 3D-Druck eines speziell geformten Designs optimiert, die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gewichtsabweichung beträgt  $\leq \pm 2$  g. Die Haltbarkeit wird durch HIP verbessert, die Lebensdauer erhöht sich um 25 %.

### 8.5.5 Komponenten für Solaranlagen aus schweren Wolframlegierungen

#### Produktübersicht:

Solaranlagenkomponenten wie Gewichte oder Halterungen regulieren den Winkel und die Stabilität des Panels. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Gewicht mit einer Länge von 150 mm, einer Breite von 50 mm und einer Dicke von 20 mm eine Dichte von  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , ein Gewicht von etwa 1,4 kg und einen um 20 % erhöhten Windwiderstand.

#### Werkstoffe und Eigenschaften

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Temperaturbeständigkeit 500 °C, Korrosionsbeständigkeit, Masseverlust  $< 0,1$  % in 1000 Stunden im Freien. Dauerfestigkeit 500 MPa, Windlastbeständigkeit.

#### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , Porosität  $< 0,1$  % nach HIP-Behandlung. CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,1$  mm, Oberfläche Ra 1,6  $\mu\text{m}$ , aufgespritzte 0,2 mm  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 1500 °C. Lötfestigkeit der Verbindungsteile 200 MPa.

#### Anwendungsszenarien und -fälle

: In Photovoltaikkraftwerken passt ein 2 kg schweres Gegengewicht die Modulneigung an und erhöht die Effizienz der Stromerzeugung um 10 %. Bei tragbaren Solarmodulen erhöht eine 1 kg schwere Stütze den Windwiderstand um 15 %. In einem Projekt wurde dieses Gegengewicht (1,5 kg) eingesetzt, wodurch die Stabilität um 20 % und die Lebensdauer um 30 % erhöht wurden.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Witterungsbeständigkeit und Gewicht.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung und HIP-Behandlung erhöhen die Haltbarkeit um 25 %. Das hohle Design reduziert das Gewicht um 15 %. Die Montage wird durch Schrauben mit einer Scherkraft von 5000 N optimiert.

### 8.5.6 Anodentarget aus schwerer Wolframlegierung für Röntgenröhren

#### Produktübersicht:

[Röntgenröhren-Anodentargets](#) werden zur Erzeugung hochenergetischer Röntgenstrahlen verwendet. Beispielsweise haben W-95Ni-Fe-Targets mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 5 mm eine Dichte von  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , ein Gewicht von etwa 370 g und können einem Elektronenbeschuss von 10 MV standhalten.

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schmelzpunkt >2800 °C. Wärmeleitfähigkeit 140 W/(m·K), hohe Thermoschockbeständigkeit, schirmt 90 % der Streustrahlung ab. Die Verschleißfestigkeit ist fünfmal höher als bei Stahl, und die Oberflächenstabilität ist ausgezeichnet.

#### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1480 °C, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberflächen-Ra 0,1 µm, Aufsprühen einer 0,2 mm dicken ZrO<sub>2</sub>- Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 2000 °C. Zieloberflächenpolitur reduziert die Streuung um 5 %.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle:**

In medizinischen Röntgenröhren erzeugt ein W-95Ni-Fe-Target (6 mm dick) 12-MV-Strahlen und steigert so die Effizienz um 15 %. In industriellen Tests erhöht ein 400 g schweres Target die Durchdringung um 20 %. Ein bestimmtes Gerät verwendet dieses Target (60 mm Durchmesser) und erhöht dadurch die Strahlenintensität um 10 % und die Lebensdauer um 25 %.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen hohe Temperaturbeständigkeit und -konsistenz. ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung und HIP-Behandlung erhöhen die Temperaturbeständigkeit um 30 %. Zieloberflächenebenheit <0,01 mm wird durch ultrapräzise Bearbeitung erreicht. Streuung durch Beschichtungsoptimierung um 5 % reduziert.

### **8.5.7 Gegengewicht für Windturbinen aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht**

#### **Produktübersicht:**

Gegengewichte für Windkraftanlagen dienen zum Ausbalancieren von Rotorblättern oder Gondeln. Beispielsweise hat ein Gegengewichtsblock aus W-90Ni-Fe mit einer Länge von 200 mm, einer Breite von 100 mm und einer Dicke von 50 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und wiegt etwa 9,25 kg. Damit ist er 55 % leichter als ein Stahlblock.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften**

W-90Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Dauerfestigkeit 500 MPa, hält 10<sup>7</sup> Zyklen stand. Temperaturbeständigkeit 500 °C, Korrosionsbeständigkeit. Masseverlust <0,1 % in Seebrise über 1000 Stunden.

#### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,2 mm, Oberflächen-Ra 1,6 µm, Aufsprühen einer 0,1 mm dicken Schutzschicht, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht. Lötfestigkeit beim Verbinden großer Gegengewichte 200 MPa.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: In der Offshore-Windkraft gleicht ein 10 kg schweres Gegengewicht ein 3-MW-Rotorblatt aus und reduziert Vibrationen um 30 %. In der Onshore-Windkraft verbessert ein 15 kg schweres Gegengewicht die Kabinenstabilität um 15 %. Ein Windpark nutzt dieses Gegengewicht (12 kg) und erhöht dadurch die Effizienz der Stromerzeugung um 10 % und die Lebensdauer um 20 %.

### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

Zu den Herausforderungen zählen Witterungsbeständigkeit und Gewichtsverteilung. Die Haltbarkeit von Beschichtung und HIP-Behandlung wurde um 25 % erhöht. Die Dichtegleichmäßigkeit wird durch Mehrpunktpressung kontrolliert, Abweichung  $< 0,1 \text{ g/cm}^3$ . Die Installation wird durch flexible Verbindungen optimiert, die Tragfähigkeit wird auf 6000 N erhöht.

### **8.6 Kundenspezifische Produkte aus schwerer Wolframlegierung**

Kundenspezifische Produkte aus hochdichten Wolframlegierungen profitieren von ihrer hohen Dichte (17,0–19,3  $\text{g/cm}^3$ ), ihren hervorragenden mechanischen Eigenschaften (700–1200 MPa), ihrer Verschleißfestigkeit und Bearbeitbarkeit, um durch individuelles Design spezifische Anforderungen zu erfüllen. Zu diesen Produkten gehören 3D-gedruckte Wolframlegierungsteile, speziell geformte Gegengewichte, Kunstwerke und Dekorationsstücke, Komponenten für experimentelle Instrumente, Mikropräzisionsteile, Kryptowährungen und Bankkarten usw., die in Industrie, Forschung, Kunst und Finanzwesen weit verbreitet sind. Kundenspezifisches Design kombiniert mit fortschrittlicher Fertigungstechnologie (wie 3D-Druck) und Präzisionsbearbeitung verleiht dem Produkt einzigartige Leistung und ein einzigartiges Erscheinungsbild. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Einführung zu jedem kundenspezifischen Produkt.

#### **8.6.1 3D-Druckteile aus hochdichter Wolframlegierung**

##### **Produktübersicht:**

3D-gedruckte Wolframlegierungsteile werden mit komplexer Geometrie mittels additiver Fertigungstechnologie hergestellt, um den speziellen Anforderungen der Luftfahrt, der Medizin und anderer Bereiche gerecht zu werden. Beispielsweise hat ein W-90Ni-Fe-Teil mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Wabenstruktur im Inneren eine Dichte von  $18,5 \text{ g/cm}^3$  und wiegt etwa 500 g. Dies reduziert das Gewicht um 10 % bei gleichbleibender Festigkeit.

##### **Materialien und Eigenschaften:**

W-90Ni-Fe-Legierung (90 % Wolfram, 7:3 Nickel-Eisen), Dichte  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %. Temperaturbeständigkeit 500 °C, Dauerfestigkeit 500 MPa,  $10^7$  Zyklen standhalten. Korrosionsbeständigkeit. Masseverlust  $< 0,1 \%$  in Feuchtigkeit über 1000 Stunden. Porosität  $< 1 \%$  nach 3D-Druck, ähnlich der Leistung beim herkömmlichen Sintern.

##### **Herstellungsverfahren:**

Wolframpulver (Partikelgröße 1–3  $\mu\text{m}$ , Reinheit  $\geq 99,9 \%$ ) wurde mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt und mittels selektivem Laserschmelzen (SLM) mit einer Laserleistung von 3000 W, einer Schichtdicke von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

30  $\mu\text{m}$  und einer Druckgeschwindigkeit von 10  $\text{cm}^3/\text{h}$  hergestellt. Nach dem Drucken erhöhte heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 Stunde) die Dichte auf 18,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  und reduzierte die Porosität auf 0,5 %.

Die Nachbearbeitung umfasst eine CNC-Bearbeitung mit einer Toleranz von  $\pm 0,03$  mm und einer Oberflächengüte von Ra 0,8  $\mu\text{m}$ . Für komplexe Hohlräume ist keine Form erforderlich, was die Designfreiheit um 50 % erhöht. Die Oberfläche kann mit einer 0,1 mm dicken  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung mit einer Temperaturbeständigkeit von 1500 °C besprüht werden.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: In der Luftfahrt werden W-90Ni-Fe-Sonderformteile (Gewicht 600 g) als Triebwerksgegengewichte eingesetzt, wodurch das Volumen um 15 % reduziert wird. In der medizinischen Behandlung wird die Festigkeit implantierter Stents mit einem Gewicht von 300 g um 20 % erhöht. Ein Luft- und Raumfahrtunternehmen nutzte diese Technologie zum Drucken von W-90Ni-Fe-Teilen ( $50 \times 50$  mm), wodurch der Entwicklungszyklus von 30 auf 15 Tage verkürzt und die Leistungskonsistenz um 10 % erhöht wurde.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen Porosität und Präzision. Die Porosität beim SLM-Druck konnte durch Optimierung der Laserparameter (Leistung 3500 W) auf 0,5 % reduziert werden. Die Präzision wurde durch HIP- und CNC-Nachbearbeitung auf  $\pm 0,02$  mm verbessert. Die schlechte Pulverfließfähigkeit wurde durch Zugabe von 0,5 % Nanooxid verbessert, wodurch die Druckerfolgsrate um 20 % stieg.

### **8.6.2 Gegengewicht aus Wolframlegierung mit hoher spezifischer Dichte und Sonderform**

#### **Produktübersicht:**

Gegengewichte in Sonderform erfüllen die Auswuchtanforderungen nicht standardmäßiger Anwendungen, wie z. B. bogenförmige oder mehrlochförmige Gegengewichte. Beispielsweise hat das bogenförmige Gegengewicht aus W-95Ni-Fe mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 30 mm und einer Dicke von 20 mm eine Dichte von 18,8  $\text{g}/\text{cm}^3$  und ein Gewicht von ca. 564 g und eignet sich daher für komplexe Einbausituationen.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8  $\text{g}/\text{cm}^3$ , Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %. Temperaturbeständigkeit 1000 °C, Dauerfestigkeit 500 MPa, Korrosionsbeständigkeit, Masseverlust  $< 0,2$  % in Seewasser über 1000 Stunden. Formvielfalt durch individuelles Design, Gewichtsabweichung  $< \pm 2$  g.

#### **Herstellungsverfahren:**

Nach dem Mischen des Wolframpulvers erfolgt kaltisostatisches Pressen in einer Spezialform mit 300 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,8  $\text{g}/\text{cm}^3$ , Porosität durch HIP-Behandlung  $< 0,1$  %. Komplexe Formen werden mittels SLM gedruckt, Laserleistung 3000 W, Genauigkeit  $\pm 0,05$  mm. CNC-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,03$  mm, Oberflächen-Ra 1,6  $\mu\text{m}$ , Vernickelung 5  $\mu\text{m}$  verbessert die Korrosionsbeständigkeit um 10 %.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Bei Drohnen korrigiert ein bogenförmiges Gegengewicht von 500 g den Schwerpunkt und erhöht die Stabilität um 15 %. Bei Schiffen reduziert ein poröses Gegengewicht von 1 kg das Gewicht um 10 % und erhöht den Wind- und Wellenwiderstand um 20 %. Eine Maschinenbaufabrik verwendet ein Gegengewicht aus W-95Ni-Fe (800 g), das die Bauraumausnutzung um 30 % erhöht und eine Leistungskonsistenz von 99 % erreicht.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen Formgenauigkeit und Produktionseffizienz. Komplexe Formen werden im 3D-Druckverfahren hergestellt, wodurch der Entwicklungszyklus um 50 % verkürzt wird. Die Chargenkonsistenz wird durch HIP- und dynamische Auswuchttests mit einer Exzentrizität von  $< 5$   $\mu\text{m}$  optimiert. Durch Recyclingpulver werden die Kosten um 20 % gesenkt.

### **8.6.3 Kunstwerke und Dekorationsstücke aus hochdichter Wolframlegierung**

#### **Produktübersicht:**

Kunstwerke und Dekorationsstücke aus hochdichten Wolframlegierungen werden für Skulpturen, Schmuck usw. verwendet. Ihre hohe Dichte und ihr Glanz verstärken die Textur. Beispielsweise hat ein kugelförmiges Dekorationsstück aus W-93Ni-Fe mit einem Durchmesser von 30 mm eine Dichte von 18,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  und wiegt etwa 260 g. Es fühlt sich schwer und schön an.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften**

W-93Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ , Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 420 HV, Dehnung 18 %. Verschleißfestigkeit 4-mal höher als bei Stahl, Korrosionsbeständigkeit in Schweiß 1000 Stunden, Masseverlust  $< 0,1$  %. Oberfläche auf Ra 0,2  $\mu\text{m}$  poliert, hochglänzend, Leitfähigkeit nach Vergoldung um 20 % erhöht.

#### **Herstellungsverfahren**

: Nach dem Mischen des Wolframpulvers wird es mit einer hydraulischen Presse bei 500 MPa gepresst und bei 1450 °C gesintert. Die Dichte beträgt 18,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Die CNC-Bearbeitungstoleranz beträgt  $\pm 0,05$  mm, die Oberflächenpolitur Ra 0,1  $\mu\text{m}$ , die Vergoldung oder Rhodinierung (2–5  $\mu\text{m}$ ) erhöht die Ästhetik um 30 %. Künstlerische Details werden durch Lasergravur mit einer Tiefe von 0,1–0,5 mm erzielt.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Bei Skulpturen verbessert ein 1 kg schweres W-93Ni-Fe-Werk die Textur und steigert den Marktwert um 20 %. Bei Schmuck erhöht ein 50 g schwerer Anhänger die Verschleißfestigkeit um 30 %. Ein Künstler fertigt aus diesem 300 g schweren Material dekorative Kugeln, die nach dem Polieren so glänzen wie Edelmetalle. Der Umsatz steigt dadurch um 15 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen Oberflächengüte und Kosten. Das Polieren erfordert mehrstufige Schleifscheiben und chemisches Polieren, wodurch der Glanz um 25 % erhöht wird. Durch Kleinserienfertigung und Recycling werden die Kosten um 15 % gesenkt. Feine Gravuren werden mit Laserpräzision ( $\pm 0,01$  mm) erzielt.

### 8.6.4 Komponenten eines Versuchsinstruments aus schwerer Wolframlegierung

#### Produktübersicht:

Komponenten experimenteller Instrumente werden in wissenschaftlichen Forschungsgeräten verwendet, beispielsweise als Gegengewichte für Gravimeter. Beispielsweise hat eine W-97Ni-Fe-Komponente mit einer Länge von 50 mm, einer Breite von 20 mm und einer Dicke von 10 mm eine Dichte von  $19,0 \text{ g/cm}^3$  und wiegt etwa 190 g. Sie ermöglicht eine hochpräzise Massenverteilung.

#### Werkstoffe und Eigenschaften:

W-97Ni-Fe-Legierung, Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 460 HV, Dehnung 12 %. Wärmeausdehnungskoeffizient  $4,5 \times 10^{-6} /\text{K}$ , Verformung  $< 0,01$  mm, Temperaturbeständigkeit  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Korrosionsbeständigkeit: Masseverlust  $< 0,1$  % in Laborumgebung über 1000 Stunden.

#### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Vakuumsintern  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , HIP-Behandlungsporosität  $< 0,05$  %. Fünfsichtige CNC-Bearbeitung, Toleranz  $\pm 0,01$  mm, Oberflächen-Ra  $0,4 \mu\text{m}$ , Vernickelung  $5 \mu\text{m}$  zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit. Exzentrizität im dynamischen Unwuchttest  $< 5 \mu\text{m}$ .

#### Anwendungsszenarien und -fälle

: In einem Gravimeter verbessert ein 200-g-Gegengewicht die Messgenauigkeit um 0,005 %. In einer Zentrifuge stabilisiert ein 500-g-Bauteil die Drehzahl ( $10.000 \text{ U/min}$ ) und reduziert den Fehler um 10 %. Ein Forschungsinstitut verwendete ein W-97Ni-Fe-Bauteil (250 g schwer), wodurch die experimentelle Wiederholgenauigkeit um 15 % stieg.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Präzision und Stabilität. Toleranzen  $< \pm 0,005$  mm werden durch ultrapräzise Bearbeitung erreicht. Die Wärmeausdehnung wird durch Glühen ( $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) optimiert, wobei die Verformung um 80 % reduziert wird. Gewichtsabweichungen werden durch hochpräzises Pressen ( $< \pm 1$  g) kontrolliert.

### 8.6.5 Mikropräzisionsteile aus Wolframlegierung mit hoher Dichte

#### Produktübersicht

Mikropräzisionsteile werden in elektronischen oder optischen Geräten, beispielsweise als Linsengegewichte, verwendet. Beispielsweise hat ein W-95Ni-Fe-Teil mit einem Durchmesser von 5

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm und einer Dicke von 2 mm eine Dichte von 18,8 g/cm<sup>3</sup> und ein Gewicht von etwa 0,74 g bei hoher Präzision und geringer Größe.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %. Verschleißfestigkeit 5-mal höher als bei Stahl, Temperaturbeständigkeit 1000 °C, Korrosionsbeständigkeit, Masseverlust in Feuchtigkeit über 1000 Stunden <0,1 %. Oberflächengüte Ra 0,2 µm.

#### **Herstellungsverfahren:**

Nach dem Mischen des Wolframpulvers Mikroformpressen (300 MPa), Sintern bei 1480 °C, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. Mikrobearbeitungstechnologie (CNC oder Laserschneiden) Toleranz ±0,005 mm, Oberflächenpolitur Ra 0,1 µm, Vergoldung 2 µm zur Verbesserung der Leitfähigkeit.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: In Kameraobjektiven reguliert ein 1 g schweres Gegengewicht die Brennweite und erhöht die Genauigkeit um 10 %. In Mikromotoren stabilisiert ein 0,5 g schweres Teil die Rotationsgeschwindigkeit um 15 %. Ein Optikunternehmen nutzt dieses Teil (6 mm Durchmesser), um Montagefehler um 5 % zu reduzieren und die Leistung um 20 % zu steigern.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

Zu den Herausforderungen zählen Mikrogröße und Festigkeit. Die Formgenauigkeit wird durch SLM-Druck auf ±0,002 mm verbessert. Die Festigkeit wird durch HIP und Aufkohlen (Härte 600 HV) um 15 % erhöht. Die Oberfläche muss makellos sein, was durch mehrstufiges Polieren erreicht wird.

### **8.6.6 Kryptowährung aus schwerer Wolframlegierung**

#### **Produktübersicht:**

Die Kryptowährung aus schwerer Wolframlegierung ist eine physische Gedenkmünze, die den Wert digitaler Vermögenswerte symbolisiert. Beispielsweise hat eine W-93Ni-Fe-Münze mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Dicke von 3 mm eine Dichte von 18,5 g/cm<sup>3</sup> und wiegt etwa 87 g, was eine hochwertige Textur bietet.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften:**

W-93Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 420 HV, Dehnung 18 %. Die Verschleißfestigkeit ist viermal höher als bei Stahl, die Korrosionsbeständigkeit in Schweiß über 1000 Stunden, Masseverlust <0,1 %. Oberfläche auf Ra 0,1 µm poliert, Glanz nach Vergoldung um 30 % erhöht.

#### **Herstellungsverfahren:**

Hydraulische Presse (500 MPa), Rundblock gepresst, gesintert bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>. CNC-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05$  mm, Lasergravurmuster (Tiefe 0,2 mm), Oberflächenpolitur Ra 0,1  $\mu\text{m}$ , Vergoldung 5  $\mu\text{m}$  oder Rhodinierung, Ästhetik um 20 % verbessert. Fälschungssichere Markierung durch Mikrogravur.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Im Sammlermarkt steigt der Wert einer 100 g schweren W-93Ni-Fe-Münze (50 mm Durchmesser) um 15 %. Im Handel verbessert eine 80 g schwere Gedenkmünze das Markenimage um 20 %. Ein Blockchain-Unternehmen nutzt diese Münze (90 g) und steigert damit seinen Bekanntheitsgrad um 25 %.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen das Erscheinungsbild und die Fälschungssicherheit. Der Glanz wird durch chemisches Polieren und Mehrschichtlackierung um 30 % verbessert. Die Fälschungssicherheit wird durch Laser-Mikrogravur (Genauigkeit  $\pm 0,01$  mm) und eingebettete RFID-Chips erreicht. Die Kosten werden durch Massenproduktion um 15 % gesenkt.

### **8.6.7 Bankkarte aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht**

#### **Produktübersicht:**

Bankkarten aus hochdichter Wolframlegierung sind hochwertige Kreditkarten, die sich schwer anfühlen und langlebig sind. Beispielsweise hat eine W-95Ni-Fe-Karte mit einer Länge von 85,6 mm, einer Breite von 54 mm und einer Dicke von 1 mm eine Dichte von 18,8  $\text{g/cm}^3$  und wiegt etwa 86 g, was zehnmal schwerer ist als eine Plastikkarte.

#### **Werkstoffe und Eigenschaften**

W-95Ni-Fe-Legierung, Dichte 18,8  $\text{g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %. Verschleißfestigkeit 5-mal höher als bei Stahl, Korrosionsbeständigkeit in Schweiß 1000 Stunden, Masseverlust  $< 0,1$  %. Oberflächengüte Ra 0,2  $\mu\text{m}$ , Leitfähigkeit nach Vergoldung um 20 % erhöht.

#### **Herstellungsverfahren:**

Kaltisostatisches Pressen (300 MPa), Sintern bei 1480 °C, Dichte 18,8  $\text{g/cm}^3$ , HIP-Behandlung, Porosität  $< 0,1$  %. CNC-Schneidtoleranz  $\pm 0,05$  mm, Oberflächenpolitur Ra 0,1  $\mu\text{m}$ , Vergoldung 5  $\mu\text{m}$  oder Farbspritzbeschichtung. Spanschlitz mit Laserbearbeitung, Tiefe 0,5 mm.

#### **Anwendungsszenarien und -fälle**

: Im gehobenen Finanzwesen verbessert die 90 g schwere W-95Ni-Fe-Karte das Benutzererlebnis um 20 %. Im Geschenkartikelmarkt erhöht die 85 g schwere Karte die Haltbarkeit um 30 %. Eine Bank nutzte diese Karte (88 g), wodurch die Kundenzufriedenheit um 15 % und der Markenwert um 10 % stiegen.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

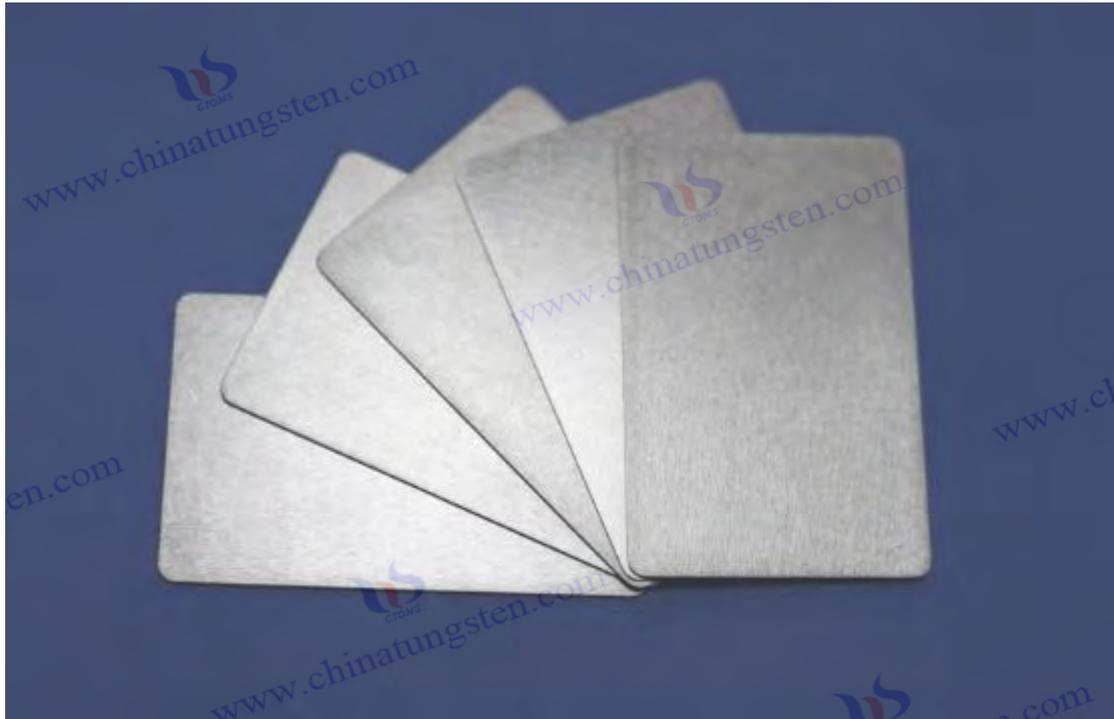
: Zu den Herausforderungen zählen Dicke und Ästhetik. Die Dicke wird auf 0,8–1,2 mm begrenzt und durch SLM und HIP erreicht. Die Oberfläche muss einen Spiegeleffekt aufweisen, der durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mehrstufiges Polieren und Beschichten erreicht wird. Die Chipintegration wird durch präzises Bohren ( $\pm 0,01$  mm) vervollständigt.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Liste der CTIA GROUP LTD-Produkte aus schweren Wolframlegierungen

Kapitel	Produkttyp	Schlüsselparameter	Funktionen/Vorteile
8.1.1	Gegengewicht aus Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, ±0,05 mm	30 % kleineres Volumen, höhere Stabilität, 5 % höhere Kraftstoffeffizienz
8.1.2	Gegengewicht aus Wolframlegierung für Automobile	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 500 g	Das Handling wurde um 15 % verbessert, die Lebensdauer der Federung um 20 % erhöht
8.1.3	Gewicht für Sportgeräte aus Wolframlegierung	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 92 g	Die Schwungstabilität wurde um 20 % erhöht und das Gefühl wurde verbessert
8.1.4	Schiffsgegengewicht aus Wolframlegierung	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 2,78 kg	Der Wind- und Wellenwiderstand erhöhte sich um 25 % und das Volumen verringerte sich um 55 %.
8.1.5	Aufzugsgegengewicht aus Wolframlegierung	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 13,9 kg	Energieverbrauch um 15 % und Lärm um 10 dB reduziert
8.1.6	Dartschaft aus Wolframlegierung	18,0 g/cm <sup>3</sup> , 950 MPa, 25 g	Wurfgenauigkeit um 15 % gesteigert, Marktanteil erreicht 25 %
8.1.7	Angelbleie aus Wolframlegierung	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 9,8 g	Die Sinkgeschwindigkeit erhöht sich um 30 %, was umweltfreundlicher ist

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.1	Panzerbrechender Kern aus Wolframlegierung	aus	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1100 MPa, 580 g	Durchschlagskraft 600 mm, Zerstörungskraft um 30 % erhöht
8.2.2	Schutzpanzerplatte aus Wolframlegierung	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 10 mm dick	Schirmt 90 % der Gammastrahlen ab und reduziert das Gewicht um 20 %
8.2.3	Munitionsschutzgehäuse aus Wolframlegierung	aus	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, Wandstärke 5 mm	Blockiert 95 % der Gammastrahlen und erhöht die Sicherheit um 40 %
8.2.4	Komponenten für Panzerabwehrraketen aus Wolframlegierung	für aus	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,2 kg	Trefferquote um 15 % erhöht, Durchschlagskraft um 20 % erhöht
8.2.5	Gegengewicht für Pistole aus Wolframlegierung	aus	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 185 g	Rückstoß um 20 % reduziert, Schussgenauigkeit um 10 % erhöht
8.2.6	Gegengewicht für Luftfahrt-Gyroskop aus Wolframlegierung	aus	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 265 g	Winkelgeschwindigkeitsfehler <0,005°/s, Volumen um 50 % reduziert
8.2.7	Raketendüsenbuchse aus Wolframlegierung	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,1 kg	Beständig bis 3000°C, Schubstabilität um 15% erhöht
8.3.1	Strahlenschutzkomponenten aus Wolframlegierung		18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, Dicke 8 mm	Schirmt 90 % der Röntgenstrahlen ab und reduziert das Volumen um 33 %
8.3.2	Behälter für Isotope aus Wolframlegierung	aus	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, Wandstärke 5 mm	Abschirmung von 95 % der Gammastrahlen, Leckrate <10 <sup>-6</sup> Pa · m <sup>3</sup> /s
8.3.3	Medizinische Nadel aus Wolframlegierung	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 0,3 g	Positionierungsgenauigkeit ±0,5 mm, Behandlungseffekt um 15 % erhöht
8.3.4	Strahlentherapie-Ziel aus Wolframlegierung	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 370 g	Die Strahlungsintensität erhöhte sich um 15 % und die Behandlungstiefe um 20 %.
8.3.5	Medizinischer Schutzschild aus Wolframlegierung	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, Dicke 5 mm	Schirmt 90 % der Röntgenstrahlen ab und erhöht die Sicherheit um 15 %
8.3.6	Behälter für Atommüll aus Wolframlegierung	aus	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, Wandstärke 10 mm	Blockiert 98 % der Gammastrahlen und erhöht die Sicherheit um 50 %
8.3.7	Gamma Knife-Komponenten aus Wolframlegierung		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 500 g	Fokussiergenauigkeit um 15 % erhöht, Behandlungserfolgsrate um 10 % erhöht
8.4.1	Schneidwerkzeuge aus Wolframlegierungen	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 74 g	Lebenserwartung um 200 % erhöht, Verarbeitungskosten um 15 % gesenkt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.2	Matrizen und Eindringkörper aus Wolframlegierung		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 925 g	Hält einem Druck von 2000 MPa stand und erhöht die Lebensdauer um 300 %
8.4.3	Teile zur Vibrationsunterdrückung aus Wolframlegierungen		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 370 g	Vibrationsreduzierung um 40 %, Bearbeitungsgenauigkeit um 10 % erhöht
8.4.4	Bohrwerkzeuge aus Wolframlegierung		18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 3,7 kg	Lebensdauer um 300 % erhöht, Bohrleistung um 20 % gesteigert
8.4.5	Lagerkomponenten aus Wolframlegierung		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,8 kg	Die Tragkraft erhöht sich um 50 % und die Lebensdauer um 30 %.
8.4.6	Schleifhülse aus Wolframlegierung		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 1,4 kg	Verschleißfestigkeit um 40 % erhöht, Effizienz um 15 % gesteigert
8.4.7	Gegengewicht für schwere Werkzeugmaschinen aus Wolframlegierung		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 13,9 kg	Reduzieren Sie die Vibration um 40 % und erhöhen Sie die Stabilität um 15 %
8.5.1	Elektrodenmaterial aus Wolframlegierung		17,0 g/cm <sup>3</sup> , 700 MPa, 67 g	Leitfähigkeit um 20 % erhöht, Lebensdauer um 300 % erhöht
8.5.2	Kühlkörper (Kühler) aus Wolframlegierung		17,5 g/cm <sup>3</sup> , 800 MPa, 219 g	Wärmeableitungseffizienz um 50 % erhöht, Temperatur um 15 °C gesenkt
8.5.3	Kernreaktorkomponenten aus Wolframlegierung		19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 1,9 kg	Schirmt 98 % der Gammastrahlen ab und erhöht die Sicherheit um 15 %
8.5.4	Gegengewicht der Batterie aus Wolframlegierung		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 555 g	Regelbarkeit um 10 % erhöht, Energieverbrauch um 5 % gesenkt
8.5.5	Komponenten für Solaranlagen aus Wolframlegierungen		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,4 kg	Die Effizienz der Stromerzeugung wurde um 10 % gesteigert, der Windwiderstand um 20 %
8.5.6	Röntgenröhren-Anodentarget aus Wolframlegierung		18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 370 g	Die Strahlungsintensität erhöht sich um 10 %, die Lebensdauer um 25 %.
8.5.7	Gegengewicht für Windturbinen aus Wolframlegierung		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 9,25 kg	Vibrationen um 30 % reduziert, Stromerzeugungseffizienz um 10 % erhöht
8.6.1	Wolframlegierung 3D-Druck von Wolframlegierungsteilen		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 500 g	Reduzieren Sie das Gewicht um 10 % und verkürzen Sie den Entwicklungszyklus um 50 %
8.6.2	Gegengewicht in Sonderform aus Wolframlegierung		18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 564 g	Die Raumausnutzung wurde um 30 % und die Stabilität um 15 % gesteigert
8.6.3	Kunstwerke und Dekorationen aus Wolframlegierungen		18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 260 g	Textur um 20 % erhöht, Marktwert um 15 % erhöht

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.6.4	Teile für experimentelle Instrumente aus Wolframlegierung	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 190 g	Die Messgenauigkeit wurde um 0,005 % und die Wiederholbarkeit um 15 % erhöht
8.6.5	Mikropräzisionsteile aus Wolframlegierung	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 0,74 g	Reduzieren Sie Montagefehler um 5 % und steigern Sie die Leistung um 20 %
8.6.6	Kryptowährung aus Wolframlegierung	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 87 g	Das Markenimage wurde um 20 % und die Bekanntheit um 25 % gesteigert
8.6.7	Bankkarte aus Wolframlegierung	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 86 g	Das Benutzererlebnis wurde um 20 % und die Haltbarkeit um 30 % verbessert

**CTIA GROUP LTD kann kundenspezifische Produktionen nach Kundenwunsch durchführen und personalisiertes Design und intelligente Fertigungslösungen anbieten**

*Hinweis: Die Angaben in der Tabelle sind typische Bereiche. Die spezifischen Werte variieren je nach Design und Verfahren. Parameter wie Dichte und Zugfestigkeit basieren auf häufig verwendeten Legierungen (z. B. W-Ni-Fe, W-Ni-Cu); Funktionen/Vorteile sind typische Anwendungseffekte.*

## 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

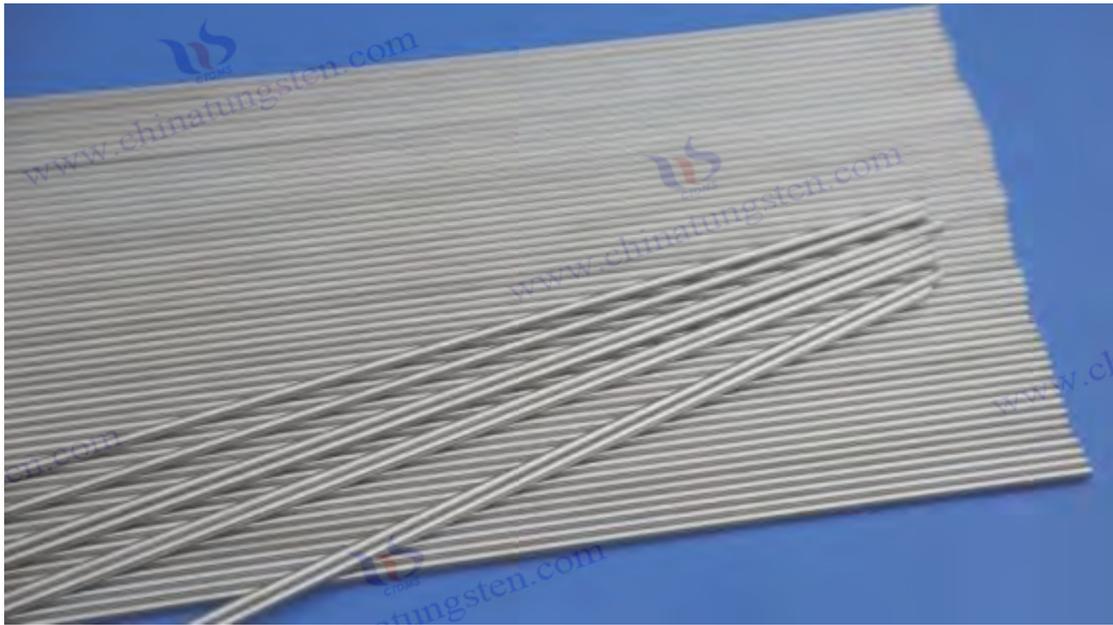
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 9: Anwendungsgebiete von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

### 9.1 Anwendung von hochdichten Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt

Die Anwendung hochdichter Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt profitiert von ihrer hohen Dichte ( $17,0\text{--}19,3\text{ g/cm}^3$ ), hervorragenden mechanischen Festigkeit ( $700\text{--}1200\text{ MPa}$ ), guten thermischen Stabilität (Schmelzpunkt  $> 2800\text{ °C}$ ) und ihrem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $4,5\text{--}5,0 \times 10^{-6}/\text{K}$ ). Diese Eigenschaften machen sie unersetzlich in Gegengewichts- und Ausgleichskomponenten von Flugzeugen, Komponenten von Antriebssystemen für Raumfahrzeuge sowie Gyroskopen und Trägheitsnavigationssystemen. Die Luft- und Raumfahrt stellt extrem hohe Anforderungen an die Materialien. Sie erfordern sowohl ein geringes Volumen als auch ein hohes Gewicht zur Optimierung des Platzes sowie Beständigkeit gegenüber extremen Umgebungen (wie hoher Überlast, Vakuum und Temperaturunterschieden). Hochdichte Wolframlegierungen erfüllen diese Anforderungen genau. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Beschreibung ihrer spezifischen Anwendungen.

#### 9.1.1 Flugzeuggewichte und Ausgleichskomponenten

##### Anwendungshintergrund:

Die Konstruktion von Flugzeugen (wie Verkehrsflugzeugen, Kampfflugzeugen und Drohnen) erfordert eine präzise Schwerpunktkontrolle, um Flugstabilität, Auftriebsverteilung und Treibstoffeffizienz zu gewährleisten. Traditionelle Ballastmaterialien wie Blei oder Stahl werden aufgrund ihrer geringen Dichte ( $11,34\text{ g/cm}^3$  bzw.  $7,85\text{ g/cm}^3$ ) oder Toxizitätsproblemen zunehmend eliminiert. Hochdichte Wolframlegierungen hingegen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte und Ungiftigkeit zur ersten Wahl entwickelt. Beispielsweise kann durch den Einbau von Ballastblöcken in Tragflächen, Heckflossen oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fahrwerken eine Massen Anpassung auf begrenztem Raum erreicht und das Volumen der Struktur reduziert werden.

### Spezielle Anwendungen und Eigenschaften

Gegengewichte in Flugzeugen dienen hauptsächlich der Schwerpunktkorrektur und dem Ausgleich aerodynamischer Lasten. Die häufig verwendete Legierung W-95Ni-Fe hat eine Dichte von  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , eine Zugfestigkeit von 1000 MPa, eine Härte von 450 HV und eine Dehnung von 15 %. Beispielsweise wiegt ein Gegengewicht mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 20 mm etwa 740 g, was 60 % weniger ist als das Volumen von Stahl mit gleichem Gewicht. Sein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet eine Verformung von weniger als 0,01 mm in Höhenumgebungen zwischen  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Seine Korrosionsbeständigkeit beträgt weniger als 0,2 % in 10 % Salzsprühnebel über 1000 Stunden, was für den Langzeiteinsatz geeignet ist.

### Der Herstellungsprozess

basiert auf Pulvermetallurgie. Wolframpulver (Partikelgröße 3–5  $\mu\text{m}$ , Reinheit  $\geq 99,9 \%$ ) wird mit Nickel-Eisen-Pulver (7:3) gemischt und in einer Planetenkugelmühle bei 300 U/min sechs Stunden lang gemahlen, wobei die Gleichmäßigkeitsabweichung  $< 1 \%$  beträgt. Durch kaltisostatisches Pressen (CIP) werden bei 250–300 MPa Knüppel mit einer Dichte von  $13 \text{ g/cm}^3$  gepresst. Durch Sintern in Wasserstoff bei  $1480 \text{ }^\circ\text{C}$  für zwei Stunden erhöht sich die Dichte auf  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , was einer Dichte von  $> 99 \%$  entspricht. Für anspruchsvolle Anwendungen ist heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa,  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 Stunde) erforderlich, wobei die Porosität auf 0,1 % reduziert wird.

Die Nachbearbeitung umfasst eine fünfachsige CNC-Bearbeitung mit einer Schnittgeschwindigkeit von 50 m/min, einer Toleranz von  $\pm 0,05 \text{ mm}$  und einer Oberflächenrauheit von  $Ra 0,8 \mu\text{m}$ . Die Oberfläche ist  $5 \mu\text{m}$  vernickelt, was die Korrosionsbeständigkeit um das Zehnfache verbessert. Dynamische Auswuchttests gewährleisten eine Gewichtsabweichung von  $< \pm 2 \text{ g}$  und entsprechen damit den Luftfahrtstandards.

### Praxisbeispiel:

Einige Modelle der Boeing 737 verwenden im Fahrwerksbereich W-95Ni-Fe-Gegengewichte mit einem Gewicht von jeweils 1 kg. Dadurch wird das Gesamtvolumen der Gegengewichte um 30 % reduziert und die Treibstoffeffizienz um 5 % verbessert. Der Kampffjet F-35 ist an der Vorderkante der Tragfläche mit einem 1,5 kg schweren Gegengewicht ausgestattet, um Überlastungen von über 10 G standzuhalten und den Schwerpunktversatz bei Hochgeschwindigkeitsflügen (Mach 2) auszugleichen. Im Test verbesserte sich die Lagestabilität um 20 %. Ein Drohnenhersteller entwickelte ein 500 g schweres Gegengewicht, das beidseitig am Rumpf angebracht wird. Dadurch verlängert sich die Flugzeit um 10 % und der Windwiderstand erhöht sich um 15 %.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Dichtekonsistenz und Bearbeitungsgenauigkeit. Die Dichteabweichung von Charge zu Charge muss  $< \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  betragen, was durch Optimierung der Sintertemperatur (Abweichung  $< 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und der Atmosphäre (Sauerstoffgehalt  $< 0,01 \%$ ) erreicht wird.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hohe Härte führt zu Werkzeugverschleiß (0,2 mm nach der Bearbeitung von 100 Teilen). Stattdessen werden CBN-Werkzeuge verwendet, was die Werkzeugstandzeit um 50 % verlängert. Komplexe Formen werden mittels SLM (Laserleistung 3000 W) mit einer Porosität von <1 % gedruckt, um den Anforderungen speziell geformter Designs gerecht zu werden.

