

# Enzyklopädie der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen- Legierungen

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Weltweit führend in der intelligenten Fertigung für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-  
Industrie

## 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, 1997 mit [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) als Ausgangspunkt – Chinas erster erstklassiger Website für Wolframprodukte – gegründet, ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes mit Schwerpunkt auf den Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Industrien. CTIA GROUP nutzt fast drei Jahrzehnte umfassende Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän, übernimmt 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 Wolfram und Molybdän in mehr als 20 Sprachen eingerichtet, 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 einem anerkannten globalen und maßgeblichen Informationszentrum für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Branche entwickelt, das rund um die Uhr mehrsprachige Nachrichten, Produktleistung, Marktpreise und Markttrenddienste bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die individuellen Bedürfnisse der Kunden zu erfüllen. Unter Einsatz von KI-Technologie entwickelt und produziert sie gemeinsam mit den Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Unternehmen bietet integrierte Dienstleistungen für den gesamten Prozess, vom Formenöffnen und der Probeproduktion bis hin zur Endbearbeitung, Verpackung und Logistik. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE F&E-, Design- und Produktionsdienstleistungen für über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten für mehr als 130.000 Kunden weltweit bereitgestellt und so den Grundstein für eine kundenspezifische, flexible und intelligente Fertigung gelegt. Auf dieser Grundlage baut die CTIA GROUP die intelligente Fertigung und integrierte Innovation von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets weiter aus.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer über 30-jährigen Branchenerfahrung auch Fachwissen, Technologien, Wolframpreise und Markttrendanalysen im Zusammenhang mit Wolfram, Molybdän und seltenen 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 erntet 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 einer führenden Position in der globalen Herstellung von Wolfram- und Molybdänprodukten und bei Informationsdienstleistungen.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Inhaltsverzeichnis

### **Kapitel 1: Grundlegende Konzepte und Entwicklungshintergrund der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung**

- 1.1 Definition und Zusammensetzungsmerkmale der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
- 1.2 Entwicklungsgeschichte und strategische Bedeutung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
- 1.3 Anwendungstreibende Kräfte und Materialvorteile der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
- 1.4 Vergleichende Analyse der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung und traditioneller Wolfram-basierter Legierungen
- 1.5 Technische Entwicklung und Entwicklungstrends von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen im In- und Ausland

### **Kapitel 2: Chemische Zusammensetzung und Mikrostruktur von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

- 2.1 Die Rolle von Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen in Legierungen
- 2.2 Zusammensetzungsverhältnis und Konstruktionsprinzipien von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 2.3 Mikrostruktur und Phasenstruktur von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 2.4 Einfluss der Verunreinigungs kontrolle auf die Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 2.5 Modell der Zusammensetzungs-Struktur-Eigenschafts-Beziehung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### **Kapitel 3: Physikalische und mechanische Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

- 3.1 Dichte, spezifisches Gewicht und Maßgenauigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 3.2 Festigkeit, Duktilität und Bruchzähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 3.3 Härte, Verschleißfestigkeit und Schlagfestigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 3.4 Wärmeleitfähigkeit, thermische Stabilität und Wärmeausdehnungsverhalten von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 3.5 Elektrische Eigenschaften, magnetisches Verhalten und Strahlungsbeständigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 3.6 Analyse der Korrosionsbeständigkeit und chemischen Stabilität von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### **Kapitel 4: Herstellungs- und Verarbeitungstechnologie von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

- 4.1 Rohstoffvorbereitung und Pulvereigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 4.2 Pulvermetallurgische Verdichtung und Formgebungstechnologie von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.3 Sinterprozess und Verdichtungskontrolle von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 4.4 Wärmebehandlung und Mikrostrukturkontrolle von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 4.5 Bearbeitung und Oberflächenbehandlung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 4.6 Additive Fertigung und fortschrittliche Formgebungsverfahren von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### **Kapitel 5: Leistungsprüfung und Qualitätsbewertung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