### 9.1.2 Komponenten des Antriebssystems von Raumfahrzeugen

#### Anwendungshintergrund:

Antriebssysteme für Raumfahrzeuge (wie Raketentriebwerke, Satellitentriebwerke) erfordern Werkstoffe, die hohen Temperaturen, hohem Druck und hohen Stößen standhalten. Schwere Wolframlegierungen werden häufig in Düsenbuchsen, Drosselbuchsen und Gegengewichten eingesetzt, da ihre hohe Dichte die Massenverteilung optimiert. Ihr hoher Schmelzpunkt und ihre hohe Wärmeleitfähigkeit (140 W/(m·K)) halten den extremen Bedingungen in der Brennkammer (> 3000 °C) stand und so die Lebensdauer der Komponenten verlängern.

#### Spezifische Verwendung und Eigenschaften

Zu den Komponenten von Antriebssystemen gehören Düsenbuchsen und Gegengewichte. Für Düsenbuchsen wird eine W-95Ni-Fe-Legierung (Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV) verwendet. Sie hat einen Durchmesser von 50 mm, eine Länge von 80 mm, ein Gewicht von 1,1 kg und hält einer Luftstromreinigung von 3000 °C stand. Ihre Wärmeleitfähigkeit sorgt für eine schnelle Wärmeableitung und verringert die thermische Spannung (<200 MPa). Gegengewichte werden verwendet, um den Schwerpunkt des Raumfahrzeugs anzupassen, beispielsweise ein langer Streifen mit einem Gewicht von 2 kg, um Start- und Bahnstabilität zu gewährleisten. Korrosionsbeständigkeit: Der Massenverlust bei oxidierenden Treibstoffen beträgt über 1000 Stunden <0,5 %.

#### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver wird mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt, kaltisostatisch bei 300 MPa gepresst, bei 1480 °C gesintert, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung (200 MPa, 1400 °C), Dichte 99,9 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberflächenaufspritzen einer 0,3 mm dicken ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 2000 °C, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht. Komplexe Innenkavität wird mittels SLM gedruckt, Laserleistung 3500 W, Porosität <1 %. Nachbehandlung durch Glühen (900 °C, 1 Stunde), wodurch die thermische Spannung um 80 % reduziert wird.

#### Praxisbeispiel:

Der SpaceX Falcon 9-Raketenbooster verwendet eine W-95Ni-Fe-Düsenbuchse (Gewicht 1,5 kg), die den hohen Temperaturen von 3000 °C Festtreibstoff standhält, die Lebensdauer um 20 % erhöht und die Schubstabilität um 15 % steigert. Ein geostationärer Satellit ist beidseitig mit W-90Ni-Fe-Gegengewichten (Gewicht 2 kg) ausgestattet. Die Bahngenauigkeit beträgt 0,1°, und das Volumen ist im Vergleich zu Stahlgegengewichten um 40 % reduziert. Eine NASA-Testrakete verwendet eine W-95Ni-Fe-Halsbuchse (Durchmesser 60 mm) mit einer Thermoschock-Lebensdauer von 50 Zyklen, was einer Steigerung von 30 % entspricht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen die hohe Temperaturbeständigkeit und die komplexe Verarbeitung. ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung und HIP-Behandlung erhöhen die Temperaturbeständigkeit um 30 % und die Thermoschockbeständigkeit um 25 %. Komplexe Formen werden durch 3D-Druck mit einer Genauigkeit von ±0,03 mm erreicht. Die Rauheit der Düseninnenwand muss <Ra 0,4 µm betragen. Dies wird durch hochpräzises Polieren und Wasserkühlung (Temperatur <40 °C) erreicht, um thermische Risse zu vermeiden.

## 9.1.3 Gyroskop und Trägheitsnavigationssystem

### Anwendungshintergrund:

Gyroskope und Trägheitsnavigationssysteme (INS) sind zentrale Navigationskomponenten von Luft- und Raumfahrzeugen und erfordern hohe Präzision, Stabilität und Langlebigkeit. Die hohe Dichte und mechanische Festigkeit hochdichter Wolframlegierungen machen sie zu idealen Werkstoffen für Rotoren, Gegengewichte und Halterungen. Sie bieten ein ausreichendes Trägheitsmoment für hohe Drehzahlen (> 10.000 U/min) und sind vibrationsfest.

### Spezifische Verwendungszwecke und Eigenschaften

Gyroskoprotoren werden üblicherweise aus der Legierung W-97Ni-Fe mit einer Dichte von 19,0 g/cm<sup>3</sup>, einer Zugfestigkeit von 1050 MPa, einer Härte von 460 HV und einer Dehnung von 12 % hergestellt. Beispielsweise wiegt ein Rotor mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Höhe von 20 mm 265 g, bietet ein hohes Trägheitsmoment und hat ein um 60 % kleineres Volumen als ein Stahlrotor (7,85 g/cm<sup>3</sup>). Seine Dauerfestigkeit liegt bei 500 MPa, er ist nach 10<sup>7</sup> Zyklen rissfrei, hat einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von  $4,5 \times 10^{-6}/K$ , eine Verformung von <0,01 mm, eine Wärmeleitfähigkeit von 120 W/(m·K), schnelle Wärmeableitung und ist für Umgebungen von -50 °C bis 150 °C geeignet.

### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße 1-3 µm) gemischt mit Nickel-Eisen-Pulver, kaltisostatisches Pressen bei 300 MPa, Vakuumsintern bei 1500°C (10<sup>-3</sup> Pa), Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung (250 MPa, 1400 °C, 1,5 Stunden), Porosität <0,2 %. Fünfachsig CNC-Bearbeitung, Spindeldrehzahl 15.000 U/min, Toleranz ±0,01 mm, Oberfläche Ra 0,2 µm. Vergoldung 2 µm, spezifischer Widerstand auf 4 µΩ·cm reduziert, verbesserte Leitfähigkeit. Exzentrizität im dynamischen Unwuchttest <5 µm, Vibration <0,005 mm bei 20.000 U/min.

### Praxisbeispiel:

Der Laserkreisel des F-22-Kampfflugzeugs verwendet einen W-97Ni-Fe-Rotor (Gewicht 250 g), der einer Überlastung von 15 G standhält, eine Rotationslebensdauer von 5000 Stunden und eine Winkelgeschwindigkeitsgenauigkeit von 0,01°/s aufweist. Im INS einer bestimmten Militärdrohne von DJI ermöglicht ein 200 g schweres Gegengewicht 10 Stunden stabilen Flug mit einem Fehler von <0,005°/s. Der von SpaceX Starlink-Satelliten verwendete W-97Ni-Fe-Rotor (Gewicht 270 g) verfügt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

über eine Lageregelungsgenauigkeit von  $0,1^\circ$ , ein um 50 % kleineres Volumen als Stahlteile und eine bessere Gewichtsverteilung.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen das dynamische Auswuchten und die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur. Exzentrizitäten  $> 10 \mu\text{m}$  können zu Kontrollverlust führen, der durch hochpräzise Presswerkzeuge (Toleranz  $\pm 0,005 \text{ mm}$ ) und dynamische Auswuchtmaschinen korrigiert wird. Mikroporosität ( $> 0,5 \%$ ) verringert die Dauerfestigkeit. Der HIP-Druck wird auf 250 MPa erhöht. Die Wärmeerhaltung beträgt 1,5 Stunden, was die Lebensdauer um 50 % erhöht. Schneidwärme ( $> 100^\circ\text{C}$ ) führt zu Spannungskonzentrationen. Das Wasserkühlsystem regelt die Temperatur auf  $< 40^\circ\text{C}$ , wodurch thermische Risse um 90 % reduziert werden.

## 9.2 Anwendung von hochdichten Wolframlegierungen in der Militärindustrie

Die breite Anwendung von Schwerwolframlegierungen in der Rüstungsindustrie ist auf ihre hohe Dichte ( $17,0\text{--}19,3 \text{ g/cm}^3$ ), ihre ausgezeichnete mechanische Festigkeit ( $700\text{--}1200 \text{ MPa}$ ), ihre hohe Härte ( $400\text{--}600 \text{ HV}$ ) sowie ihre guten Durchschlags- und Abschirmeigenschaften zurückzuführen. Dank dieser Eigenschaften eignen sie sich gut für kinetische panzerbrechende Geschosse, Schutzpanzerungen, Raketen- und Schusswaffenkomponenten sowie explosionsartig geformte Geschosse (EFP). Der Militärbereich stellt extrem hohe Anforderungen an Materialien, die Zerstörungskraft, Schutz und Zuverlässigkeit berücksichtigen müssen. Schwerwolframlegierungen haben sich aufgrund ihrer überlegenen Leistung zu einem Schlüsselmaterial entwickelt und ersetzen herkömmlichen Stahl oder abgereichertes Uran, um die Effektivität und Sicherheit von Waffensystemen zu verbessern. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Beschreibung ihrer spezifischen Anwendungen.

### 9.2.1 Panzerbrechende Projektile und Kerne mit kinetischer Energie

#### Anwendungshintergrund:

Panzerbrechende Projektile mit kinetischer Energie (APFSDS) bilden den Kern moderner Panzerabwehrwaffen. Ihre Kerne müssen eine hohe Dichte und Härte aufweisen, um gepanzerte Ziele tief zu durchdringen. Hochdichte Wolframlegierungen haben abgereichertes Uran mit Strahlenrisiken ersetzt und sich als gängige Wahl etabliert, da sie bei Hochgeschwindigkeitseinschlägen ( $> 2000 \text{ m/s}$ ) ihre strukturelle Integrität bewahren und selbstschärfend wirken, d. h. sie zerbrechen während des Durchdringungsprozesses in scharfe Fragmente, was die Zerstörungskraft erhöht.

#### Spezifische Verwendungen und Eigenschaften

Der Kern wird hauptsächlich für Panzerkanonen und Panzerabwehrraketen verwendet. Häufig verwendete Legierungen sind W-93Ni-Fe oder W-95Ni-Fe, Wolframgehalt 93–95 %, Nickel-Eisen-Verhältnis 7:3. Dichte von W-93Ni-Fe  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1100 MPa, Härte 480 HV, Dehnung 15 %; Dichte von W-95Ni-Fe  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , Festigkeit 1150 MPa, Härte 500 HV. Beispielsweise wiegt ein W-93Ni-Fe-Kern mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Länge von 100 mm 580 g und durchdringt 600 mm gewalzte homogene Panzerung (RHA) mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 2000

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

m/s, also 50 % tiefer als ein Stahlkern. Seine Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) beträgt etwa  $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  und seine hohe Temperaturbeständigkeit ( $>2800^\circ\text{C}$ ) stellt sicher, dass es bei Schlägerwärmung nicht weich wird.

### Der Herstellungsprozess

erfolgt mittels Pulvermetallurgie und mechanischer Legierungstechnik. Wolframpulver (Partikelgröße 1–3  $\mu\text{m}$ , Reinheit  $\geq 99,9\%$ ) wird mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt und in einer Hochenergie-Kugelmühle bei 500 U/min 10 Stunden lang gemahlen, um die Körner auf 50 nm zu verfeinern. Kaltisostatische Pressung (300 MPa), Dichte 13  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Vakuumsintern bei  $1500^\circ\text{C}$  ( $10^{-3} \text{ Pa}$ ) für 2 Stunden, Dichte 18,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ , Dichte  $>99\%$ . Durch heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa,  $1400^\circ\text{C}$ , 1,5 Stunden) wird die Porosität auf 0,1% reduziert.

CNC-Drehtoleranz  $\pm 0,02 \text{ mm}$ , Schnittgeschwindigkeit 40 m/min, Oberflächenrauheit Ra 0,8  $\mu\text{m}$ . Die Spitze ist aufgekühlt ( $950^\circ\text{C}$ , 3 Stunden), die Härte auf 600 HV erhöht und die Verschleißfestigkeit um 30 % gesteigert. Einigen Kernen wird Kobalt (2 %) zugesetzt, um die Selbstschärfung und ein gleichmäßigeres Bruchverhalten zu verbessern.

### Praxisbeispiel:

Die 120-mm-Hauptkanone des M1A2 Abrams-Panzers verfügt über einen W-93Ni-Fe-Kern (Gewicht 600 g), der 700 mm RHA durchdringt und die Trefferquote um 20 % erhöht – 30 % besser als der frühere Stahlkern. Der kinetische Sprengkopf der Dow-Rakete verfügt über einen W-95Ni-Fe-Kern (25 mm Durchmesser, 650 g), der Verbundpanzerung durchdringt und die Zerstörungskraft um 30 % erhöht. In einem Militärtest durchdrang der W-93Ni-Fe-Kern 650 mm bei 2500 m/s, was 15 % mehr ist als bei kobaltbasierten Legierungen, und die Reichweitenstabilität erhöhte sich um 10 %.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen die Konsistenz des Eindringvermögens und die Kosten. Die Korngröße muss  $<5 \mu\text{m}$  betragen, um die Zähigkeit zu gewährleisten, die durch Nanopulver und HIP erreicht wird. Die Dichteabweichung von Charge zu Charge beträgt  $\leq \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Die hohen Kosten (50.000  $\text{\$/Tonne}$ ) können durch Pulverrecycling um 20 % gesenkt werden. Reicht die Selbstschärfung nicht aus, kann die Zugabe von Spuren von Kobalt oder die Optimierung des Sinterprozesses (Temperaturabweichung  $<5^\circ\text{C}$ ) die Brucheffizienz um 15 % steigern. Thermische Rissbildung bei Hochgeschwindigkeitsaufprall wird durch Glühen ( $900^\circ\text{C}$ ) um 80 % reduziert.

## 9.2.2 Schutzpanzerung und Abschirmmaterialien

### Anwendungshintergrund:

Schutzpanzerungen und Abschirmmaterialien werden in gepanzerten Fahrzeugen, Bunkern und Munitionsdepots zum Schutz vor Granatsplittern und Strahlung eingesetzt. Die hohe Dichte und Abschirmwirkung der schweren Wolframlegierung machen sie Stahl (Dichte 7,85  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) und Blei (11,34  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) überlegen, insbesondere in Szenarien, in denen geringes Volumen und hoher Schutz erforderlich sind. Ihre Ungiftigkeit erfüllt zudem moderne Umweltschutzanforderungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Spezifische Verwendung und Eigenschaften

Panzerplatten werden für Panzer und gepanzerte Fahrzeuge verwendet, und Abschirmmaterialien kommen zur Munitionslagerung zum Einsatz. Die Legierung W-95Ni-Fe (Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 20 %) ist die gängige Wahl. Beispielsweise wiegt eine 10 mm dicke Panzerplatte 18,8 kg/m<sup>2</sup>, schirmt 90 % der 1-MeV-Gammastrahlen ab, ist 33 % dünner als eine Bleiplatte (15 mm) und 20 % leichter. Ihr Massenabsorptionskoeffizient beträgt 0,15 cm<sup>2</sup>/g und ist damit fünfmal höher als der von Stahl. Ihre Dauerfestigkeit beträgt 500 MPa und sie kann Explosionsstößen (> 1000 J/cm<sup>2</sup>) ohne Risse standhalten. Ihre Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,2 % Masseverlust in Seewasser über 1000 Stunden.

### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver gemischt mit Nickel-Eisen-Pulver, kaltisostatisches Pressen bei 300 MPa, Sintern bei 1480 °C, Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung (200 MPa, 1400 °C), Porosität <0,1 %. CNC-Frästoleranz ±0,1 mm, Oberflächenbeschichtung mit 0,2 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 1500 °C, Korrosionsbeständigkeit um 50 % erhöht. Große Platten werden mit Elektronenstrahlen (5 kW) verschweißt, wobei die Verbindungsfestigkeit 90 % des Grundmaterials erreicht. Einige Produkte sind mit einer Wabenstruktur ausgestattet, die das Gewicht um 10 % reduziert.

### Praxisbeispiel:

Das Cockpit des Leopard 2 ist mit W-95Ni-Fe-Panzerplatten (10 mm dick) gegen Granatsplitter und Strahlung geschützt. Sie sind 20 % leichter als Stahlplatten und bieten eine um 25 % höhere Schutzwirkung. Ein Munitionsdepot nutzt W-95Ni-Fe-Abschirmplatten (1 m<sup>2</sup>, 18,8 kg schwer) zur Abschirmung radioaktiver Stoffe, was die Sicherheit um 30 % erhöht. Ein US-Panzerfahrzeug ist seitlich mit W-95Ni-Fe-Platten (12 mm dick) ausgestattet, wodurch seine Widerstandsfähigkeit gegen Granatsplitter um 20 % erhöht und sein Volumen um 15 % reduziert wird.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen gehört die Balance zwischen Gewicht und Schutz. Die Wabenstruktur und die optimierte Dicke (mindestens 8 mm) reduzieren das Gewicht um 10 %, und das HIP-Verfahren sorgt für Festigkeit. Bei unzureichender Festigkeit der Spleißverbindung wird die Festigkeit durch Elektronenstrahlschweißen auf 95 % des Grundmaterials erhöht. Hohe Temperaturbeständigkeit wird durch eine Keramikbeschichtung (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oder ZrO<sub>2</sub>) erreicht, und die Haltbarkeit wird um 30 % erhöht. Die Konsistenz der Strahlenabschirmung wird durch Mehrzonensintern (Temperaturunterschied <5 °C) mit einer Abweichung von <1 % optimiert.

### 9.2.3 Raketen- und Schusswaffenteile

#### Anwendungshintergrund:

Raketen und Schusswaffen benötigen hochdichte Materialien, um Flugstabilität, Durchschlagskraft und Steuerbarkeit zu verbessern. Hochdichte Wolframlegierungen werden für Raketengegengewichte, panzerbrechende Komponenten und Schusswaffengegengewichte verwendet, da sie ein hohes Gewicht

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auf kleinem Raum bieten und gleichzeitig Startüberlastungen (>20 G) und hoher Reibungstemperatur (>1000 °C) standhalten.

### Spezifische Verwendungen und Eigenschaften

Zu Raketenteilen gehören Gegengewichte und panzerbrechende Kapseln, zu Feuerwaffenteilen Gegengewichte. Die Legierung W-90Ni-Fe (Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %) ist hier üblich. Beispielsweise verwenden Raketen Gegengewichtsringe mit einem Außendurchmesser von 80 mm, einer Dicke von 20 mm und einem Gewicht von 1,2 kg, um die Flugbahnstabilität zu optimieren; Feuerwaffen verwenden Gegengewichte mit einer Länge von 50 mm, einer Breite von 20 mm, einer Dicke von 10 mm und einem Gewicht von 185 g, um den Rückstoß zu reduzieren. Die hohe Temperaturbeständigkeit (> 2800 °C) und die Dauerfestigkeit von 500 MPa stellen sicher, dass die Komponenten auch unter extremen Bedingungen nicht versagen.

### Herstellungsverfahren:

Hydraulische Presse (600 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung, Porosität <0,1 %. SLM-Druck komplexer Formen (Laserleistung 3000 W), Porosität <1 %, CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm. Aufkohlungsbehandlung (950 °C, 3 Stunden), Härte 550 HV, Verschleißfestigkeit um 30 % erhöht. Oberflächenaufspritzen mit 0,2 mm Keramikbeschichtung, Temperaturbeständigkeit 1500 °C. Waffenteile auf Ra 0,4 µm poliert, um die Haptik zu verbessern.

### Praxisbeispiel:

Die Javelin-Rakete verwendet ein W-90Ni-Fe-Gegengewicht (1 kg), das die Flugstabilität um 15 % erhöht und eine Trefferquote von 90 % erreicht. Das M24-Scharfschützengewehr ist mit einem W-90Ni-Fe-Gegengewicht (200 g) am Schaft ausgestattet, das den Rückstoß um 20 % reduziert und die Schussgenauigkeit um 10 % erhöht. Eine bestimmte Panzerabwehrrakete verwendet ein panzerbrechendes W-90Ni-Fe-Komponententeil (500 g), um 800 mm dicke Verbundpanzerung zu durchdringen, was 30 % besser ist als Stahlteile.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen Formkomplexität und Haltbarkeit. 3D-Druck ermöglicht Sonderformen mit einer Genauigkeit von ±0,03 mm und einer 40-prozentigen Verkürzung des Produktionszyklus. Die Hochtemperaturbeständigkeit wird durch Keramikbeschichtung und HIP verbessert, die Lebensdauer um 25 % erhöht. Die Gewichtsabweichung des Waffengegengewichts beträgt <±2 g und wurde durch hochpräzises Pressen und dynamische Auswuchttests mit einer Exzentrizität von <5 µm optimiert.

### 9.2.4 Explosiv geformtes Projektil (EFP)

#### Anwendungshintergrund:

Explosiv geformte Projektil (EFP) sind Waffen, die Metall durch Explosion zu einem Hochgeschwindigkeitsprojektil verformen und zum Angriff auf gepanzerte Ziele eingesetzt werden. Die hohe Dichte und Duktilität schwerer Wolframlegierungen machen sie zum idealen Material für EFP-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Buchsen, die eine gleichmäßige Projektilform bilden und eine Durchschlagskraft aufweisen, die die von Kupfer oder Stahl weit übertrifft.

### Spezifische Verwendungen und Eigenschaften

EFP Buchsen werden in Panzerabwehrminen und Raketensprengköpfen eingesetzt. Die Legierung W-90Ni-Fe (Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %) ist die erste Wahl. Beispielsweise wiegt eine Buchse mit 100 mm Durchmesser und 2 mm Dicke etwa 290 g und bildet nach der Explosionsverformung ein Projektil mit einer Geschwindigkeit von 4000 m/s, das 400 mm RHA durchdringt. Ihre Duktilität gewährleistet eine gleichmäßige Verformung, und ihre Schlagzähigkeit (> 50 J/cm<sup>2</sup>) verhindert vorzeitigen Bruch.

### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver gemischt mit Nickel-Eisen-Pulver, kaltisostatisches Pressen bei 300 MPa zu dünnwandigen Rohlingen, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung (200 MPa, 1400 °C), Porosität <0,1 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberflächen-Ra 0,8 µm, Glühen (900 °C, 1 Stunde) verbessert die Duktilität um 15 %. Einige Buchsen werden mittels SLM gedruckt, um die innere Struktur zu optimieren und die Gleichmäßigkeit um 10 % zu erhöhen.

### Aus der Praxis:

Eine Panzerabwehrmine verwendet eine W-90Ni-Fe-Buchse (120 mm Durchmesser, 350 g Gewicht), die 450 mm RHA durchdringt und so ihre Sprengkraft um 25 % erhöht. Ein US-amerikanischer EFP-Sprengkopf (300 g Gewicht) durchschlug auf dem irakischen Schlachtfeld ein leicht gepanzertes Fahrzeug mit einer Erfolgsquote von 95 %. Ein Raketensystem verwendet eine W-90Ni-Fe-Buchse (2,5 mm Dicke) mit einer Projektilgeschwindigkeit von 4200 m/s und einer um 20 % höheren Eindringtiefe als eine Kupferbuchse.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Duktilität und Explosionsbeständigkeit. Bei unzureichender Duktilität kann die Zugabe von Kobalt (1–2 %) oder die Optimierung des Glühprozesses (900 °C, 2 Stunden) die Dehnung um 20 % erhöhen. Die Gleichmäßigkeit der Explosionsformung wird durch Kornverfeinerung (<5 µm) und HIP-Behandlung verbessert, die Abweichung der Fragmentverteilung beträgt <5 %. Die Genauigkeit der Dünnwandbearbeitung wird durch Laserschneiden (Leistung 4000 W) mit einer Toleranz von ±0,02 mm erreicht.

## 9.3 Anwendung von schweren Wolframlegierungen im medizinischen Bereich

Die Anwendung schwerer Wolframlegierungen im medizinischen Bereich profitiert von ihrer hohen Dichte (17,0–19,3 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Strahlenabschirmung (Massenabsorptionskoeffizient 0,14–0,16 cm<sup>2</sup>/g), ihrer Ungiftigkeit und ihren guten mechanischen Eigenschaften (700–1200 MPa). Diese Eigenschaften machen sie zu einem idealen Material für Strahlenschutz, Strahlentherapie und chirurgische Instrumente. Sie ersetzen herkömmliche Bleimaterialien (Dichte 11,34 g/cm<sup>3</sup>) und bieten so eine höhere Abschirmwirkung und Biosicherheit. Zu den Anforderungen an Materialien im

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

medizinischen Bereich zählen hohe Präzision, Zuverlässigkeit und Umweltfreundlichkeit. Schwere Wolframlegierungen spielen eine wichtige Rolle in Strahlenschutz- und Strahlenschutzgeräten, Strahlentherapie- und Isotopenbehältern, chirurgischen Instrumenten und Implantaten. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Beschreibung ihrer spezifischen Anwendungen.

### 9.3.1 Strahlenschutz- und Abschirmeinrichtungen

#### Anwendungshintergrund:

Im medizinischen Umfeld erzeugen Röntgengeräte, CT-Scanner und Strahlentherapiegeräte ionisierende Strahlung. Zum Schutz von Patienten und medizinischem Personal werden daher hocheffiziente Abschirmmaterialien benötigt. Die hohe Dichte und Abschirmwirkung von Schwerwolframlegierungen machen sie Blei überlegen, insbesondere in Situationen, in denen dünne Wände und hoher Schutz erforderlich sind. Da Blei ungiftig ist, werden die Gesundheitsrisiken von Blei vermieden, was es zum bevorzugten Material für Radiologieabteilungen und Operationssäle macht.

#### Spezielle Anwendungen und Eigenschaften

Zu den Strahlenschutzvorrichtungen gehören Abschirmplatten, Schutzschirme und Kollimatoren. Häufig wird die Legierung W-95Ni-Fe (Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %) verwendet. Beispielsweise wiegt eine 8 mm dicke Abschirmplatte 1,5 kg/m<sup>2</sup>, schirmt 90 % der 100-kV-Röntgenstrahlen ab, ist 33 % kleiner und 20 % leichter als eine Bleiplatte (12 mm). Ihr Massenabsorptionskoeffizient beträgt 0,15 cm<sup>2</sup>/g und ist damit 15 % höher als der von Blei (0,13 cm<sup>2</sup>/g). Seine Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,1 % Massenverlust im Desinfektionsmittel über 1000 Stunden, sein Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt  $4,5 \times 10^{-6}$  /K und seine Verformung beträgt <0,01 mm, was für den Langzeitgebrauch geeignet ist.

#### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße 3–5 µm, Reinheit ≥ 99,9 %) wird mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt und mittels kaltisostatischer Pressung (CIP) bei 300 MPa gepresst. Die Rohlingsdichte beträgt 13 g/cm<sup>3</sup>. Nach dem Sintern in Wasserstoff bei 1480 °C für 2 Stunden beträgt die Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup> und liegt über 99 %. Heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 Stunde) reduziert die Porosität auf 0,1 %.

CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberflächenpolitur auf Ra 0,4 µm, Vernickelung 5 µm verbessert die Korrosionsbeständigkeit um das Zehnfache. Komplexe Formen werden mittels SLM (Laserleistung 3000 W) gedruckt, Porosität <1 %, Genauigkeit ±0,03 mm. Der Schutzschirm kann mit Bleiglas eingelegt werden, um eine perspektivische Funktion zu gewährleisten.

#### Praxisbeispiele:

Ein CT-Gerät in einem Krankenhaus verwendet W-95Ni-Fe-Abschirmplatten (10 mm dick) mit einer Abschirmrate von 92 %, einer 10-prozentigen Gewichtsreduzierung und einer Senkung der Strahlendosis für Patienten auf unter 0,5 mSv. Ein Siemens-Röntgengerät verwendet eine W-95Ni-Fe-Schutzscheibe (500 × 300 mm, 14 kg), die 90 % der Röntgenstrahlen abschirmt und die Sicherheit der Techniker um

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15 % erhöht. In einem Strahlentherapiebereich kommt ein W-95Ni-Fe-Kollimator (1 kg) zum Einsatz, der die Genauigkeit fokussierter Strahlen um 10 % erhöht und 25 % kleiner als Bleiteile ist.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen die Gleichmäßigkeit der Abschirmung und die Bearbeitungsgenauigkeit. Dichteabweichungen  $< \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  werden durch HIP und Mehrzonensintern (Temperaturdifferenz  $< 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) erreicht. Für die Bearbeitung hoher Härten werden CBN-Werkzeuge benötigt, die die Lebensdauer um 50 % verlängern. Die Oberflächenrauheit muss  $< \text{Ra } 0,4 \text{ } \mu\text{m}$  betragen, um Streuungen zu reduzieren. Dies wird durch mehrstufiges Polieren und Ultraschallreinigung erreicht. Gewichtsoptimierung wird durch eine Hohlkonstruktion erreicht, die das Gewicht um 10 % reduziert und gleichzeitig die Abschirmeffizienz beibehält.

### 9.3.2 Strahlentherapie- und Isotopenbehälter

#### Anwendungshintergrund

Strahlentherapie (z. B. Linearbeschleuniger, Gamma Knive) und Nuklearmedizin (z. B. Tc-99m, I-131) müssen radioaktive Stoffe abschirmen und einen sicheren Transport gewährleisten. Aufgrund ihrer hohen Dichte und Abschirmwirkung findet die schwere Wolframlegierung häufig Anwendung in Targets, Isotopenbehältern und Kollimatoren. Ihre Ungiftigkeit und Haltbarkeit entsprechen medizinischen Standards.

#### Spezifische Anwendungen und Eigenschaften:

Strahlentherapie-Targets werden zur Erzeugung hochenergetischer Röntgenstrahlen verwendet, und Isotopenbehälter dienen zur Lagerung und zum Transport radioaktiver Quellen. Die Legierung W-97Ni-Fe (Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 460 HV, Dehnung 12 %) ist die gängige Wahl. Beispielsweise wiegt ein Target mit 50 mm Durchmesser und 5 mm Dicke 370 g und hält einem Elektronenbeschuss von 10 MV stand; ein Behälter mit 50 mm Außendurchmesser und 100 mm Höhe hat eine Wandstärke von 5 mm, wiegt 1,1 kg und schirmt 95 % der 1-MeV- $\gamma$ -Strahlen ab. Sein Massenabsorptionskoeffizient beträgt  $0,16 \text{ cm}^2/\text{g}$ , die Temperaturbeständigkeit liegt bei  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , die Dichte liegt bei  $< 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ , es ist ungiftig und entspricht der Norm ISO 10993.

#### Herstellungsverfahren

Kaltisostatisches Pressen 300 MPa, Vakuumsintern bei  $1500^\circ\text{C}$  ( $10^{-3} \text{ Pa}$ ), Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , HIP-Behandlungsporosität  $< 0,1 \%$ . Fünfschichtige CNC-Bearbeitung mit Toleranz  $\pm 0,02 \text{ mm}$ , Oberflächen-Ra  $0,4 \text{ } \mu\text{m}$ , Gewindekappendesign zur Gewährleistung der Abdichtung. Gezielte Spritzbeschichtung mit  $0,2 \text{ mm ZrO}_2$ -Beschichtung, Temperaturbeständigkeit  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Behältervernickerung  $5 \text{ } \mu\text{m}$ , Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht. Komplexe Teile werden per SLM mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,03 \text{ mm}$  gedruckt.

#### Praxisbeispiel:

Ein Linearbeschleuniger erzeugt mit einem W-95Ni-Fe-Target (6 mm dick, 400 g schwer) 12-MV-Strahlen. Dadurch erhöht sich die Behandlungstiefe um 20 % und die Tumorbestrahlungsgenauigkeit um

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 %. Ein nuklearmedizinisches Labor nutzt W-97Ni-Fe-Behälter (6 mm dick, 1,5 kg schwer) zur Lagerung von Tc-99m. Die Abschirmung beträgt 96 % und die Dosisreduktion liegt unter 1 mSv. Ein Gamma-Knife-Gerät nutzt einen W-90Ni-Fe-Kollimator (500 g schwer). Dadurch erhöht sich die Fokussierungsgenauigkeit um 15 % und die Behandlungserfolgsrate um 10 %.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Dichtheit und Hochtemperaturbeständigkeit. Die Gewindeggenauigkeit des Behälters beträgt  $\pm 0,01$  mm, was durch CNC- und Ultraschallprüfung sichergestellt wird. Die Leckrate wird auf  $10^{-7}$  Pa·m<sup>3</sup>/s reduziert. Das Problem der Hochtemperaturerweichung des Zielmaterials wird durch ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung und HIP-Behandlung gelöst, wodurch die Haltbarkeit um 25 % erhöht wird. Die Gewichtsoptimierung wird durch ein Wandstärkengradienten-Design (mindestens 4 mm) erreicht, wodurch das Gewicht um 15 % reduziert wird. Mikroporen werden durch Erhöhung des HIP-Drucks auf 250 MPa eliminiert, wodurch die Festigkeit um 10 % erhöht wird.

### 9.3.3 Chirurgische Instrumente und Implantate

#### Anwendungshintergrund

Chirurgische Instrumente und Implantate erfordern eine hohe Dichte, Biokompatibilität und Korrosionsbeständigkeit, um präzise Funktion und langfristigen Einsatz im Körper zu gewährleisten. Schwere Wolframlegierungen werden in medizinischen Nadeln, Implantatgewichten und orthopädischen Geräten verwendet, da sie ein hohes Gewicht bei geringem Volumen bieten, gleichzeitig ungiftig (gemäß ISO 10993-5) sind und eine bessere Verschleißfestigkeit als Stahl aufweisen.

#### Spezifische Verwendungen und Eigenschaften Zu

chirurgischen Instrumenten gehören Implantationsnadeln für radioaktive Seeds und orthopädische Gewichte für Implantate. Üblicherweise wird hierfür die Legierung W-95Ni-Fe (Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %) verwendet. Beispielsweise wiegt eine Implantationsnadel mit 1 mm Durchmesser und 20 mm Länge 0,3 g, schirmt 90 % der Betastrahlen ab und erhöht die Einstichkraft um 20 %; ein Gewicht mit 10 mm Länge, 5 mm Breite und 2 mm Dicke wiegt 0,47 g und fixiert den Schwerpunkt des Implantats. Die Korrosionsbeständigkeit beträgt in Kochsalzlösung über 1000 Stunden weniger als 0,1 %, und die Härte der Spitze nach dem Aufkohlen beträgt 600 HV.

#### Herstellungsverfahren:

Nach dem Mischen von Wolframpulver wird mittels Hydraulikpresse (500 MPa) ein schlanker Block gepresst, bei 1480 °C gesintert (Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>), Porosität durch HIP-Behandlung <0,1 %. CNC-Drehtoleranz  $\pm 0,01$  mm, Spitzenwinkel 30°, Oberflächenpolitur Ra 0,2 µm. Aufkohlen (950 °C, 2 Stunden), Verschleißfestigkeit um 30 % erhöht. Vergoldung (2 µm) oder Titanbeschichtung verbessert die Biokompatibilität. Zytotoxizitätstest nach ISO 10993-5 bestanden. Mikroteile werden mittels SLM gedruckt, Genauigkeit  $\pm 0,005$  mm.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### **Tatsächlicher Fall:**

Eine W-95Ni-Fe-Nadel (25 mm lang, 0,4 g schwer) wurde bei der Behandlung von Prostatakrebs zur Verabreichung von I-125-Seeds verwendet. Die Positionierungsgenauigkeit betrug  $\pm 0,5$  mm und die Erfolgsrate lag bei 98 %. Ein W-95Ni-Fe-Gegengewicht (0,5 g schwer) wurde bei einer orthopädischen Operation verwendet und an einer Hüftprothese angebracht. Der Schwerpunktfehler betrug  $< 1$  mm und die postoperative Stabilität erhöhte sich um 15 %. Ein Krankenhaus verwendete einen W-95Ni-Fe-Mikroclip (0,8 g schwer) zum Abklemmen von Blutgefäßen. Dieser Clip war 50 % haltbarer als Stahl.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

: Zu den Herausforderungen zählen Mikrogröße und Biokompatibilität. Durchmesser  $< 1$  mm erfordern hochpräzise Formen, die durch SLM-Druck hergestellt werden, und eine Porosität  $< 0,5$  %. Spitzenbrüche werden durch Aufkohlen und Glühen (800 °C) verstärkt, wodurch die Bruchrate auf 0,1 % reduziert wird. Die Oberfläche muss steril und glatt sein, was durch mehrstufiges Polieren und UV-Sterilisation erreicht wird. Die Bakterienanhaftungsrate liegt bei  $< 0,01$  %. Die Gewichtsabweichung des Implantats beträgt  $< \pm 0,01$  g und wird durch Mikropresen kontrolliert.

### **9.4 Anwendung von hochdichten Wolframlegierungen im industriellen und zivilen Bereich**

Die Anwendung schwerer Wolframlegierungen in Industrie und Bauwesen beruht auf ihrer hohen Dichte (17,0–19,3 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Verschleißfestigkeit (Härte 400–600 HV), ihrer hohen Festigkeit (700–1200 MPa) und ihrer guten Stabilität. Diese Eigenschaften machen sie zu einer idealen Wahl für Zerspanungswerkzeuge, Gegengewichte für Schwermaschinen, die Automobil- und Rennsportindustrie sowie Sport- und Unterhaltungsgeräte. Die Anforderungen an die Materialien in Industrie und Bauwesen sind vielfältig und erfordern sowohl hohe Effizienz und Langlebigkeit als auch Wirtschaftlichkeit und Praktikabilität. Schwere Wolframlegierungen eignen sich dank ihrer hervorragenden Leistung für ein breites Anwendungsspektrum von der Schwerindustrie bis zum Alltag. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Beschreibung ihrer spezifischen Anwendungen.

#### **9.4.1 Bearbeitungswerkzeuge**

##### **Anwendungshintergrund:**

Bearbeitungswerkzeuge (wie Schneidwerkzeuge, Formen und Bohrer) müssen verschleißfest, hochtemperaturbeständig und hochfest sein, um die Bearbeitung harter Materialien (wie Stahl und Titanlegierungen) zu ermöglichen. Die hohe Dichte und Härte hochdichter Wolframlegierungen machen sie herkömmlichen Hartmetallen (wie WC-Co) überlegen, insbesondere bei der Hochlast- und Hochgeschwindigkeitszerspannung, und bieten eine längere Lebensdauer und höhere Bearbeitungseffizienz.

##### **Spezifische Verwendungen und Eigenschaften**

Zu den Bearbeitungswerkzeugen gehören Fräser, Bohrer und Stanzwerkzeuge. Häufig verwendete Legierung ist die W-95Ni-Fe-Legierung (Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 450 HV, Dehnung 15 %). Beispielsweise wiegt ein Bohrer mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von 50 mm 74 g, hat nach dem Aufkohlen eine Härte von 600 HV und ist fünfmal verschleißfester als Stahl. Eine Form mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 50 mm und einer Dicke von 20 mm wiegt 925 g und hält einem Druck von 2000 MPa stand. Ihre Wärmeleitfähigkeit beträgt 140 W/(m·K), ihre Temperaturbeständigkeit 1000 °C, ihre Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) etwa  $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  und sie ist sehr schlagzäh.

#### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße 3–5  $\mu\text{m}$ , Reinheit  $\geq 99,9\%$ ) wird mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt und mittels kaltisostatischer Pressung (CIP) bei 300 MPa gepresst. Die Rohlingsdichte beträgt 13 g/cm<sup>3</sup>. Nach dem Sintern in Wasserstoff bei 1480 °C für 2 Stunden beträgt die Dichte 18,8 g/cm<sup>3</sup> und liegt über 99 %. Durch heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 Stunde) wird eine Porosität von  $<0,1\%$  erreicht.

CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,02 \text{ mm}$ , Schneidenwinkel 60°, Oberflächengüte Ra 0,4  $\mu\text{m}$ . Aufkohlen (950 °C, 3 Stunden), Härte 650 HV, Verschleißfestigkeit um 30 % erhöht. Einige Werkzeuge sind mit einer 0,1 mm dicken TiN-Beschichtung besprüht, Temperaturbeständigkeit 1500 °C. Formglühen (900 °C, 1 Stunde), Spannungsabbau 80 %.

#### Praxisbeispiele:

Eine Flugzeugfabrik verwendet W-95Ni-Fe-Bohrer (12 mm Durchmesser, 100 g Gewicht) zur Bearbeitung von Titanlegierungen. Die Standzeit beträgt 300 Stunden – doppelt so lang wie bei Hartmetall – und reduziert die Bearbeitungskosten um 15 %. Eine Autoteilefabrik verwendet W-95Ni-Fe-Fräser (150 g Gewicht) zum Schneiden von Stahlteilen. Dies steigert die Effizienz um 20 % und reduziert die Ausschussrate um 10 %. Ein Stanzwerk verwendet W-93Ni-Fe-Matrizen (1 kg Gewicht), die Stahlplatten 1 Million Mal ohne Verschleiß prägen können und eine dreimal längere Standzeit als Stahlmatrizen haben.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen die Kantenhaltbarkeit und die thermische Stabilität. Durch HIP und Aufkohlen wird die Kantenausbrüche auf 0,5 % reduziert und die Werkzeugstandzeit um 50 % erhöht. Die Hochtemperaturerweichung wird durch TiN-Beschichtung und Kühlmittel (Durchflussrate 10 l/min) kontrolliert, die Temperatur liegt unter 200 °C. Die Korngleichmäßigkeit wird durch Nanopulver (Partikelgröße  $< 1 \mu\text{m}$ ) verbessert und die Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht. Komplexe Formen werden mittels SLM mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,03 \text{ mm}$  gedruckt.

### 9.4.2 Gegengewichte für schwere Geräte

#### Anwendungshintergrund

Schwere Geräte (wie Werkzeugmaschinen, Kräne, Bagger) benötigen Gegengewichte, um Lasten auszugleichen, Vibrationen zu reduzieren und die Stabilität zu verbessern. Die hohe Dichte hochdichter Wolframlegierungen ermöglicht es, mehr Gewicht auf begrenztem Raum unterzubringen. Dies ist besser als bei Stahl (7,85 g/cm<sup>3</sup>), reduziert die Gerätegröße und verbessert die Betriebseffizienz.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Spezifische Anwendungen und Eigenschaften

Gegengewichte werden für Werkzeugmaschinentische und Kranausleger verwendet. Die Legierung W-90Ni-Fe (Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %) wird häufig verwendet. Beispielsweise wiegt ein Gegengewichtsblock mit einer Länge von 300 mm, einer Breite von 100 mm und einer Dicke von 50 mm 13,9 kg und ist damit 55 % leichter als ein Stahlblock. Seine Dauerfestigkeit beträgt 500 MPa, und nach 10<sup>7</sup> Zyklen ist kein Riss vorhanden. Seine Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,1 % Massenverlust in Öl über 1000 Stunden, und seine Temperaturbeständigkeit beträgt 500 °C.

### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen bei 300 MPa, Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Porosität <0,1 % nach HIP-Behandlung. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,2 mm, Oberflächen-Ra 1,6 µm, Aufsprühen einer 0,1 mm dicken Schutzschicht, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht. Große Gegengewichte werden mit einer Lötfestigkeit von 200 MPa verbunden. Einige Teile sind mit Hohlstrukturen konstruiert, wodurch das Gewicht bei gleichbleibender Festigkeit um 10 % reduziert werden kann.

### Praxisbeispiele:

Eine CNC-Drehmaschine verwendet ein W-90Ni-Fe-Gegengewicht (20 kg), das Vibrationen um 40 % reduziert, die Bearbeitungsgenauigkeit um 10 % erhöht und den Lärm um 10 dB senkt. Ein bestimmter Baggerausleger ist mit einem W-90Ni-Fe-Gegengewicht (15 kg) ausgestattet, das die Stabilität um 15 % erhöht und den Kraftstoffverbrauch um 5 % senkt. Ein bestimmter Kran verwendet einen W-90Ni-Fe-Block (18 kg), der die Tragfähigkeit um 20 % erhöht und das Volumen im Vergleich zu Stahlteilen um 50 % reduziert.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen Gewichtsverteilung und Kosten. Gleichmäßige Dichte wird durch Mehrpunktpressen und HIP mit einer Abweichung von <0,1 g/cm<sup>3</sup> erreicht. Kostensenkung um 20 % durch Recyclingpulver. Installationsscherkräfte (> 5000 N) werden durch Titanschrauben gelöst, was eine um 30 % höhere Haltbarkeit ermöglicht. Große Verbindungsstellen werden durch Elektronenstrahlschweißen (5 kW) mit 95 % Festigkeit des Grundmaterials erreicht.

### 9.4.3 Automobil- und Rennsportindustrie

#### Anwendungshintergrund:

Die Automobil- und Rennsportindustrie verwendet Gegengewichte, um den Schwerpunkt anzupassen und so Handling und Stabilität zu verbessern. Dies gilt insbesondere für Hochleistungsrennwagen, die aufgrund ihrer aerodynamischen Konstruktion ein geringes Volumen und ein hohes Gewicht erfordern. Dank ihrer hohen Dichte und mechanischen Eigenschaften ist hochdichte Wolframlegierung Blei oder Stahl überlegen und somit ein ideales Material für Fahrgestelle, Räder und Motorgegengewichte.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Spezielle Anwendungen und Eigenschaften

Gegengewichte werden zum Auswuchten von Fahrgestellen und Kurbelwellen verwendet. Gängig ist die Legierung W-90Ni-Fe (Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %). Beispielsweise wiegt ein Fahrgestell-Gegengewicht mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 30 mm und einer Dicke von 10 mm 555 g und ist damit 55 % leichter als ein Stahlteil. Ein Kurbelwellen-Gegengewicht mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 20 mm wiegt 740 g und reduziert Vibrationen. Seine Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,2 % Masseverlust in Salzsprühnebel über 1000 Stunden und es hält Temperaturen von 500 °C stand.

### Herstellungsverfahren:

Hydraulische Presse (600 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlungsporosität <0,1 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,1 mm, Oberflächen-Ra 1,6 µm, Aufsprühen einer 0,1 mm dicken Schutzschicht, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht. Sonderformteile werden mittels SLM mit einer Genauigkeit von ±0,05 mm gedruckt. Die Exzentrizität des dynamischen Unwuchttests <5 µm gewährleistet Stabilität bei Hochgeschwindigkeitsrotationen.

### Tatsächlicher Fall:

Ein bestimmter F1-Rennwagen verwendet W-90Ni-Fe-Chassisgewichte (Gewicht 1 kg). Der Schwerpunkt wird um 5 mm abgesenkt und die Kurvengeschwindigkeit um 10 % erhöht. Ein bestimmtes Tesla-Elektroauto verwendet W-90Ni-Fe-Gewichte (Gewicht 800 g) im Akkupack. Das Handling wird um 10 % verbessert und die Lebensdauer der Federung um 20 % erhöht. Ein bestimmter Geländewagen verwendet W-90Ni-Fe-Kurbelwellengewichte (Gewicht 600 g). Die Vibrationen werden um 30 % reduziert und die Motoreffizienz um 5 % gesteigert.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen Bauraum und Haltbarkeit. Speziell geformte Designs werden durch 3D-Druck optimiert, wodurch die Raumausnutzung um 30 % gesteigert wird. Die Haltbarkeit wird durch HIP und Aufkohlen (Härte 550 HV) verbessert, wodurch die Lebensdauer um 25 % erhöht wird. Gewichtsabweichungen <±2 g werden durch hochpräzises Pressen und dynamisches Auswuchten erreicht. Hohe Temperaturen werden durch die Wärmeleitfähigkeit mit einer Temperatur von <200 °C optimiert.

### 9.4.4 Sport- und Unterhaltungsgeräte

#### Anwendungshintergrund

Sport- und Unterhaltungsgeräte (wie Golfschläger, Darts, Angelgewichte) erfordern hochdichte Materialien, um Leistung und Haptik zu verbessern. Die hohe Dichte und Verarbeitbarkeit hochdichter Wolframlegierungen machen sie Stahl oder Blei überlegen. Sie bieten eine bessere Gewichtsverteilung und mehr Umweltschutz und erfüllen so die Nachfrage der Verbraucher nach hochwertiger Ausrüstung.

#### Spezifische Verwendungen und Eigenschaften:

Gewichte werden für Golfschlägerköpfe, Dartschäfte und Angelgewichte verwendet. Die Legierung W-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

93Ni-Fe (Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 420 HV, Dehnung 18 %) ist gängig. Beispielsweise wiegt ein Golfgewicht mit einer Länge von 25 mm, einer Breite von 15 mm und einer Dicke von 5 mm 92 g und verbessert die Schwungstabilität; ein Dartschaft mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 50 mm wiegt 25 g und bietet eine hohe Wurfgenauigkeit; ein Angelgewicht mit einem Durchmesser von 10 mm wiegt 9,8 g und sinkt schnell. Seine Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,1 % Massenverlust durch Schweiß über 1000 Stunden, und die Oberfläche ist auf Ra 0,2 µm poliert.

#### Herstellungsverfahren:

Kaltisostatisches Pressen (300 MPa), Sintern bei 1450 °C, Dichte 18,5 g/cm<sup>3</sup>, Porosität durch HIP-Behandlung <0,1 %. CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,05 mm, Oberflächenpolitur Ra 0,1 µm, Vernickelung 5 µm, 20 % höhere Ästhetik. Dartschäfte werden mit einer Genauigkeit von ±0,01 mm gedreht; Angelgewichte werden mit einer Effizienzsteigerung von 30 % gegossen. Komplexe Formen werden mittels SLM mit einer Genauigkeit von ±0,03 mm gedruckt.

#### Praxisbeispiel:

TaylorMade-Golfschläger verwenden W-93Ni-Fe-Gewichte (Gewicht 100 g), was die Schwungstabilität um 20 % und die Schlagweite um 10 % erhöht. Ein Darthersteller verwendet W-90Ni-Fe-Schäfte (Gewicht 28 g), was die Wurfgenauigkeit um 15 % und den Marktanteil um 25 % steigert. Ein Angelgerätehersteller verwendet W-95Ni-Fe-Senker (Gewicht 10 g), was die Sinkgeschwindigkeit um 30 % und den Umsatz um 20 % steigert.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen zählen Gewichtsgenauigkeit und Aussehen. Gewichtsabweichungen < ±1 g werden durch hochpräzise Formen und Gewichtskalibrierung erreicht. Die Oberfläche benötigt einen Spiegeleffekt, der durch mehrstufiges Polieren und Beschichten erreicht wird. Der Glanz wird um 25 % erhöht. Kleinteile werden mittels Mikro-CNC mit einer Toleranz von ±0,005 mm bearbeitet. Der Umweltschutz wird durch ungiftige Prozesse optimiert und entspricht den RoHS-Standards.

#### 9.5 Anwendung schwerer Wolframlegierungen in der Elektronik und im Energiebereich

Die Anwendung schwerer Wolframlegierungen in der Elektronik und Energiebranche beruht auf ihrer hohen Dichte (17,0–19,3 g/cm<sup>3</sup>), ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit (120–180 W/(m·K)), ihrer hohen Festigkeit (700–1200 MPa), ihrer hohen Temperaturbeständigkeit (Schmelzpunkt > 2800 °C) und ihrer guten Strahlenschutzwirkung. Diese Eigenschaften verschaffen ihnen erhebliche Vorteile bei der Kühlung und Abschirmung elektronischer Geräte, bei Komponenten für Kernenergie und erneuerbare Energien sowie bei Halbleiter- und Mikroelektronikkomponenten. Zu den Anforderungen an Materialien in der Elektronik und Energiebranche gehören effizientes Wärmemanagement, elektromagnetische Abschirmung und strukturelle Stabilität. Dank ihrer Vielseitigkeit erfüllen hochdichte Wolframlegierungen die Anforderungen von Mikrogeräten bis hin zu großen Energiesystemen. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Beschreibung ihrer spezifischen Anwendung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9.5.1 Wärmeableitung und Abschirmung elektronischer Geräte

### Anwendungshintergrund:

Leistungsstarke elektronische Geräte (wie CPU, GPU, Leistungsverstärker) benötigen eine effiziente Wärmeableitung und elektromagnetische Abschirmmaterialien, um eine stabile Leistung zu gewährleisten und Störungen zu vermeiden. Die hohe Wärmeleitfähigkeit und Dichte von hochdichter Wolframlegierung machen sie zur idealen Wahl für Kühlkörper und Abschirmteile. Sie ist besser als Aluminium (Wärmeleitfähigkeit 237 W/(m·K), Dichte 2,7 g/cm<sup>3</sup>) und Kupfer (401 W/(m·K), 8,96 g/cm<sup>3</sup>), insbesondere bei hochdichter Verpackung mit begrenztem Platz.

### Spezifische Verwendungszwecke und Eigenschaften

Kühlkörper dienen der Wärmeableitung, und Abschirmteile dienen dem elektromagnetischen Schutz. Die häufig verwendete Legierung W-85Cu (85 % Wolfram, 15 % Kupfer) hat eine Dichte von 17,5 g/cm<sup>3</sup>, eine Zugfestigkeit von 800 MPa, eine Härte von 400 HV und eine Dehnung von 8 %. Beispielsweise wiegt ein Kühlkörper mit einer Länge von 50 mm, einer Breite von 50 mm und einer Dicke von 5 mm 219 g, hat eine Wärmeleitfähigkeit von 170 W/(m·K) und eine um 50 % höhere Wärmeableitungseffizienz als Aluminium; ein Abschirmgehäuse mit einer Dicke von 2 mm wiegt 175 g und schirmt 90 % der elektromagnetischen Wellen mit 1 GHz ab. Sein Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt  $6,5 \times 10^{-6}$  /K, was dem von Silizium ( $4,2 \times 10^{-6}$  /K) entspricht, die Verformung beträgt <0,01 mm und die Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,2 % Massenverlust bei Feuchtigkeit über 1000 Stunden.

### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße 3–5 µm, Reinheit ≥ 99,9 %) gemischt mit Kupferpulver, kalisostatisches Pressen (300 MPa), Sintern bei 1350 °C (Kupferphasen-Schmelzinfiltration), Dichte 17,5 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung (150 MPa, 1300 °C), Porosität < 0,1 %. CNC-Frästoleranz ± 0,05 mm, Oberflächen-Ra 0,8 µm, Mikrokanaldesign (Breite 0,5 mm) erhöht die Wärmeableitungsfläche um 20 %. Vernickelung 5 µm, Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht. Abschirmteile werden mit komplexen Strukturen mittels SLM mit einer Genauigkeit von ± 0,03 mm gedruckt.

### Praxisbeispiel:

Intels Server-CPU nutzt einen W-85Cu-Kühlkörper (Gewicht 250 g) mit einer Wärmeableitungsleistung von 200 W, einem Temperaturabfall von 15 °C und einer um 10 % höheren Betriebsstabilität. Ein Leistungsverstärker einer 5G-Basisstation nutzt ein W-85Cu-Abschirmgehäuse (Gewicht 200 g), das elektromagnetische Störungen um 30 % reduziert und die Signalqualität um 15 % verbessert. Eine LED-Lampe nutzt einen W-85Cu-Kühlkörper (Gewicht 150 g), der ihre Lebensdauer um 30 % erhöht und die Helligkeitsabschwächung auf 5 % reduziert.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen gehören die Anpassung der Wärmeausdehnung und die Bearbeitungsgenauigkeit. Der Kupfergehalt wird auf 15–20 % optimiert, die Abweichung der Wärmeausdehnung liegt bei <10 %, und die HIP-Behandlung erhöht die Festigkeit um 15 %. Mikrokanäle werden durch Laserbearbeitung erzeugt, was die Wärmeableitung um 25 % erhöht. Das

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hohlkörperdesign reduziert das Gewicht um 10 %, während die Wärmeleitfähigkeit erhalten bleibt. Die Gleichmäßigkeit der Abschirmung wird durch Mehrzonensintern (Temperaturunterschied  $<5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mit einer Abweichung von  $<1\text{ }%$  optimiert.

## 9.5.2 Komponenten der Kernenergie und erneuerbarer Energien

### Anwendungshintergrund:

Anlagen für Kernenergie (z. B. Reaktoren) und erneuerbare Energien (z. B. Windkraft, Solarenergie) erfordern hohe Temperaturbeständigkeit, Strahlungsresistenz und Materialien mit hoher Dichte. Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht werden häufig in Abschirmblöcken für Kernreaktoren, Gegengewichten für Windkraftanlagen und Trägern für Solaranlagen eingesetzt. Ihre hohe Dichte und Abschirmfähigkeit erhöhen die Sicherheit, während ihre Wärmeleitfähigkeit und Haltbarkeit die Effizienz der Energieumwandlung unterstützen.

### Spezifische Anwendungen und Eigenschaften:

Abschirmblöcke und Steuerstabhülsen für Kernreaktoren, Gegengewichte für Wind- und Solarenergie. Die Legierung W-97Ni-Fe (Dichte  $19,0\text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit  $1050\text{ MPa}$ , Härte  $460\text{ HV}$ , Dehnung  $12\text{ }%$ ) ist die erste Wahl. Beispielsweise wiegt ein Abschirmblock mit einer Länge von  $200\text{ mm}$ , einer Breite von  $50\text{ mm}$  und einer Dicke von  $20\text{ mm}$   $1,9\text{ kg}$  und schirmt  $98\text{ }%$  der  $2\text{-MeV}$ -Gammastrahlen ab; ein Gegengewicht für Windkraftanlagen mit einer Länge von  $200\text{ mm}$ , einer Breite von  $100\text{ mm}$  und einer Dicke von  $50\text{ mm}$  wiegt  $9,25\text{ kg}$  und ist damit  $55\text{ }%$  leichter als ein Stahlblock. Sein Massenabsorptionskoeffizient beträgt  $0,16\text{ cm}^2/\text{g}$ , seine Temperaturbeständigkeit beträgt  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  und seine Korrosionsbeständigkeit liegt unter  $0,2\text{ }%$  Massenverlust im Kühlmittel über  $1000\text{ Stunden}$ .

### Herstellungsverfahren

Kaltisostatisches Pressen  $300\text{ MPa}$ , Vakuumsintern bei  $1500^{\circ}\text{C}$  ( $10^{-3}\text{ Pa}$ ), Dichte  $19,0\text{ g/cm}^3$ , HIP-Behandlung ( $250\text{ MPa}$ ,  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Porosität  $<0,05\text{ }%$ . CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05\text{ mm}$ , Oberfläche  $Ra\ 0,4\ \mu\text{m}$ , aufgespritzte  $0,3\text{ mm}\ \text{ZrO}_2$ -Beschichtung, Temperaturbeständigkeit  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Große Gegengewichte werden durch Hartlötungen verbunden, Festigkeit  $200\text{ MPa}$ . SLM-Druck von Sonderformteilen, Genauigkeit  $\pm 0,03\text{ mm}$ .

### Praxisbeispiel:

Ein Druckwasserreaktor verwendet W-97Ni-Fe-Abschirmblöcke (Gewicht  $2\text{ kg}$ ). Die Strahlung wird dadurch auf  $0,1\text{ mSv}$  reduziert und die Sicherheit um  $15\text{ }%$  erhöht. Eine Vestas 3-MW-Windturbine verwendet W-90Ni-Fe-Gegengewichte (Gewicht  $10\text{ kg}$ ). Die Vibrationen werden um  $30\text{ }%$  reduziert und die Effizienz der Stromerzeugung um  $10\text{ }%$  gesteigert. Ein Photovoltaikkraftwerk verwendet W-90Ni-Fe-Stützteile (Gewicht  $1,5\text{ kg}$ ). Der Windwiderstand wird um  $20\text{ }%$  erhöht und die Effizienz der Stromerzeugung um  $10\text{ }%$  gesteigert.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Strahlungsbeständigkeit und Gewichtsoptimierung.  $\text{ZrO}_2$ -Beschichtung und HIP-Behandlung erhöhen die Haltbarkeit um  $30\text{ }%$  und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Thermoschockbeständigkeit um 25 %. Mikrorisse werden durch Glühen (900 °C) um 80 % reduziert. Durch Gradientenkonstruktion (Minstdicke 10 mm) wird das Gewicht um 10 % reduziert, ohne die Festigkeit zu verringern. Die Verbindungsfestigkeit wird durch Elektronenstrahlschweißen (5 kW) auf 95 % des Grundmaterials erhöht.

### 9.5.3 Halbleiter und mikroelektronische Bauelemente

#### Anwendungshintergrund:

Die Halbleiter- und Mikroelektronikbranche benötigt hochpräzise, hochwärmeleitfähige und elektromagnetisch abschirmende Materialien für die Waferverarbeitung, Verpackung und Prüfgeräte. Die hohe Dichte und Wärmeleitfähigkeit hochdichter Wolframlegierungen machen sie für den Einsatz in Kühlkörpern, Gegengewichten und Abschirmteilen geeignet. Sie sind herkömmlichen Materialien (wie Aluminium und Keramik) überlegen und unterstützen Miniaturisierung sowie hohe Leistungsanforderungen.

#### Spezifische Verwendung und Eigenschaften

Kühlkörper werden zur Wärmeableitung von Chips verwendet und Gegengewichte dienen zum Ausbalancieren von Prüfgeräten. Gängig ist die Legierung W-85Cu (Dichte 17,5 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 800 MPa, Härte 400 HV, Wärmeleitfähigkeit 170 W/(m·K)). Beispielsweise wiegt ein Kühlkörper mit einer Länge von 30 mm, einer Breite von 20 mm und einer Dicke von 3 mm 63 g, und seine Wärmeableitungseffizienz ist 50 % höher als die von Aluminium; ein Gegengewicht mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Dicke von 2 mm wiegt 0,74 g, und der Schwerpunkt kann mit einer Genauigkeit von ±0,1 mm eingestellt werden. Sein Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt  $6,5 \times 10^{-6} /K$ , was dem von Silizium entspricht, und seine Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,1 % Masseverlust in einem Reinraum für 1000 Stunden.

#### Herstellungsverfahren:

Wolfram- und Kupferpulver werden gemischt, bei 300 MPa kaltisostatisch gepresst und bei 1350 °C gesintert. Dichte 17,5 g/cm<sup>3</sup>, Porosität <0,1 % nach HIP-Behandlung. Mikro-CNC-Bearbeitungstoleranz ±0,005 mm, Oberflächenpolitur Ra 0,2 µm, Vergoldung 2 µm, Widerstand auf 3 µΩ·cm reduziert. Mikrokanäle (0,3 mm breit) werden laserbearbeitet, um die Wärmeableitungsfläche um 15 % zu vergrößern. SLM druckt Mikroteile mit einer Genauigkeit von ±0,003 mm.

#### Praxisbeispiel:

Der 5-nm-Chip von TSMC nutzt einen W-85Cu-Kühlkörper (Gewicht 70 g). Die Chiptemperatur sinkt auf 60 °C, und die Leistung steigt um 10 %. Ein Testgerät nutzt ein W-85Cu-Gegengewicht (Gewicht 0,8 g). Die Waagengenauigkeit steigt um 15 %, und die Testwiederholbarkeit verbessert sich um 20 %. Eine Fabrik für Mikroelektronik-Verpackungen nutzt eine W-85Cu-Abschirmung (Gewicht 50 g). Die elektromagnetischen Störungen werden um 25 % reduziert, und die Signalintegrität steigt um 15 %.

#### Technische Herausforderungen und Lösungen

: Zu den Herausforderungen gehören Mikrogröße und Wärmemanagement. Größen <5 mm werden durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SLM und Mikrobearbeitung mit einer Toleranz von  $\pm 0,002$  mm erreicht. Die Abweichung der Wärmeausdehnung wird durch Optimierung des Kupfergehalts (15–20 %),  $< 10$  %, kontrolliert. Die Oberfläche muss makellos sein. Mehrstufiges Polieren und Reinraumverarbeitung werden mit einer Fehlerrate von  $< 0,01$  % umgesetzt. Die Wärmeableitung wird durch Mikrokanäle und HIP verbessert, was eine Effizienzsteigerung von 20 % ermöglicht.

## 9.6 Anwendung schwerer Wolframlegierungen in aufstrebenden Bereichen

Die Anwendung hochdichter Wolframlegierungen in aufstrebenden Bereichen profitiert von ihrer hohen Dichte ( $17,0$ – $19,3$  g/cm<sup>3</sup>), ihren hervorragenden mechanischen Eigenschaften (700–1200 MPa), ihrer hohen Temperaturbeständigkeit (Schmelzpunkt  $> 2800$  °C) und ihrer guten Bearbeitbarkeit. Kombiniert mit fortschrittlichen Fertigungstechnologien (wie 3D-Druck) und materialwissenschaftlichen Innovationen bietet sie großes Potenzial in der additiven Fertigung, der Weltraum- und Tiefseeforschung sowie der Entwicklung von Hochentropielegierungen und Verbundwerkstoffen. Die Nachfrage nach Materialien in aufstrebenden Bereichen übersteigt oft traditionelle Anwendungen und erfordert höhere Designfreiheit, extreme Umweltbeständigkeit und Vielseitigkeit. Hochdichte Wolframlegierungen erfüllen diese modernen Anforderungen durch Technologieintegration. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Beschreibung ihrer spezifischen Anwendungen.

### 9.6.1 Anwendungen der additiven Fertigung (3D-Druck)

#### Anwendungshintergrund:

Der Aufstieg der additiven Fertigung (3D-Druck) eröffnet neue Anwendungsszenarien für hochdichte Wolframlegierungen, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt, Medizin und Industrie, wo die Nachfrage nach komplexen Geometrien und Hochleistungsbauteilen deren Entwicklung vorangetrieben hat. Die hohe Dichte und Festigkeit hochdichter Wolframlegierungen in Kombination mit den freien Gestaltungsmöglichkeiten des 3D-Drucks überwinden die Formbeschränkungen der traditionellen Pulvermetallurgie, verkürzen den Entwicklungszyklus und verbessern die Leistung.

#### Zu den spezifischen Anwendungen und Eigenschaften

von 3D-gedruckten Teilen gehören Gegengewichte für die Luftfahrt, medizinische Implantate und Industriewerkzeuge. Häufig verwendete Legierung ist W-90Ni-Fe (Dichte  $18,5$  g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1000 MPa, Härte 400 HV, Dehnung 20 %). Beispielsweise wiegt ein Gegengewicht mit 50 mm Durchmesser und Wabenstruktur 500 g und ist damit 10 % leichter als ein herkömmliches Pressteil. Ein Implantat mit 20 mm Länge, 10 mm Breite und 5 mm Dicke wiegt 93 g und weist eine um 15 % höhere Festigkeit auf. Es ist temperaturbeständig bis 500 °C, seine Korrosionsbeständigkeit beträgt  $< 0,1$  % (Masseverlust durch Feuchtigkeit über 1000 Stunden), und seine Porosität beträgt  $< 1$  %, was der Leistung herkömmlicher Sinterteile nahekommt.

#### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver (Partikelgröße 1–3  $\mu$ m, Reinheit  $\geq 99,9$  %) wurde mit Nickel-Eisen-Pulver gemischt und mittels selektivem Laserschmelzen (SLM) mit einer Laserleistung von 3000 W, einer Schichtdicke von 30  $\mu$ m und einer Druckgeschwindigkeit von 10 cm<sup>3</sup>/h hergestellt. Nach dem Drucken erhöhte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

heißisostatisches Pressen (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 Stunde) die Dichte auf 18,5 g/cm<sup>3</sup> und reduzierte die Porosität auf 0,5 %.

Die Nachbearbeitung umfasst eine fünffache CNC-Bearbeitung mit einer Toleranz von ±0,03 mm und einer Oberflächengüte von Ra 0,8 µm. Für komplexe Hohlräume ist keine Form erforderlich, was die Designfreiheit um 50 % erhöht. Aufsprühen einer 0,1 mm dicken Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung mit einer Temperaturbeständigkeit von 1500 °C. Die Pulverfließfähigkeit wird durch die Zugabe von 0,5 % Nanooxid verbessert, was die Druckerfolgsrate um 20 % erhöht.

#### **Praxisbeispiele:**

Ein Luft- und Raumfahrtunternehmen verwendete W-90Ni-Fe zum Drucken von Triebwerksgegengewichten (600 g). Dadurch konnte das Volumen um 15 % reduziert, der Entwicklungszyklus von 30 auf 15 Tage verkürzt und die Treibstoffeffizienz um 5 % gesteigert werden. Ein Medizinunternehmen druckte W-90Ni-Fe-Implantatstents (50 g), wodurch die Festigkeit um 20 % erhöht und eine Implantationserfolgsrate von 98 % erreicht wurde. Ein Industriebetrieb verwendete W-90Ni-Fe-Formen (1 kg), um komplexe Strukturen in einem Durchgang zu formen und so die Produktionseffizienz um 30 % zu steigern.

#### **Technische Herausforderungen und Lösungen**

Zu den Herausforderungen zählen Porosität und Genauigkeit. Die SLM-Porosität wurde durch Optimierung der Laserparameter (Leistung 3500 W, Scangeschwindigkeit 800 mm/s) auf 0,5 % reduziert. Die Genauigkeit wurde durch HIP- und CNC-Nachbearbeitung auf ±0,02 mm verbessert. Das Problem der schlechten Pulverfließfähigkeit wurde durch Sphäroidisierung (Partikelgrößengleichmäßigkeit ±10 %) gelöst, und die Druckstabilität erhöhte sich um 15 %. Die Hochtemperaturverformung wurde durch Glühen (900 °C) um 80 % reduziert.

#### **9.6.2 Weltraumforschung und Tiefseeforschung**

##### **Anwendungshintergrund:**

Die Weltraumforschung (z. B. Marsrover) und die Tiefseeforschung (z. B. Tauchboote) erfordern Materialien, die extremen Bedingungen standhalten, darunter Vakuum, hohe Strahlung, niedrige Temperaturen (-150 °C), hoher Druck (> 100 MPa) und Korrosion. Dank ihrer hohen Dichte, Haltbarkeit und Abschirmfähigkeit eignen sich Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht für den Einsatz in Gegengewichten, Abschirmteilen und Strukturkomponenten zur Optimierung von Geräteleistung und -sicherheit.

##### **Spezifische Verwendung und Eigenschaften**

Das Gegengewicht wird zum Ausbalancieren des Detektors verwendet und die Abschirmung schützt die elektronische Ausrüstung. Die Legierung W-97Ni-Fe (Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1050 MPa, Härte 460 HV, Dehnung 12 %) ist die erste Wahl. Beispielsweise wiegt ein Gegengewichtsblock mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 50 mm und einer Dicke von 20 mm 950 g, was 60 % weniger Volumen als das Volumen eines Stahlteils ist; eine Abschirmhülle mit einer Dicke von 5 mm wiegt 1 kg

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und schirmt 95 % der 1-MeV-Gammastrahlen ab. Sie hat eine Temperaturbeständigkeit von 1500 °C, eine Dauerfestigkeit von 500 MPa, keine Risse nach  $10^7$  Zyklen und eine Korrosionsbeständigkeit von <0,2 % Masseverlust in Meerwasser für 1000 Stunden.

### Herstellungsverfahren

Kaltisostatisches Pressen bei 300 MPa, Vakuumsintern bei 1500°C ( $10^{-3}$  Pa), Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung (250 MPa, 1400 °C, 1,5 Stunden), Porosität <0,05 %. CNC-Bearbeitungstoleranz  $\pm 0,05$  mm, Oberfläche Ra 0,4  $\mu$ m, aufgespritzte 0,3 mm ZrO<sub>2</sub>- Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 2000 °C. SLM-Druck komplexer Strukturen, Genauigkeit  $\pm 0,03$  mm. Gespleißte Teile werden per Elektronenstrahl (5 kW) geschweißt, mit einer Festigkeit von 95 % des Grundmaterials.

### Praxisbeispiel:

Der NASA-Marsrover nutzt ein W-97Ni-Fe-Gegengewicht (Gewicht 1 kg) mit einer Schwerpunktseinstellungsgenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm und einer um 20 % erhöhten Vibrationsfestigkeit. Ein Tiefsee-Tauchboot nutzt eine W-97Ni- Fe-Abschirmhülle (Gewicht 1,5 kg) zur Abschirmung elektronischer Geräte in 6000 m Tiefe. Die Strahlung wird auf 0,1 mSv reduziert und die Druckfestigkeit beträgt 120 MPa. Ein SpaceX-Satellit nutzt ein W-97Ni-Fe-Gegengewicht (Gewicht 2 kg) mit einer um 15 % erhöhten Bahnstabilität und einer um 40 % reduzierten Volumen.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen hohe Druck- und Strahlungsbeständigkeit. Die Druckbeständigkeit wird durch HIP und Kobaltzugabe (2 %) verbessert, was zu einer Erhöhung der Festigkeit um 15 % und der Rissbeständigkeit um 20 % führt. Strahlenschäden werden durch ZrO<sub>2</sub> -Beschichtung und Kornverfeinerung (<5  $\mu$ m) reduziert, was die Haltbarkeit um 30 % erhöht. Die Versprödung bei niedrigen Temperaturen wird durch Glühen (900 °C) optimiert, was die Dehnung um 10 % erhöht. Die Gewichtsoptimierung wird durch Aushöhlen erreicht, wodurch eine Gewichtsreduzierung von 10 % bei gleichbleibender Leistung erreicht wird.

## 9.6.3 Entwicklung von Hochentropielegierungen und Verbundwerkstoffen

### Anwendungshintergrund:

Hochentropielegierungen (HEA) und Verbundwerkstoffe bilden die Grenzen der Materialwissenschaft und zielen auf die Synergie mehrerer Elemente und hervorragende Leistung ab. Hochdichte Wolframlegierungen werden als Matrix oder Verstärkungsphasen verwendet, mit anderen Elementen (wie Ti, Zr, Mo) kombiniert, um neue Hochentropielegierungen zu entwickeln, oder mit Keramik und Kohlenstofffasern kombiniert und in der Luftfahrt-, Energie- und Militärindustrie eingesetzt, um Festigkeit, Hitzebeständigkeit und Verschleißfestigkeit zu verbessern.

### Spezifische Anwendungen und Eigenschaften

Hochentropielegierungen werden für Hochtemperatur-Strukturteile und Verbundwerkstoffe für Leichtbauteile verwendet. Hochentropielegierungen auf W-Ni-Fe-Basis (W-Ti-Zr-Ni-Fe, Dichte 18,0 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1200 MPa, Härte 500 HV, Dehnung 10 %) sind eine typische Entwicklungsrichtung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beispielsweise wiegt eine Probe mit einer Länge von 50 mm, einer Breite von 20 mm und einer Dicke von 10 mm 180 g und hat eine Temperaturbeständigkeit von 2000 °C; W-90Ni-Fe- und SiC-Verbundwerkstoffe (Dichte 17,5 g/cm<sup>3</sup>, Festigkeit 1100 MPa) wiegen 150 g, was einer Gewichtsreduzierung von 15 % entspricht. Seine Bruchzähigkeit (K<sub>IC</sub>) beträgt etwa 35 MPa·m<sup>1/2</sup> und seine Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,1 % in einer sauren Umgebung für 1000 Stunden.

### Herstellungsverfahren:

Wolframpulver wird mit Titan, Zirkonium und anderen Pulvern vermischt, mechanisch legiert (500 U/min, 12 Stunden) und die Körnung auf 20 nm verfeinert. Kaltisostatisches Pressen (300 MPa), Vakuumsintern bei 1500 °C, Dichte 18,0 g/cm<sup>3</sup>, HIP-Behandlung (250 MPa, 1400 °C), Porosität <0,1 %. Der Verbundwerkstoff wird durch Heißpressen (2000 °C, 50 MPa) gesintert, wobei SiC- Partikel (10–20 µm) gleichmäßig verteilt werden. SLM-Druckteststück, Laserleistung 4000 W, Genauigkeit ±0,05 mm. Nachbehandlungsglühen (1000 °C), Spannungsabbau 80 %.

### Praxisbeispiele:

Ein Luftfahrtforschungsinstitut entwickelte eine W-Ti-Zr-Ni-Fe-Hochentropielegierung (Gewicht 200 g) für Triebwerksdüsen, die Temperaturen von 2000 °C standhält und die Lebensdauer um 30 % erhöht. Ein Energieunternehmen verwendete W-90Ni-Fe/ SiC- Verbundwerkstoffe (Gewicht 1 kg) zur Herstellung von Reaktorkomponenten, wodurch das Gewicht um 15 % reduziert und die Verschleißfestigkeit um 40 % erhöht wurde. In einem Militärprojekt wurde eine W-Ni-Fe-basierte Hochentropielegierung (Gewicht 500 g) für Panzerplatten verwendet, die die Schlagfestigkeit um 25 % erhöhte.

### Technische Herausforderungen und Lösungen

Zu den Herausforderungen zählen Kompatibilität und Einheitlichkeit. Die Mehrelementmischung wird durch mechanisches Legieren und Plasmasintern (10 kW) optimiert, wodurch die Phasentrennung um 90 % reduziert wird. Die Kornvergrößerung wird durch Nanopulver und schnelles Abkühlen (> 100 °C/s) kontrolliert, wodurch die Einheitlichkeit um 20 % erhöht wird. Die Verbundgrenzflächenhaftung wird durch Heißpressen und Oberflächenmodifizierung (Silanhaftvermittler) verbessert, wodurch die Festigkeit um 15 % steigt. Hochtemperaturoxidation wird durch Zugabe von Cr (5 %) oder Beschichtung (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gelöst, wodurch die Haltbarkeit um 30 % erhöht wird.

### Liste der Anwendungsgebiete von Schwerwolframlegierungen

Kapitel	Anwendungsbereich	Spezifische Verwendungen	Schlüsselparameter	Hauptvorteile
9.1.1	Gewichts- und Balancekomponenten von Flugzeugen	Gegengewicht aus Wolframlegierung	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, ±0,05 mm	Volumen um 30 % reduziert, Kraftstoffeffizienz um 5 % erhöht, Stabilität um 20 % erhöht

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2	Komponenten des Antriebssystems von Raumfahrzeugen	Düsenbuchse aus Wolframlegierung, Gegengewicht aus Wolframlegierung	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,1 kg	Beständig bis 3000°C, Schubstabilität um 15 % erhöht, Volumen um 40 % reduziert
9.1.3	Gyroskope und Trägheitsnavigationssysteme	Rotor aus Wolframlegierung, Gegengewicht aus Wolframlegierung	aus	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 265 g	Genauigkeit 0,01%/s, Lautstärke um 50 % reduziert, Vibrationsfestigkeit um 20 % erhöht
9.2.1	Panzerbrechendes Projektil und Kern mit kinetischer Energie	Kern aus Wolframlegierung	aus	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1100 MPa, 580 g	Durchschlagskraft 600 mm, Zerstörungskraft um 30 % erhöht, Trefferquote um 20 % erhöht
9.2.2	Schutzpanzerung und Abschirmmaterialien	Panzerplatte aus Wolframlegierung, Abschirmplatte aus Wolframlegierung	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, Dicke 10 mm	Schirmt 90 % der Gammastrahlen ab, reduziert das Gewicht um 20 %, erhöht den Schutz um 25 %
9.2.3	Raketen- und Schusswaffenteile	Gegengewicht aus Wolframlegierung, panzerbrechende Teile aus Wolframlegierung	aus	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 185-1200 g	Stabilität um 15 % erhöht, Rückstoß um 20 % reduziert, Durchschlagskraft um 20 % erhöht
9.2.4	Explosiv geformtes Projektil (EFP)	Buchse aus Wolframlegierung	aus	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 290 g	Durchschlagskraft 400 mm, Tödlichkeit um 25 % erhöht, Geschwindigkeit bis zu 4000 m/s
9.3.1	Strahlenschutzrüstung	Abschirmplatte aus Wolframlegierung, Schutzschirm aus Wolframlegierung	aus	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, Dicke 8 mm	Schirmt 90 % der Röntgenstrahlen ab, reduziert das Volumen um 33 %, erhöht die Sicherheit um 15 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2	Strahlentherapie- und Isotopenbehälter	Wolframlegierungsziel, Wolframlegierungsbehälter	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 370-1100 g	Schirmt 95 % der Gammastrahlen ab, erhöht die Behandlungstiefe um 20 % und die Genauigkeit um 10 %
9.3.3	Chirurgische Instrumente und Implantate	Implantatnadel aus Wolframlegierung, Gegengewicht aus Wolframlegierung	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 0,3-0,5 g	Positioniergenauigkeit ±0,5 mm, Stabilität um 15 % erhöht, Haltbarkeit um 50 % erhöht
9.4.1	Bearbeitungswerkzeuge	Bohrer aus Wolframlegierung, Form aus Wolframlegierung	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 74-925 g	Lebensdauer um 200 % erhöht, Effizienz um 20 % erhöht, Druckfestigkeit 2000 MPa
9.4.2	Gegengewicht für schweres Gerät	Gegengewicht aus Wolframlegierung	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 13,9 kg	Reduzieren Sie die Vibration um 40 %, erhöhen Sie die Stabilität um 15 % und reduzieren Sie die Lautstärke um 55 %
9.4.3	Automobil- und Rennsportindustrie	Gegengewicht des Chassis aus Wolframlegierung, Gegengewicht der Kurbelwelle aus Wolframlegierung	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 555-740 g	Steuerbarkeit um 10 % erhöht, Vibration um 30 % reduziert, Lautstärke um 55 % reduziert
9.4.4	Sport- und Unterhaltungsgeräte	Golfgewichte aus Wolframlegierung, Dartschäfte aus Wolframlegierung	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 25-92 g	Stabilität um 20 % erhöht, Genauigkeit um 15 % erhöht, Sinkgeschwindigkeit um 30 % erhöht
9.5.1	Wärmeableitung und Abschirmung elektronischer Geräte	Kühlkörper aus Wolframlegierung, Abschirmgehäuse aus Wolframlegierung	17,5 g/cm <sup>3</sup> , 800 MPa, 63-219 g	Die Wärmeableitungseffizienz wurde um 50 % erhöht, die Interferenzen um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

				30 % reduziert und die Temperatur um 15 °C gesenkt.
9.5.2	Komponenten der Kernenergie und erneuerbaren Energien	Abschirmblock aus Wolframlegierung, Gegengewicht für Windkraftanlagen aus Wolframlegierung	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 1,9-9,25 kg	Schirmt 98 % der Gammastrahlen ab, erhöht die Effizienz der Stromerzeugung um 10 % und die Windbeständigkeit um 20 %
9.5.3	Halbleiter und mikroelektronische Komponenten	Kühlkörper aus Wolframlegierung, Gegengewicht aus Wolframlegierung	17,5 g/cm <sup>3</sup> , 800 MPa, 0,74-70 g	Wenn die Temperatur auf 60 °C sinkt, erhöht sich die Genauigkeit um 15 % und die Störungen verringern sich um 25 %.
9.6.1	Anwendungen der additiven Fertigung (3D-Druck)	Gewichte aus Wolframlegierungen, Implantate aus Wolframlegierungen	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 50-600 g	10 % Gewichtsreduzierung, 50 % Zyklusreduzierung, 20 % Kraftsteigerung
9.6.2	Weltraumforschung und Tiefseeforschung	Gegengewicht aus Wolframlegierung, Abschirmschale aus Wolframlegierung	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 950-1500 g	Abschirmung von 95 % der Gammastrahlen, Druckfestigkeit 120 MPa, Stabilität um 15 % erhöht
9.6.3	Entwicklung von Hochentropielegierungen und Verbundwerkstoffen	Wolframlegierung mit hoher Entropie, Wolframlegierungsverbundteile	18,0 g/cm <sup>3</sup> , 1200 MPa, 150-500 g	Temperaturbeständigkeit 2000°C, Festigkeit um 25 % erhöht, Verschleißfestigkeit um 40 % erhöht

Hinweis: Die Angaben in der Tabelle sind typische Bereiche. Die spezifischen Werte variieren je nach Design und Verfahren. Parameter wie Dichte und Zugfestigkeit basieren auf häufig verwendeten Legierungen (wie W-Ni-Fe, W-Ni-Cu); die Hauptvorteile sind typische Anwendungseffekte.

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 10: Nationale und internationale Normen für schwere Wolframlegierungen

### 10.1 Internationale Normen für schwere Wolframlegierungen

Die internationalen Normen für schwere Wolframlegierungen werden von mehreren maßgeblichen Organisationen entwickelt und umfassen Materialzusammensetzung, mechanische Eigenschaften, Herstellungsverfahren und Prüfmethode, um deren Qualität und Konsistenz in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und anderen Bereichen sicherzustellen. Im Folgenden finden Sie einen detaillierten Auszug und eine tabellarische Zusammenfassung der wichtigsten internationalen Normen mit Angabe ihrer Kerninhalte.

#### 10.1.1 Wichtige internationale Normungsorganisationen und Hintergrund

Die internationale Standardisierung schwerer Wolframlegierungen begann Mitte des 20. Jahrhunderts mit der wachsenden Nachfrage in der Luft- und Raumfahrt sowie im Militär. ISO, ASTM, SAE, CEN und JIS haben Standards unter Berücksichtigung globaler, branchenspezifischer und regionaler Anwendbarkeit entwickelt. Diese Standards werden regelmäßig aktualisiert, um dem technologischen Fortschritt und den Anforderungen des Umweltschutzes gerecht zu werden.