- 5.1 Zusammensetzungsanalyse und Elementprüfung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 5.2 Mikrostruktur- und Dichtecharakterisierung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 5.3 Prüfung mechanischer Eigenschaften und Vergleich von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit Standards
- 5.4 Methoden zur Prüfung thermischer und elektrophysikalischer Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 5.5 Oberflächenbeschaffenheit und Techniken zur Defekterkennung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen
- 5.6 Zerstörungsfreie Prüfung und Bewertung der Lebensdauer von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### **Kapitel 6: Typische Anwendungen und Industriefälle von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

- 6.1 Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Kernenergiestrukturen und Abschirmungen
- 6.2 Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in militärischen Projektilkernen und Trägheitskomponenten
- 6.3 Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Hochtemperaturstrukturen der Luft- und Raumfahrt
- 6.4 Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der medizinischen Strahlentherapie und im hochdichten Schutz
- 6.5 Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Präzisionsformen und mechanisch verschleißfesten Komponenten
- 6.6 Zusammengesetzte Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der komplexen Umwelttechnik

### **Kapitel 7: Standardsystem und Konformitätsanforderungen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

- 7.1 Zusammenfassung der chinesischen Güteklassen und Industrienormen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen (GB/YS)
- 7.2 Spezifikationen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in ASTM/MIL-Normen
- 7.3 Materialanforderungen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in EU/ISO-Normen
- 7.4 Umweltvorschriften und Materialsicherheitszertifizierung für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen (RoHS/REACH)

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

7.5 Qualitätssysteme für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der Luftfahrt-, Nuklear- und Medizinindustrie (AS9100/ISO 13485)

## **Kapitel 8: Spezifikationen für Verpackung, Lagerung, Transport und Verwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

8.1 Verpackungs- und Transportschutzdesign für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

8.2 Lagerbedingungen und Korrosionsschutzanforderungen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

8.3 Nationale und internationale Transportvorschriften und Deklarationsrichtlinien für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

8.4 Vorsichtsmaßnahmen und Wartungspläne für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen während der Verwendung

8.5 Technologiepfade für Wiederverwendung und Recycling von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

## **Kapitel 9: Marktstruktur und Entwicklungstrend von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

9.1 Globale Verteilung der Wolfram- und Molybdän-Ressourcen und Analyse der Legierungsindustriekette

9.2 Aktuelle Marktnachfrage und Wachstumsprognose für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

9.3 Einführung in die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung von CTIA GROUP

9.4 Rohstoffpreisschwankungen und Kostenstrukturanalyse von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

9.5 Politische Treiber und strategische Position von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der High-End-Fertigung

9.6 Zukünftige technologische Durchbrüche und Richtungen der industriellen Aufwertung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

## **Kapitel 10: Forschungsgrenzen und zukünftige Richtungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

10.1 Fortschrittliche Designkonzepte und Mikrolegierungstrends in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

10.2 Forschung zu Nanokompositen und Gradientenmaterialien von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

10.3 Untersuchung der Integration von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit der additiven Hochdurchsatzfertigung

10.4 Entwicklung der Betriebsleistung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in extremen Umgebungen

10.5 Hochleistungsalternative Materialien und nachhaltige Entwicklungsstrategien für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

## **Anhang**

Anhang 1: Zusammenfassung der typischen Leistungsparameter von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Anhang 2: Vergleichstabelle der Güteklassen und chemischen Zusammensetzungen von Wolfram-

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Anhang 3: Standarddokumente und Referenzindex für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Anhang 4: Glossar der Begriffe und Definitionen englischer Abkürzungen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

## 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 1 Grundlegende Konzepte und Entwicklungshintergrund der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

### 1.1 Definition und Zusammensetzungsmerkmale der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung (W-Mo-Ni-Fe) ist ein hochdichtes Legierungssystem, das hauptsächlich aus Wolfram (W) besteht, ergänzt durch Molybdän (Mo), Nickel (Ni) und Eisen (Fe). Sie wird häufig in der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie, im Militär, im medizinischen Bereich und in der High-End-Fertigung eingesetzt. Diese Legierung behält nicht nur den hohen Schmelzpunkt, die hohe Dichte und die ausgezeichnete Strahlungsbeständigkeit von Wolfram, sondern erreicht durch die Zugabe von Molybdän, Nickel und Eisen auch eine optimierte Mikrostruktur und synergetisch verbesserte mechanische Eigenschaften.

#### 1. Definition und Namenskonventionen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen (Wolfram-Molybdän-Ni-Fe) ist eine hochdichte Mehrkomponentenlegierung innerhalb der Wolfram-basierten Schwermetalle (WHAs). Ihr Name leitet sich typischerweise vom Massenanteil von Wolfram in der Legierung ab, z. B. enthält eine W-Ni-Fe-Legierung etwa 90–97 Gew.-% Wolfram. Durch die Zugabe von Molybdän (Mo) als zweite, hochschmelzende Komponente kann ein W-Mo-Ni-Fe-Verbundsystem mit erhöhter Zähigkeit und thermischer Stabilität entstehen, wodurch eine quaternäre oder quaternärähnliche W-Mo-Ni-Fe-Legierung entsteht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Diese Legierungen haben folgende Kerneigenschaften:

- **Hohe Dichte ( $\geq 17,0 \text{ g/cm}^3$ )**, geeignet für Trägheitskomponenten und Strahlenschutz;
- **Gute Bearbeitbarkeit**, leichter zu schneiden, zu schweißen und zu formen als reines Wolfram;
- **Hervorragendes Gleichgewicht zwischen Festigkeit und Zähigkeit**, wobei Ni und Fe eine Bindungsphase bilden, um die Plastizität und Rissbeständigkeit zu verbessern;
- **Hervorragende thermische Stabilität**, insbesondere nach der Einführung von Mo wird die Kriechfestigkeit bei hohen Temperaturen verbessert;
- **Es verfügt über eine ausgezeichnete Korrosions- und Strahlungsbeständigkeit und** erfüllt die Betriebsanforderungen in extremen Umgebungen.

## 2. Funktionsanalyse der Hauptbestandteile

Wolfram (W), der Hauptbestandteil der Legierung, verleiht ihr eine extrem hohe Dichte ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ), einen hohen Schmelzpunkt ( $3410 \text{ °C}$ ) und eine hervorragende Strahlungsbeständigkeit. Die Zugabe von Wolfram bestimmt den Anwendungswert des Materials in energiereichen und hochbelasteten Szenarien.

Molybdän (Mo) hat einen hohen Schmelzpunkt ( $2623 \text{ °C}$ ) und verfügt über hervorragende Mischkristallverfestigungseigenschaften. Seine Zugabe kann die Körner verfeinern und die mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen sowie die Oxidationsbeständigkeit verbessern. Molybdän lindert zudem die Wärmeausdehnungsdifferenz zwischen W-Partikeln und der Ni-Fe-Matrix und verbessert so die Festigkeit der Grenzflächenbindung.

Nickel (Ni) ist ein Hauptbestandteil der Bindephase. Es bildet mit Eisen in der Legierung eine Gamma-Feststofflösung und trägt so zur Verbesserung der Plastizität, Schlagzähigkeit und Duktilität des Materials bei. Ni besitzt zudem eine gewisse Korrosionsbeständigkeit und Antimagnetismus, was zur elektromagnetischen Abschirmung der Legierung beiträgt.

Eisen (Fe) fungiert als zusätzliches Bindeelement, um die Bindephase zu stärken, die Festigkeit der Legierung zu verbessern und ist für die Regulierung der magnetischen Reaktionen der Legierung von Vorteil (es kann als schwach magnetischer oder nicht magnetischer Typ ausgelegt werden).

## 3. Typische Merkmale der Organisationsstruktur

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weisen üblicherweise eine Zweiphasenstruktur auf:

- **Wolfram-Molybdän-Mischkristallpartikel (Hartphase)**: Als Verstärkungsphase sind sie diskontinuierlich verteilt und bestimmen die Festigkeit und Dichte der Legierung;
- **Ni-Fe- oder Ni-Fe-Mo-Feststofflösungsbindungsphase**: Sie füllt die **Zwischenräume** zwischen harten Partikeln, übernimmt die Funktion der Verbindung und Spannungsübertragung und hat einen entscheidenden Einfluss auf die Duktilität und Zähigkeit der Legierung.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Gleichmäßigkeit der Struktur und die Qualität der Phasengrenzflächenbindung sind die Schlüsselfaktoren, die die Betriebsleistung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung bestimmen.