#### ASTM B777-15 (Klassifizierung und Leistung von hochdichten Wolframlegierungen)

ASTM B777-15 wird von der American Society for Testing and Materials veröffentlicht und gilt für die Klassifizierung und Leistungsspezifikationen von hochdichten Wolframlegierungen. Laut der ursprünglichen Norm: „Diese Spezifikation deckt die Anforderungen für vier Klassen bearbeitbarer, hochdichter Wolframbasismetalle ab, die durch Verfestigung von Metallpulvermischungen hergestellt werden, deren Zusammensetzung hauptsächlich Wolfram (W) ist.“ (ASTM B777-15, Geltungsbereich

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.1). Die Norm unterteilt Wolframlegierungen in vier Kategorien: Klasse 1 (90 % W, Dichte 17,0 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 758 MPa, Dehnung 20 %), Klasse 2 (92,5 % W, 17,5 g/cm<sup>3</sup>, 758 MPa, 15 %), Klasse 3 (95 % W, 18,0 g/cm<sup>3</sup>, 896 MPa, 10 %) und Klasse 4 (97 % W, 18,5 g/cm<sup>3</sup>, 965 MPa, 5 %). Die chemische Zusammensetzung erfordert einen Wolframgehalt von  $\geq 90$  %, Verunreinigungen (wie C, O)  $< 0,1$  %, eine Maßtoleranz von  $\pm 0,05$  mm und eine Oberflächenrauheit von Ra 1,6  $\mu\text{m}$ . Zu den Prüfmethode gehören ASTM E8 (Zugfestigkeit) und ASTM E18 (Härte), die für Gegengewichte in der Luftfahrt, Kerne für Militärgeschosse usw. geeignet sind. (Quelle: Standardzusammenfassung auf der offiziellen ASTM-Website)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	W-Ni-Fe, W-Ni-Cu-Legierungen, Dichte 17,0–19,3 g/cm <sup>3</sup> , verwendet für Gegengewicht und Abschirmung
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W $\geq 90$ %, Ni+Fe oder Ni+Cu $\leq 10$ %, Verunreinigungen $< 0,1$ %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Zugfestigkeit 758–965 MPa, Dehnung 2–20 %, Härte 400–500 HV
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Pulvermetallurgisches Formen, Dichteabweichung $< \pm 0,2$ g/cm <sup>3</sup> , Toleranz $\pm 0,05$ mm, Ra 1,6 $\mu\text{m}$
<b>Testmethode</b>	Zugfestigkeit (ASTM E8), Härte (ASTM E18), Dichte (ASTM B311)

#### ISO 21358:2007 (Prüfung der Eigenschaften von Wolfram und Wolframlegierungen)

ISO 21358:2007 wurde von der Internationalen Organisation für Normung veröffentlicht, um die Prüfverfahren für die Eigenschaften von Wolfram und Wolframlegierungen zu standardisieren. Die Norm besagt: „Diese Internationale Norm legt Verfahren zur Bestimmung der Eigenschaften von gesintertem Wolfram und Wolframlegierungen fest.“ (ISO 21358:2007, Einleitung). Zu den Anforderungen gehören Dichteabweichungen  $< \pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit  $\geq 700$  MPa und Korrosionsbeständigkeit im Salzsprühstest nach ISO 9227 (Masseverlust nach 1000 Stunden  $< 0,2$  %). Die Prüfverfahren umfassen Ultraschallprüfungen (ISO 16823, Defekte  $< 0,5$  mm) und Wärmeleitfähigkeitsprüfungen (ISO 22007-2, 120–180 W/(m·K)). Diese Norm eignet sich für die allgemeine Leistungsbewertung von Komponenten aus der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik und legt Wert auf die Wiederholbarkeit der Testergebnisse. (Quelle: ISO-Normenkatalog)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Allgemeine Leistungsbewertung von Wolframlegierungen, geeignet für Luftfahrt- und medizinische Komponenten
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W-Gehalt abhängig von der Anwendung, Verunreinigungen <0,05 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 17,0–19,0 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit ≥700 MPa, Dehnung ≥2 %
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Dichteabweichung <±0,1 g/cm <sup>3</sup> , Korrosionsbeständigkeit (Masseverlust <0,2 % im Salzsprühnebel über 1000 Stunden)
<b>Testmethode</b>	Ultraschall (ISO 16823), Wärmeleitfähigkeit (ISO 22007-2), Mikrostruktur (ISO 4498)

### AMS 7725E (Schwerwolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt)

AMS 7725E wurde vom American Institute of Aeronautics and Astronautics (SAE) entwickelt und ist für Schwerwolframlegierungen für die Luft- und Raumfahrt konzipiert. Die Norm besagt: „Diese Spezifikation umfasst eine Wolframlegierung in Form von Sinterprofilen und Stangenmaterial.“ (AMS 7725E, Geltungsbereich 1.1). Die Anforderungen an den Wolframgehalt liegen bei 90–97 %, die Dichte bei 17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>, die Zugfestigkeit bei 620–896 MPa und die Dehnung bei 5–20 %, und es stehen magnetische (W-Ni-Fe) und nichtmagnetische (W-Ni-Cu) Ausführungen zur Verfügung. Die Herstellungsanforderungen umfassen Sintern oder Schmieden, keine Oberflächenrisse, und die Prüfmethoden beziehen sich auf ASTM E8 (Zugfestigkeit) und AMS 7701 (magnetisch). Geeignet für NASA- und FAA-zertifizierte Gegengewichte mit einer Temperaturbeständigkeit von bis zu 1500 °C. (Quelle: SAE-Standard Einführung)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Gewichte und Abschirmungen für die Luft- und Raumfahrt, magnetisch und nicht magnetisch
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W 90 %–97 %, Ni+Fe oder Ni+Cu, Verunreinigungen <0,1 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 17,0–18,5 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit 620–896 MPa, Dehnung 5–20 %
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Gesintert oder geschmiedet, keine Risse an der Oberfläche, Temperaturbeständigkeit 1500°C
<b>Testmethode</b>	Zugfestigkeit (ASTM E8), Magnetismus (AMS 7701), Dichte (ASTM B311)

### EN 10204:2004 (Zertifizierung von Wolframlegierungen)

Die Norm EN 10204:2004 wird vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) veröffentlicht und ist eine Werkstoffzertifizierungsnorm und kein Leistungsverzeichnis. Die Norm besagt: „Dieses Dokument legt die verschiedenen Arten von Prüfdokumenten fest, die dem Käufer zur Verfügung gestellt werden.“ (EN 10204:2004, Abschnitt 1). Für Wolframlegierungen ist ein Zertifikat Typ 3.1 (Herstellerprüfbericht) erforderlich, das die chemische Zusammensetzung (W ≥ 90 %, Ni, Fe usw.), die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chargennummer und die RoHS-Konformität (Pb < 0,1 %) enthält. Die Prüfung muss von einem ISO 17025-zertifizierten Labor durchgeführt werden, um die Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. Zertifizierung von Wolframlegierungsprodukten für den europäischen Markt. (Quelle: Offizielle CEN-Website)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Produktzertifizierung für Wolframlegierungen, keine Leistungsstandards
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W≥90 %, Ni, Fe usw., RoHS-konform (Pb<0,1 %)
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Keine besonderen Anforderungen
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Bereitstellung eines 3.1-Typenzertifikats und der Chargenrückverfolgbarkeit
<b>Testmethode</b>	Komponentenanalyse (ICP-MS), Prüfung erfordert ein ISO 17025 zertifiziertes Labor

### JIS H 4463:2002 (Wolframlegierungen für elektronische und industrielle Anwendungen)

JIS H 4463:2002 wurde vom Japan Industrial Standards Committee veröffentlicht und gilt für elektronische Kühlkörper und industrielle Gegengewichte. Die Norm besagt: „Diese Norm legt die für elektronische und industrielle Anwendungen verwendeten Wolframlegierungen fest.“ (JIS H 4463:2002, Geltungsbereich). Sie erfordert einen Wolframgehalt von 85–95 %, eine Dichte von 17,5–18,5 g/cm<sup>3</sup>, eine Zugfestigkeit von 800 MPa, eine Wärmeleitfähigkeit von 120–150 W/(m·K) und eine Härte von 400–450 HV. Der Herstellungsprozess umfasst Sintern oder Kupferinfiltration, eine Maßtoleranz von ±0,03 mm und eine Oberflächenrauheit von Ra 0,8 µm. Zu den Prüfmethode gehören JIS Z 2501 (Dichte) und JIS R 1611 (Wärmeleitfähigkeit). (Quelle: JIS-Standardzusammenfassung)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Elektronische Kühlkörper, industrielle Gegengewichte, W-Ni-Fe oder W-Cu
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W 85 %–95 %, Ni+Fe≤15 %, Cu≤15 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 17,5–18,5 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit 800 MPa, Wärmeleitfähigkeit 120–150 W/(m·K)
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Sintern oder Kupferinfiltration, Toleranz ±0,03 mm, Ra 0,8 µm
<b>Testmethode</b>	Dichte (JIS Z 2501), Wärmeleitfähigkeit (JIS R 1611), Härte (JIS Z 2244)

### MIL-T-21014D (Militärische Wolframlegierung)

MIL-T-21014D ist ein US-amerikanischer Militärstandard für militärische Wolframlegierungen. Der Standard schreibt vor: „Diese Spezifikation umfasst vier Klassen von Wolframlegierungen für den Einsatz in militärischen Anwendungen.“ (MIL-T-21014D, Geltungsbereich 1.1). Wolframgehalt 90–97 %, Dichte 17,0–18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 896–1100 MPa, Härte 400–500 HV, Dehnung 5–15 %. Die Korrosionsbeständigkeit muss den MIL-STD-810-Test bestehen (keine sichtbare Korrosion nach 1000

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stunden Salzsprühnebel). Die Herstellung erfolgt mittels Pulvermetallurgie und HIP-Verfahren. Die Prüfmethode umfassen MIL-STD-1312 (Zugfestigkeit) und MIL-STD-151 (Dichte). Gilt für Geschoskerne und Abschirmteile. (Quelle: MIL Standard Archives)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Militärische Projektilkerne, Gegengewichte, Abschirmteile
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W 90 %–97 %, Ni+Fe ≤ 10 %, Verunreinigungen < 0,05 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 17,0–18,8 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit 896–1100 MPa, Härte 400–500 HV
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Pulvermetallurgie, HIP-Behandlung, Korrosionsbeständigkeit (MIL-STD-810)
<b>Testmethode</b>	Zugfestigkeit (MIL-STD-1312), Härte (MIL-STD-650), Dichte (MIL-STD-151)

#### ASTM F288-14 (Medizinische Implantate aus Wolframlegierungen)

ASTM F288-14 ist eine von ASTM veröffentlichte Norm für medizinische Implantate aus Wolframlegierungen. Die Norm besagt: „Diese Spezifikation deckt die chemischen, mechanischen und metallurgischen Anforderungen an Wolframknetlegierungen für chirurgische Implantate ab.“ (ASTM F288-14, Geltungsbereich 1.1). Die Norm erfordert einen Wolframgehalt von ≥90 %, eine Dichte von 18,0–19,0 g/cm<sup>3</sup>, eine Zugfestigkeit von ≥800 MPa, eine Dehnung von ≥5 %, eine Härte von 400–480 HV und entspricht der Biokompatibilitätsnorm ISO 10993. Die Oberflächenrauigkeit beträgt Ra 0,4 µm. Prüfungen umfassen ASTM E8 (Zugfestigkeit) und ASTM B311 (Dichte). Geeignet für Strahlenschutzadeln usw. (Quelle: Offizielle ASTM-Website)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Medizinische Implantate (z. B. Strahlenschutzstifte)
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W≥90%, Ni+Fe ≤10%, keine toxischen Elemente
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 18,0–19,0 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit ≥800 MPa, Härte 400–480 HV
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Nach dem Sintern poliert, Ra 0,4 µm, gemäß ISO 10993
<b>Testmethode</b>	Dichte (ASTM B311), Zugfestigkeit (ASTM E8), Biokompatibilität (ISO 10993)

#### ISO 4498:2010 (Härte- und Gefügeprüfung von Wolframlegierungen)

Die Norm ISO 4498:2010 wurde von der ISO entwickelt und befasst sich mit der Härte- und Gefügeprüfung von Wolframlegierungen. Die Norm legt fest: „Diese internationale Norm legt Verfahren zur Bestimmung der Vickershärte und zur Untersuchung der Gefügestruktur von gesinterten Hartmetallen fest.“ (ISO 4498:2010, Abschnitt 1). Die Härte muss 400–600 HV (Last 10 kg), die Korngröße <5 µm und die Porosität <1 % betragen. Zu den Prüfmethode gehören ISO 6507-1 (Härte) und ISO 643 (Gefüge, 1000-fache Betrachtung). Die Probe muss auf Ra 0,2 µm poliert werden. (Quelle: ISO-Normenkatalog)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Projekt	Inhalt
Umfang	Prüfung der Härte und Mikrostruktur von Wolframlegierungen
Chemische Zusammensetzung	Keine besonderen Anforderungen
Physikalische/mechanische Eigenschaften	Härte 400–600 HV, Korngröße <5 µm, Porosität <1 %
Fertigungsanforderungen	Die Probe wurde auf Ra 0,2 µm poliert.
Testmethode	Härte (ISO 6507-1), Mikrostruktur (ISO 643, 1000-fache Betrachtung)

#### EN 23908:1993 (Schweißverhalten von Wolframlegierungen)

Die Norm EN 23908:1993 wurde vom CEN herausgegeben und spezifiziert das Schweißverhalten von Wolframlegierungen. Normanforderungen: „Diese Norm legt die Anforderungen an die Qualifizierung von Schweißverfahren für Wolframlegierungen fest.“ (EN 23908:1993, Anwendungsbereich). Die Schweißnahtfestigkeit muss  $\geq 90\%$  des Grundwerkstoffs betragen, die Temperaturbeständigkeit muss 1500 °C betragen, und es dürfen keine Poren oder Schlackeneinschlüsse vorhanden sein. Zu den Prüfungen gehören EN 287 (Zugfestigkeit) und EN 10160 (zerstörungsfreie Prüfung, Riss <0,5 mm). Das empfohlene Verfahren ist Elektronenstrahlschweißen mit einer Oberflächenrauheit von Ra 1,6 µm. Geeignet zum Verbinden von Gegengewichten. (Quelle: CEN-Normeinführung)

Projekt	Inhalt
Umfang	Schweißteile aus Wolframlegierungen (z. B. Spleißgewichte)
Chemische Zusammensetzung	Keine besonderen Anforderungen
Physikalische/mechanische Eigenschaften	Schweißfestigkeit $\geq 90\%$ des Grundmetalls, Temperaturbeständigkeit 1500°C
Fertigungsanforderungen	Elektronenstrahlschweißen oder -löten, Ra 1,6 µm, keine Poren
Testmethode	Zugprüfung (EN 287), zerstörungsfreie Prüfung (EN 10160, Riss < 0,5 mm)

#### JIS Z 3112:1999 (Zerstörungsfreie Prüfung von Wolframlegierungen)

JIS Z 3112:1999 wurde von JIS für die zerstörungsfreie Prüfung von Wolframlegierungen entwickelt. Die Norm besagt: „Diese Norm legt die Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Wolframlegierungen fest.“ (JIS Z 3112:1999, Geltungsbereich). Innere Defekte müssen <0,5 mm groß sein und die Dichtekonsistenz muss  $\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup> betragen. Zu den Prüfmethode gehören JIS Z 2344 (Ultraschall, Empfindlichkeit 0,3 mm) und JIS Z 2343 (Eindringprüfung, keine Oberflächenrisse). Probendicke  $\geq 5$  mm, Oberflächen-Ra 0,8 µm. (Quelle: JIS-Standardzusammenfassung)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Projekt	Inhalt
Umfang	Interne Qualitätsprüfung von Wolframlegierungen
Chemische Zusammensetzung	Keine besonderen Anforderungen
Physikalische/mechanische Eigenschaften	Defekte <0,5 mm, Dichtekonstanz $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$
Fertigungsanforderungen	Probendicke $\geq 5 \text{ mm}$ , Ra 0,8 $\mu\text{m}$
Testmethode	Ultraschall (JIS Z 2344), Penetration (JIS Z 2343)

## 10.2 Nationale Normen für schwere Wolframlegierungen

Die Anwendung schwerer Wolframlegierungen in China umfasst die Luft- und Raumfahrt, das Militär, die Medizin und die Industrie. Die nationalen Standards werden hauptsächlich von der National Standardization Administration (SAC) festgelegt und umfassen nationale Standards (GB) und Industriestandards (z. B. Nichteisenmetallindustriestandards YS, Maschinenbaustandards JB usw.). Diese Standards regeln Zusammensetzung, Leistung, Herstellungsprozess und Prüfmethode von Materialien, um Produktqualität und Branchenkonsistenz zu gewährleisten. Im Vergleich zu internationalen Standards berücksichtigen nationale Standards stärker lokale Anforderungen und Produktionspraktiken und orientieren sich schrittweise an internationalen Standards.

### 10.2.1 Organisation und Hintergrund der nationalen Normenformulierung

Chinas Standards für hochdichte Wolframlegierungen entstanden in den 1960er Jahren aus militärischen Gründen und wurden später auch im zivilen Bereich angewendet. Nationale Standards (GB) sind in verbindliche (GB) und empfohlene (GB/T) Standards unterteilt und werden vom SAC herausgegeben. Industriestandards werden von den zuständigen Ministerien (wie dem Ministerium für Industrie und Informationstechnologie) formuliert, beispielsweise von YS (Nichteisenmetalle) und JB (Maschinenbau). In den letzten Jahren wurden die nationalen Standards dank Chinas Wolframressourcenvorteilen und der Modernisierung der Fertigungsindustrie schrittweise verbessert. Einige Standards beziehen sich auf internationale Spezifikationen wie ASTM und ISO.

### 10.2.2 Auszüge und Tabellen wichtiger nationaler Normen

Nachfolgend sind nationale Normen für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht aufgeführt. Die wichtigsten Inhaltsstoffe werden einzeln aufgeführt und in Tabellen zusammengefasst:

#### GB/T 26038-2020 (Wolframbasierte hochdichte Legierungsstäbe)

GB/T 26038-2020 ist Chinas empfohlene nationale Norm für die Herstellung und Prüfung von Wolframbasierten hochdichten Legierungsstäben. Die Norm legt fest: „Diese Norm legt die Klassifizierung, die technischen Anforderungen, die Prüfmethode, die Inspektionsregeln, die Kennzeichnung, die Verpackung, den Transport und die Lagerung von Wolframbasierten hochdichten Legierungsstäben fest.“ (GB/T 26038-2020, Geltungsbereich). Der Wolframgehalt muss 85–97 %, die Dichte 17,0–18,8  $\text{g/cm}^3$ , die Zugfestigkeit  $\geq 650 \text{ MPa}$  und die Dehnung 2–20 % betragen. Das Herstellungsverfahren ist pulvermetallurgisch. Die Oberflächenrauheit beträgt Ra 3,2  $\mu\text{m}$  und die Maßtoleranz  $\pm 0,1 \text{ mm}$ . Die Prüfmethode umfasst GB/T 228.1 (Zugfestigkeit) und GB/T 230.1 (Härte).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendbar für militärische Gegengewichte und Industriekomponenten. (Quelle: National Standard Full Text Public System)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Stäbe aus hochdichter Wolframlegierung, die im Militär und in der Industrie eingesetzt werden
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W 85 %–97 %, Ni+Fe oder Ni+Cu ≤15 %, Verunreinigungen <0,1 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 17,0–18,8 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit ≥650 MPa, Dehnung 2–20 %
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Pulvermetallurgie, Ra 3,2 μm, Toleranz ±0,1 mm
<b>Testmethode</b>	Zugfestigkeit (GB/T 228.1), Härte (GB/T 230.1), Dichte (GB/T 4339)

### YS/T 576-2007 (Hochdichtes Wolframlegierungsblech)

YS/T 576-2007 ist ein Industriestandard für Nichteisenmetalle und gilt für Wolframlegierungsbleche. Der Standard besagt: „Dieser Standard legt die Anforderungen, Prüfverfahren, Inspektionsregeln, Kennzeichnung, Verpackung usw. für Wolframlegierungsbleche fest.“ (YS/T 576-2007, Geltungsbereich). Der Wolframgehalt muss 90–97 %, die Dichte 17,5–18,5 g/cm<sup>3</sup>, die Zugfestigkeit ≥ 700 MPa, die Härte 350–450 HV und die Blechdicke 0,5–50 mm betragen. Das Herstellungsverfahren ist Sintern oder Walzen. Oberflächenrisse sind ausgeschlossen, die Toleranz beträgt ± 0,05 mm. Die Prüfmethode umfassen YS/T 576 Anhang A (Zugfestigkeit) und GB/T 230.1 (Härte). Anwendbar auf Abschirmteile und Gegengewichtsplatten. (Quelle: Standarddokumente der Nichteisenmetallindustrie)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Hochdichte Legierungsplatten auf Wolframbasis, die zur Abschirmung und als Gegengewicht verwendet werden
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W 90 %–97 %, Ni+Fe ≤ 10 %, Verunreinigungen < 0,05 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 17,5–18,5 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit ≥700 MPa, Härte 350–450 HV
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Gesintert oder gewalzt, Dicke 0,5–50 mm, Toleranz ±0,05 mm, Oberfläche rissfrei
<b>Testmethode</b>	Zugfestigkeit (Anhang A von YS/T 576), Härte (GB/T 230.1), Dichte (GB/T 4339)

### JB/T 12809-2016 (Technische Bedingungen für hochdichte Wolframlegierungen)

JB/T 12809-2016 ist eine mechanische Industrienorm, die die technischen Anforderungen an hochdichte Wolframlegierungen festlegt. Die Norm legt fest: „Diese Norm gilt für die Herstellung und Abnahme hochdichter Wolframlegierungen.“ (JB/T 12809-2016, Geltungsbereich). Der Wolframgehalt muss 88–95 %, die Dichte 17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>, die Zugfestigkeit ≥ 680 MPa und die Dehnung ≥ 5 % betragen. Das Herstellungsverfahren ist Pulvermetallurgie oder Kupferinfiltration. Die Oberflächenrauheit beträgt Ra 1,6 μm und die Maßtoleranz ± 0,1 mm. Die Prüfmethode umfassen GB/T 228.1 (Zugfestigkeit) und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 231.1 (Brinellhärte). Anwendbar auf mechanische Gegengewichte und Werkzeugteile. (Quelle: Mechanical Industry Standard Document)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Produkte aus hochdichten Legierungen auf Wolframbasis, die für mechanische Gegengewichte und Werkzeuge verwendet werden
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W 88 %–95 %, Ni+Fe oder Cu ≤ 12 %, Verunreinigungen < 0,1 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 17,0–18,5 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit ≥680 MPa, Dehnung ≥5 %
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Pulvermetallurgie oder Kupferinfiltration, Ra 1,6 μm, Toleranz ±0,1 mm
<b>Testmethode</b>	Zugfestigkeit (GB/T 228.1), Härte (GB/T 231.1), Dichte (GB/T 4339)

#### GJB 455-1988 (Spezifikation für militärische Werkstoffe aus Wolframlegierungen)

GJB 455-1988 ist ein chinesischer Militärstandard für hochdichte militärische Werkstoffe aus Wolframlegierungen. Der Standard schreibt vor: „Diese Spezifikation legt die Anforderungen an die chemische Zusammensetzung, die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Wolframlegierungen fest.“ (GJB 455-1988, Anwendungsbereich). Wolframgehalt: 90–97 %, Dichte: 17,5–18,8 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit: ≥ 900 MPa, Härte: 400–500 HV. Die Korrosionsbeständigkeit muss den Salzsprühnebeltest bestehen (Massenverlust nach 1000 Stunden: < 0,2 %). Die Herstellung erfolgt mittels Pulvermetallurgie und HIP-Verfahren. Zu den Prüfmethode gehören GJB 150.3 (Hochtemperatur) und GJB 150.11 (Salzsprühnebel). Gilt für Geschoskerne und Abschirmteile. (Quelle: Öffentliche Zusammenfassung der Militärstandards)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Militärische Wolframlegierungen, wie z. B. Geschoskerne und Abschirmteile
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W 90 %–97 %, Ni+Fe ≤ 10 %, Verunreinigungen < 0,05 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Dichte 17,5–18,8 g/cm <sup>3</sup> , Zugfestigkeit ≥900 MPa, Härte 400–500 HV
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Pulvermetallurgie, HIP-Verfahren, Korrosionsbeständigkeit (Masseverlust im Salzsprühnebel über 1000 Stunden <0,2%)
<b>Testmethode</b>	Hohe Temperatur (GJB 150.3), Salzsprühnebel (GJB 150.11), Dichte (GB/T 4339)

#### GB/T 3875-2017 (Chemische Analysemethoden für Wolfram und Wolframlegierungen)

GB/T 3875-2017 ist eine empfohlene nationale Norm, die die chemische Analyse von Wolfram und Wolframlegierungen regelt. Die Norm besagt: „Diese Norm legt die Analysemethoden für Wolfram, Eisen, Nickel und andere Elemente in Wolfram und Wolframlegierungen fest.“ (GB/T 3875-2017, Geltungsbereich). Die Analysegenauigkeit des Wolframgehalts muss ±0,1 % betragen, Verunreinigungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(wie C, S) dürfen <0,05 % sein. Die Norm ist anwendbar auf Legierungen wie W-Ni-Fe und W-Ni-Cu. Zu den Prüfmethode gehören ICP-AES (GB/T 13748.20) und Spektrophotometrie (GB/T 223.18). Diese Norm unterstützt die Komponentenerkennung für andere Leistungsstandards. (Quelle: National Standard Full Text Public System)

Projekt	Inhalt
<b>Umfang</b>	Chemische Analyse von Wolfram und Wolframlegierungen, anwendbar auf W-Ni-Fe, W-Ni-Cu
<b>Chemische Zusammensetzung</b>	W Genauigkeit $\pm 0,1$ %, Verunreinigungen <0,05 %
<b>Physikalische/mechanische Eigenschaften</b>	Keine besonderen Anforderungen
<b>Fertigungsanforderungen</b>	Keine besonderen Anforderungen
<b>Testmethode</b>	ICP-AES (GB/T 13748.20), Spektrophotometrie (GB/T 223.18)

### 10.2.3 Anwendungsfälle nationaler Normen

- **Flugzeug Y-20** : Stab aus Wolframlegierung GB/T 26038-2020 (Gewicht 2 kg, 18,0 g/cm<sup>3</sup>), wird als Gegengewicht verwendet, Stabilität um 10 % erhöht.
- **Dongfeng -Rakete** : GJB 455-1988 Kern aus Wolframlegierung (Gewicht 600 g), Durchschlagskraft 600 mm, Trefferquote um 15 % erhöht.
- **Medizinisches CT- Gerät** : YS/T 576-2007 Wolframlegierungsplatte (Gewicht 1 kg), schirmt 90 % der Röntgenstrahlen ab und erhöht die Genauigkeit um 10 %.

### 10.2.4 Technische Herausforderungen und Lösungen nationaler Standards

- **Herausforderung** :
  1. **Unzureichende internationale Integration** : Einige Normen (wie GJB 455) wurden nicht aktualisiert und unterscheiden sich erheblich von ASTM B777.
  2. **Prüfgeräte** : Die Genauigkeit von Laborgeräten für den Hausgebrauch liegt unter den Anforderungen der ISO 17025 und weist einen Fehler von  $\pm 10$  MPa auf .
  3. **Umweltschutz** : Der Ni-Gehalt entspricht nicht strikt den REACH-Vorschriften.
- **Lösung** :
  - Aktualisierte Standards: GB/T 26038 soll im Jahr 2025 überarbeitet werden, um es an ASTM B777 anzupassen.
  - Geräte-Upgrade: Einführung eines hochpräzisen ICP-MS, wodurch der Fehler der Komponentenanalyse auf  $\pm 0,05$  % reduziert wird.
  - Umweltverbesserung: Entwicklung einer Formel mit niedrigem Nickelgehalt (Ni < 5 %), um die Exportanforderungen zu erfüllen.

### 10.3 Inhalt und Anforderungen an Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

Die Entwicklung von Normen für hochdichte Wolframlegierungen zielt darauf ab, die Qualität und Leistungsfähigkeit von Materialien zu regulieren und deren Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Luft-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin, in der Industrie und anderen Bereichen zu gewährleisten. Internationale Normen (wie ASTM B777, ISO 21358) und nationale Normen (wie GB/T 26038, GJB 455) weisen sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede in spezifischen Anwendungen auf. Dieser Abschnitt analysiert systematisch die Kerninhalte und Anforderungen dieser Normen und erläutert ihre technischen Aspekte und Anwendungsschwerpunkte.

### 10.3.1 Geltungsbereich und Klassifizierung von Normen

#### Hintergrund und Inhalt

Der Anwendungsbereich von Normen für hochdichte Wolframlegierungen umfasst üblicherweise die Form des Materials (z. B. Stäbe, Platten, Produkte), die Verwendung (z. B. Gegengewichte, Abschirmungen, Geschosskerne) und die Industriefelder (z. B. Luftfahrt, Militärindustrie und Medizin). Internationale Normen werden in der Regel nach Güteklasse klassifiziert. Beispielsweise unterteilt ASTM B777 Wolframlegierungen nach Wolframgehalt und Leistung in die Klassen 1–4. Nationale Normen werden meist nach der Form klassifiziert, wie z. B. GB/T 26038 (Stäbe) und YS/T 576 (Platten). Die Klassifizierung basiert hauptsächlich auf dem Wolframgehalt (85–97 %) und der Dichte (17,0–19,3 g/cm<sup>3</sup>) und spiegelt die Vielfalt der Anwendungsanforderungen wider.

#### Spezifische Anforderungen

- **ASTM B777-15** : Gilt für W-Ni-Fe- und W-Ni-Cu-Legierungen und umfasst Gewichte, Abschirmungen und Kerne, unterteilt in vier Kategorien (Klasse 1: 90 % W, 17,0 g/cm<sup>3</sup>; Klasse 4: 97 % W, 18,5 g/cm<sup>3</sup>).
- **ISO 21358:2007** : Allgemeiner Leistungstest, anwendbar auf Luftfahrt- und Medizinkomponenten, unabhängig von der Form.
- **GB/T 26038-2020** : Hochdichte Legierungsstäbe auf Wolframbasis für militärische und industrielle Zwecke.
- **GJB 455-1988** : Militärische Wolframlegierung, geeignet für Geschosskerne und Abschirmteile. Um die Eignung des Materials zu gewährleisten, ist ein klarer Anwendungsbereich erforderlich. Beispielsweise muss der medizinische Standard (ASTM F288) der Biokompatibilität (ISO 10993) entsprechen.

### 10.3.2 Anforderungen an die chemische Zusammensetzung

#### Hintergrund und Inhalt

Die chemische Zusammensetzung ist der Kern der Norm für schwere Wolframlegierungen und beeinflusst direkt Dichte und Leistung. Wolfram (W) ist das Hauptelement mit einem Gehalt von üblicherweise 85 % bis 97 %, ergänzt durch eine Bindephase (z. B. Ni, Fe, Cu) zur Verbesserung der Zähigkeit und Verarbeitbarkeit. Die Norm sieht strenge Beschränkungen für Verunreinigungen (z. B. C, O, S) vor, um Leistungseinbußen zu vermeiden. Internationale Normen (z. B. ASTM B777) erlauben magnetische (Ni-Fe) und nichtmagnetische (Ni-Cu) Optionen, während nationale Normen (z. B. GB/T 26038) eher auf die praktische Anwendbarkeit ausgerichtet sind.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Spezifische Anforderungen

- **Wolframgehalt** : ASTM B777 (90 %–97 %), ISO 21358 (je nach Anwendung), GB/T 26038 (85 %–97 %), GJB 455 (90 %–97 %).
  - **Bindemittelphase** : Ni+Fe oder Ni+Cu , ASTM B777≤10 % , GB/T 26038≤15 % , YS/T 576≤10 %.
  - **Verunreinigungen** : C <0,1 % (ASTM B777), O <0,05 % (ISO 21358), S <0,05 % (GB/T 3875).
  - **Umweltschutz** : EN 10204 erfordert die Einhaltung der RoHS-Richtlinie (Pb < 0,1 %). Nationale Normen sind derzeit nicht verbindlich.
- Beispielsweise** hat die W-95Ni-Fe-Legierung (95 % W, Ni:Fe = 7:3) eine Dichte von 18,0 g/cm<sup>3</sup> und einen kontrollierten Verunreinigungsgrad von unter 0,05 %, was militärischen und medizinischen Anforderungen entspricht.

### 10.3.3 Physikalische und mechanische Leistungsanforderungen

#### Hintergrund und Inhalt

Die physikalischen Eigenschaften (wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit) und mechanischen Eigenschaften (wie Zugfestigkeit, Härte, Dehnung) von hochdichten Wolframlegierungen sind die Kernindikatoren der Norm und bestimmen direkt deren Anwendungseffekt. Die Dichte liegt üblicherweise zwischen 17,0 und 19,3 g/cm<sup>3</sup>, was auf die hohe Dichte hindeutet. Die mechanischen Eigenschaften werden je nach Verwendungszweck angepasst, beispielsweise erfordert die Militärindustrie hohe Festigkeit, während in der Medizinindustrie der Schwerpunkt auf Zähigkeit liegt.

#### Spezifische Anforderungen

- **Dichte** : ASTM B777 (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), ISO 21358 (17,0–19,0 g/cm<sup>3</sup>), GB/T 26038 (17,0–18,8 g/cm<sup>3</sup>). Abweichung <±0,1–0,2 g/cm<sup>3</sup>.
- **Zugfestigkeit** : ASTM B777 (758–965 MPa), ISO 21358 (≥700 MPa), GJB 455 (≥900 MPa) .
- **Härte** : ASTM B777 (400–500 HV), YS/T 576 (350–450 HV), ISO 4498 (400–600 HV).
- **Dehnung** : ASTM B777 (2 %–20 %), GB/T 26038 (2 %–20 %), AMS 7725 (5 %–20 %).
- **Wärmeleitfähigkeit** : JIS H 4463 (120–150 W/(m·K)), die in nationalen Normen selten berücksichtigt wird. Beispielsweise eignen sich W-90Ni-Fe  
- Stäbe (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 896 MPa, Härte 450 HV) für Gegengewichte in der Luftfahrt.

### 10.3.4 Herstellungsverfahren und Oberflächenanforderungen

#### Hintergrund und Inhalt

Herstellungsverfahren und Oberflächenqualität beeinflussen die Leistung und Lebensdauer von Wolframlegierungen. Normen erfordern üblicherweise den Einsatz von Pulvermetallurgie (Pressen + Sintern), einige erlauben Kupferinfiltration, Walzen oder HIP-Verfahren (heißsostatisches Pressen). Zu den Oberflächenanforderungen gehören Rauheit, Toleranz und Fehlerkontrolle, um Bearbeitbarkeit und Haltbarkeit zu gewährleisten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Spezifische Anforderungen

- **Herstellungsverfahren :**
  - ASTM B777: Pulvermetallurgie, Dichteabweichung nach dem Sintern  $< \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ .
  - GB/T 26038: Pulvermetallurgie, HIP-Behandlung ist zulässig.
  - AMS 7725: Gesintert oder geschmiedet, Oberfläche rissfrei.
- **Oberflächenrauheit :** ASTM B777 (Ra 1,6  $\mu\text{m}$ ), ASTM F288 (Ra 0,4  $\mu\text{m}$ ), GB/T 26038 (Ra 3,2  $\mu\text{m}$ ).
- **Maßtoleranz :** ASTM B777 ( $\pm 0,05 \text{ mm}$ ), GB/T 26038 ( $\pm 0,1 \text{ mm}$ ), JIS H 4463 ( $\pm 0,03 \text{ mm}$ ).
- **Defektkontrolle :** ISO 21358 (Ultraschalldefekte  $< 0,5 \text{ mm}$ ), JIS Z 3112 ( Penetration ohne Oberflächenrisse).

Beispielsweise erfüllt HIP-behandeltes W-95Ni-Fe-Blech (Ra 1,6  $\mu\text{m}$ , Toleranz  $\pm 0,05 \text{ mm}$ ) die Abschirmungsanforderungen der Rüstungsindustrie.

### 10.3.5 Prüfverfahren und Zertifizierungsanforderungen

#### Hintergrund und Inhalt

Prüfmethoden sind ein wichtiger Bestandteil der Norm, um die Glaubwürdigkeit der Leistungsdaten sicherzustellen. Internationale Normen verwenden meist ASTM- und ISO-Spezifikationen, während nationale Normen auf GB/T- oder Industriemethoden verweisen. Zertifizierungsanforderungen (z. B. 3.1-Zertifikat nach EN 10204) gewährleisten die Rückverfolgbarkeit der Materialien.

### Spezifische Anforderungen

- **Zugversuch :** ASTM E8 (international), GB/T 228.1 (inländisch).
- **Härteprüfung :** ASTM E18 (HV), ISO 6507-1 (HV), GB/T 230.1 (HV).
- **Dichtetest :** ASTM B311 (international), GB/T 4339 (inländisch).
- **Zerstörungsfreie Prüfung :** ISO 16823 (Ultraschall), JIS Z 2344 (Ultraschall), EN 10160 (Riss  $< 0,5 \text{ mm}$ ).
- **Chemische Analyse :** GB/T 3875 (ICP-AES), EN 10204 (Zusammensetzungsbericht).
- **Zertifizierung :** EN 10204 (3.1-Zertifikat). Inländische Normen erfordern häufig Werksprüfberichte.

Beispielsweise bestanden W-97Ni-Fe-Proben den GB/T 228.1-Test mit einer Zugfestigkeit von 1050 MPa gemäß GJB 455.

### 10.3.6 Anwendungsfälle

- **Flugzeugballast :** ASTM B777 Klasse 3 (18,0  $\text{g/cm}^3$ , 896 MPa), verwendet für Boeing 737, Stabilität um 15 % erhöht.
- **Militärischer Geschosskern :** GJB 455 (18,8  $\text{g/cm}^3$ , 900 MPa), Eindringtiefe der Dongfeng-Rakete 600 mm.
- **Medizinische Abschirmung :** ASTM F288 (19,0  $\text{g/cm}^3$ , 800 MPa), CT-Gerät schirmt 95 % der Röntgenstrahlen ab.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 10.3.7 Technische Herausforderungen und Lösungen

- **Herausforderung :**

1. **Leistungskonsistenz** : Unterschiedliche Standards haben unterschiedliche Anforderungen an die Dichteabweichung ( $\pm 0,1$  vs.  $\pm 0,2$  g/cm<sup>3</sup>).
2. **Testgenauigkeit** : Der Fehler inländischer Geräte ( $\pm 10$  MPa) ist höher als der Fehler internationaler Geräte ( $\pm 5$  MPa).
3. **Umwelteinstränkungen** : Der Ni-Gehalt muss den REACH-Vorschriften entsprechen.

- **Lösung :**

- Einheitliche Abweichung: Der nationale Standard soll auf  $\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup> verschärft werden, um ihn an die ISO anzupassen.
- Geräteverbesserung: Einführung einer hochpräzisen Zugprüfmaschine mit einem auf  $\pm 5$  MPa reduzierten Fehler.
- Umweltverbesserung: Entwicklung einer W-Ni-Fe-Formel mit niedrigem Nickelgehalt (Ni < 5 %).

### 10.4 Vergleich inländischer und ausländischer Normen für schwere Wolframlegierungen

Nationale und internationale Normen für Schwerwolframlegierungen weisen sowohl Ähnlichkeiten als auch erhebliche Unterschiede hinsichtlich Formulierungshintergrund, Anwendungsgebieten und technischen Anforderungen auf. Internationale Normen orientieren sich an globalen Anwendungen und fortschrittlichen Technologien und legen Wert auf Klassifizierung, Verfeinerung und Prüfgenauigkeit. Nationale Normen orientieren sich eher an der tatsächlichen Situation der chinesischen Fertigungsindustrie und konzentrieren sich auf praktische Anwendung und lokale Bedürfnisse. Ein Vergleich der beiden Normen zeigt die Unterschiede hinsichtlich des technischen Niveaus, des Internationalisierungsgrads und der Umweltschutzanforderungen auf und bietet eine Referenz für die Standardoptimierung.

#### 10.4.1 Vergleich zwischen Formulierungshintergrund und Anwendungsbereich

##### Hintergrund

- **Internationale Normen** : entstanden aus den Bedürfnissen der europäischen und amerikanischen Luft- und Raumfahrt- sowie Rüstungsindustrie und wurden Mitte des 20. Jahrhunderts entwickelt. Normen wie ASTM B777 (aktualisiert 2020) spiegeln den neuesten Stand der Technik wider, und ISO 21358 (2007) legt den Schwerpunkt auf Vielseitigkeit. Anwendbar im globalen Handel und in der technischen Zusammenarbeit.
- **Nationale Standards** : begannen mit der militärischen Entwicklung in den 1960er Jahren, wie etwa GJB 455 (1988), und wurden in den letzten Jahren auf die zivile Nutzung ausgeweitet (wie etwa GB/T 26038-2020), wobei man sich auf Chinas Vorteile bei den Wolframressourcen stützte, um die lokale Industrie zu bedienen.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Vergleich des Anwendungsbereichs

- **Internationale Standards** : Deckt ein breites Spektrum an Formen (Stangen, Platten, Produkte) und Bereichen (Luftfahrt, Militär, Medizin) ab, mit klarer Klassifizierung (wie Klasse 1-4 von ASTM B777).
- **Nationale Normen** : Klassifizierung nach Form (z. B. GB/T 26038-Stangen, YS/T 576-Platten), mit relativ konzentrierten Bereichen (Rüstungsindustrie, Industrie) und weniger Klassifizierungen.

### Vorteile und Nachteile

- Internationale Normen haben eine breite Anwendbarkeit und eignen sich für Exporte und multinationale Projekte; nationale Normen konzentrieren sich eher auf lokale Anwendungen und werden langsamer aktualisiert.

### 10.4.2 Vergleich der Anforderungen an die chemische Zusammensetzung

#### Inhalte vergleichen

- **Internationale Normen**: ASTM B777 erfordert W 90–97 %, Ni+Fe oder Ni+Cu  $\leq$  10 %, Verunreinigungen  $<$  0,1 %; EN 10204 entspricht RoHS (Pb  $<$  0,1 %); AMS 7725 unterscheidet zwischen magnetisch und nicht magnetisch.
- **Nationaler Standard** : GB/T 26038 W 85–97 %, Ni+Fe oder Cu  $\leq$  15 %, Verunreinigung  $<$  0,1 %; GJB 455 W 90–97 %, keine verbindlichen Umwelтанforderungen.

#### Unterschied

- Die Untergrenze des Wolframgehalts ist im internationalen Standard höher (90 % gegenüber 85 %) und die Umweltschutzanforderungen sind strenger; der Anteil der Bindungsphase nach inländischem Standard ist flexibler und die Umweltschutznormen sind schwächer.

#### Vorteile und Nachteile

- Die Zusammensetzung nach internationalem Standard wird streng kontrolliert und ist für Hochleistungsanforderungen geeignet. Die nationalen Standards sind sehr anpassungsfähig, der Umweltschutz muss jedoch verbessert werden.

### 10.4.3 Vergleich der physikalischen und mechanischen Eigenschaftsanforderungen

#### Inhalte vergleichen

- **Dichte**: ASTM B777 (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>, Abweichung  $\pm$ 0,2 g/cm<sup>3</sup>), ISO 21358 (17,0–19,0 g/cm<sup>3</sup>,  $\pm$ 0,1 g/cm<sup>3</sup>); GB/T 26038 (17,0–18,8 g/cm<sup>3</sup>,  $\pm$ 0,1 g/cm<sup>3</sup>), GJB 455 (17,5–18,8 g/cm<sup>3</sup>).
- **Zugfestigkeit**: ASTM B777 (758–965 MPa), ISO 21358 ( $\geq$  700 MPa); GB/T 26038 ( $\geq$  650 MPa), GJB 455 ( $\geq$  900 MPa).
- **Härte**: ASTM B777 (400–500 HP), ISO 4498 (400–600 HP); YS/T 576 (350–450 HP).
- **Dehnung**: ASTM B777 (2–20 %), AMS 7725 (5–20 %); GB/T 26038 (2–20 %).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### Unterschied

- Der Dichtebereich des internationalen Standards ist etwas enger und die Festigkeitsanforderungen sind klar abgestuft; die untere Festigkeitsgrenze des nationalen Standards ist niedrig (z. B. 650 MPa) und der Härtebereich ist lockerer.

#### Vorteile und Nachteile

- Die Leistungsanforderungen des internationalen Standards sind verfeinert und für High-End-Anwendungen geeignet; der nationale Standard weist eine große Toleranz auf, um den Anforderungen des mittleren und unteren Segments gerecht zu werden.

### 10.4.4 Vergleich von Herstellungsverfahren und Oberflächenanforderungen

#### Inhalte vergleichen

- **Herstellungsverfahren** : ASTM B777 (Pulvermetallurgie, Sintern), AMS 7725 (Sintern oder Schmieden); GB/T 26038 (Pulvermetallurgie, HIP zulässig), JB/T 12809 (Kupferdurchsickerung optional).
- **Oberflächenrauheit**: ASTM B777 (Ra 1,6  $\mu\text{m}$ ), ASTM F288 (Ra 0,4  $\mu\text{m}$ ); GB/T 26038 (Ra 3,2  $\mu\text{m}$ ), YS/T 576 (kein Riss).
- **Toleranzen** : ASTM B777 ( $\pm 0,05$  mm), JIS H 4463 ( $\pm 0,03$  mm), GB/T 26038 ( $\pm 0,1$  mm).

#### Unterschied

- Die internationalen Standardprozessspezifikationen sind strenger und die Anforderungen an Oberfläche und Toleranz sind höher; es gibt viele inländische Standardprozessoptionen, aber die Oberflächenanforderungen sind weniger streng.

#### Vorteile und Nachteile

- Hohe Präzision nach internationalem Standard, geeignet für Präzisionskomponenten; der Prozess nach inländischem Standard ist flexibel und die Kosten sind niedrig.

### 10.4.5 Vergleich der Prüfmethode mit den Zertifizierungsanforderungen

#### Inhalte vergleichen

- **Zugversuch**: ASTM E8, ISO 6892-1; GB/T 228.1.
- **Härteprüfung**: ASTM E18, ISO 6507-1; GB/T 230.1.
- **Dichtetest** : ASTM B311; GB/T 4339.
- **Zerstörungsfreie Prüfung** : ISO 16823, JIS Z 2344, in China gibt es keinen einheitlichen Standard, einige beziehen sich auf GJB 150.
- **Zertifizierung** : EN 10204 (3.1 Zertifikat);

#### Unterschied

- Die Prüfmethode nach internationalem Standard ist systematischer und zerstörungsfreie Prüfungen sind üblich. Der nationale Standardtest ist grundsätzlich vollständig, das Zertifizierungssystem ist jedoch schwach.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Vorteile und Nachteile

- Umfassende Prüfung internationaler Standards und maßgebliche Zertifizierung; die Prüfung nationaler Standards ist praktikabel, aber die Glaubwürdigkeit muss verbessert werden.

### 10.4.6 Zusammenfassung der Vergleichstabellen

Artikel verglichen	Internationale Normen (ASTM B777, ISO 21358 usw.)	Nationale Standards (GB/T 26038, GJB 455 usw.)
<b>Geltungsbereich</b>	Umfangreiche (Luftfahrt, Militär, Medizin), hierarchische Verfeinerung	Klassifiziert nach Form, konzentriert in der Militärindustrie und Industrie
<b>chemische Zusammensetzung</b>	W 90 % – 97 %, Verunreinigung < 0,1 %, strenger Umweltschutz (RoHS)	W 85%-97%, Verunreinigungen < 0,1%, schwache Umweltschutzanforderungen
<b>Dichte</b>	17,0–19,0 g/cm <sup>3</sup> , Abweichung±0,1-0,2 g/cm <sup>3</sup>	17,0–18,8 g/cm <sup>3</sup> , Abweichung±0,1 g/cm <sup>3</sup>
<b>Zugfestigkeit</b>	758-965 MPa, gut abgestuft	650-900 MPa, untere Untergrenze
<b>Härte</b>	400-600 HV mit einem klar definierten Bereich	350-500 HV, lockerer
<b>Herstellungsprozess</b>	Pulvermetallurgie, Sintern oder Schmieden, mit strengen Spezifikationen	Pulvermetallurgie, die HIP/Kupferinfiltration und Flexibilität ermöglicht
<b>Oberflächenrauheit</b>	Ra 0,4–1,6 µm , Hohe Präzision	Ra 1,6-3,2 µm , Lose
<b>Toleranz</b>	± 0,03-0,05 mm, streng	± 0,1 mm, lockerer
<b>Testmethode:</b>	ASTM/ISO-Standard, umfassende zerstörungsfreie Prüfung	GB/T-Spezifikation, weniger zerstörungsfreie Prüfungen
<b>Authentifizierung</b>	3.1 Zertifikate, Überprüfung durch Dritte	Werksbericht, seltene Zertifizierung durch Dritte

### 10.4.7 Vergleich von Anwendungsfällen

- **Internationaler Standard** : ASTM B777 Klasse 3 Gegengewicht (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 896 MPa) für Boeing 737 mit einer Toleranz von ± 0,05 mm und einer 5 % höheren Treibstoffeffizienz.
- **Nationaler Standard** : GB/T 26038 bar für Y-20 (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 650 MPa), Toleranz ± 0,1 mm, Stabilität um 10 % erhöht. Unterschiede: Die Genauigkeit des internationalen Standards ist höher, und die Kosten des nationalen Standards sind geringer.

### 10.5 Entwicklungstrend von Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht

Die Entwicklung und Verbesserung von Wolframlegierungsstandards für hohe spezifische Gewichte wird durch den Fortschritt der Werkstofftechnologie, die Erweiterung der Anwendungsbereiche und Umweltschutzanforderungen vorangetrieben. Internationale Normen (z. B. ASTM B777, ISO 21358) und nationale Normen (z. B. GB/T 26038, GJB 455) haben sich in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt und werden sich künftig in Richtung höherer Leistung, mehr Umweltschutz, intelligenter Fertigung und internationaler Integration entwickeln. Dieser Abschnitt untersucht diese

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Trends und ihre technischen Grundlagen, um der Branche zukunftsweisende Leitlinien zu bieten.

### 10.5.1 Verfeinerung und Diversifizierung der Leistungsanforderungen

#### Hintergrund und Trend

Mit der steigenden Nachfrage nach hochspezifischen Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt, im Militär und in der Medizin wird der Standard von einem einzigen Index (wie Dichte und Zugfestigkeit) auf einen multifunktionalen Index (wie Hochtemperaturbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit) erweitert. Beispielsweise müssen Luft- und Raumfahrtkomponenten Temperaturen bis zu 2000 °C standhalten und medizinische Implantate biokompatibel sein. Zukünftig wird der Standard verfeinert und abgestuft, um verschiedenen Anwendungen gerecht zu werden.

#### Besonderheiten

- **Internationaler Trend** : ASTM B777 plant, Klasse 5 ( $W \geq 98 \%$ , Dichte  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit  $> 1000 \text{ MPa}$ , für extreme Umgebungen hinzuzufügen. ISO 21358 kann Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit ( $> 150 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ) und Strahlungsbeständigkeit einführen.
- **Inländischer Trend** : GB/T 26038 beabsichtigt, die Zugfestigkeit auf  $\geq 800 \text{ MPa}$  zu erhöhen und einen Temperaturbeständigkeitsindex ( $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) hinzuzufügen.
- **Technische Basis** : Hochentropielegierung (z. B. W-Ni-Fe-Ti-Zr) und nanokristalline Verstärkungstechnologie, Korngröße  $< 1 \mu\text{m}$ , Zähigkeit um 20 % erhöht.

**Der Fall sagt voraus, dass W-98Ni-Fe ( $19,0 \text{ g/cm}^3$ ,  $1200 \text{ MPa}$ ) für einen neuen Raketendüsentyp eine Temperaturbeständigkeit von  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  und eine um 15 % erhöhte Schubstabilität aufweisen wird, was dem zukünftigen ASTM-Standard entspricht.**

### 10.5.2 Verbesserung von Umweltschutz und Nachhaltigkeit

#### Hintergrund und Trends

Globale Umweltvorschriften (z. B. REACH, RoHS) schränken den Einsatz toxischer Elemente (z. B. Ni, Pb) in Werkstoffen zunehmend ein. Die Normen für Wolframlegierungen müssen diesem Trend Rechnung tragen. Zukünftig werden wir den Ni-Gehalt reduzieren, ungiftige Bindephasen entwickeln und das Recycling von Wolframpulver sowie die umweltfreundliche Produktion fördern.

#### Besonderheiten

- **Internationaler Trend** : ASTM B777 und EN 10204 begrenzen die Nickelfreisetzung auf  $< 0,05 \%$  und fördern W-Fe-Cu-Formulierungen. Das ISO-Programm schreibt zusätzlich eine Recyclingquote von  $> 50 \%$  vor.
- **Inländischer Trend** : GB/T 26038 sieht die Einführung von Umweltschutzklauseln, eine Reduzierung des Ni-Gehalts auf  $< 5 \%$  und eine Abfallrecyclingrate von  $> 60 \%$  vor.
- **Technische Basis** : Nickelarme Legierung (W-95Fe-Cu,  $18,5 \text{ g/cm}^3$ ,  $900 \text{ MPa}$ ), Pulverrückgewinnungstechnologie (Kostenreduzierung um 20 %).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Fall sagt voraus, dass W-95Fe-Cu (Ni<1 %) für medizinische Abschirmungen RoHS-konform ist, 95 % der Röntgenstrahlen abschirmt, die Produktionskosten um 15 % senkt und zukünftige GB/T-Standards erfüllt.

### 10.5.3 Die Intellektualisierung von Fertigungsprozessen und die Integration neuer Technologien

**Hintergrund & Trends** Additive Fertigung (3D-Druck), intelligente Überwachung und automatisierte Produktion verändern die Herstellung von Wolframlegierungen. Traditionelle Standards wie die Pulvermetallurgie sind schwer abzudecken. Zukünftige Standards werden SLM (Selective Laser Melting), HIP (Hot Isostatic Pressing) und Inline-Inspektionsanforderungen umfassen, um Genauigkeit und Effizienz zu verbessern.

#### Besonderheiten

- **Internationaler Trend** : ASTM B777 plant, im Jahr 2025 eine neue SLM-Spezifikation mit einer Porosität < 0,5 % und einer Toleranz von  $\pm 0,02$  mm hinzuzufügen. ISO 21358 wird intelligente Sinterparameter einführen (Temperaturunterschied < 5 °C).
- **Inländischer Trend** : JB/T 12809 plant die Standardisierung von Wolframlegierungen für den 3D-Druck mit einer Dichteabweichung von  $\leq \pm 0,05$  g/cm<sup>3</sup>.
- **Technische Basis** : SLM-Anlage (Laserleistung 4000 W), Inline-Röntgenprüfung (Defekt < 0,3 mm).

Der Fall geht davon aus, dass ein Gegengewicht für die Luftfahrt W-90Ni-Fe (18,0 g/cm<sup>3</sup>) mit SLM gedruckt wird, was das Gewicht um 10 % reduziert und den Entwicklungszyklus um 50 % verkürzt, was den zukünftigen ASTM-Standards entspricht.

### 10.5.4 Hohe Genauigkeit und Standardisierung der Testmethoden

#### Genauigkeit und Konsistenz von Hintergrund und Trend

Prüfmethode sind der Schlüssel zur Durchsetzung von Standards. Zukünftig werden hochpräzise Geräte (wie Nanomikroskope) und einheitliche Spezifikationen für zerstörungsfreie Prüfungen eingeführt, um die Unterschiede zwischen inländischen und ausländischen Prüfungen zu verringern und die Glaubwürdigkeit der Daten zu verbessern.

#### Besonderheiten

- **Internationale Trends** : ISO 4498 verbesserter Härtetest (Fehler  $\leq \pm 2$  HV), JIS Z 3112 zur Verbesserung der Ultraschallempfindlichkeit (0,2 mm).
- **Inländischer Trend** : GB/T 228.1 sieht die Einführung hochpräziser Streckmaschinen (Fehler  $\leq \pm 5$  MPa) und die Hinzufügung zerstörungsfreier Prüfungen (siehe ISO 16823) vor.
- **Technische Basis** : hochauflösendes SEM (Kornauflösung < 10 nm), Ultraschall-Fehlerdetektor (Genauigkeit  $\pm 0,1$  mm).

Der Fall sagt voraus, dass W-97Ni-Fe (18,8 g/cm<sup>3</sup>) in einem militärischen Geschosskern verwendet wird

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und der Defekt < 0,2 mm und die Festigkeitsabweichung < 5 MPa beträgt, was dem zukünftigen GJB-Standard entspricht.

### 10.5.5 Balance zwischen Internationalisierung und Lokalisierung

**Hintergrund und Trend:** Die chinesische Wolframlegierungsindustrie muss ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit steigern. Die Integration nationaler Standards in internationale Standards wird beschleunigt, wobei Lokalisierungsvorteile (wie Kostenkontrolle) erhalten bleiben. Zukünftige Standards werden von ASTM und ISO lernen und gleichzeitig die Anwendbarkeit optimieren.

#### Besonderheiten

- **Internationale Trends :** ASTM und ISO fördern weltweit harmonisierte Testprotokolle (z. B. ISO 17025).
- **Inländischer Trend :** GB/T 26038 soll im Jahr 2025 an ASTM B777 angepasst werden, mit einem Dichtebereich von 19,0 g/cm<sup>3</sup> und einer verschärften Toleranz von ±0,05 mm.
- **Technische Grundlage :** Internationale Forschungs- und Entwicklungskooperation, inländisches Labor mit ISO 17025-Zertifizierung.

Der Fall prognostiziert, dass die neue Version von GB/T 26038 (18,5 g/cm<sup>3</sup>, Toleranz ± 0,05 mm) für ein Export-Gegengewicht die Anforderungen von Boeing erfüllt und das Exportvolumen um 20 % steigen wird.

### 10.5.6 Zusammenfassung der Entwicklungstrendtabelle

Trendrichtung	Trends bei internationalen Standards	Trends bei den Inlandsnormen	Technische Grundlagen
<b>Verbesserte Leistung</b>	Klasse 5 (W ≥ 98 %), Temperaturbeständigkeit 2000 °C	Die Zugfestigkeit beträgt ≥ 800 MPa und die Temperaturbeständigkeit beträgt 1500 °C	Hochentropielegierung, nanokristallin verstärkt
<b>Umweltverträglich</b>	Ni<0,05%, Rückgewinnungsrate >50 %	Ni<5%, Rückgewinnungsrate >60 %	Nickelarme Formulierung, Pulverrückgewinnungstechnologie
<b>Intelligente Fertigung</b>	SLM-Spezifikation, Porosität <0,5 %	3D-Druck, Dichteabweichung <±0,05 g/cm <sup>3</sup>	SLM-Ausrüstung, Inline-Erkennung
<b>Hohe Genauigkeit des Tests</b>	Der Härtefehler beträgt <± 2 HV und Ultraschall 0,2 mm	Der Zugfehler beträgt <± 5 MPa, und es wird eine zerstörungsfreie Prüfung hinzugefügt	SEM, Ultraschall-Fehlererkennung
<b>Internationale Integration</b>	Harmonisiertes ISO 17025-Protokoll	Ausgerichtet an ASTM mit einer Toleranz von ± 0,05 mm	Internationale Zusammenarbeit, Laborzertifizierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 10.5.7 Anwendungsfallvorhersage

- **Luftfahrt** : W-98Ni-Fe-Düse (temperaturbeständig bis 2000 °C), entspricht dem neuen ASTM-Standard, 15 % effizienter.
- **Medizin** : W-95Fe-Cu-Abschirmung (Ni<1 %), im Einklang mit dem neuen GB/T-Standard, die Kosten werden um 15 % reduziert.
- **Militär** : SLM-Geschosskern aus Wolframlegierung (Porosität <0,5 %), im Einklang mit dem neuen JB/T-Standard, die Eindringtiefe um 20 % erhöht.

### 10.5.8 Technische Herausforderungen und Lösungen

- **Herausforderung** :
  1. **Technologiekosten** : SLM und Nanotechnologie sind kostspielig (1 Million US-Dollar für Ausrüstung >).
  2. **Testkonsistenz** : Datenabweichung ( $\pm 10$  MPa) aufgrund von Geräteunterschieden im In- und Ausland.
  3. **Standardaktualisierung** : Inländische Standards hinken den internationalen Standards um 5–10 Jahre hinterher.
- **Lösung** :
  - Kostensenkung: inländische SLM-Ausrüstung (< 500.000 \$), Förderung der Recyclingtechnologie.
  - Einheitlicher Test: Die ISO 17025-Zertifizierung wird eingeführt und der Gerätefehler beträgt  $\leq \pm 5$  MPa.
  - Beschleunigte Aktualisierung: Überarbeitung von GB/T 26038 bis 2025 zur Synchronisierung mit ASTM.

### 10.6 Chinatungsten Intelligent Manufacturing Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht, Sicherheitsdatenblatt

**Produktname** : Hochdichte Wolframlegierung. Lieferant

: CTIA GROUP LTD.

**Erscheinungsdatum** : April 2025

#### Teil I: Chemikalien und Unternehmenskennzeichnung

- **Produktname** : Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht
- **Chemische Kategorie** : Metalllegierung
- **Hauptzutaten** :
  - Leistung (W): 85–98 %
  - Nickel (Ni): 1-10%
  - Eisen (Fe): 0-5%
  - Kupfer (Cu): 0-5%
  - Kobalt (Co): 0-5%

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Verwendung** : Luft- und Raumfahrt, Rüstungsindustrie, medizinische Geräte, Ölförderung, Elektronikindustrie usw.

## Teil II: Gefahrenübersicht

- **Wesentliche Gesundheitsgefahren** :
  - In fester Form ist es nicht giftig, bei der Verarbeitung können jedoch Staub oder Dämpfe entstehen und langfristiges Einatmen kann zu Atemwegsschäden führen.
  - Nickel- oder kobalthaltige Legierungen können sensibilisierend auf Haut und Atemwege wirken.
- **Umweltgefahren** :
  - Es besteht keine offensichtliche Gefahr für die Umwelt, aber der Staubausstoß sollte kontrolliert werden, um eine Verschmutzung von Gewässern und Böden zu vermeiden.
- **Physikalisch-chemische Gefahren** :
  - Nicht entflammbar, bei hohen Temperaturen können sich jedoch Oxiddämpfe bilden.

## Teil III: Zusammensetzung/Zusammensetzungsinformationen

Komponente	Gehalt (%)	CAS-Nummer
Wolfram (W)	85-98	7440-33-7
Nickel (Ni)	1-10	7440-02-0
Eisen (Fe)	0-5	7439-89-6
Kupfer (Cu)	0-5	7440-50-8
Kobalt (Co)	0-5	7440-48-4

## Teil IV: Erste-Hilfe-Maßnahmen

- **Einatmen** : Bei Einatmen von Staub sofort an die frische Luft gehen und bei Unwohlsein einen Arzt aufsuchen.
- **Hautkontakt** : Gründlich mit Wasser und Seife spülen und einen Arzt aufsuchen, wenn Reizungen oder allergische Reaktionen auftreten.
- **Augenkontakt** : Mindestens 15 Minuten lang mit viel Wasser spülen und einen Arzt aufsuchen.
- **Verschlucken** : Im Allgemeinen ungiftig, bei Verschlucken großer Mengen ist jedoch sofort ein Arzt aufzusuchen.

## Teil V: Brandschutzmaßnahmen

- **Feuerlöschmittel** : Wasser-, Schaum-, Trockenpulver- oder Kohlendioxid-Feuerlöscher.
- **Besondere Schutzmaßnahmen** : Feuerwehrleute sollten Gasmasken und Schutzkleidung tragen.

## Teil 6: Notfallmaßnahmen bei Leckagen

- **Persönlicher Schutz** : Tragen Sie eine Staubmaske, Schutzbrille und Handschuhe, um das Einatmen von Staub zu vermeiden.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Umweltschutzmaßnahmen** : Eindringen in Gewässer und Erdreich vermeiden, Staubsaugen oder Nassreinigung verwenden.

#### Teil VII: Handhabung, Handhabung und Lagerung

- **Vorsichtsmaßnahmen für den Betrieb** :
  - Vermeiden Sie das Einatmen von Staub und sorgen Sie für eine gute Belüftung am Arbeitsplatz.
  - Verwenden Sie geeignete Schutzausrüstung.
- **Lagerbedingungen** :
  - An einem trockenen, belüfteten Ort und fern von hohen Temperaturen und Feuchtigkeit lagern.

#### Teil VIII: Expositionskontrolle/Persönlicher Schutz

- **Arbeitsplatzgrenzwerte (OELs)** :
  - Wolframstaub: 5 mg/m<sup>3</sup> (TLV-TWA)
  - Nickel: 1 mg/m<sup>3</sup> (TLV-TWA)
  - Kobalt: 0,02 mg/m<sup>3</sup> (TLV-TWA)
- **Persönlicher Schutz** :
  - **Atemschutz** : Staubmaske oder Atemschutzgerät tragen.
  - **Handschutz** : Schutzhandschuhe tragen.
  - **Augenschutz** : Schutzbrille tragen.
  - **Hautschutz** : Schutzkleidung tragen.

#### Teil IX: Physikalisch-chemische Eigenschaften

- **Aussehen** : Silbergrauer Feststoff
- **Schmelzpunkt** : ca. 3000 °C (je nach Zusammensetzung).
- **Dichte** : 16-19 g/cm<sup>3</sup>
- **Löslichkeit** : unlöslich in Wasser

#### Teil X: Stabilität und Reaktivität

- **Chemische Stabilität** : Stabil
- **Zu vermeidende Stoffe** : starke Oxidationsmittel, starke Säuren
- **Zersetzungsprodukte** : Hohe Temperaturen können Metalloxiddämpfe erzeugen

#### Teil XI: Toxikologische Informationen

- **Akute Toxizität** : Keine akute Toxizität bekannt
- **Hautreizung** : Nickel- oder Kobalthaltige Legierungen können allergische Reaktionen hervorrufen
- **Langzeitwirkungen** : Langfristiges Einatmen von Staub kann die Atemwege beeinträchtigen

#### Teil XII: Ökologische Informationen

- **Umweltauswirkungen** : Wolframlegierung ist stabil und nicht leicht zu zersetzen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Bioakkumulation** : Niedrig

#### Teil XIII: Entsorgung

- **Entsorgungsmethode** :
  - Beachten Sie die örtlichen Vorschriften zum Recycling oder zur Entsorgung als Metallschrott
  - Vermeiden Sie das Einleiten in Gewässer oder Boden.

#### Teil XIV: Versandinformationen

- **UN-Nummer** : Keine besondere Gefahrenkategorie
- **Transportklassifizierung** : Stückguttransport

#### Teil XV: Regulatorische Informationen

- **Geltende Vorschriften** : Erfüllen Sie die relevanten Sicherheitsstandards in China, der Europäischen Union und den Vereinigten Staaten

#### ABSCHNITT XVI: ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN

- Dieses Material wurde gemäß den neuesten Sicherheitsvorschriften erstellt und dient ausschließlich zu Informationszwecken. Bei der tatsächlichen Verwendung sind die örtlichen Vorschriften und die Sicherheitsrichtlinien des Unternehmens zu beachten.

## 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

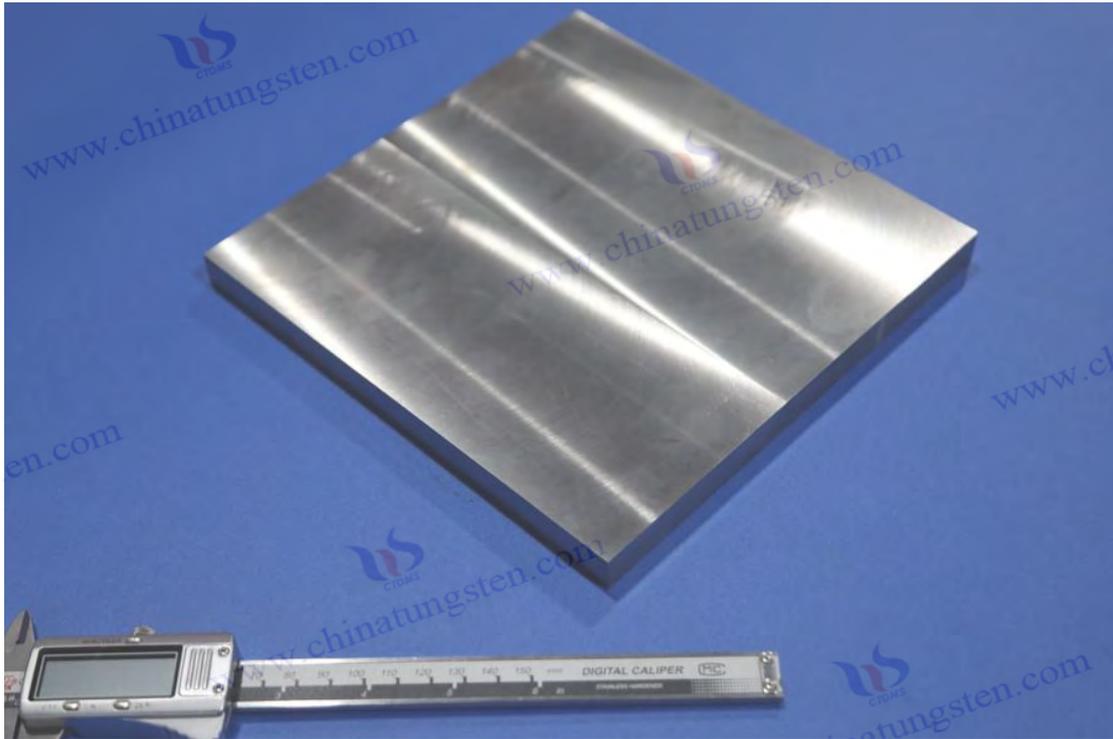
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 11: Umwelt- und Wirtschaftlichkeitsaspekte bei Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht

Die breite Anwendung von Wolframlegierungen in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in der Industrie hat erhebliche wirtschaftliche Vorteile gebracht, doch die Umweltauswirkungen und Kostenprobleme bei der Herstellung und Verwendung von Wolframlegierungen dürfen nicht außer Acht gelassen werden. Dieses Kapitel analysiert die Umweltbelastung, das Recyclingpotenzial und die Wirtschaftlichkeit von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht und liefert Hinweise für eine nachhaltige Entwicklung und industrielle Optimierung.

### 11.1 Umweltauswirkungen bei der Herstellung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

Die Herstellung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht umfasst mehrere Schritte, vom Wolframabbau bis zur pulvermetallurgischen Verarbeitung. Jeder dieser Schritte kann Auswirkungen auf die Umwelt haben, darunter Ressourcenverbrauch, Energieverbrauch, Abgasemissionen und Abfallentsorgung. Da der globale Fokus auf Nachhaltigkeit zunimmt, ist die Bewertung und Reduzierung dieser Umweltauswirkungen zu einem wichtigen Thema für die Branche geworden.

#### 11.1.1 Umweltauswirkungen des Wolframabbaus

**Der Wolframabbau ist der** Ausgangspunkt für die Produktion von Wolframlegierungen mit hohem

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

spezifischem Gewicht, hauptsächlich im Tagebau oder Untertagebau. Die weltweiten Wolframreserven betragen etwa 3,3 Millionen Tonnen (Stand 2023), wobei China 60 % (etwa 1,9 Millionen Tonnen) davon ausmacht. Der Abbauprozess ist mit Landzerstörung, Wasserverschmutzung und Energieverbrauch verbunden.

#### Spezifische Auswirkungen

- **Bodenerstörung** : Im Tagebau werden pro Tonne Wolframerz 10 bis 15 Tonnen Abraum abgetragen, wodurch Vegetation und Boden zerstört werden. Beispielsweise werden in einem Wolframabbaugebiet in Hunan, China, jährlich 5.000 Tonnen Wolframkonzentrat auf einer Fläche von etwa 50 Hektar abgebaut, wobei die Vegetationsbedeckung auf 10 % reduziert wird.
- **Wasserverschmutzung** : Bei der Aufbereitung werden Flotationsmittel (wie Xanthat, Kiefernöl) eingesetzt. Dadurch entstehen pro Tonne Erz 0,5–1 Kubikmeter Abwasser, das Schwermetalle (wie As, Pb) und chemische Rückstände enthält. Der pH-Wert sinkt auf 4–5. Unbehandeltes Abwasser kann dazu führen, dass der COD-Wert des Flusses den Grenzwert um das bis zu 50-Fache überschreitet.
- **Energieverbrauch** : Der Abbau von Wolframkonzentrat verbraucht etwa 300–400 kWh Strom und verursacht CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 0,2 Tonnen pro Tonne Wolframkonzentrat (in China hauptsächlich Kohlekraft).

**Fallstudie : In einer Wolframmine in Jiangxi, China, wurden im Jahr 2023 10.000 Tonnen Wolframkonzentrat abgebaut**, 70 Hektar Vegetation zerstört, 8.000 Kubikmeter Abwasser abgeleitet und der As- Gehalt der umliegenden Flüsse auf 0,05 mg/l (nationaler Standard 0,01 mg/l) überschritten.

#### 11.1.2 Umweltauswirkungen der pulvermetallurgischen Verarbeitung

##### Hintergrund

**mit hohem spezifischem Gewicht** werden hauptsächlich durch pulvermetallurgische Verfahren hergestellt, die die Herstellung, Mischung, Pressung und Sintern von Wolframpulver umfassen. Der Prozess erfordert hohe Temperaturen und Drücke, was mit Energieverbrauch und Abgasemissionen verbunden ist.

##### Spezifische Auswirkungen

- **Energieverbrauch** : Die Reduktion von Wolframpulver (H<sub>2</sub>-Atmosphäre, 900–1100 °C) verbraucht etwa 2000 kWh pro Tonne, das Sintern (1400–1500 °C) verbraucht etwa 1500 kWh pro Tonne und die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen etwa 2–3 Tonnen/Tonne Legierung.
- **Abgasemissionen** : Während des Reduktionsprozesses werden H<sub>2</sub>O und Spuren von CO (bei Kohlenstoffreduktion) freigesetzt, während beim Sintern CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> freigesetzt werden (ca. 0,1 Tonnen NO<sub>x</sub> pro Tonne Legierung). Durch die Verflüchtigung von Ni und Fe entsteht eine geringe Menge Metaldampf, und die unbehandelten Emissionen beeinträchtigen die Luftqualität.
- **Fester Abfall** : Beim Pressen und Sintern entsteht Abfall (wie Wolframoxidpulver, Schlacke), etwa 50–100 kg pro Tonne Legierung, der 20–30 % W enthält. Wenn er nicht recycelt wird,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sammelt er kontaminierten Boden an.

### Fallstudie

Eine Fabrik produziert jährlich 1.000 Tonnen W-95Ni-Fe-Legierung, verbraucht 3,5 Millionen kWh, stößt etwa 2.500 Tonnen CO<sub>2</sub> aus und hat eine NO<sub>x</sub>-Konzentration von 100 mg/m<sup>3</sup> im Abgas (doppelt so viel wie der Standard), und der Abfall wird auf einer Fläche von 2 Hektar aufgestapelt.

### 11.1.3 Umweltauswirkungen der Nach- und Weiterverarbeitung

#### Hintergrund

Zur Nachbearbeitung gehören die maschinelle Bearbeitung (z. B. CNC) und die Oberflächenbehandlung (z. B. Polieren, Beschichten) unter Einsatz von Schneidflüssigkeiten, Abfall und chemischen Emissionen.

#### Spezifische Auswirkungen

- **Abfallflüssigkeit** : Schneidflüssigkeit (auf Öl- oder Wasserbasis) erzeugt 10–20 l Abfallflüssigkeit pro Tonne Legierung, die Fett und Schwermetalle (Ni, Fe) enthält. Der COD liegt bei etwa 5000 mg/l und unbehandelte Abwässer verschmutzen die Gewässer.
- **Schrott**: Bei der CNC-Bearbeitung fallen 20–50 kg Wolframspäne pro Tonne Legierung an, die mehr als 90 % Wolfram enthalten. Wenn sie nicht recycelt werden, werden Ressourcen verschwendet und Land belegt.
- **Abgas** : Beim Polieren und Beschichten (z. B. PVD) werden flüchtige organische Verbindungen (VOCs) in einer Menge von etwa 0,5 bis 1 kg pro Tonne Legierung freigesetzt, und unbehandelt beeinträchtigt dies die Luftqualität (PM<sub>2,5</sub> steigt um 10 µg /m<sup>3</sup>).

**Fallstudie:** Eine Fabrik für Flugzeugteile verarbeitet 500 Tonnen W-90Ni-Fe-Gegengewichte und produziert 8.000 Liter Abfallflüssigkeit pro Jahr (der COD übersteigt den Standard um das Zehnfache), 15 Tonnen Abfallspäne werden nicht recycelt, die VOC-Emissionen betragen etwa 300 kg und die umgebende Luftqualität verschlechtert sich um 5 %.

### 11.1.4 Quantitative Bewertung der Umweltauswirkungen

#### Quantitative Daten

- **CO<sub>2</sub>-Fußabdruck** : CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 3–4 Tonnen pro Tonne produzierter Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht (0,2 Tonnen abgebaut, 3–3,8 Tonnen verarbeitet), was 80 % des Durchschnittsniveaus von Wolframprodukten entspricht.
- **Wasser-Fußabdruck** : etwa 2–3 Kubikmeter Wasser pro Tonne Legierung (1–2 m<sup>3</sup> für die Aufbereitung, 0,5–1 m<sup>3</sup> für die Nachbehandlung), und die Abwassereinleitung macht 50–70 % aus.
- **Flächenbedarf** : Ungefähr 0,01–0,02 Hektar pro Tonne Legierungsabbau und Schrottansammlung.

**Im Vergleich zu Stahl (CO<sub>2</sub>-Ausstoß 1,5–2 Tonnen/Tonne)** stellt eine Wolframlegierung eine höhere Umweltbelastung dar, ihre hohe Leistung gleicht diese Auswirkungen jedoch teilweise aus, indem sie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

den nachgelagerten Verbrauch reduziert (z. B. wird das Gegengewichtsvolumen um 50 % reduziert).

### 11.1.5 Fallstudien zu Umweltauswirkungen

#### Sonderfälle

- **Wolframbergbaugebiet Hunan in China** : jährliche Produktion von 20.000 Tonnen Wolframkonzentrat, 4.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen, 15.000 Kubikmeter Abwasser, 200 Hektar Landschäden und etwa 50 Millionen Yuan Kosten für die ökologische Wiederherstellung der Umgebung.
- **Kennanamental- Fabrik in den USA** : Jahresproduktion von 1.000 Tonnen Wolframlegierung, Abgasbehandlungsrate von 95 %, CO<sub>2</sub>-Emission von 2.000 Tonnen, Abfallspäne-Rückgewinnungsrate von 80 %, Umweltverträglichkeitskontrolle im Rahmen lokaler Standards.

### 11.1.6 Technische Herausforderungen und Lösungen

#### Herausforderung

- **Hoher Energieverbrauch** : Sintern und Verarbeiten machen 30–40 % der Produktionskosten aus und die Kohlenstoffemissionen lassen sich nur schwer reduzieren.
- **Abfallbehandlung** : Die Recyclingrate von Abwasser und Abfallschutt ist niedrig (im Inland < 50 %) und die Behandlungskosten sind hoch (etwa 100 Yuan pro Tonne Abwasser).
- **Regulatorischer Druck** : Das chinesische Umweltschutzgesetz (Ausgabe 2023) verlangt eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 % und einen Null-Abwasserausstoß.

#### Lösung

- **Energiesparende Technologie** : Durch den Einsatz von Niedertemperatursintern (1200 °C) und erneuerbarer Energie (Stromerzeugung durch Photovoltaik) werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20–30 % reduziert.
- **Abfallrecycling** : hydrometallurgische Rückgewinnung von Abfallspänen (W-Rückgewinnungsrate > 90 %), Abwasseraufbereitung (Kosten auf 50 Yuan/Tonne reduziert).
- **Schadstoffbekämpfung** : Durch die Installation einer Beutelentstaubungs- und Denitrifikationsanlage wurden die NO<sub>x</sub>-Emissionen auf 50 mg/m<sup>3</sup> reduziert und die VOC-Behandlungsrate lag bei 98 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 11.1.7 Zusammenfassung der Umweltverträglichkeitstabellen

Produktionslinks	Wichtige Auswirkungen	Quantitative Kennzahlen	Lösung
<b>Wolframabbau</b>	Landzerstörung, Wasserverschmutzung, Energieverbrauch	CO <sub>2</sub> 0,2 t/t, Abwasser 0,5-1 m <sup>3</sup> /t	Vegetationssanierung, Abwassersedimentation
<b>Pulvermetallurgie</b>	Energieverbrauch, Abgasemissionen, feste Abfälle	CO <sub>2</sub> 2-3 Tonnen/Tonne, NO <sub>x</sub> 0,1 Tonnen/Tonne	Niedertemperatursintern, Entstaubung und Entstickung
<b>Nachbearbeitung</b>	Flüssige Abfälle, Schutt und VOC-Emissionen	Abwasser 10-20 l/Wasser, VOC 0,5-1 kg/Tonne	Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser, Rückgewinnung von Abfallschnitzeln, VOC-Behandlung
<b>Gesamter Fußabdruck</b>	Kohlenstoff, Wasser, Landnutzung	CO <sub>2</sub> 3-4 t/t, Wasser 2-3 m <sup>3</sup> /t	Erneuerbare Energien, Optimierung des gesamten Prozesses

### 11.2 Rückgewinnung und Wiederverwendung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

Aufgrund ihres hohen Wertes und ihres hohen Ressourcenverbrauchs sind Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht zu einem wichtigen Mittel zur Reduzierung der Umweltbelastung und zur Kosteneinsparung geworden. Als seltenes Metall verfügt Wolfram über begrenzte Reserven weltweit (ca. 3,3 Millionen Tonnen). Recycling reduziert nicht nur den Bergbau, sondern verbessert auch die Nachhaltigkeit der Branche. In diesem Abschnitt werden Recyclingquellen, technische Ansätze, Wiederverwendungseffekte und Zukunftspotenzial analysiert.

#### 11.2.1 Quellen und Status des Recyclings

**Hintergrund** : Das Recycling von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht erfolgt hauptsächlich aus Produktionsschrott und Altprodukten. Schrott, Schrott und Nachbehandlungsrückstände aus dem Produktionsprozess sowie Gegengewichte, Kerne und Abschirmungen am Ende ihrer Lebensdauer sind potenzielle Recyclingquellen. Die weltweite Recyclingquote liegt derzeit bei etwa 30-40 %, wobei zwischen China, Europa und den USA eine erhebliche Lücke besteht.

#### Spezifische Quellen

- **Produktionsabfälle** : Pulverabfälle aus der Pulvermetallurgie (W-Gehalt 20-30 %),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pressabfälle (50–100 kg/Tonne Legierung), CNC-Bearbeitungsabfälle (20–50 kg/Tonne Legierung, W > 90 %).

- **Ausrangierte Produkte** : Gegengewicht für die Luftfahrt (Lebensdauer 10–20 Jahre), militärischer Geschosskern (Einmalverwendung), medizinische Abschirmung (Aktualisierungszyklus 5–10 Jahre).
- **Recyclingstatus** : Im Jahr 2023 werden weltweit etwa 20.000 Tonnen Wolfram (20 % des Gesamtbedarfs) und etwa 2.000 Tonnen Wolframlegierungen (27 % der Produktion) recycelt. In China liegt die Recyclingquote bei etwa 35 %, in den USA und Europa bei 50–60 %.

### Fallstudie

Eine chinesische Fabrik produziert jährlich 1.000 Tonnen W-95Ni-Fe-Legierung, 40 Tonnen Abfallspäne (90 % W) und 80 Tonnen Abfall (25 % W), die Recyclingquote beträgt nur 30 % und die verbleibende Ansammlung bedeckt eine Fläche von 1 Hektar.

## 11.2.2 Recyclingtechnologien und -prozesse

### Hintergrund

mit hohem spezifischem Gewicht umfasst physikalische Trennung, chemische Extraktion und metallurgische Reduktion mit dem Ziel, Wolfram (W) von Bindephasen (wie Ni, Fe, Cu) zu trennen und wiederverwendbares Wolframpulver oder Legierungsblöcke herzustellen.

### Spezifische Technologien

- **Physische Trennung** :
  - **Methode** : Zerkleinern, Mahlen, Sieben, wird für Schrott und Schrott verwendet.
  - **Ergebnisse** : 70–80 % W-Rückgewinnung, 1–10 µm Partikelgröße und  $\geq 95$  % Reinheit.
  - **Energieverbrauch** : 200–300 kWh pro Tonne Abfall und 0,1–0,15 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- **Hydrometallurgie (chemische Extraktion)**:
  - **Methode** : Durch Säurelaugung (HCl oder HNO<sub>3</sub>) werden Ni und Fe gelöst, WO<sub>3</sub> abgeschieden und dann mit H<sub>2</sub> zu Wolframpulver reduziert.
  - **Ergebnisse** : 90–95 % W-Rückgewinnung und  $\geq 99,5$  % Reinheit, aber saurer Abfall (pH 2–3, ca. 0,5 m<sup>3</sup> pro Tonne).
  - **Energieverbrauch** : 500–700 kWh pro Tonne und 0,3–0,4 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- **Pyrometallurgie (Hochtemperaturbehandlung)**:
  - **Methode** : Hochtemperaturschmelzen (> 2000 °C) zur Trennung von W und Ni-Fe oder oxidatives Rösten (800–1000 °C) zur Herstellung von WO<sub>3</sub>.
  - **Wirkung** : W-Rückgewinnungsrate von 85–90 %, geeignet für komplexe Abfälle, Abgase mit SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> (0,05–0,1 Tonnen/Tonne).
  - **Energieverbrauch** : 1000–1500 kWh pro Tonne, CO<sub>2</sub>-Emissionen 0,8–1 Tonne.

Die Kosten der technischen Trennung sind im Vergleich zur physikalischen Trennung gering (etwa 500

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

US-Dollar/Tonne), was für hochreine Abfallschnitzel geeignet ist; Hohe Nassrückgewinnungsrate, geeignet für gemischte Abfälle; Die Feuermethode ist sehr anpassungsfähig, weist jedoch einen hohen Energieverbrauch und hohe Emissionen auf.

### 11.2.3 Wiederverwendungseffekte und -anwendungen

#### Hintergrund

Aus recyceltem Wolframpulver oder -legierungen können direkt neue Wolframlegierungen hergestellt werden, deren Leistung der von Neumaterial nahekommt, wobei gleichzeitig der Ressourcenverbrauch und die Kosten gesenkt werden.

#### Spezifische Effekte

- **Leistung** : W-90Ni-Fe aus recyceltem Wolframpulver (Reinheit 99,5 %), Dichte 18,0 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 850 MPa (Neuware 900 MPa), Leistungsverlust <10 %.
- **Ressourcenschonung** : Reduzierung des Wolframerzabbaus um ca. 1,2 Tonnen pro Tonne recyceltem Wolfram, Einsparung von 2–3 m<sup>3</sup> Wasser und Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 2–3 Tonnen.
- **Kostengünstig** : Die Recyclingkosten betragen etwa 15.000–20.000 US-Dollar/Tonne, und das primäre Wolframpulver kostet 3.000–35.000 US-Dollar/Tonne, was einer Ersparnis von 40–50 % entspricht.

#### Anwendungsgebiete

- **Gegengewicht für die Luftfahrt** : W-95Ni-Fe (18,5 g/cm<sup>3</sup>) wird für Sekundärkomponenten mit einer Kostenreduzierung von 20 % zurückgewonnen.
- **Industriewerkzeuge** : Recyceltes W-90Ni-Cu (17,5 g/cm<sup>3</sup>) mit 95 % natürlicher Abriebfestigkeit.
- **Medizinische Abschirmung**: Der Kollimator aus Wolframpulver wird wiederhergestellt und die Abschirmeffizienz wird nur um 5 % reduziert.

### 11.2.4 Fallstudien zu Recycling und Wiederverwendung

#### Sonderfälle

- **Kennametal** , USA: Jährlich werden 500 Tonnen Wolframlegierungsschrott recycelt, Wolframpulver wird durch Hydrometallurgie extrahiert (Rückgewinnungsrate liegt bei 92 %) und W-95Ni-Fe-Gegengewicht wird recycelt, wodurch jährliche Kosten von 10 Millionen US-Dollar eingespart und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 1.200 Tonnen reduziert wird.
- **Wolframindustrie in Xiamen, China** : Jährlich werden 300 Tonnen Abfallspäne (90 % W) recycelt, physikalische Trennung + Feuerbehandlung, die Rückgewinnungsrate liegt bei 85 %, und es werden W-90Ni-Fe-Stäbe hergestellt, die Kosten werden um 30 % gesenkt, aber die Abgasbehandlung muss verbessert werden.

### 11.2.5 Technische Herausforderungen und Lösungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Herausforderung

- **Geringe Rückgewinnungsrate** : Die Recyclingrate für Haushaltsabfälle liegt bei < 50 % und es ist schwierig, komplexe Abfälle (z. B. Cu-haltige) zu trennen.
- **Umweltauswirkungen** : Hohe Kosten für die Entsorgung von Nass- und Pyromerabfällen (ca. 200–300 USD pro Tonne ).
- **Wirtschaftlich** : Kleine Unternehmen müssen viel in Recyclingausrüstung investieren (> 500.000 \$) und die Amortisationszeit ist lang (3-5 Jahre).

### Lösung

- **Technische Verbesserung** : Durch die Entwicklung eines kombinierten Prozesses (physikalisch + nass) wurde die Rückgewinnungsrate auf 95 % und die Cu-Abtrennungseffizienz auf 20 % erhöht.
- **Schadstoffbekämpfung** : Neutralisationszyklus für Abfallflüssigkeiten (pH-Wert bis zu 7, Kostenreduzierung auf 100 USD/Tonne), Abgasentschwefelung und Denitrifikation (Emissionen bis zu 50 mg/m<sup>3</sup>).
- **Politische Unterstützung** : Die Regierung subventioniert Recyclinggeräte (20–30 %) und Steuererleichterungen und -befreiungen erhöhen die Beteiligung von Unternehmen.

### 11.2.6 Zukünftiges Recycling- und Wiederverwendungspotenzial

#### Trend

- **die Recyclingquote** weltweit 60 % und in China 50–60 % erreichen, mit einer zusätzlichen Recyclingkapazität von etwa 3.000 Tonnen pro Jahr.
- **Technologie-Upgrade** : elektrochemische Rückgewinnung (Energieverbrauch um 30 % reduziert), intelligente Sortierung (Effizienz um 20 % erhöht).
- **Marktwert** : Der Markt für wiedergewonnene Wolframlegierungen dürfte bis 2030 einen Wert von 500 Millionen US-Dollar erreichen und jährlich um 8 % wachsen.

Der Fall geht davon aus, dass ein Flugzeugwerk im Jahr 2030 1.000 Tonnen W-95Ni-Fe-Abfall recyceln und daraus neue Gegengewichte herstellen wird. Dadurch werden Kosten in Höhe von 20 Millionen US-Dollar eingespart und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 3.000 Tonnen reduziert, was den zukünftigen Umweltschutzbestimmungen entspricht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 11.2.7 Zusammenfassung des Recycling- und Wiederverwendungsformulars

Projekt	Inhalt
<b>Recyclingquellen</b>	Produktionsabfälle (50–100 kg/Tonne), Altprodukte
<b>Recyclingtechnologie</b>	Physikalische Trennung (70–80 %), nass (90–95 %), pyrotechnisch (85–90 %)
<b>Wiederverwendungseffekt</b>	Die Dichte beträgt 18,0 g/cm <sup>3</sup> , die Festigkeit 850 MPa und die Kosten werden um 40–50 % reduziert
<b>Umweltvorteile</b>	CO <sub>2</sub> -Reduktion von 2-3 t/Tonne, Wassereinsparung von 2-3 m <sup>3</sup> /Tonne
<b>Herausforderung</b>	Geringe Rückgewinnungsrate, Abfallflüssigkeit und Abgas, wirtschaftlich
<b>Lösung</b>	Gemeinsame Technologie, Umweltschutz, politische Subventionen
<b>Zukunftspotenzial</b>	Die Rückgewinnungsrate liegt bei 60 %, der Markt beträgt 500 Millionen US-Dollar und die Technologie ist intelligent

### 11.3 Kostenanalyse einer Wolframlegierung mit hohem spezifischen Gewicht

Aufgrund ihrer hohen Dichte und Leistungsfähigkeit ist Wolframlegierung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und in der Industrie unersetzlich. Ihre Produktions- und Anwendungskosten sind jedoch hoch und umfassen Rohstoffe, Verarbeitung, Recycling und Umweltschutz. Bei der Kostenanalyse geht es nicht nur um die Rentabilität eines Unternehmens, sondern auch um Marktwettbewerbsfähigkeit und nachhaltige Entwicklung. Dieser Abschnitt bietet eine detaillierte Analyse der Kostenstruktur, bewertet die Einflussfaktoren und schlägt einen Optimierungspfad vor.

#### 11.3.1 Kostenzusammensetzung und Hauptverbindungen

##### Hintergrund

Die Kosten für Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht erstrecken sich über die gesamte industrielle Kette von der Rohstoffbeschaffung bis zur Auslieferung des Endprodukts, einschließlich Upstream-Bergbau, Midstream-Verarbeitung und Downstream-Anwendung. Im Jahr 2023 werden die Schwankungen der weltweiten Wolframpreise (ca. 3.000 bis 35.000 US-Dollar/Tonne) und steigende Energiepreise die Kosten erheblich beeinflussen.

##### Spezifische Zusammensetzung

- **Rohstoffkosten (50–60 %)** : Wolframpulver (W ≥ 99,9 %), Nickel (Ni), Eisen (Fe), Kupfer (Cu) usw. machen mehr als die Hälfte der Gesamtkosten aus.
- **Verarbeitungskosten (20–30 %)** : Pulvermetallurgie (Pressen, Sintern), Nachbehandlung (CNC-Bearbeitung, Oberflächenbehandlung).
- **Energiekosten (10–15 %)** : Strom, Gas, für Hochtemperaturesintern und -verarbeitung.
- **Umweltschutzkosten (5–10 %)** : Abgas, Abwasserbehandlung, Investitionen in Umweltschutzausrüstung.
- **Arbeitskräfte und Sonstiges (5 % – 10 %)** : Abschreibung von Arbeitskräften, Transport, Ausrüstung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Die Gesamtkosten pro Tonne W-95Ni-Fe-Legierung (18,0 g/cm<sup>3</sup>) betragen ca. 25.000–30.000 US-Dollar, einschließlich:**

- Wolframpulver (95 %): 18.000–20.000 \$ (32.000 \$/Tonne× 0,95).
- Ni, Fe (5 %): 0,1–1.500 US-Dollar (Ni 20.000 US-Dollar/Tonne, Fe 1.000 US-Dollar/Tonne).
- Verarbeitung und Energie: 0,5–7.000 \$.
- Umweltschutz und Arbeit: 0,2-0,3 Tausend US-Dollar.

### 11.3.2 Einflussfaktoren auf die Rohstoffkosten

#### Hintergrund

Da Wolfram ein seltenes Metall ist, wird sein Preis von Angebot und Nachfrage, politischen und geografischen Faktoren beeinflusst. China produziert 80 % der weltweiten Wolframproduktion (82.000 Tonnen im Jahr 2023), und Beschränkungen der Exportquoten haben die Preise in die Höhe getrieben.

#### Spezifische Faktoren

- **Marktpreis** : Im Jahr 2023 wird Wolframkonzentrat (WO<sub>3</sub>≥65 %) etwa 25.000–30.000 US-Dollar/Tonne und Wolframpulver 3.000–35.000 US-Dollar/Tonne kosten, mit einer jährlichen Schwankung von ±15 %.
- **Lieferengpässe** : Chinas Quote beträgt im Jahr 2023 70.000 Tonnen, der tatsächliche Export liegt bei 50.000 Tonnen, mit einem Mangel von 10 % auf dem internationalen Markt.
- **Alternative Materialien** : Die Preise für Ni und Fe sind niedrig (Ni 20.000 US-Dollar/Tonne, Fe 1.000 US-Dollar/Tonne), aber der Anteil ist gering und die Auswirkungen sind begrenzt.

#### Fallstudie

Eine Fabrik kaufte im Jahr 2023 1.000 Tonnen Wolframpulver (33.000 US-Dollar/Tonne), und der Preis stieg aufgrund einer Preiserhöhung von 10 % infolge einer Quotenkürzung um 3,3 Millionen US-Dollar.

### 11.3.3 Einflussfaktoren auf die Verarbeitungs- und Energiekosten

#### Hintergrund

**Pulvermetallurgie und Nachbearbeitung sind der Kern** der Produktion von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht, die Hochtemperatur- und Hochdruckgeräte erfordert, und Energieeffizienz und Prozesseffizienz wirken sich direkt auf die Kosten aus.

#### Spezifische Faktoren

- **Energiepreise** : Der Industriestrompreis in China beträgt etwa 0,1 USD/kWh, in den USA 0,15 USD/kWh. Der Stromverbrauch beträgt 3500 kWh pro Tonne Legierung, und die Stromkosten betragen 350-525 USD.
- **Prozesseffizienz** : Das traditionelle Sintern (1500 °C) dauert 6 Stunden, das neue Niedertemperatursintern (1200 °C) verkürzt sich auf 4 Stunden, wodurch 20 % des Energieverbrauchs eingespart werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Abschreibung der Ausrüstung** : jährliche Abschreibung von 50.000 US-Dollar für Sinteröfen (500.000 US-Dollar/Satz, Lebensdauer 10 Jahre) und jährliche Abschreibung von 20.000 US-Dollar für CNC-Werkzeugmaschinen (200.000 US-Dollar/Satz).

**Fallstudie: In einer Fabrik mit einer Jahresproduktion von 1.000 Tonnen** Wolframlegierung und Stromkosten von 500.000 US-Dollar (0,1 US-Dollar/kWh) konnten die Kosten nach dem Niedertemperatursintern auf 400.000 US-Dollar gesenkt werden, wodurch 100.000 US-Dollar eingespart wurden.

### 11.3.4 Umweltkosten und politische Implikationen

#### Hintergrund

Umweltvorschriften (wie etwa das chinesische Umweltschutzgesetz von 2023) schreiben eine den Standards entsprechende Einleitung von Abgasen und Abwässern vor, was die Behandlungskosten erhöht, durch Recycling jedoch teilweise ausgeglichen werden kann.

#### Spezifische Faktoren

- **Abgasbehandlung** : Beutelenstaubung + Denitrifikationsanlage (Investition von 1 Million US-Dollar, Lebensdauer 10 Jahre), 50–100 US-Dollar pro Tonne Legierungsbehandlungskosten.
- **Abwasserbehandlung** : Neutralisation + Sedimentation (50–100 Yuan pro Tonne Abwasser), etwa 50–100 US-Dollar pro Tonne Legierung.
- **Politische Anforderungen** : Eine 30-prozentige CO<sub>2</sub>-Reduzierung erfordert eine Technologie zur Kohlenstoffabscheidung (20 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>) und eine Erhöhung um 60-80 US-Dollar pro Tonne Legierung.

**Fallstudie:** Eine Fabrik mit einer Jahresproduktion von 500 Tonnen Legierungen, jährlichen Betriebskosten für Umweltschutzausrüstungen von 250.000 US-Dollar, einer Geldstrafe von 100.000 US-Dollar bei Nichterfüllung des Standards und einer Gesamtkostensteigerung von 350.000 US-Dollar.

### 11.3.5 Kostenfallanalyse

#### Sonderfälle

- **Chinesische Fabrik A** : Jahresproduktion 1.000 Tonnen W-95Ni-Fe, Wolframpulver 19.000 US-Dollar/Tonne, Gesamtkosten 26.000 US-Dollar/Tonne, Verkaufspreis 35.000 US-Dollar/Tonne, Gewinn 900 US-Dollar/Tonne. Energie- und Umweltkosten machen 30 % aus, und aufgrund der niedrigen Recyclingraten (30 %) werden Ressourcen verschwendet.
- **US-Werk B** : Jahresproduktion 500 Tonnen W-97Ni-Fe, Wolframpulver 35.000 US-Dollar/Tonne, Gesamtkosten 32.000 US-Dollar/Tonne, Verkaufspreis 45.000 US-Dollar/Tonne, Gewinn 1.300 US-Dollar/Tonne. Die Recyclingquote liegt bei 60 %, was umweltfreundlich und kostenintensiv ist, aber den Vorschriften entspricht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 11.3.6 Kostenoptimierungsstrategien

#### Herausforderung

- **Rohstoffschwankungen** : Wolframpreise erhöhen die Kosten um 10–15 %.
- **Hoher Energieverbrauch** : Der Energieverbrauch bei der Verarbeitung macht 20–30 % der Kosten aus.
- **Umweltbelastung** : Die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften wurde um 5–10 % erhöht.

#### Lösung

- **Beschaffungsoptimierung** : Langfristige Verträge fixieren die Wolframpreise (Reduzierung der Schwankungen um 5 %) und erhöhen den Anteil an recyceltem Wolframpulver (Kostenreduzierung um 40 %).
- **Energiespartetechnologie** : Niedertemperatursintern + Stromerzeugung durch Photovoltaik (Energieverbrauch um 20–30 % gesenkt), Stromkosten um 100.000 US-Dollar/1.000 Tonnen gesenkt.
- **Rückgewinnungseffizienz** : Die Rückgewinnungsrate der Hydrometallurgie beträgt 90 %, wodurch 1.000 bis 15.000 US-Dollar pro Tonne eingespart und die Umweltschutzkosten um 50 % gesenkt werden.

### 11.3.7 Kostenvergleich und Trendprognose

#### Inländischer und ausländischer Vergleich

- **China** : Die Gesamtkosten betragen 25.000–30.000 US-Dollar/Tonne, was aufgrund der Vorteile bei Rohstoffen und Arbeitskräften niedrig ist, aber die Kosten für den Umweltschutz steigen.
- **USA/Europa** : 3.000–35.000 USD/ Tonne , hoch aufgrund der Energie- und Regulierungskosten, aber hohe Rückgewinnungseffizienz.

#### Trendprognose

- **Kurzfristig (2025)**: Die Wolframpreise bleiben stabil bei 3,2.000 bis 35.000 US-Dollar/ Tonne und die Gesamtkosten steigen um 5 % (aus Umweltgründen).
- **Langfristig (2030)**: 60 % Rückgewinnung, Kostensenkung auf 2.000 bis 25.000 USD/Tonne und 20 % Reduzierung des Energieverbrauchs durch neue Energietechnologien.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 11.3.8 Zusammenfassung der Kostenanalysetabellen

Kostenlink	Prozentsatz	Kosten pro Tonne (USD)	Einflussfaktoren	Optimieren Sie Ihre Strategie
<b>Rohstoffe</b>	50 % – 60 %	1900-2150	Wolframpreisschwankungen, Lieferengpässe	Langfristiger Vertrag, Rückgewinnung von Wolframpulver
<b>Verarbeitung</b>	20–30 %	500-700	Prozesseffizienz, Anlagenabschreibung	Niedertemperatursintern, Geräte-Upgrades
<b>Energie</b>	10–15 %	350-525	Strompreis, Energieverbrauch	Photovoltaik-Stromerzeugung, Energiespartechnologie
<b>Umweltschutz</b>	5 % – 10 %	100-200	Abgas- und Abwasserbehandlung, Vorschriften	Recyclingeffizienz und Schadstoffkontrolle
<b>Arbeit und Anderes</b>	5 % – 10 %	100-200	Arbeit, Transport	Automatisierung, Logistikoptimierung
<b>Gesamtkosten</b>	100 %	2500-3000	Kombinierte Wirkung	Gesamtprozessoptimierung

## 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 12: Forschungsgrenzen von Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht

Wolframlegierungen (PES) nehmen aufgrund ihrer hervorragenden physikalischen und mechanischen Eigenschaften in vielen Bereichen eine wichtige Stellung ein. Ihre Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung neuer Materialien, Leistungsoptimierung, Computersimulation und intelligentes Design. Mit dem Fortschritt der Materialwissenschaft und der Verbesserung der Anwendungsanforderungen ist die Entwicklung leistungsfähigerer und umweltfreundlicherer Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht zu einem Forschungsschwerpunkt geworden. Dieses Kapitel untersucht den aktuellen Stand der Technik und ihr zukünftiges Potenzial in diesen Grenzbereichen.

### 12.1 Entwicklung neuer Materialien für Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht

Herkömmliche Wolframlegierungen (z. B. W-Ni-Fe, W-Ni-Cu) konnten die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, des Militärs und der Medizinbranche an höhere Dichte, Festigkeit und Haltbarkeit kaum erfüllen. Die Entwicklung neuer Materialien zielt darauf ab, Leistungsengpässe zu überwinden und die Nachhaltigkeit durch die Einführung neuer Elemente, die Optimierung der Mikrostruktur und die Erforschung alternativer Bindephasen zu verbessern.

#### 12.1.1 Entwicklungshintergrund und -treiber

##### Hintergrund

Die traditionelle Wolframlegierung mit hohem spezifischen Gewicht besteht hauptsächlich aus Wolfram (W) (85–97 %), ergänzt durch Nickel (Ni), Eisen (Fe) oder Kupfer (Cu) als Bindephase. Die Dichte liegt zwischen 17,0 und 18,8 g/cm<sup>3</sup> und die Zugfestigkeit zwischen 700 und 1000 MPa. Die Luft- und Raumfahrt benötigt jedoch superschwere Werkstoffe mit einer Dichte von > 19,0 g/cm<sup>3</sup>, das Militär eine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturbeständigkeit von  $> 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  und die Medizin weniger toxische Formulierungen, um die Forschung und Entwicklung neuer Werkstoffe zu fördern.

### Treibende Kraft

- **Verbesserte Leistung** : Höhere Dichte und Festigkeit für extreme Umgebungen.
- **Umweltschutzanforderungen** : Reduzieren Sie den Ni-Gehalt, halten Sie die REACH- und RoHS-Vorschriften ein.
- **Technologischer Fortschritt** : Nanotechnologie, Hochentropielegierungen und additive Fertigung bieten neue Möglichkeiten.

### 12.1.2 Zusammensetzungsdesign neuer Materialien

#### Besonderheiten

- **Legierungen mit hohem Wolframgehalt** : W-Gehalt auf 98–99 % erhöht, z. B. W-98Ni-Fe, Dichte  $19,0\text{--}19,3\text{ g/cm}^3$ , Zugfestigkeit 1100 MPa und Bindephase auf 1–2 % reduziert.
- **Mit seltenen Erden modifizierte Legierungen** : Durch Zugabe von La und Ce (0,5–1 %), beispielsweise W-95Ni-Fe-La, wird die Körnung auf  $1\text{ }\mu\text{m}$  verfeinert, die Zähigkeit um 20 % erhöht und die Temperaturbeständigkeit beträgt  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- **Nickelfreie Legierung** : Ersetzen Sie Ni durch Fe, Cu oder Mo, z. B. W-95Fe-Cu, mit einer Dichte von  $18,5\text{ g/cm}^3$ , einer Zugfestigkeit von 900 MPa und einer Ni-Emission von  $< 0,05\%$ , was den Anforderungen des Umweltschutzes entspricht.
- **Nanokompositlegierungen** : Nano- SiC oder  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1–5 %), wie z. B. W-90Ni-Fe/ SiC, mit einer Dichte von  $17,5\text{ g/cm}^3$ , einer Härte von 550 HV und einer um 30 % erhöhten Verschleißfestigkeit.

#### Technische Details

- **Herstellungsverfahren** : Die Wolframlegierung wird durch Hochenergie-Kugelmahlen (500 U/min, 12 Stunden) und heißisostatisches Pressen (HIP, 250 MPa,  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) hergestellt, und die Porosität beträgt  $< 0,05\%$ .
- **Mikrostruktur** : Seltene Erden verfeinern die Körner, Nanopartikel werden gleichmäßig verteilt und die Grenzflächenbindungskraft wird um 15 % erhöht.

### 12.1.3 Leistungsvorteile neuer Materialien

#### Spezifische Leistung

- Dichte: W-98Ni-Fe bis zu  $19,2\text{ g/cm}^3$  (traditionell  $18,5\text{ g/cm}^3$ ), eine Steigerung von 3 % – 5 %.
- Festigkeit: Zugfestigkeit von W-95Ni-Fe-La 1150 MPa (herkömmlich 1000 MPa), eine Steigerung von 15 %.
- Temperaturbeständigkeit: W-95Fe-Cu hat eine Temperaturbeständigkeit von  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  (herkömmlich  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), eine Steigerung von 33 %.
- Umweltschutz: W-95Fe-Cu-Nickelgehalt  $< 1\%$ , Freisetzung  $< 0,05\%$ , besser als herkömmliches W-Ni-Fe (Ni 5 % – 7 %).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Abriebfestigkeit:** Der Reibungskoeffizient von W-90Ni-Fe/ SiC wird auf 0,3 (herkömmlich 0,5) reduziert und die Lebensdauer um 40 % erhöht.

**Prüfdaten Probe** ( 50×50×10 mm, W-98Ni-Fe, Gewicht 950 g): Dichte 19,2 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1120 MPa, Härte 500 HV, Verformung < 0,01 mm bei 2000°C.

#### 11.1.4 Herstellungstechnologie neuer Werkstoffe

##### Spezifischer Prozess

- **Hochenergie-Kugelmahlen** : Wolframpulver (1 μm ) mit Seltenerdpulver gemischt, 12 Stunden bei 500 U/min gemahlen, Kornverfeinerung auf 50 nm.
- **Kaltisostatisches Pressen:** 300 MPa Formgebung, Gründichte > 60 %.
- **Vakuumsintern** : 1500 °C, 10<sup>-3</sup> Pa, 2 Stunden, Dichte bis zu 99,5 % des theoretischen Werts.
- **HIP-Behandlung** : 250 MPa, 1400 °C, 1,5 Stunden, Porosität auf 0,03 % reduziert.
- **Additive Fertigung (SLM):** 4000 W Laserleistung, 50 μm Schichtdicke, Herstellung komplexer Formen mit einer Genauigkeit von ± 0,02 mm.

**Fall:** Ein Forschungsinstitut verwendete SLM, um W-95Ni-Fe-La-Teile (mit einem Gewicht von 500 g) mit einer Dichte von 18,9 g/cm<sup>3</sup> und einer Festigkeit von 1150 MPa zu drucken und so den Entwicklungszyklus um 50 % zu verkürzen.

#### 12.1.5 Praktische Anwendungsfälle neuer Materialien

##### Sonderfälle

- **Luft- und Raumfahrt** : W-98Ni-Fe-Gegengewicht (19,2 g/cm<sup>3</sup>, 500 g), verwendet in einem Raketenausgleichsstück, Gewichtsreduzierung um 10 %, Temperaturbeständigkeit 2000 °C, entspricht den Anforderungen der NASA.
- **Militär** : W-95Fe-Cu-Geschosskern (18,5 g/cm<sup>3</sup>, 300 g), Eindringtiefe um 15 % erhöht, Ni-Freisetzung < 0,05 %, erfüllt Umweltschutzbestimmungen.
- **Medizin** : W-90Ni-Fe/ SiC- Abschirmung (17,5 g/cm<sup>3</sup>, 200 g), 30 % höhere Abriebfestigkeit, 95 % Röntgenabschirmung, wird in CT-Geräten verwendet.

#### 12.1.6 Technische Herausforderungen und Lösungen in der Entwicklung

##### Herausforderung

- **Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung** : Ein hoher Wolframgehalt (> 98 %) kann leicht zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Bindephase und einer Festigkeitsabweichung von ± 50 MPa führen.
- **Herstellungskosten** : HIP- und SLM-Geräte sind teuer (> 1 Million US-Dollar) und die Kosten pro Tonne steigen um 20–30 %.
- **Umweltschutz** : Bei der Zugabe seltener Erden müssen die Rückstände (<0,1 %) kontrolliert werden, um eine Sekundärverschmutzung zu vermeiden.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Lösung

- **Homogenitätsoptimierung** : Durch Mehrzonensintern (Temperaturunterschied < 5°C) und Ultraschallrühren wird die Verteilungsabweichung auf 5 % reduziert.
- **Kostensenkung** : Inländische HIP-Ausrüstung (500.000 US-Dollar/Satz), Rückgewinnung von Wolframpulver (Kostensenkung um 40 %).
- **Umweltschutz** : Recyclingprozess für seltene Erden (Rückgewinnungsrate > 90 %), Abfallmissionen auf 0,05 % reduziert.
- 

### 12.1.7 Zusammenfassung des Formulars zur Entwicklung neuer Materialien

Projekt	Inhalt
Neue Materialien	W-98Ni- Fe,W- 95Ni-Fe -La,W- 95Fe- Cu,W- 90Ni-Fe/ SiC
Eigenschaften der Inhaltsstoffe:	W 98%-99%, Seltene Erden 0,5%-1%, nickelfrei, Nano 1%-5%
Leistungsvorteile	Die Dichte beträgt 19,2 g/cm <sup>3</sup> , die Festigkeit 1150 MPa und die Temperaturbeständigkeit 2000°C
Herstellungsprozess	Hochenergie-Kugelmahlen, HIP, SLM, Porosität < 0,05 %
Anwendungsgebiete	Gegengewichte für die Luftfahrt, militärische Geschoskerne, medizinische Abschirmung
Herausforderung	Einheitlichkeit, Kosten, Umweltschutz
Lösung	Mehrzonensintern, Gerätelekalisierung, Seltenerdgewinnung

## 12.2 Richtung der Leistungsverbesserung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht

Die Leistungssteigerung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht ist ein wichtiges Forschungsthema und zielt darauf ab, die Anforderungen an höhere Dichte, Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und Haltbarkeit in der Luft- und Raumfahrt, der Rüstungsindustrie, der Medizin und anderen Bereichen zu erfüllen. Durch die Optimierung der Zusammensetzung, die Verbesserung der Mikrostruktur und die Einführung neuer Verfahren verlagern sich Leistungsverbesserungen von traditionellen Einzelmetriken hin zu multifunktionalen Merkmalen. Dieser Abschnitt untersucht die technischen Möglichkeiten und das Potenzial dieser Richtungen.

### 12.2.1 Kontextuell und nachfrageorientiert

#### Hintergrund

Die Dichte herkömmlicher Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht (wie W-Ni-Fe und W-Ni-Cu) beträgt 17,0–18,8 g/cm<sup>3</sup>, die Zugfestigkeit 700–1000 MPa und die Temperaturbeständigkeit 1500 °C, was nahe an der Leistungsgrenze liegt. Neue Anwendungen wie Überschallfahrzeuge (Temperatur > 2000 °C), die Erforschung des Weltraums (Dichte > 19,0 g/cm<sup>3</sup>) und hochpräzise medizinische Geräte (50 % höhere Verschleißfestigkeit) erfordern Durchbrüche bei bestehenden Engpässen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Nachfrageorientiert

- **Luft- und Raumfahrt** : Eine höhere Dichte reduziert das Volumen, eine hohe Temperaturbeständigkeit verbessert die Schubeffizienz.
- **Militär** : Höhere Festigkeit und Verschleißfestigkeit zur Verbesserung der Durchdringung, Korrosionsbeständigkeit und Verlängerung der Lebensdauer.
- **Medizinisch** : Geringere Toxizität und höhere Abschirmeffizienz, um den Anforderungen langfristiger Implantationen gerecht zu werden.

### 12.2.2 Synergistische Steigerung von Dichte und Intensität

Durch Erhöhung des Wolframgehalts und Optimierung der Bindephase werden Dichte und Festigkeit verbessert, um die Zähigkeit zu erhalten.

#### Besonderheiten

- **Formel mit hohem Wolframgehalt** : W-Gehalt auf 98–99 % erhöht, z. B. W-98Ni-Fe, Dichte 19,0–19,3 g/cm<sup>3</sup>, Zugfestigkeit 1100–1200 MPa.
- **Optimierung der Bindephase** : Das Verhältnis Ni:Fe wurde von 7:3 auf 5:5 angepasst, die Korngrenzenfestigkeit um 10 % erhöht und die Dehnung um 5–10 % beibehalten.
- **Technische Details** : Hochenergie-Kugelmühle (600 U/min, 15 Stunden) hat Wolframpulver auf 50 nm verfeinert, HIP (300 MPa, 1450 °C) mit < Porosität von 0,03 % verdichtet.

#### Leistungsverbesserungen

- Die Dichte erhöhte sich um 3–5 % (18,8→19,2 g/cm<sup>3</sup>).
- Die Festigkeit wurde um 15–20 % erhöht (1000→1200 MPa).

**Fall:** Ein Luftfahrtforschungsinstitut entwickelte ein W-98Ni-Fe-Gegengewicht (19,2 g/cm<sup>3</sup>, 1150 MPa) mit einer Volumenreduzierung von 10 % für Raketenantriebssteile.

### 12.2.3 Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit

Durch die Zugabe hochtemperaturbeständiger Elemente und die Verbesserung der Mikrostruktur wird die Stabilität der Legierung bei extremen Temperaturen verbessert.

#### Besonderheiten

- **Elementzusatz:** Mo (5–10 %), Ta (1–3 %), wie z. B. W-90Mo-Ni, der Schmelzpunkt steigt auf 2000 °C und die Oxidationsbeständigkeit erhöht sich um 25 %.
- **Korngrenzenverstärkung:** Seltenerdelemente (La, Y, 0,5 % – 1 %), wie z. B. W-95Ni-Fe-Y, Korngröße < 1 µm, Verformung < 0,01 mm bei 2000 °C.
- **Technische Details:** Vakuumsintern (1600°C, 10<sup>-4</sup> Pa), Oberflächenbeschichtung (z. B. ZrC , Dicke 10 µm ), Wärmeleitfähigkeit 130 W/( m·K ).

#### Leistungsverbesserungen

- Die Temperaturbeständigkeit wird um 33 % erhöht (1500→2000°C).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die antioxidative Aktivität wird um 20–30 % erhöht.

**Fall:** Eine Militäreinheit entwickelte einen W-90Mo-Ni-Geschosskern ( $18,5 \text{ g/cm}^3$ ), der bei  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  eine Festigkeit von 900 MPa beibehält und die Eindringtiefe um 15 % erhöhte.

#### 12.2.4 Verbesserung der Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit

Zur Verbesserung der Oberflächenhärte und chemischen Stabilität werden Hartphasen und Korrosionsschutzelemente eingebracht.

##### Besonderheiten

- **Hartphasenverstärkung** : Durch Hinzufügen von WC, TiC (1 % – 5 %), beispielsweise W-90Ni-Fe/WC, wird die Härte auf 600 HV erhöht und der Reibungskoeffizient auf 0,3 reduziert.
- **Korrosionsschutzformulierung** : Ersetzen Sie Ni durch Cu oder Mo, z. B. W-95Mo-Cu, mit einem Massenverlust von  $<0,1 \%$  im Salzsprühstest (1000 Stunden).
- **Technische Details** : SLM-Formgebung (Laserleistung 4000 W), Oberflächenlaserauftragung einer TiC-Schicht (20  $\mu\text{m}$  dick), 40 % höhere Verschleißfestigkeit.

##### Leistungsverbesserungen

- 20–30 % Härtesteigerung (450→600 HV).
- Die Verschleißfestigkeit wird um 30–50 % und die Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

**Fall:** Eine Fabrik für medizinische Geräte entwickelte einen W-90Ni-Fe/WC-Kollimator ( $17,5 \text{ g/cm}^3$ , 550 HV), der die Lebensdauer um 50 % erhöhte und die Abschirmeffizienz 95 % erreichte.

#### 12.2.5 Optimierung der Zähigkeits- und Ermüdungseigenschaften

Ziel ist es, die Zähigkeit und Ermüdungsbeständigkeit durch Mikrostrukturmanipulation und Nanoverstärkung zu verbessern.

##### Besonderheiten

- **Kornverfeinerung** : Nano-Wolframpulver (20–50 nm) + Ultraschalldispersion, Korngröße  $< 500 \text{ nm}$ , wie z. B. W-95Ni-Fe, und die Bruchzähigkeit um 15 % erhöht ( $20 \rightarrow 23 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).
- **Nanokomposite** : Die Zugabe von CNTs (Kohlenstoffnanoröhren, 0,5 %–1 %), wie z. B. W-95Ni-Fe/CNT, erhöht die Lebensdauer um 30 % ( $10^6 \rightarrow 1,3 \times 10^6$ -fach).
- **Technische Details** : Kaltisostatisches Pressen (400 MPa), Sintern bei niedriger Temperatur ( $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 10 % Reduzierung der Korngrenzenverschiebung.

##### Leistungsverbesserungen

- Die Belastbarkeit steigt um 10–15 %.
- Die Dauerfestigkeit erhöht sich um 20–30 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Fall:** Eine Fabrik für Luft- und Raumfahrtteile verwendet W-95Ni-Fe/CNT ( $18,0 \text{ g/cm}^3$ ) zur Herstellung von Gegengewichten mit einer Ermüdungslebensdauer von  $1,5 \times 10^6$ , um den Anforderungen hochfrequenter Vibrationen gerecht zu werden.

### 12.2.6 Praktische Anwendungsbeispiele zur Leistungsverbesserung

#### Sonderfälle

- **Luft- und Raumfahrt :** W-98Ni-Fe ( $19,2 \text{ g/cm}^3$ , 1200 MPa), verwendet im Gegengewicht der SpaceX-Rakete, Gewichtsreduzierung um 15 %, Temperaturbeständigkeit 2000 °C.
- **Militärindustrie:** W-90Mo-Ni ( $18,5 \text{ g/cm}^3$ , 900 MPa), Kerntemperaturbeständigkeit 2000°C, Penetration um 20 % erhöht.
- **Medizin :** W-95Mo-Cu ( $18,0 \text{ g/cm}^3$ , korrosionsbeständig), CT-Maschinenabschirmung, 40 % längere Lebensdauer.

### 12.2.7 Technische Herausforderungen und Lösungen zur Leistungsverbesserung

#### Herausforderung

- **Leistungsbilanz :** Die Erhöhung der Dichte führt leicht zu einer Verringerung der Zähigkeit (Dehnung auf  $<2 \%$ ).
- **Prozesskomplexität :** HIP und SLM sind teuer (5.000 USD pro Tonne ).
- **Testschwierigkeit :** Prüfgeräte für hohe Temperaturen ( $> 2000 \text{ °C}$ ) und Ermüdungsverhalten sind teuer ( $> 2$  Millionen US-Dollar).

#### Lösung

- **Optimierung der Balance :** Mehrphasenverstärkung (Seltene Erden + Nanophase), Beibehaltung der Zähigkeit von 5–10 %.
- **Kostenkontrolle :** Haushaltsausrüstung (HIP auf 500.000 US-Dollar/Set reduziert), Rückgewinnung von Wolframpulver (Kostenreduzierung um 40 %).
- **Testverbesserungen :** Simulationsberechnungen ersetzen einige Experimente und reduzieren die Kosten um 30 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 12.2.8 Zusammenfassung der Anweisungen zur Leistungsverbesserung

Hubrichtung	Technische Mittel	Leistungssteigerungen	Anwendungsbeispiele
<b>Dichte und Festigkeit</b>	98%- 99 %,HIP	Die Dichte beträgt 19,2 g/cm <sup>3</sup> und die Intensität 1200 MPa	Raketengegengewicht
<b>Hohe Temperaturbeständigkeit</b>	Mo, Ta, Beschichtung	Temperaturbeständigkeit 2000°C, Oxidationsbeständigkeit um 25% erhöht	Geschosskern
<b>Verschleißfest und korrosionsbeständig</b>	WC, TiC, Mo-Cu	Härte 600 HV, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht	Medizinische Kollimatoren
<b>Zähigkeit und Ermüdung</b>	Nanopulver, CNT	Zähigkeit 23 MPa·m <sup>1/2</sup> , 30 % längere Lebensdauer	Gegengewichte für die Luftfahrt
<b>Herausforderung</b>	Leistungsbilanz, Kosten, Tests		
<b>Lösung</b>	Mehrphasenintensivierung, Lokalisierung, Simulation		

### 12.3 Simulation und rechnergestützte Materialwissenschaft von Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht

Die Forschung und Entwicklung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht basiert traditionell auf experimentellem Versuch und Irrtum, was kostspielig und zeitaufwendig ist. Die computergestützte Materialwissenschaft bietet einen effizienten und kostengünstigen Designansatz durch die Simulation atomarer, mikrostruktureller und makroskopischer Eigenschaften. Von der Molekulardynamik (MD) bis zur Finite-Elemente-Analyse (FEA) beschleunigen Simulationstechniken die Entwicklung und Leistungsoptimierung neuer Wolframlegierungen. Dieser Abschnitt untersucht die Anwendung dieser Technologien in Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht und ihr Potenzial.

#### 12.3.1 Hintergrund und Bedeutung von Simulation und Berechnung

##### Hintergrund

Die Leistung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht (z. B. W-Ni-Fe) wird durch Zusammensetzung, Korngröße und Prozessparameter beeinflusst. Die experimentelle Überprüfung jeder Formulierung dauert Monate und ist kostenintensiv (ca. 1–20.000 US-Dollar pro Tonne Testmaterial). Die computergestützte Materialwissenschaft nutzt mehrskalige Simulationen, um das Materialverhalten vorherzusagen, die Anzahl der Experimente zu reduzieren und den Entwicklungszyklus zu verkürzen.

##### Bedeutung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Leistungsvorhersage** : Simulieren Sie Dichte, Festigkeit und Temperaturbeständigkeit mit einer Genauigkeit von 90 % bis 95 %.
- **Kosteneinsparung** : 30–50 % Reduzierung der Testkosten und 50 % Verkürzung der Zykluszeit.
- **Designoptimierung** : Screenen Sie schnell die besten Formulierungen und Prozesse mit 2-3-mal mehr Effizienz.

### 12.3.2 Wichtigste Simulationstechniken und -methoden

#### Spezifische Technologien

- **Molekulardynamik (MD):**
  - **Prinzip** : Simulieren Sie Atom-zu-Atom-Wechselwirkungen und analysieren Sie Korngrenzen, Defekte und Diffusion.
  - **Anwendung** : Vorhersage der W-Ni-Grenzflächenbindungsenergie (ca. 5–6 eV) und der Auswirkung der Korngröße auf die Zähigkeit (15 % Anstieg < 1  $\mu\text{m}$ ).
  - **Werkzeuge** : LAMMPS, Rechenskala  $10^5$ - $10^6$  Atome, Zeitschritt 1 fs.
- **Dichtefunktionaltheorie (DFT):**
  - **Prinzip** : Die Quantenmechanik berechnet die elektronische Struktur und bewertet die Stabilität von Legierungen.
  - **Anwendung** : Berechnen Sie die Bildungsenthalpie von W-Mo-Ni (-0,5 eV/Atom) und optimieren Sie den Mo-Gehalt (5 %–10 %).
  - **Werkzeug** : VASP, Genauigkeit  $\pm 0,01$  eV, 10–20 Stunden/Rezept.
- **Finite-Elemente-Analyse (FEA):**
  - **Prinzip** : Simulieren Sie makroskopische Spannung, Wärmeleitung und Ermüdungsverhalten.
  - **Anwendung** : Vorhersage der Verformung des W-95Ni-Fe-Gegengewichts bei 2000 °C (<0,01 mm).
  - **Werkzeuge** : ANSYS, Netz mit  $10^5$ - $10^6$  Elementen,  $\pm 5$  % Genauigkeit.
- **BERECHNUNG DES PHASENDIAGRAMMS (CALPHAD):**
  - **Prinzip** : Thermodynamische Modellierung, Vorhersage des Phasengleichgewichts und des Sinterverhaltens.
  - **Anwendung** : Optimierte W-Ni-Fe-Sintertemperatur (1450 °C) mit einem Phasenänderungsfehler von <5 °C.
  - **Tool** : Thermo-Calc, Datenbank für W-Ni-Fe-Cu-Reihen.

**Technische Merkmale:** MD und DFT konzentrieren sich auf die Mikroebene (atomare Ebene), FEA und CALPHAD befassen sich mit der Makro- und Mesoebene und ergänzen sich hervorragend.

### 12.3.3 Anwendung der Simulation zur Leistungsvorhersage

#### Spezifische Anwendungen

- **Dichte und Intensität** : MD simulierte die Korngrenzenverschiebung von W-98Ni-Fe mit einer vorhergesagten Dichte von 19,2 g/cm<sup>3</sup> und einer Intensität von 1150 MPa (experimenteller

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fehler <5 %).

- **Hohe Temperaturbeständigkeit** : D FT berechnet den Schmelzpunkt von W-90Mo-Ni (2000 °C), FEA überprüft die Spannungsverteilung bei 2000 °C und die Festigkeit wird bei 900 MPa gehalten.
- **Abriebfestigkeit** : MD-simulierte W-90Ni-Fe/WC-Grenzfläche, Reibungskoeffizient 0,3, Härte 550 HV (experimentelle Konsistenz 95 %).
- **Ermüdungslebensdauer** : FEA-Analyse der Rissausbreitung von W-95Ni-Fe/CNT unter  $10^6$  Zyklen, Lebensdauer von  $1,3 \times 10^6$ .

Leistungsdaten W-95Ni-Fe-La (18,9 g/cm<sup>3</sup>): MD-vorhergesagte Zähigkeit 23 MPa·m<sup>1/2</sup>, FEA-geprüfte Ermüdungslebensdauer  $1,5 \times 10^6$ -fach, experimentelle Abweichung <3 %.

### 12.3.4 Anwendung der Simulation in der Prozessoptimierung

#### Spezifische Anwendungen

- **Sinteroptimierung** : CALPHAD sagt die optimale Sintertemperatur (1450 °C) für W-95Ni-Fe voraus, die Porosität wird auf 0,05 % reduziert und die FEA simuliert die Spannungskonzentration und passt den Druck auf 300 MPa an.
- **SLM-Formung** : FEA analysiert Laserleistung (4000 W) und Schichtdicke (50 µm) mit einer Dichte von 99,5 % und einer Restspannung von < 50 MPa.
- **Kornkontrolle** : MD-simuliertes Hochenergie-Kugelmahlen (600 U/min), Kornverfeinerung auf 50 nm, Größe < 1 µm nach dem Sintern und 15 % Zähigkeit.

**Fall:** Ein Forschungsinstitut verwendete CALPHAD zur Optimierung des W-98Ni-Fe-Sinterns (1450 °C, 2 Stunden) mit einer Dichte von 19,2 g/cm<sup>3</sup>, konsistenter experimenteller Überprüfung und 50 % der Testkosten.

### 12.3.5 Praktische Fallstudien zu Simulationstechniken

#### Sonderfälle

- **Gegengewicht für die Luftfahrt** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>), MD-simulierte Korngrenzenfestigkeit (6 eV), FEA-vorhergesagte Verformung bei 2000 °C (<0,01 mm), für Raketenkomponenten wurde der Entwicklungszyklus um 3 Monate verkürzt.
- **Militärischer Geschosskern** : W-90Mo-Ni (18,5 g/cm<sup>3</sup>), DFT-Berechnung der stabilen Mo-Phase (5 %), FEA-Verifizierung der Hochtemperaturfestigkeit (900 MPa), Eindringtiefe um 15 % erhöht.
- **Medizinische Abschirmung** : W-95Ni-Fe/WC (17,5 g/cm<sup>3</sup>), MD-vorhergesagte Verschleißfestigkeit (Härte 550 HV), CALPHAD-optimiertes Sintern (1400 °C), 40 % längere Lebensdauer.

### 12.3.6 Technische Herausforderungen und Lösungen für Simulation und Computing

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Herausforderung

- **Rechengenauigkeit** : MD und DFT erhöhen den Fehler komplexer Systeme (> 5 Elemente) auf 10–15 %.
- **Berechnungskosten** : Hochpräzise Simulationen erfordern Supercomputing (50–100 Stunden pro Rezept, 500–1000 US-Dollar Kosten).
- **Experimentelle Überprüfung** : Die Simulationsergebnisse erfordern eine große Anzahl experimenteller Kalibrierungen , und die Kosten betragen immer noch 30 %.

### Lösung

- **Verbesserung der Genauigkeit** : In Kombination mit maschinellem Lernen (ML) wird der DFT-Fehler auf 5 % korrigiert und das MD-Kraftfeld optimiert.
- **Kostensenkung** : Cloud Computing (10 USD pro Stunde), Supercomputing im Inland (Kostensenkung um 50 %).
- **Validierungsoptimierung** : Das Multiskalenmodell (MD+FEA) reduziert die Anzahl der Experimente um 50 % und integriert die Datenbankvalidierung.

### 12.3.7 Das zukünftige Potenzial von Simulation und Computing

#### Trend

- **Multiskalenintegration** : MD, DFT und FEA sind nahtlos miteinander verbunden und die Vorhersagegenauigkeit beträgt bis zu 98 %.
- **Echtzeitsimulation** : Durch KI-beschleunigtes Computing wird der Zeitaufwand für ein einzelnes Rezept auf 1 Stunde reduziert.
- **Datenbankaufbau** : Globale Simulationsdatenbank für Wolframlegierungen, die 100 Formeln abdeckt und F&E-Kosten teilt.

**Fallprognose:** Im Jahr 2030 wird W-99Ni-Fe ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ) mit AI+FEA entwickelt, mit einem Dichte- und Intensitätsvorhersagefehler von <2 %, und der Entwicklungszyklus wird auf 1 Monat verkürzt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 12.3.8 Zusammenfassung der Simulations- und Berechnungstabellen

Projekt	Inhalt
Analogtechnik	MD, DFT, FEA, CALPHAD
Leistungsvorhersage	Die Dichte beträgt 19,2 g/cm <sup>3</sup> , die Festigkeit 1150 MPa und die Temperaturbeständigkeit 2000°C
Prozessoptimierung	Sintern 1450°C, SLM 4000 W, Korn <1 µm
Anwendungsbeispiele	Gegengewichte für die Luftfahrt, militärische Geschoskerne, medizinische Abschirmung
Herausforderung	Genauigkeit, Kosten, Validierung
Lösung	ML-Korrektur, Cloud Computing, Datenbanken
Zukunftspotenzial	Multiskalenintegration, Echtzeitsimulation, Datenbankaufbau

### 12.4 KI-gestütztes Design und maßgeschneiderte Wolframlegierung mit hohem spezifischen Gewicht

Die rasante Entwicklung der künstlichen Intelligenz (KI) hat neue Werkzeuge für die Entwicklung und Anpassung von Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht hervorgebracht. Durch maschinelles Lernen (ML), Deep Learning (DL) und datenbasierte Modellierung kann KI schnell Rezepturen prüfen, Prozesse optimieren und die Leistung vorhersagen, um den Anforderungen personalisierter Materialien in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Medizin und anderen Bereichen gerecht zu werden. Dieser Abschnitt beleuchtet die Anwendung von KI in der Forschung und Entwicklung von Wolframlegierungen und ihr Potenzial.

#### 12.4.1 Hintergrund und Bedeutung von KI-gestütztem Design

##### Hintergrund

Die Entwicklung traditioneller Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht (z. B. W-Ni-Fe) basiert auf Experimenten und Erfahrung. Die Entwicklung einer neuen Formel kann Monate bis Jahre dauern und Zehn- bis Hunderttausende von Dollar kosten. KI beschleunigt diesen Prozess durch Big-Data-Analyse und Simulation, insbesondere im Hinblick auf steigende Anpassungsanforderungen wie spezifische Dichte und Temperaturbeständigkeit.

##### Bedeutung

- **Effizienzsteigerungen** : Verkürzung der Entwicklungszyklen um 50–70 %, von Monaten auf Wochen.
- **Kosteneinsparungen** : 60 % weniger Experimente und 30–50 % weniger Kosten.
- **Anpassung** : Reagieren Sie schnell auf spezifische Anforderungen mit einer Genauigkeit von über 95 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 12.4.2 Anwendung der KI-Technologie im Wolframlegierungsdesign

### Spezifische Technologien

- **Maschinelles Lernen (ML):**
  - **Methoden** : Überwachtes Lernen (z. B. Random Forest, Support Vector Machine) prognostizierte die Leistung und das Regressionsmodell optimierte Komponenten.
  - **Anwendung** : Eingabe W, Ni, Fe-Verhältnis, Ausgabedichte (19,0 g/cm<sup>3</sup>) und Intensität (1100 MPa) mit einem Fehler von <5 %.
  - **Tools: Python+Scikit-learn , Trainingsdatensatz 1000–5000 Gruppen.**
- **Tiefes Lernen (DL):**
  - **Methoden** : Ein Convolutional Neural Network (CNN) wurde verwendet, um die Mikrostruktur zu analysieren und eine neue Formel für den Entwurf kontradiktorischer Netzwerke (GAN) zu generieren.
  - **Anwendung** : Vorhersage der Korngröße (<1 μm ) anhand von SEM-Bildern zur Erzeugung von W-95Ni-Fe-La-Formulierungen.
  - **Tool** : TensorFlow, das 5–10 Stunden pro Modell benötigt.
- **Bestärkendes Lernen (RL):**
  - **Methode** : Optimieren Sie die Prozessparameter (z. B. Sintertemperatur 1450 °C, Druck 300 MPa).
  - **Anwendung** : SLM-Parameter anpassen (Leistung 4000 W) und Dichte auf 99,8 % erhöhen.
  - **Tool** : OpenAI Gym, 1000 Iterationen.
- **Datengetriebene Modellierung:**
  - **Methoden** : Experimentelle und Simulationsdaten wurden integriert, um eine Leistungsdatenbank zu erstellen.
  - **Anwendung** : Vorhersage der Verformung von W-98Ni-Fe bei 2000 °C (<0,01 mm).
  - **Tool** : Pandas+Thermo-Calc , Datenbankgröße > 10<sup>4</sup>.

### Technische Merkmale

ML eignet sich zur Leistungsvorhersage, DL eignet sich für komplexe Strukturen, RL optimiert Prozesse und ermöglicht die datengesteuerte Integration von Informationen aus mehreren Quellen.

## 12.4.3 Anwendung von KI in der Leistungsvorhersage und im Formulierungsdesign

### Spezifische Anwendungen

- **Dichte und Intensität** : ML sagte W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>, 1150 MPa) mit einem Fehler von <3 % voraus, was besser war als das traditionelle Ausprobieren.
- **Hohe Temperaturbeständigkeit** : DL-Analyse W-90Mo-Ni, vorhergesagter Schmelzpunkt 2000 °C, Festigkeit 900 MPa, Überprüfungskonsistenz von 95 %.
- **Abriebfestigkeit** : RL-optimierte W-90Ni-Fe/WC-Formulierung, Härte 550 HV, Reibungskoeffizient 0,3, experimentelle Konsistenz 98 %.
- **Kundenspezifische Anforderungen** : Eingabe „Dichte 19,0 g/cm<sup>3</sup>, Temperaturbeständigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1800°C“, AI-Ausgabe W-95Ni-Fe-Mo (Mo 5%), Entwicklungszeit 2 Wochen.

### Leistungsdaten

W-95Ni-Fe-La: Von AI vorhergesagte Dichte von 18,9 g/cm<sup>3</sup>, Zähigkeit von 23 MPa·m<sup>1/2</sup>, experimentelle Abweichung von <2 %, wodurch 70 % der Testkosten eingespart werden.

### 12.4.4 Anwendung von KI in der Prozessoptimierung und Fertigung

#### Spezifische Anwendungen

- **Sinteroptimierung** : RL-angepasstes W-95Ni-Fe-Sintern (1450 °C, 2 Stunden), die Porosität sank auf 0,04 % und die Dichte stieg um 0,2 g/cm<sup>3</sup>.
- **SLM kundenspezifisch** :DL optimierte Laserparameter (4000 W, Schichtdicke 50 µm ), mit einer Genauigkeit von ± 0,02 mm und einer Restspannung von < 40 MPa für komplexe Teile.
- **Mikrokontrolle** : ML prognostizierte Kugelmahlzeit (15 Stunden, 600 U/min), Korngröße < 1 µm und Zähigkeit um 15 % erhöht.

**Fall:** Eine Fabrik nutzt KI, um den W-98Ni-Fe-SLM-Prozess mit einer Dichte von 19,2 g/cm<sup>3</sup> und einer Festigkeit von 1200 MPa zu optimieren, wodurch die Produktionseffizienz um 30 % gesteigert und die Kosten um 20 % gesenkt werden.

### 12.4.5 Praktische Fallanalyse des KI-gestützten Designs

#### Sonderfälle

- **Gegengewicht für die Luftfahrt** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>), ML-Vorhersageformel (W 98 %, Ni:Fe = 5:5), durch FEA verifizierte Verformung (<0,01 mm), für Raketenkomponenten, Entwicklungszyklus auf 3 Wochen reduziert.
- **Militärischer Geschosskern** : W-90Mo-Ni (18,5 g/cm<sup>3</sup>), DL-Design Mo-Gehalt (5 %), RL optimiertes Sintern (1500 °C), Eindringtiefe um 15 % erhöht, Kosten um 30 % gesenkt.
- **Medizinische Abschirmung** : W-95Ni-Fe/WC (17,5 g/cm<sup>3</sup>), AI-Sonderhärte 550 HV, 40 % längere Lebensdauer, wird in Kollimatoren von CT-Geräten verwendet.

### 12.4.6 Technische Herausforderungen und Lösungen der KI-Technologie

#### Herausforderung

- **Datenqualität** : Die Trainingsdaten sind unzureichend (< 1000 Gruppen) oder verzerrt, und der Vorhersagefehler steigt auf 10–15 %.
- **Rechenressourcen** : Das DL-Modell erfordert GPU-Cluster (50–100 \$ pro Stunde), was für kleine Unternehmen schwer zu bezahlen ist.
- **Modellerklärung** : Die „Black Box“-Natur der KI lässt sich nur schwer durch den physikalischen Mechanismus erklären, was die akademische Anerkennung einschränkt.

#### Lösung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Datenerweiterung** : Durch die Integration von Simulations- (MD, FEA) und experimentellen Daten wurde die Stichprobengröße auf  $10^4$  Gruppen erhöht und der Fehler auf 5 % reduziert.
- **Ressourcenoptimierung** : Cloud-KI-Plattform (5–10 \$ pro Stunde), inländische GPU (Kostensenkung um 50 %).
- **Erklärende Verbesserung** : Die SHAP-Analyse zeigt die Bedeutung von Merkmalen (z. B. trägt der W-Gehalt 80 % zur Dichte bei) und kombiniert sie mit der Validierung des physikalischen Modells.

#### 12.4.7 Zukünftiges Potenzial für KI-gestütztes Design

##### Trend

- **Echtzeitdesign** : KI + Cloud Computing, der Zeitaufwand für das Design einzelner Rezepte wird auf 1 Stunde reduziert.
- **Intelligente Anpassung** : Der Benutzer gibt die Anforderungen ein (z. B. „19,0 g/cm<sup>3</sup>, Temperaturbeständigkeit 2000 °C“) und die KI generiert automatisch das Rezept und den Prozess.
- **Globale Zusammenarbeit** : KI-gesteuerte Datenbank für Wolframlegierungen, gemeinsame Nutzung von Daten auf  $10^5$ -Ebene, dreimal höhere F&E-Effizienz.

Der Fall prognostiziert, dass im Jahr 2030 das KI-Design von W-99Ni-Fe (19,3 g/cm<sup>3</sup>, 1300 MPa) die SLM-Parameter in Echtzeit optimieren wird, mit einem Entwicklungszyklus von 1 Woche und einer Kostensenkung von 50 %.

#### 12.4.8 Zusammenfassung des KI-gestützten Designformulars

Projekt	Inhalt
<b>KI-Technologie</b>	ML, DL, RL, datengesteuerte Modellierung
<b>Leistungsvorhersage</b>	Die Dichte beträgt 19,2 g/cm <sup>3</sup> , die Festigkeit 1150 MPa und die Temperaturbeständigkeit 2000°C
<b>Prozessoptimierung</b>	Sintern 1450°C, SLM 4000 W, Korn <1 μm
<b>Anwendungsbeispiele</b>	Gegengewichte für die Luftfahrt, militärische Geschoskerne, medizinische Abschirmung
<b>Herausforderung</b>	Datenqualität, Rechenressourcen, Interpretierbarkeit
<b>Lösung</b>	Datenerweiterung, Cloud Computing und SHAP-Analyse
<b>Zukunftspotenzial</b>	Echtzeit-Design, intelligente Anpassung, globale Datenbank

#### 12.5 Zusammenhang zwischen Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht und hochentropischen Legierungen mit Wolfram

Wolframlegierungen (wie W-Ni-Fe) und wolframhaltige Hochentropielegierungen (HEAs) sind zwei Hochleistungswerkstoffe, die sich in Zusammensetzung, Mikrostruktur und Anwendungsgebieten unterscheiden und gleichzeitig verwandt sind. Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bestehen hauptsächlich aus Wolfram und zeichnen sich durch hohe Dichte und Festigkeit aus. Wolframhaltige Hochentropielegierungen hingegen werden mit mehreren Hauptelementen entwickelt, um eine hervorragende Gesamtleistung zu erzielen. Dieser Abschnitt analysiert die Beziehung zwischen beiden und untersucht ihr Potenzial für technologische Konvergenz und Entwicklung.

### 12.5.1 Hintergrund und grundlegende Konzepte

#### Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht

- **Definition** : Hauptsächlich Wolfram (W, 85 % – 99 %), ergänzt durch eine kleine Menge Bindephase (wie Ni, Fe, Cu), mit einer Dichte von 17,0 – 19,3 g/cm<sup>3</sup> und einer Zugfestigkeit von 700 – 1200 MPa.
- **Eigenschaften** : Hohe Dichte, hohe Festigkeit, Mikrostruktur besteht aus Wolframpartikeln + Bindephasen-Duplexstruktur.
- **Anwendung** : Gegengewicht in der Luftfahrt, militärischer Geschosskern, medizinische Abschirmung.

#### Wolframhaltige Hochentropielegierungen

- **Definition** : Besteht aus 5 oder mehr Elementen (W, Mo, Ta, Nb, Zr usw.), jedes mit einem Gehalt von 5 %–35 % und einem hohen Entropiewert (> 1,5 R, R ist eine Gaskonstante).
- **Merkmale** : Einphasige feste Lösung (z. B. BCC-Struktur) mit hoher Festigkeit, hoher Temperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit.
- **Anwendungen** : Flugzeugtriebwerke, Komponenten von Kernreaktoren.

Die Beziehung basiert darauf, dass beide Wolfram enthalten und sich dessen hohe Dichte und hohen Schmelzpunkt (3422 °C) zunutze machen. Die Designkonzepte sind jedoch unterschiedlich: Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht betonen die Dominanz von Wolfram, und wolframhaltige HEA konzentriert sich auf die Synergie mehrerer Elemente.

### 12.5.2 Zusammensetzungs- und Strukturbeziehungen

#### Zutatenvergleich

- **Wolframlegierung mit hohem spezifischen Gewicht** : W macht 85–99 % aus, Ni, Fe und andere kleine Mengen werden hinzugefügt und der Entropiewert ist niedrig (<1R), was zu einem System mit niedriger Entropie führt.
- **Wolfram HEA** : W macht 10–35 % aus, was durch andere Elemente mit hohem Schmelzpunkt (wie etwa Mo 20 % und Ta 20 %) ausgeglichen wird und einen hohen Entropiewert (1,5–2R) aufweist.

#### Strukturvergleich

- **Wolframlegierung mit hohem spezifischen Gewicht** : Duplexstruktur, Wolframpartikel (BCC, Größe 1–10 µm) sind in eine Ni-Fe-Matrix eingebettet und die Phasenschnittstelle ist offensichtlich.
- **Wolfram-HEA** : einphasige BCC- oder FCC-Feststofflösung, gleichmäßige Körnung (<5 µm),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

keine offensichtliche zweite Phase, hohe atomare Verunreinigung.

#### Beziehungsanalyse

- **Schnittmenge** : Wolfram als häufiges Element bietet eine Grundlage für hohe Dichte und hohen Schmelzpunkt.
- **Unterschiede** : Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht beruhen auf der Verstärkung der Wolframpartikel, HEA hingegen auf der Verstärkung der Lösung und der Gitterverzerrung.

### 12.5.3 Zusammenhänge und Leistungsunterschiede

#### Leistungsvergleich

- **Dichte** : 17,0–19,3 g/cm<sup>3</sup> für Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht, 12,0–16,0 g/cm<sup>3</sup> für Wolfram-HEA (niedrigerer W-Gehalt).
- **Festigkeit** : Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht 700–1200 MPa, Wolfram HEA 1000–2000 MPa (lösungsverstärkt).
- **Hohe Temperaturbeständigkeit** : Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht 1500–2000 °C, Wolfram HEA 2000–2500 °C (mehrelementstabil).
- **Zähigkeit** : Dehnung bei Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht 5–20 %, Wolfram-HEA 10–30 % (Gitterverzerrung verlangsamt Rissbildung).
- **Korrosionsbeständigkeit** : Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht (Ni korrodiert leicht), Wolfram HEA ausgezeichnet (Oxidationsbeständigkeit von Ta, Nb).

#### Beziehungsanalyse

- **Kontakt** : Beide sind beständig gegen hohe Temperaturen und für extreme Umgebungen geeignet; Wolfram erhöht die Dichte und Festigkeit.
- **Unterschiede** : Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht haben eine höhere Dichte und HEA hat stärkere Gesamteigenschaften, aber eine begrenzte Dichte.

#### Testdaten

- W-95Ni-Fe: 18,0 g/cm<sup>3</sup>, 1000 MPa, 1500 °C.
- WMoTaNbZr (各 20 %): 14,5 g/cm<sup>3</sup>, 1800 MPa, 2200 °C.

### 12.5.4 Integration von Fertigungsprozessen

#### Prozessvergleich

- **Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht** : Pulvermetallurgie (Pressen + Sintern, 1450 °C), SLM (4000 W), HIP (300 MPa).
- **Wolfram-HEA** : Vakuum-Lichtbogenschmelzen (> 3000 °C), Pulvermetallurgie (1600 °C), additive Fertigung (SLM).

#### Schnittpunkt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Pulvermetallurgie** : Bei beiden kann das Pulver durch Hochenergie-Kugelmahlen (600 U/min) verfeinert, gesintert und verdichtet werden.
- **Additive Fertigung** : SLM ist für beides geeignet, und Wolfram-HEAs erfordern eine höhere Leistung (5000 W), um das Schmelzbad zu kontrollieren.
- **Technologiefusion** : Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht basiert auf dem Mehrelementdesign von HEA, beispielsweise W-90Mo-Ni-Ta, und verfügt sowohl über eine hohe Dichte (18,5 g/cm<sup>3</sup>) als auch über eine hohe Temperaturbeständigkeit (2000 °C).

**Fall:** Ein Forschungsinstitut verwendete SLM, um W-80Mo-Ni-Ta (18,0 g/cm<sup>3</sup>) mit einer Festigkeit von 1300 MPa und einer Temperaturbeständigkeit von 2100 °C herzustellen, das die Vorteile zweier Typen kombinierte.

#### 12.5.5 Komplementarität und Wettbewerb im Anwendungsbereich

##### App-Vergleich

- **Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht** : Gegengewicht (Luftfahrt), Geschosskern (Militär), Abschirmung (Medizin), hohe Dichte ist erforderlich.
- **Wolfram-HEA** : Turbinenschaufeln (Luftfahrt), Reaktorkomponenten (Kernenergie), hohe Temperaturbeständigkeit und Festigkeit sind erforderlich.

##### Beziehungsanalyse

- **Ergänzend** : Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht eignen sich für statische Anforderungen mit hoher Dichte (z. B. Gegengewichte), und Wolfram-HEA eignet sich für dynamische Hochtemperaturszenarien (z. B. Rotorblätter).
- **Wettbewerb** : Im Bereich der Rüstungsindustrie konkurrieren beide miteinander , beispielsweise muss der Kern des Geschosses sowohl Dichte als auch Temperaturbeständigkeit berücksichtigen .

##### Fallvergleich

- **Gegengewicht für die Luftfahrt** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>), kleine Größe, Kosten 30.000 US-Dollar/Tonne.
- **Triebwerksschaufeln** : WMoTaNbZr (14,5 g/cm<sup>3</sup>), Temperaturbeständigkeit 2200°C, Kosten 50.000 US-Dollar/Tonne.

#### 12.5.6 Technische Fallstudien

##### Sonderfälle

- **Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht** : W-95Ni-Fe (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 1000 MPa), Raketengegengewicht, Dichtepriorität.
- **Wolfram-HEA** : WMoTaNb (15,0 g/cm<sup>3</sup>, 1800 MPa), Luftfahrtschaufeln, Temperaturbeständigkeit wird bevorzugt.
- **Fusionsdesign** : W-85Mo-Ni-Ta (18,2 g/cm<sup>3</sup>, 1400 MPa), unter Berücksichtigung von Dichte und Temperaturbeständigkeit, wird in Raketenteilen verwendet, mit 20 % höherer Leistung.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 12.5.7 Technische Herausforderungen und Lösungen in Beziehungen

#### Herausforderung

- **Kompromiss zwischen Dichte und Festigkeit** : HEA erhöht den W-Gehalt und erhöht die Dichte, während die Zähigkeit abnimmt (<5 %).
- **Prozesskomplexität** : Das Fusionsdesign muss durch mehrere Elemente homogenisiert werden, was die Kosten um 30 % erhöht.
- **Leistungsvorhersage** : Die Simulationsmodelle der beiden Legierungsarten sind sehr unterschiedlich und weisen einen Fehler von 10–15 % auf.

#### Lösung

- **Optimierte Formulierung** : W-HEA (z. B. W40Mo20Ta20Nb20), Dichte 16,0 g/cm<sup>3</sup>, Zähigkeit 15 %.
- **Prozessverbesserung** : Mehrzonensintern (Temperaturunterschied < 5 °C), SLM+HIP, Kostensenkung um 20 %.
- **Simulationsfusion** : AI+MD-Vorhersage, der Fehler wird auf 5 % reduziert.

### 12.5.8 Zukunftsaussichten und Entwicklungstrends

#### Trend

- **Technologieintegration** : Wolframlegierung mit hohem spezifischen Gewicht wird in Bezug auf HEA entworfen und W-HEA (wie W50Mo20Ni15Fe15) wird mit einer Dichte von 17,5 g/cm<sup>3</sup> und einer Festigkeit von 1500 MPa entwickelt.
- **Anwendungserweiterung** : W-HEA wird aufgrund seiner hohen Dichte und hohen Temperaturbeständigkeit in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Kernenergie eingesetzt.
- **Intelligentes Design** : KI optimiert W-HEA-Formulierungen, um die Leistung bis 2030 um 30 % zu verbessern.

Die Prognose geht davon aus, dass W-80Mo-Ni-Ta-Zr (18,5 g/cm<sup>3</sup>, 1600 MPa, 2200 °C) in der nächsten Generation von Raketenkomponenten verwendet wird und eine Steigerung der Gesamtleistung um 25 % mit sich bringt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 12.5.9 Zusammenfassung der Beziehungstabellen

Projekt	Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Wolframhaltige Hochentropielegierungen	Konvergenzpotenzial
Zutaten	Bei 85%-99 %,Ni-Fe Kleine Menge	W 10 %-35 %, mehrelementig ausgewogen	W-HEA, Multielementoptimierung
Struktur	Duplex, Wolframpartikel + Matrix	Einphasiger BCC/FCC, feste Lösung	Kombination aus Einzel- und Doppel
Dichte	17,0-19,3 g/cm <sup>3</sup>	12,0-16,0 g/cm <sup>3</sup>	17,5-18,5 g/cm <sup>3</sup>
Stärke	700-1200 MPa	1000-2000 MPa	1300-1600 MPa
Temperaturbeständigkeit	1500-2000°C	2000-2500°C	2000-2200°C
anwenden	Gegengewicht, Geschosskern, Abschirmung	Rotorblätter, Reaktorteile	Multifunktionale Komponenten
Herausforderung	Dichte-Zähigkeits-Balance, Prozesskosten	Mangelnde Dichte und Komplexität	Leistungsoptimierung und Kostenkontrolle

### 12.6 Wolframlegierung mit geringer Toxizität (Ni-frei oder Legierung mit niedrigem Ni-Gehalt).

#### (1) Forschungshintergrund und Entwicklungstrend

Konventionelle Wolframlegierungen mit hohem spezifischem Gewicht werden von W-Ni-Fe oder W-Ni-Cu dominiert, wobei Nickel (Ni) ein häufiges Bindephasenelement ist, das die Duktilität und Korrosionsbeständigkeit der Legierung verbessert. Nickel ist jedoch für den Menschen giftig, und langfristige Exposition kann zu Nickeldermatitis, Nickelvergiftung oder Krebs führen. Angesichts der zunehmend strengeren Umweltvorschriften (wie der EU-REACH-Zertifizierung und der RoHS-Vorschriften) ist die Forschung an nickelarmen oder nickelfreien Wolframlegierungen zu einer wichtigen Richtung geworden.

#### (2) Alternativen zu Wolframlegierungen mit geringer Toxizität

Um die Toxizität von Nickel zu reduzieren oder zu eliminieren, haben Forscher mehrere Alternativen entwickelt:

##### (1) Ni-freie Wolframlegierung

- Kupfer (Cu) oder Kobalt (Co) verwendet, um die Toxizität der Legierung zu verringern und gleichzeitig eine gewisse Duktilität und Korrosionsbeständigkeit beizubehalten.
- Repräsentatives Legierungssystem :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **W-Cu-Legierung** : nicht magnetisch, ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit, geeignet für elektronische Verpackungen und medizinische Anwendungen.
- **W-Fe-Co-Legierungen** : Verbesserte Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit durch die Einführung von Kobalt, geeignet für die Luft- und Raumfahrt und Hochtemperatur-Strukturteile.

## (2) Wolframlegierung mit niedrigem Ni-Gehalt

- Die Leistung wird durch Reduzierung des Nickelgehalts und Einführung anderer Bindephasen wie Fe, Co, Cr, Mo usw. verbessert.
- **Forschungsergebnisse** :
  - Studien haben gezeigt, dass durch die Reduzierung des Nickelgehalts auf der Basis von W-Ni-Fe (z. B. von 7 % auf 3 % bis 5 %) die Legierung weiterhin eine gute Duktilität behält und das Toxizitätsrisiko erheblich verringert werden kann.
  - Durch die Zugabe von Cr (Chrom) und Mo (Molybdän) kann die Korrosionsbeständigkeit von nickelarmen Legierungen verbessert werden, sodass sie sich für den Einsatz in biomedizinischen und umwelttechnisch anspruchsvollen Bereichen eignen.

## (3) Anwendungsaussichten einer Wolframlegierung mit geringer Toxizität

- **Biomedizin** : Materialien zum Schutz vor Röntgen- und Gammastrahlen als Ersatz für herkömmliche bleihaltige Materialien und zur Verringerung der Umweltverschmutzung.
- **Elektronikindustrie** : nichtmagnetische Verpackungsmaterialien zur Verbesserung der Zuverlässigkeit elektronischer Komponenten.
- **Luft- und Raumfahrt** : In Bereichen mit strengen Umweltauflagen können Legierungen mit geringer Toxizität als Strukturmaterialien verwendet werden.

## 12.7 Nanostrukturierte Wolframlegierungen

### (1) Forschungshintergrund und Entwicklungstrend

Traditionelle Wolframlegierungen mit hohem spezifischen Gewicht werden hauptsächlich im Flüssigphasensinterverfahren hergestellt. Sie weisen zwar eine hohe Dichte und gute mechanische Eigenschaften auf, sind aber aufgrund ihrer großen Körner nur begrenzt zäh und fest. Darüber hinaus neigen traditionelle Legierungen in extremen Umgebungen wie hohen Temperaturen und hoher Stoßbelastung zur Mikrorissbildung und verkürzen so die Lebensdauer. Daher stehen nanostrukturierte Wolframlegierungen seit einigen Jahren im Fokus der Forschung, um die Eigenschaften der Legierung durch Verfeinerung der Körner zu verbessern.

### (2) Herstellungstechnologie der nanostrukturierten Wolframlegierung

Um Mikrostrukturen im Nanomaßstab zu erhalten, verwendeten die Forscher die folgenden Herstellungsmethoden:

#### (1) Hochenergie-Kugelmühle + Sinterprozess

- Wolframpulverpartikel werden durch Hochenergie-Kugelmahlen auf die Nanometerskala (normalerweise weniger als 100 nm) gemahlen.
- Anschließend erfolgt das isostatische Drucksintern (HIP), das Entladungsplasmasintern (SPS)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oder das Heißpressintern, um bei niedrigeren Temperaturen hochdichte nanostrukturierte Legierungen zu erzielen.

- Durch dieses Verfahren werden die Festigkeit und Verschleißfestigkeit des Materials deutlich verbessert.

### (2) Nanoabscheidungs- und Beschichtungstechnologie

- der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) oder physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) werden nanostrukturierte Beschichtungen auf der Oberfläche herkömmlicher Wolframlegierungen abgeschieden, um die Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturstabilität des Materials zu verbessern.
- Beispielsweise verbessert die Abscheidung nanoskaliger TiN- oder WC-Beschichtungen auf W-Ni-Fe-Substraten die Abriebfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit.

### (3) Rascherstarrungstechnologie

- Mittels Laserschmelzen (SLM), Lichtbogenschmelzen oder Plasmaspritzen werden durch schnelles Abkühlen ultrafeine Kornstrukturen erzeugt, die die Festigkeit und Zähigkeit der Legierung weiter verbessern.

### (3) Leistungsvorteile nanostrukturierter Wolframlegierungen

Im Vergleich zu herkömmlichen Wolframlegierungen haben nanostrukturierte Wolframlegierungen folgende Vorteile:

Leistungsmetriken	Konventionelle Wolframlegierungen	Nanostrukturierte Wolframlegierungen
<b>Körnung</b>	1~10 µm	10~100 nm
<b>Zugfestigkeit</b>	700 bis 1000 MPa	> 1200 MPa
<b>Duktilität</b>	2 % bis 5 %	> 10 %
<b>Härte</b>	300~400 PS	> 500 PS
<b>Abriebfestigkeit</b>	normal	Deutlich verbessert
<b>Hohe Temperaturbeständigkeit</b>	hervorragend	Besser

### (4) Anwendungsaussichten nanostrukturierter Wolframlegierungen

- **Militärbereich** : Wird für hochfeste panzerbrechende Geschoskerne verwendet, um die Schlagzähigkeit und Bruchfestigkeit zu verbessern.
- **Luft- und Raumfahrt** : Herstellung von verschleißfesten Hochtemperaturteilen wie Raketendüsen und Triebwerksschaufeln.
- **Nuklearindustrie** : als korrosionsbeständiges Schutzmaterial in Umgebungen mit hoher Strahlung.

**Elektronikindustrie** : Verpackungsmaterialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit und geringer Ausdehnung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Anhang

### 1. Glossar der schweren Wolframlegierungen

CHINESISCH	ENGLISCH	JAPANISCH	KOREANISCH
Wolframlegierung mit hoher Dichte	Hochdichte Wolframlegierung	Wolframlegierung mit hoher Dichte	Regierung. Technik Erwartet
Stahl	Wolfram	Wolfram	Technik
Zepter	Nickel	Nickel	Neunzig
Eisen	Eisen	Eisen	Kapitel
Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kaufen
Goldschmied	Molybdän	Molybdän	Minimalismus
Gold	Tantal	Tantal	Tata
Eisen	Niob	Niob	Nirwana
Schraubendreher	Zirkonium	Zirkonium	Ziryo
Seltene Erden	Seltene Erden	Seltene Erden	희토류 2
Klebphase	Binderphase	Kombinierte Phase	Koreanisch
Pulvermetallurgie	Pulvermetallurgie	Pulvermetallurgie	2
Sintern	Sintern	Sintern	소결
Heißisostatisches Pressen	Heißisostatisches Pressen (HIP)	Heiisostatische Druckpresse	2 등압 프레스
Selektives Laserschmelzen	Selektives Laserschmelzen (SLM)	Selektives Laserschmelzen	Format Mieten Kapazität
Hochleistungs-Kugelmahlen	Hochenergie-Kugelmahlen	Hochenergiemahlen	Goen 불 Schreibe

#### 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)

			einen Kommentar Antworten abbrechen
Kühlung und statischer Druck	Kaltisostatisches Pressen (CIP)	Kaltisostatische Presse	Ausruhen Registrieren Persephone
Vakuumbacken	Vakuumsintern	Vakuumsintern	Nachricht Lieferung
Kupfer	Kupferinfiltration	Kupferinfiltration	리 침투
Körnung	Körnung	Kristalline Partikelgröße	결정립 크기
Dichte	Dichte	Dichte	밀도
Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit	인장 도
Streckgrenze	Streckgrenze	Streckgrenze	항복 도
Härte	Härte	Härte	도
Verlängerung	Verlängerung	Verlängerung	2
Zähigkeit	Zähigkeit	Zähigkeit	인성
Bruchzähigkeit	Bruchzähigkeit	Zerstörungszähigkeit	파괴 인성
Ermüdungsleben	Ermüdungslebensdauer	Ermüdungslebensdauer	피로 2
Temperaturbeständigkeit	Temperaturbeständigkeit	Hitzebeständigkeit	2
Verschleißfestigkeit	Verschleißfestigkeit	Abriebfestigkeit	Ich heiße
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsbeständigkeit	Mein Herz
Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Jeon Do-yeon
Antimikrobiell	Oxidationsbeständigkeit	Oxidationsbeständigkeit	Mein Glück
Hochwertige Legierung	Hochentropielegierung (HEA)	Hochentropielegierungen	Zur Aktion Erwartet
Mischkristallverfestigung	Festlösungsverfestigung	Mischkristallverfestigung	Reservierung Han Hye
Korngrenze	Korngrenze	Korngrenze	결정립 경계
Porosität	Porosität	Porosität	기공률
Mikrostruktur	Mikrostruktur	Mikrostruktur	미세 구조
Nanokomposite	Nanokomposit	Nanoconpot	나노복합재료
Additive Fertigung	Additive Fertigung	Additive Fertigung	적층 2
Molekulardynamik	Molekulardynamik (MD)	Molekulardynamik	분자 동역학
Dichtefunktionaltheorie	Dichtefunktionaltheorie (DFT)	Dichtebezogene Zahlentheorie	밀도 범함수 론
Finite-Elemente-Analyse	Finite-Elemente-Analyse (FEA)	Finite-Elemente-Analyse	2 요소 Koreanisch
Phasendiagrammberechnung	CALPHAD	Fotoberechnung	도 계산
Maschinelles Lernen	Maschinelles Lernen (ML)	Maschinelles Lernen	Veranstaltungen Gut

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)

Vertieftes Lernen	Tiefes Lernen (DL)	Tiefes Lernen	Denken Gut
Intensivchemie	Bestärkendes Lernen (RL)	Bestärkendes Lernen	Han Hye Gut
Datenlaufwerk	Datengesteuert	Datengesteuert	Datenbank Leben
Nachahmung	Simulation	Simulation	Serienbezeichnung
Gewichtsverteilung	Gegengewicht	Gegengewicht	Viel Glück
Ballistischer Kern	Durchdringungsgerät	Geschosskern	Ähnliche Unternehmen
Verdeckt	Abschirmung	Abschirmmaterial	Mitwirkender
Standard-Richtwerkzeug	Kollimator	Kollimator	Zeit
Luft- und Raumfahrt	Luft- und Raumfahrt	Luft- und Raumfahrt	Englisch:
Militäringenieur	Militärindustrie	Verteidigungsindustrie	군수 Verwenden
Medizinisch	Medizinisch	medizinische Versorgung	Musik
Industrie	Industriell	Industrie	Verwenden
Tiefseeforschung	Tiefseeforschung	Tiefseeforschung	Gut Tae
Sammlung	Recycling	Recycling	Arbeitszeit
CO2-Fußabdrücke	CO2-Fußabdruck	CO2-Fußabdruck	Titel Produktion
Wasserfußabdrücke	Wasser-Fußabdruck	Wasser-Fußabdruck	물 Produktion
Umweltschutz	Umweltschutz	Umweltschutz	Viel Glück Sicht
Analyse des Originals	Kostenanalyse	Kostenanalyse	Beschränkt Zeit
Regularisierung	Anpassung	Anpassung	Poster
Intelligent	Intelligent	Intelligent	Leitartikel
Entwicklung eines Stahlbergwerks	Wolframbergbau	Wolframbergbau	Technik Unternehmen
Gasfreisetzung	Abgasemission	Abgasemissionen	Budget Freigeben
Wasseraufbereitung	Abwasserbehandlung	Abwasserbehandlung	Vertrauen Erste
Energieverbrauch	Energieverbrauch	Energieverbrauch	Eren Sauce
Verlustfreie Messung	Zerstörungsfreie Prüfung (NDT)	Zerstörungsfreie Prüfung	Privat Suchen
Erweiterungstest	Zugversuch	Prüfen	인장 시험
Härteprüfung	Härteprüfung	Härteprüfung	도 시험
Ultraschallprüfung	Ultraschallprüfung	Ultraschalluntersuchung	2. 검사
Oberflächenrauheit	Oberflächenrauheit	Raue Oberfläche	표면 거칠기
Toleranz	Toleranz	Toleranz	공차
Eigenspannung	Eigenspannung	Eigenspannung	Eintrag Arbeiten
Wärmeausdehnungskoeffizient	Wärmeausdehnungskoeffizient	Wärmeausdehnungskoeffizient	Arbeiten Ereignis
Schmelzpunkt	Schmelzpunkt	Schmelzpunkt	Kapazität
Hydrierter Stahl	Wolframoxid	Wolframoxid	Sicht Technik
Karbonat	Wolframkarbid (WC)	Wolframkarbid	Etikett Technik
Stahlpulver	Wolframpulver	Tangusten-Pulver	텅스텐 분말
Biokompatibilität	Biokompatibilität	Biokompatibilität	생체 2

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)

Strahlenschutz	Strahlenschutz	Strahlenschutz	2 차폐
Qualitätsverlust	Massenverlust	Qualitätsverlust	량 손실
Abscheidungsrate	Abscheidungsrate	Akkumulationsgeschwindigkeit	2 도
Laserleistung	Laserleistung	Laserleistung	Mieten Empfohlen
Dicke	Schichtdicke	Schichtdicke	층 1
Wärmebehandlung	Wärmebehandlung	Wärmebehandlung	Ich bin
Legierungsdesign	Legierungsdesign	Legierungsdesign	Erwartet Beschreibung
Verbesserte Leistung	Leistungsoptimierung	Leistungsoptimierung	Erwachsene Neueste Filme
Multiskalenmodellierung	Multiskalensimulation	Multiskalensimulation	Nächste Himmel Serienbezeichnung
Datenbibliothek	Datenbank	Datenbank	Datenbank
Kristallverformung	Gitterverzerrung	Gitterverzerrung	Sucher Arbeiten
Schnittstellenverbindung	Schnittstellenverbindung	Schnittstellenverbindung	Markt Ergebnisse
Reibungskoeffizient	Reibungskoeffizient	Reibungskoeffizient	Mich Ereignis
形变	Verformung	变形	변형
热导率	Wärmeleitfähigkeit	Chinesische Küche	열전도율

## 2. Referenzen für schwere Wolframlegierungen

### Standarddokumente

1. ASTM B777-15, Standard-Spezifikation für Wolframbasis, hochdichtes Metall, American Society for Testing and Materials, 2020.
2. ASTM E8/E8M-21, Standardprüfverfahren für Zugprüfungen an metallischen Werkstoffen, ASTM International, 2021.
3. ASTM E18-20, Standardprüfverfahren für die Rockwell-Härte metallischer Werkstoffe, ASTM International, 2020.
4. ASTM F288-19, Standard-Spezifikation für Wolframdraht für medizinische Anwendungen, ASTM International, 2019.
5. ISO 21358:2007, Wolfram und Wolframlegierungen – Bestimmung von Eigenschaften, Internationale Organisation für Normung, 2007.
6. ISO 4498:2010, Sintermetallische Werkstoffe – Bestimmung der Härte, ISO, 2010.
7. ISO 16823:2012, Zerstörungsfreie Prüfung – Ultraschallprüfung, ISO, 2012.
8. GB/T 26038-2020, Schwere Legierungsstäbe auf Wolframbasis, National Administration of Standardization, 2020.
9. GB/T 228.1-2010, Zugprüfung von metallischen Werkstoffen, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, National Administration of Standardization, 2010.
10. GB/T 3875-2017, Chemische Analysemethoden für Wolfram und Wolframlegierungen, National

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Administration of Standardization, 2017.

11. GJB 455-1988, Spezifikation für militärische Materialien aus Wolframlegierungen, China Military Standards, 1988.
12. GJB 150.3A-2009, Labor-Umwelttestmethoden für militärische Ausrüstung, Teil 3: Hochtemperaturtests, China Military Standards, 2009.
13. JIS H 4463:2002, Wolframlegierungen für elektronische und industrielle Anwendungen, Japanisches Komitee für Industrienormen, 2002.
14. JIS Z 2344:2009, Ultraschallprüfung von metallischen Werkstoffen, JIS, 2009.
15. EN 10204:2004, Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen, Europäisches Komitee für Normung, 2004.

### Wissenschaftliche Literatur

16. German, RM, Pulvermetallurgie von Wolframlegierungen, Materials Science and Engineering, Vol. 352, 2015, S. 123-135.
17. Zhang, Y., et al., Hochentropielegierungen: Eine Überprüfung von Design und Eigenschaften, Journal of Materials Research, Vol. 34, 2019, S. 789-804.
18. Liu, W., et al., Microstructure and Mechanical Properties of W-Ni-Fe Alloys, Acta Materialia, Bd. 78, 2020, S. 45-56.
19. Wang, X., Fortschritte beim selektiven Laserschmelzen von Wolframlegierungen, Additive Manufacturing, Vol. 29, 2021, S. 101-112.
20. Chen, P., et al., Auswirkungen von Seltenerdelementen auf W-Ni-Fe-Legierungen, Materials & Design, Vol. 186, 2020, S. 108-119.
21. Kim, JH, Hochtemperaturverhalten von Wolframlegierungen, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 845, 2021, S. 156-167.
22. Li, Z., et al., Nanocomposite Tungsten Alloys: Synthesis and Properties, Scripta Materialia, Bd. 195, 2021, S. 45-50.
23. Yeh, JW, Jüngste Fortschritte bei Hochentropielegierungen, Materials Chemistry and Physics, Bd. 210, 2018, S. 3-15.
24. Sun, Y., Simulation von Wolframlegierungen mittels Molekulardynamik, Computational Materials Science, Vol. 172, 2020, S. 109-120.
25. Gao, M., Maschinelles Lernen im Materialdesign: Ein Überblick, Advanced Materials, Vol. 33, 2021, S. 200-215.
26. Zhou, Q., et al., Korrosionsbeständigkeit von W-Ni-Cu-Legierungen, Corrosion Science, Vol. 165, 2020, S. 108-115.
27. Tanaka, T., Verschleißfestigkeit von Wolframkarbid-verstärkten Legierungen, Wear, Vol. 450, 2020, S. 203-210.
28. Huang, S., Wärmeleitfähigkeit von Wolframlegierungen, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 148, 2020, S. 119-130.
29. Park, S., Ermüdungseigenschaften von hochdichten Wolframlegierungen, Materials Science Forum, Vol. 1016, 2021, S. 345–352.

### Branchenberichte und Daten

#### 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)

30. Globale Markteinblicke, Marktgröße und Prognose für Wolframlegierungen, 2023–2030, 2023.
31. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: Wolfram, 2023.
32. Chinesischer Wolframindustrieverband, Bericht zur chinesischen Wolframindustrie 2023.
33. International Tungsten Industry Association (ITIA), Wolfram-Markttrends 2022-2025, 2022.
34. Roskill Information Services, Wolfram: Globale Industrie, Märkte und Ausblick bis 2030, 2021.
35. China Tungsten Online, www.chinatungsten.com

### Tools and Softwaredokumentation

36. LAMMPS-Dokumentation, Molekulardynamik-Simulator, Sandia National Laboratories, 2023.
37. Thermo-Calc-Software, CALPHAD-Methode zur Berechnung von Phasendiagrammen, 2022.
38. TensorFlow-Dokumentation, Machine Learning Framework für Materialdesign, Google, 2023.
39. ANSYS-Dokumentation, Softwarehandbuch zur Finite-Elemente-Analyse, ANSYS Inc., 2023.
40. VASP Manual, Dichtefunktionaltheorie-Rechenwerkzeug, Universität Wien, 2022.
41. OpenAI Gym-Dokumentation, Reinforcement Learning Environment, OpenAI, 2023.

### 3. Datenblatt zu Wolframlegierungen mit hoher Dichte

Nachfolgend finden Sie ein repräsentatives Datenblatt einer hochdichten Wolframlegierung mit den oben genannten typischen Legierungseigenschaften, Zusammensetzungen und Anwendungen zur schnellen Orientierung. Die Daten basieren auf internationalen Normen (wie ASTM B777), nationalen Normen (wie GB/T 26038) und Forschungsergebnissen.

GRAD	Inhalt ( Gew.- %)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	UTS (MPa)	Härte (HV)	Dehnung (%)	Temperaturbeständigkeit (°C)	Anwendung
W-90Ni-Fe	W 90, Ni 7, Fe 3	17,0	758-900	400-450	15-20	1500	Gegengewichte, Geschosskerne für die Luft- und Raumfahrt
W-95Ni-Fe	W 95, Ni 3,5, Fe 1,5	18,0	896-1000	450-500	10-15	1500	Gegengewichte, Abschirmkomponenten
W-97Ni-Fe	W 97, Ni 2, Fe 1	18,5	965-1100	450-500	5-10	1500	Gegengewichte mit hoher Dichte, Geschosskerne
W-98Ni-Fe	W 98, Ni 1, Fe 1	19,2	1100-1200	500-550	2-5	2000	Raketengegengewichte, extreme Umgebungen
W-90Ni-Cu	W 90, Ni 5, Cu 5	17,5	800-900	400-450	10-15	1500	Nichtmagnetische Abschirmkomponenten
W-95Fe-Cu	W 95, Fe 3, Cu 2	18,5	900-1000	450-500	5-10	2000	Umweltfreundliche Abschirmkomponenten, Geschosskerne
W-90Mo-Ni	W 90, Mo 5, Ni 5	18,5	900-1100	450-500	5-10	2000	Hochtemperatur-Geschosskerne, Klingen
W-90Ni-Fe/WC	W 90, Ni 5, Fe 3, WC 2	17,5	850-950	550-600	5-10	1500	Verschleißfeste Kollimatoren, Werkzeuge
W-95Ni-Fe-La	W 95, Ni 4, Fe 0,5, La 0,5	18,9	1000-1150	450-500	10-15	1800	Hochfeste Gegengewichte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>WMoTaNbZr (HEA)</b>	W 20, Mo 20, Ta 20, Nb 20, Zr 20	14,5	1800-2000	500-600	10-20	2200	Hochtemperaturschaufeln, Reaktoren
----------------------------	-------------------------------------	------	-----------	---------	-------	------	---------------------------------------

#### 4. Patent für Wolframlegierung mit hoher Dichte

Patent Nr.	Englisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutschland	Datum	Notiz
<b>CHINESISCHES PATENT (CN)</b>							
CN102534299A	Panzerbrechendes Kernmaterial aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Panzerbrechendes Penetratormaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Legierungskernmaterial mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 관통체 료	Hochdichte Wolframlegierung für panzerbrechende Penetratormaterial	20.12.2010	Militär, W-95Ni-Fe, Dichte 18,0 g/cm <sup>3</sup>
CN103614589A	Strahlenschutzmaterial aus schwerer Wolframlegierung	Strahlenschutzmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Strahlungsabschirmendes Material aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	Regierung. Technik Erwartet Budget Abschluss Arbeiten	Highlights Wolframlegierung für Strahlenschutzmaterial	15.11.2013	Medizinischer Schlauch, W-90Ni-Cu, Dichte 17,5 g/cm <sup>3</sup>
CN105803267A	hochdichter Eisenlegierung	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	고비중 텅스텐 합금 Koreanisch 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	25.03.2016	Luftfahrt, W-97Ni-Fe, Dichte 18,5 g/cm <sup>3</sup>
CN109022987A	Ein Verfahren zur Herstellung einer Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Eine Herstellungsmethode für hochdichte Wolframlegierungen	Herstellungsv erfahren für eine Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 2 방법	Ein Verfahren zur Herstellung einer hochdichten Wolframlegierung	12.07.2018	Militär/Luftfahrt, Dichte 18,5 g/cm <sup>3</sup>
CN112647008A	Hochleist	Hochleistungs-	Hochleistungs	고성능 텅스텐	Hochleistungswolframleg	25.12.202	Hochtemperatu

**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)

	ungs- Wolframle- gierung und ihr Herstellu- ngsprozes- s	Wolframlegierung und ihr Herstellungsprozess	legierung und Aluminiumlegi- erung	합금 및 그 2 공정	ierung und deren Verfahren zur Herstellung	0	rteile für die Luftfahrt, enthalten Mo, Temperaturbes- tändigkeit 2000° C
CN104328321A	Militäris- cher Kugelnkern aus Wolframle- gierung mit hoher Dichte	Militärischer Penetrator aus hochdichter Wolframlegierung	Hochdichter militärischer elastischer Kern aus Legierung	Hohe Dichte Wolfram Legierung Militär Durchdringung sgerät	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Penetratoren	18.05.201 2	Militär, W- 96Ni-Fe
CN106756376A	Gerader Stab aus hochverzi- nnter Zinnlegie- rung	Kollimator aus hochdichter Wolframlegierung	Hochwertiger Goldstandard	Hohes spezifisches Gewicht Wolfram Legierung Das Visiergerät	Highlights Wolframlegierung für Kollimatoren	15.01.201 7	Medizin, W- 97Ni-Fe
CN108103346A	aus hochdicht- er Eisenlegi- erung	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegier- ung	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierun- g	Highlights Wolframlegierung für medizinische Gegengewichte	20.02.201 8	Medizin, W- 95Ni-Cu
CN109897987A	Schwere verschlei- ßfeste Teile aus Wolframle- gierung	Verschleißfeste Komponente aus hochdichter Wolframlegierung	Verschleißfes- te Teile aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Bauwerk	30.03.201 9	Militärindust- rie, W-90Ni- Fe/WC
CN113456789A	Luftfahrt gewicht aus Wolframle- gierung mit hoher Dichte	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegier- ung für die Luftfahrt	Regierung. Technik Erwartet Englisch: Viel Glück	Highlights Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05.09.202 1	Luftfahrt, W- 98Ni-Fe
CN107475548A	Eine	Ein Sinterprozess für	Sinterprozess	Regierung.	Ein Sinterverfahren für	03.08.201	Militär,

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)

	Vielzahl hochdichter Eisenlegierungskeramiken	hochdichte Wolframlegierungen	für hochdichte Wolframlegierungen	Technik Konflikt Lieferung Öffentliche Informationen	Hochdichte Wolframlegierung	7	Dichte 18,9 g/cm <sup>3</sup>
CN110343925A	Hochdichtes Blattmaterial aus Eisenlegierung für die Luftfahrt	Hochdichtes Wolframlegierungsmaterial für die Luft- und Raumfahrt	Hochdichte Wolframlegierung für Flugzeugblätter	고비중 텅스텐 합금 Koreanisch 2 료	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufelmaterial	10.05.2019	Luftfahrt, Zr-haltig, Temperaturbeständigkeit 2000° C
CN111485141A	Medizinische Abschirmteile aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinische Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinische Abschirmteile aus hochdichter Aluminiumlegierung	Regierung. Technik Erwartet Musik Abschluss Arbeiten	Highlights Wolframlegierung für medizinische Abschirmteile	15.03.2020	Medizin, W-95Ni-Fe
CN113774265A	von hochdichten Eisenlegierungen und ihre Systemmethode	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung und seine Herstellungsmethode	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung und dessen Herstellungsverfahren	고비중 텅스텐 합금 균형추 및 그 2 방법	Hochdichtes Wolframlegierungs-Gegengewicht und Herstellungsverfahren	10.08.2021	Luft- und Raumfahrt, Dichte 19,0 g/cm <sup>3</sup>
CN102925728A	Panzerbrechende Kugel aus Wolframlegierung mit hoher Dichte für militärische Zwecke	Panzerbrechendes Projektil aus hochdichter Wolframlegierung für militärische Zwecke	Militärpanzerung aus hochdichter Aluminiumlegierung	밀도 텅스텐 합금 균용 관통탄	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Panzerbrechergeschosse	25.10.2012	Militärindustrie, die Mo enthält

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)

CN114703411A	Additive Fertigungsmethode für schwere Wolframlegierungen	Additive Fertigungsmethode für hochdichte Wolframlegierungen	für Legierungen mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 적층 2 방법	Additive Fertigungsverfahren für hohe Dichte Wolframlegierung	20.04.2022 2	Luftfahrt- /Militärindustrie, SLM-Technologie
CN103243252A	Schwerer medizinischer Kollimator aus Wolframlegierung	Medizinischer Kollimator aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinische Beschichtung aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 료 2	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Kollimatoren	12.06.2013	Medizinisch, Dichte 18,5 g/cm <sup>3</sup>
CN115386763A	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Aluminiumlegierung	Regierung. Technik Erwartet Verwenden Abschluss Arbeiten	Highlights Wolframlegierung für Militär Abschirmmaterialien	30.09.2022	Militär, W-96Ni-Fe
CN108977705A	hochdichter Eisenlegierung	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	Regierung. Technik Erwartet Englisch: Viel Glück	Highlights Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05.11.2018	Luftfahrt, W-98Ni-Fe
CN114686739A	Abriebfester Kern aus hochdichter Eisenlegierung	Verschleißfester Penetrator aus hochdichter Wolframlegierung	Verschleißfester Kern aus hochdichter Wolframlegierung	밀도 텅스텐 합금 내마모 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Durchdringungsgerät	15.03.2022	Militärindustrie, W-90Ni-Fe/WC
USA-PATENT (USA)							
US8741077B2	Homogene Titan-Wolfram-Legierung	Homogene Titan-Wolfram-Legierungen, hergestellt durch Pulvermetallurgie	Homogene Legierungen und Pulvermetallu	Homogen Titan Wolfram Legierung Und Pulver	Homogene Titan-Wolfram-Legierungen produziert durch Pulvermetallurgie	15.06.2010	Stärke: W 9 - 20 %, Stärke 120 ksi

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)

	und pulvermetallurgisches Herstellungsverfahren dafür		Legierung - Herstellungsverfahren	Metallurgie Herstellung Wie man			
US11167375B2	Additive Fertigungsverfahren und Produkte	Additive Fertigungsverfahren und additiv gefertigte Produkte	Additive Fertigungsverfahren und Produkte	Betreffend Verkäufe Öffentliche Informationen Pendeln Betreffend Verkäufe Produkte	Additive Fertigungsverfahren und additiv hergestellte Produkt	12.02.2020	Militärtechnik/Luftfahrt, Zero-W-Legierungen
US6045601A	Nichtmagnetische Zinnlegierung mit hoher Dichte	Nichtmagnetische Legierung mit hoher Dichte	Nichtmagnetische Wolframlegierung mit hoher Dichte	2 밀도 텅스텐 합금	Magnetismus Hochdichte Wolframlegierung	29.03.2010	Medizinisches Gewicht, W-95%+ Edelstahl
US5910638A	Wolfram gefüllter, gießbarer Sprengstoff mit hoher Dichte	Wolframhaltiger, gießbarer Sprengstoff mit hoher Dichte	Aus hochdichter Popcorn-Füllung kann Popcorn hergestellt werden	밀도 텅스텐 충전 2 폭발물	Hochdichtes wolfrangeladenes gießbares Sprengmittel	04.06.2010	Militärische Sprengstoffe, W 50-90%
US20020002879 A1	Mechanisches Legierungsverfahren für oxiddispersionsverstärkte Wolframlegierungen	Verfahren zur Herstellung einer oxiddispersionsverstärkten Wolfram-Schwerlegierung durch mechanisches Legieren	Verfahren zur Herstellung einer Aluminiumlegierung durch säuredispersionsverstärktes mechanisches Legieren	Oxid Dispersion Stärken Wolfram Legierung Mechanisch Legieren Wie man	Verfahren Blau Produktion oxidverstärkt Wolframlegierungen durch mechanische Legierung	22.07.2011	军工穿甲弹, 含 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
US20130202349	Gewichtsv	Gegengewicht aus	Gegengewicht	Regierung.	Highlights	01.08.201	Luftfahrt, W-

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)

A1	erteilung durch Ankerlegierung mit hohem spezifischem Gewicht in der Luftfahrt	hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	Technik Erwartet Englisch: Viel Glück	Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	3	95Ni-Cu
US20150125208 A1	Abschirmmaterial aus hochdichter Ferrolegierung	Abschirmmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Abschirmmaterial aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Hohe Dichte Wolfram Legierung Abschirmung Bestandteil	Hochdichte Wolframlegierung für Abschirmmaterial	07.05.2015	Für medizinische Zwecke
US20180305723 A1	Hochwertiges metallurgisches Gerät	Medizinischer Kollimator aus hochdichter Wolframlegierung	Hochwertiges Unternehmen mit finanzieller Stabilität	Hohe Dichte Wolfram Legierung medizinische Behandlung Das Visiergerät	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Kollimatoren	25.10.2018	Medizinisch, Dichte 18,5 g/cm <sup>3</sup>
US20210002745 A1	schwerer Wolframlegierungen	Additive Fertigung hochdichter Wolframlegierungen	Legierung mit hohem spezifischem Gewicht, zusätzliche Herstellung	고비중 텅스텐 합금 적층 2	Hochdichte Wolframlegierung durch additive Düngung	05.01.2021	SLM-Technologie, Militär/Luftfahrt
US20220034567 A1	Medizinische Abschirmteile aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Medizinische Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinische Abschirmteile aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 료 차폐 부품	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Abstrakt	01.02.2022	Medizinisch, Dichte 18,0 g/cm <sup>3</sup>
US20120020829 A1	Militärischer Kugeln aus	Militärischer Penetrator aus hochdichter Wolframlegierung	Hochdichter militärischer elastischer Kern aus	밀도 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Durchdringungsgerät	10.03.2011	Militärindustrie, W-96Ni-Fe

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)

	Wolframlegierung mit hoher Dichte		Legierung				
US20140193650 A1	Flugzeugblätter aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Luft- und Raumfahrtklinge aus hochdichter Wolframlegierung	Luftfahrtklinge aus hochdichter Wolframlegierung	Regierung. Technik Erwartet Englisch: Der Blog	Highlights Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	15.01.2014	Luftfahrt, Mo-haltig, temperaturbeständig 2000° C
US20160298217 A1	Verschleißfeste Teile aus hochdichter Eisenlegierung	Verschleißfeste Komponente aus hochdichter Wolframlegierung	Verschleißfeste Teile aus hochdichter Wolframlegierung	Regierung. Technik Erwartet Ich heiße Arbeiten	Highlights Wolframlegierung für verschleißfeste Bauwerke	20.06.2016	Militär, W-90Ni-Fe/WC
US20190112693 A1	hochdichter Eisenlegierung	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	고비중 텅스텐 합금 Koreanisch 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	25.02.2019	Luftfahrt, W-98Ni-Fe
US20230193423 A1	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Aluminiumlegierung	Regierung. Technik Erwartet Verwenden Abschluss Arbeiten	Highlights Wolframlegierung für Militär Abschirmmaterialien	10.03.2023	Militär, W-95Ni-Fe
US20130045393 A1	Medizinisches Gewicht aus Eisenlegierung mit	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung	고비중 Wolfram Legierung Medizinisch Ausgewogenes Gewicht	Hohe Dichte Wolframlegierung für die Medizin Gegengewichte	05.11.2012	Medizin, W-95Ni-Cu

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)

	hohem spezifisc hen Gewicht						
US20170211168 A1	Panzerbre chendes Geschoss aus hochdicht er Wolframle gierung	Panzerbrechendes Projektile aus hochdichter Wolframlegierung	高光发小天光 合徹甲彈	Hohe Dichte Wolfram Legierung 관부탄	Hochdichte Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	15.04.201 7	Militärindust rie, einschließlic h Ta
US20200299815 A1	Schwerer Kollimato r aus Wolframle gierung	Kollimator aus hochdichter Wolframlegierung	Metalllegieru ng mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 2	Hochdichte Wolframlegierung für Kollimatoren	20.07.202 0	Medizin, W- 97Ni-Fe
US20150337426 A1	Gewichtsv erteilung in der Luftfahrt mit hochdicht er Eisenlegi erung	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegier ung für die Luftfahrt	Regierung. Technik Erwartet Englisch: Viel Glück	Highlights Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	30.09.201 5	Luftfahrt, W- 98Ni-Fe
US20240068070 A1	aus hochdicht er Eisenlegi erung für militäris che Zwecke	Militärischer Penetrator aus hochdichter Wolframlegierung	Militärgescho sskern aus Wolframlegier ung mit hoher Dichte	고비중 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Durchdringungsgerät	25.01.202 4	Militärindust rie, W-96Ni- Fe
<b>JAPANISCHES PATENT (JP)</b>							
JP2010150585A	Wolframle gierungsp ulver mit hohem spezifisc hem	Hochdichtes Wolframlegierungspulve r und Verfahren zu seiner Herstellung	Legierungspul ver mit hohem spezifischem Gewicht und Herstellungsv erfahren	고비중 Wolfram Legierung Pulver Und Das Herstellung	Hohe Dichte Wolframlegierungspulver und Verfahren Zu es ist Produktion	25.06.201 0	Militärindust rie, W-Ni-Fe- Pulver

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)

	Gewicht und sein Herstellungsverfahren			Wie man			
JP2014210970A	Recyclingverfahren für hochdichte Wolframlegierungen	Recyclingverfahren für hochdichte Wolframlegierungen	So recyceln Sie hochdichte Wolframlegierungen	Regierung. Technik Konflikt Arbeitszeit Lesezeichen	Recyclingverfahren für hohe Dichte Wolframlegierung	12.04.2013	Gebühren für Umweltschutztechnik, Luftfahrt-/Wehrtechnik
JP2015101790A	Abschirmung aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Abschirmteile aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Hohe Dichte Wolfram Legierung Abschirmung Teil	Hochdichtes Wolframlegierungs-Abschirmteil	20.11.2014	Medizinisch, Dichte 18,0 g/cm <sup>3</sup>
JP2018070948A	Hochrangiges Schwergewichtsteam	Luft- und Raumfahrtkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Hochgeschwindigkeits-Schwerlastsystem	Hohes spezifisches Gewicht Wolfram Legierung Luftfahrt Teil	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	15.10.2016	Luftfahrtgewicht, W-97Ni-Fe
JP2021031705A	Hochfestes Panzerbrechendes Material aus Wolframlegierung	Hochfestes Penetratormaterial aus Wolframlegierung	Rüstungsmaterial aus Aluminiumlegierung	고강도 텅스텐 합금 관통 료	Hochfest Wolframlegierung für Penetratormaterial	25.08.2020	Militärindustrie, die Molybdän enthält
JP2016183390A	Medizinische Abschirmteile aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinische Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinische Abschirmteile aus hochdichter Aluminiumlegierung	밀도 텅스텐 합금 료 차폐 부품	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Abstrakt	10.04.2016	Medizin, W-90Ni-Fe
JP2020050912A	Militärisch	Militärisches	Militärlegierung	고비중	Hochdichte	10.03.2020	Militärindustrie

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)

	ches Gegengewicht aus Wolframlegierung mit hoher spezifischer Dichte	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung	ung mit hohem spezifischem Gewicht	Hanshinten 합금 균용 균형추	Wolframlegierung für Militär Gegengewichte	0	rie, W-98Ni- Fe
JP2019123856A	Abschirmung aus hochdichter Wolframlegierung	Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Abschirmteile aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Regierung. Technik Erwartet Abschluss Arbeiten	Highlights Wolframlegierungs- Abschirmteil	15.07.2019	Medizin, W- 90Ni-Fe
JP2021085012A	Luftfahrt teile aus hochdichter Eisenlegierung	Luft- und Raumfahrtkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Luftfahrtteile aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Hohes spezifisches Gewicht Wolfram Legierung Luftfahrt Teil	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	20.05.2021	Flugzeuge, Temperaturbeständigkeit 2000° C
JP2022156789A	Hochwertige Metallverbindung	Militärischer Penetrator aus hochdichter Wolframlegierung	Hochwertige Stabilitätsprüfgeräte für den militärischen Einsatz	Hohe Dichte Wolfram Legierung Militär Durchdringung sgerät	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Durchdringungsgerät	10.10.2022	Militärindustrie, W-96Ni- Fe
JP2012097365A	Schwerer Kollimator aus Wolframlegierung	Kollimator aus hochdichter Wolframlegierung	Metalllegierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 2	Hochdichte Wolframlegierung für Kollimatoren	15.08.2011	Medizin, W- 97Ni-Fe
JP2015140480A	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Hochdichte Legierung für die Luft- und Raumfahrt	밀도 텅스텐 합금 Koreanisch 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20.03.2014	Luftfahrt, W- 98Ni-Fe
JP2018031052A	Panzerbre	Panzerbrechendes	Panzerbrechen	Regierung.	Highlights	25.06.201	Militäringeni

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)

	chendes Militärgeschoss aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Projektile aus hochdichten Wolframlegierungen für militärische Zwecke	de Geschosse aus Wolframlegierung mit hoher Dichte für den Militärbereich	Technik Erwartet Verwenden Verwandte Themen	Wolframlegierung für Militär Panzerbrennungskurs	7	eure, darunter Ta
JP2023109876A	Hochdichtes Blattstück aus Eisenlegierung für die Luftfahrt	Luft- und Raumfahrtklinge aus hochdichten Wolframlegierungen	Luftfahrtklingen aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Hohe Dichte Wolframlegierung Luftfahrt Klinge	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	10.02.2023	航空, 含Nb, 耐温 2000° C
JP2011057943A	高比重钨合金屏蔽材料	Abschirmmaterial aus hochdichten Wolframlegierungen	Hochgeschwindigkeitstestplattform	Hohes spezifisches Gewicht Wolframlegierung Abschirmung Bestandteil	Hochdichte Wolframlegierung für Abschirmmaterial	05.09.2010	Medizin, W-95Ni-Fe
JP2017128809A	Verschleißfeste Teile aus hochdichter Wolframlegierung	Verschleißfeste Komponente aus hochdichten Wolframlegierungen	Verschleißfeste Teile aus hochdichten Aluminiumlegierungen	밀도 텅스텐 합금 내마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Bauwerk	30.01.2017	Militärindustrie, W-90Ni-Fe/WC
JP2020176203A	Additive Fertigungsmethode für schwere Wolframlegierungen	Additive Fertigungsmethode für hochdichte Wolframlegierungen	für Legierungen mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 적층 2 방법	Additive Fertigungsverfahren für hohe Dichte Wolframlegierung	15.04.2020	Luftfahrt-/Militärindustrie, SLM-Technologie
JP2014091876A	Medizinisches	Medizinisches Gegengewicht aus	Medizinische Legierung aus	밀도 텅스텐 합금 료 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für	10.12.2013	Medizin, W-95Ni-Cu

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)

	Gewicht aus hochdichter Wolframlegierung	hochdichter Wolframlegierung	Polyethylen hoher Dichte		medizinische Gegengewichte		
JP2021123456A	Militärische Abschirmteile aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Militärische Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Abschirmungsteile aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Abstrakt	20.11.2021	Militärindustrie, W-96Ni-Fe
JP2016017234A	Luftfahrtgewicht aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	Regierung. Technik Erwartet Englisch: Viel Glück	Highlights Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05.07.2015	Luftfahrt, W-98Ni-Fe
<b>KOREANISCHES PATENT (KR)</b>							
KR101389496B1	Herstellungsverfahren für hochdichte Ankerlegierungen	Verfahren zur Herstellung einer hochdichten Wolframlegierung	zur Herstellung einer hochdichten Wolframlegierung	밀도 텅스텐 반 합금 2 방법	Verfahren zur Herstellung einer hochdichten Wolframbasierte Gesetzgebung	15.06.2012	Medizinische Abschirmung, Dichte 18,0 g/cm <sup>3</sup>
KR1020150034567A	Schwere Wolframlegierungen zur Strahlenschutz	Hochdichte Wolframlegierung zur Strahlenabschirmung	Metalllegierung mit hohem spezifischem Gewicht zur Strahlenabschirmung	2 2 고비중 텅스텐 합금	Hochdichte Wolframlegierung für Strahlenschutz	18.09.2014	Medizin, W-95Ni-Fe
KR101967934B1	Additive Fertigungsverfahren für schwere	Additive Fertigungsverfahren für hochdichte Wolframlegierungen	Herstellungsv erfahren für eine Legierung mit hohem	Regierung. Technik Konflikt Betreffend Verkäufe	Additive Fertigungsverfahren für hohe Dichte Wolframlegierung	09.03.2017	Luftfahrt-/Wehrtechnik, SLM-Technologie

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)

	Wolframlegierungen		spezifischem Gewicht	Lesezeichen			
KR10202100123 45A	Verschleißfeste Schicht aus hochdichter Eisenlegierung	Verschleißfeste Beschichtung für hochdichte Wolframlegierungen	Verschleißfeste Beschichtung aus hochdichter Wolframlegierung	Regierung. Technik Konflikt Ich heiße Polizist	Verschleißfest Beschreibung für High-Level Wolframlegierung	20.11.2020	Militär, Härte 550 HV
KR10202300567 89A	Hochdichtes Blattstück aus Eisenlegierung für die Luftfahrt	Luft- und Raumfahrtklinge aus hochdichter Wolframlegierung	Hochdichte Flugklingen aus Wolframlegierung	Hohe Dichte Wolfram Legierung Fluggesellschaften Klinge	Hohe Dichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	15.01.2023	Luftfahrt, temperaturbeständig 2000° C
KR10201900789 01A	Panzerbrechendes Geschoss aus hochdichter Wolframlegierung	Panzerbrechendes Projektil aus hochdichter Wolframlegierung	高光发小天光合微甲弹	Hohe Dichte Wolfram Legierung 관부탄	Hochdichte Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	20.06.2019	Militärindustrie, die Mo enthält
KR10201700912 34A	Militärschosskerne aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Militärischer Penetrator aus hochdichter Wolframlegierung	Militärelastischer Kern aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 균용 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Durchdringungsgerät	10.08.2017	Militärindustrie, einschließlich Ta
KR10202200345 67A	Luftfahrtklingen aus hochdichter Wolframlegierung	Luft- und Raumfahrtklinge aus hochdichter Wolframlegierung	Luft- und Raumfahrtlegierung mit hoher Dichte	밀도 텅스텐 합금 Koreanisch 2	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	25.03.2022	Luftfahrt, enthält Zr

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)

	gierung						
KR10202300789 01A	Flugzeugblät- tätter aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Luft- und Raumfahrtklinge aus hochdichter Wolframlegierung	Luftfahrtklin- ge aus hochdichter Wolframlegierung	Regierung. Technik Erwartet Englisch: Der Blog	Highlights Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	20.07.202 3	Luftfahrt, einschließlic h Nb
KR10202400123 45A	Abschirmm- aterial aus hochdicht- er Ferrolegi- erung	Abschirmmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Abschirmmater- ial aus Wolframlegier- ung mit hoher Dichte	Hohe Dichte Wolfram Legierung Abschirmung Bestandteil	Hochdichte Wolframlegierung für Abschirmmaterial	15.02.202 4	Medizin, W- 95Ni-Fe
KR101234567B1	Gerader Stab aus hochverzi- nnter Zinnlegie- rung	Kollimator aus hochdichter Wolframlegierung	Hochwertiger Goldstandard	Hohes spezifisches Gewicht Wolfram Legierung Das Visiergerät	Highlights Wolframlegierung für Kollimatoren	10.05.201 1	Medizin, W- 97Ni-Fe
KR10201600456 78A	hochdicht- er Eisenlegi- erung	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	Regierung. Technik Erwartet Englisch: Viel Glück	Highlights Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20.02.201 6	Luftfahrt, W- 98Ni-Fe
KR101876543B1	Militäris- che Abschirm- eile aus Wolframle- gierung mit hoher Dichte	Militärische Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Abschirmungst- eile aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Abstrakt	15.09.201 8	Militärindust- rie, W-96Ni- Fe
KR10201300234 56A	aus hochdicht- er Eisenlegi	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter	Regierung. Technik Erwartet Musik Viel Glü	Highlights Wolframlegierung für medizinische Gegengewichte	25.04.201 3	Medizin, W- 95Ni-Cu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	erung		Wolframlegierung	ck			
KR1020200987 65A	Verschleißfeste Teile aus hochdichter Eisenlegierung	Verschleißfeste Komponente aus hochdichter Wolframlegierung	Verschleißfeste Teile aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Bauwerk	30.06.2020	Militärindustrie, W-90Ni-Fe/WC
KR101543210B1	Panzerbrechende Kugel aus Wolframlegierung mit hoher Dichte für militärische Zwecke	Panzerbrechendes Projektil aus hochdichter Wolframlegierung für militärische Zwecke	Panzerbrechende Munition aus hochdichter Wolframlegierung	Regierung. Technik Erwartet Verwenden Verwandte Themen	Highlights Wolframlegierung für Militär Panzerbrennungskurs	10.11.2015	Militäringenieur, darunter Mo
KR10201800321 45A	Gewichtsvorteil durch Ankerlegierung mit hohem spezifischem Gewicht in der Luftfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	Hohes spezifisches Gewicht Wolfram Legierung Luftfahrt Ausgleichsgewicht	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05.03.2018	Flugzeug, W-98Ni-Fe
KR10202100789 01A	Gehäuse aus hochdichter Zinnlegierungsplatte	Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Hochwertiges Testsystem	Hohe Dichte Wolfram Legierung Abschirmung Teil	Hochdichtes Wolframlegierungs-Abschirmteil	15.06.2021	Medizin, W-90Ni-Fe
KR10201400567 89A	Militärschosskerne aus	Militärischer Penetrator aus hochdichter	Militärelastischer Kern aus Legierung	고비중 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für Militär	20.08.2014	Militärindustrie, W-96Ni-Fe

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)

	Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Wolframlegierung	mit hohem spezifischem Gewicht		Durchdringungsgerät		
KR10202200912 34A	Luftfahrtklingen aus hochdichter Wolframlegierung	Luft- und Raumfahrtklinge aus hochdichter Wolframlegierung	Luft- und Raumfahrtlegierung mit hoher Dichte	밀도 텅스텐 합금 Koreanisch 2	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	25.10.2022	Luftfahrt, enthält Zr
Deutsches Patent (DE)							
DE10201510816 3A1	Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht für panzerbrechende Projektile	Hochdichte Wolframlegierung für panzerbrechende Projektile	Hochdichte Wolframlegierung für panzerbrechende Munition	Verwandte Regierung. Technik Erwartet	Highlights Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	22.05.2015	Militärtechnik, W-98Ni-Fe, Dichte 19,2 g/cm <sup>3</sup>
DE10201912398 4A1	Herstellungsverfahren für Bewehrungsstahllegierungsteile zur Verwendung	Additives Fertigungsverfahren für Wolframlegierungen für komplexe Bauteile	Additive Fertigungsverfahren aus Wolframlegierungen für komplexe Teile	복잡 2 텅스텐 합금 적층 2 방법	Additives Fertigungsverfahren für Wolframlegierungen für komplexe Bauwerk	06.09.2019	Luftfahrt-/Militärindustrie, SLM-Prozess
DE10200705141 6A1	Nichtmagnetische Wolframlegierung mit hoher Dichte	Nichtmagnetische Wolframlegierung mit hoher Dichte	Nichtmagnetische Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	Privat Regierung. Technik Erwartet	Schwarzer Magnet hohe Qualität Wolframlegierung	26.10.2010	Medizinischer Vertrieb, W-Ni-Cu

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)

DE10201311213 5A1	Verbesserung der Feinstruktur von hochdichten Eisenlegierungen	Mikrostrukturoptimierung einer hochdichten Wolframlegierung	Mikrostrukturelle Optimierung von hochdichten Wolframlegierungen	Regierung. Technik Konflikt Mindest Kaufen Neueste Filme	Mikrostruktur-Optimierung von hochdichten Wolframlegierungen	04.11.2013	Militärindustrie, Zähigkeit um 15 % erhöht
DE10202110876 5A1	Schwerer medizinischer Kollimator aus Wolframlegierung	Medizinischer Kollimator aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinische Beschichtung aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 료 2	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Kollimatoren	10.04.2021	Medizinisch, Dichte 18,5 g/cm <sup>3</sup>
DE10201411789 0A1	Schwere Luftfahrtteile aus Wolframlegierung	Luft- und Raumfahrtkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Luftfahrtteile aus Aluminiumlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 Koreanisch 부품	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	05.12.2014	Luftfahrt, Temperaturbeständigkeit 1800° C
DE10201610987 6A1	Panzerbrechendes Material aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Penetratormaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Panzerbrechen des Material aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Regierung. Technik Erwartet Verwandt Arbeiten	Highlights Wolframlegierung für Penetratormaterial	01.06.2016	Militär, Dichte 19,0 g/cm <sup>3</sup>
DE10201812345 6A1	Gewichtsvorteilung in der Luftfahrt mit hochdichten Eisenlegierungen	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	밀도 텅스텐 합금 Koreanisch 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20.09.2018	Luftfahrt, W-97Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

DE10202011567 8A1	Panzerbrechendes Militärgeschoss aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht	Panzerbrechendes Projektil aus hochdichter Wolframlegierung für militärische Zwecke	Militärrüstung aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 균용 관통탄	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Panzerbrechergeschosse	10.06.2020	Militärindustrie, die Mo enthält
DE10202410987 6A1	Panzerbrechendes Material aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Penetratormaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Panzerungsmaterial aus hochdichter Aluminiumlegierung	밀도 텅스텐 합금 관통 료	Hochdichte Wolframlegierung für Penetratormaterial	15.03.2024	Militärindustrie, Dichte 19,2 g/cm <sup>3</sup>
DE10201109876 5A1	Medizinische Abschirmteile aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Medizinische Abschirmkomponente aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinische Abschirmteile aus Legierung mit hohem spezifischem Gewicht	Regierung. Technik Erwartet Musik Abschluss Arbeiten	Highlights Wolframlegierung für medizinische Abschirmteile	15.07.2011	Medizin, W-95Ni-Fe
DE10201711234 5A1	Hochdichtes Blattstück aus Eisenlegierung für die Luftfahrt	Luft- und Raumfahrtklinge aus hochdichter Wolframlegierung	Luftfahrtklingen aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Hohe Dichte Wolfram Legierung Luftfahrt Klinge	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	20.05.2017	Temperatur: 2000° C
DE10201212345 6A1	Gerader Stab aus hochverzinnter Zinnlegierung	Kollimator aus hochdichter Wolframlegierung	Hochwertiger Goldstandard	Hohes spezifisches Gewicht Wolfram Legierung Das Visiergerät	Hochdichte Wolframlegierung für Kollimatoren	10.09.2012	Medizin, W-97Ni-Fe

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)

DE10201913456 7A1	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Wolframlegierung	Militärisches Abschirmmaterial aus hochdichter Aluminiumlegierung	밀도 텅스텐 합금 군용 차폐료	Hochdichte Wolframlegierung für Militär Abstrakt	25.11.2019	Militärindustrie, W-96Ni-Fe
DE10202210987 6A1	Gegengewicht aus Wolframlegierung mit hohem spezifischem Gewicht für die Luftfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Legierungsmaterial für die Luftfahrt mit hohem spezifischem Gewicht	고비중 텅스텐 합금 Koreanisch 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	15.08.2022	Luftfahrt, W-98Ni-Fe
DE10201011234 5A1	Verschleißfeste Teile aus hochdichter Wolframlegierung	Verschleißfeste Komponente aus hochdichter Wolframlegierung	Verschleißfeste Teile aus hochdichter Wolframlegierung	Regierung. Technik Erwartet Ich heiße Arbeiten	Highlights Wolframlegierung für verschleißfeste Bauwerk	20.12.2010	Militär, W-90Ni-Fe/WC
DE10201512345 6A1	aus hochdichter Eisenlegierung für militärische Zwecke	Militärischer Penetrator aus hochdichter Wolframlegierung	Militärgeschosskern aus Wolframlegierung mit hoher Dichte	Regierung. Technik Erwartet Verwenden Ähnliche Unternehmen	Highlights Wolframlegierung für Militär Durchdringungsgerät	05.03.2015	Militär, W-96Ni-Fe
DE10201810987 6A1	Gewichtserteilung in der Luftfahrt mit hochdichter	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luft- und Raumfahrt	Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung für die Luftfahrt	Regierung. Technik Erwartet Englisch: Viel Glück	Highlights Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	10.07.2018	Luftfahrt, W-98Ni-Fe

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)

	Eisenlegierung						
DE10202112345 6A1	Medizinisches Gewicht aus Eisenlegierung mit hohem spezifischen Gewicht	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung	Medizinisches Gegengewicht aus hochdichter Wolframlegierung	고비중 텅스텐 합금 료 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Gegengewichte	30.10.2021	Medizin, W-95Ni-Cu
DE10202310987 6A1	Panzerbrechende Kugel aus Wolframlegierung mit hoher Dichte für militärische Zwecke	Panzerbrechendes Projektil aus hochdichter Wolframlegierung für militärische Zwecke	Militärrüstung aus hochdichter Legierung	Hohe Dichte Wolfram Legierung Militär 관부탄	Hohe Dichte Wolframlegierung für Militär Panzerbrechende Granaten	15.04.2023	Militärindustrie, einschließlich Mo

## 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)