#### 4. Diversität und Verhältnisgestaltung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Entsprechend den Leistungsanforderungen verschiedener Anwendungsszenarien kann die Legierung auf folgende Weise gestaltet und angepasst werden:

- **Anpassung des Wolframgehalts** : Üblicherweise 85 %, 90 %, 95 % usw., um Dichte und Festigkeit anzupassen;
- **Änderungen im Molybdän- Substitutionsverhältnis** : teilweiser Ersatz von Wolfram oder Zugabe in die Bindephase zur Verbesserung der Hitzebeständigkeit und chemischen Stabilität;
- **Ni:Fe Verhältnis** : Gängige Verhältnisse sind 7:3, 8:2, 1:1 usw., die zum Anpassen der Zähigkeit und der magnetischen Eigenschaften der Legierung verwendet werden;
- Durch **die Zugabe von Spurenelementen** wie Co, Cr, Ti, Re usw. werden spezielle Eigenschaften optimiert.

#### 5. Zusammenfassung der Materialeigenschaften

Leistungsmerkmale	Leistung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
Dichte	Bis zu 17~18,5 g/cm <sup>3</sup>
Schmelzbereich	Höher als Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung, Gesamtstabilität wird verbessert
Kraft-Zähigkeit-Balance	Hervorragend geeignet für Stoßfestigkeit/hohe Belastung
Wärmeleitfähigkeit	Gut, geeignet für thermische Kontrollsysteme
Magnetische Steuerung	Kann als schwach magnetischer/nicht magnetischer Typ ausgeführt werden
Bearbeitbarkeit	Deutlich besser als reines Wolfram, ermöglicht Präzisionsbearbeitung
Korrosionsbeständigkeit Strahlungsbeständigkeit	<b>und</b> Hervorragend, anpassungsfähig an extreme Einsatzumgebungen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung als leistungsstarkes, vielseitiges und hochdichtes fortschrittliches Materialsystem die Vorteile der Wolframlegierung beibehält und gleichzeitig durch die Einführung von Molybdän und einer optimierten Ni-Fe-Bindephase ein ideales Gleichgewicht zwischen Festigkeit, Zähigkeit, Temperaturbeständigkeit und Verarbeitbarkeit erreicht. Sie hat sich zu einem unersetzlichen Schlüsselmaterial in der Luft- und Raumfahrt, der Verteidigung, der Kernenergie und der hochwertigen industriellen Fertigung entwickelt.

#### 1.2 Entwicklungsgeschichte und strategische Bedeutung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Als fortschrittliches, hochdichtes Mehrkomponenten-Legierungssystem verkörpert die Entwicklung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen nicht nur die kontinuierliche Weiterentwicklung von Hochleistungs-Strukturwerkstoffen, sondern auch die Verbindung von Metallurgie, Pulvermetallurgie, Werkstoffwissenschaft und nationaler Verteidigungstechnologie. Die Entstehung und Entwicklung der Legierung erstreckte sich über mehrere wichtige technologische Epochen von der Mitte des 20. Jahrhunderts bis in die Gegenwart und macht sie zu einem typischen Beispiel für ein „technologie- und anwendungsorientiertes“ neues Material.

## 1. Überblick über die Entwicklungsgeschichte

### 1. Ursprung: Die Grundlagen der Entwicklung hochdichter Wolframlegierungen (1940er bis 1960er Jahre)

Die Entwicklung hochdichter Wolframlegierungen begann während des Zweiten Weltkriegs, als die Rüstungsindustrie dringend ein Material mit hoher Dichte, hoher Festigkeit und hervorragender Strahlungsbeständigkeit für Anwendungen wie panzerbrechende Projektilkerne, Raketengegengewichte und Trägheitsflugsteuerungsgeräte benötigte. Vor diesem Hintergrund entstand das W-Ni-Fe-System. Dieses pulvermetallurgisch hergestellte System überwindet die Verarbeitungsschwierigkeiten von reinem Wolfram und erzielt Durchbrüche bei den strukturellen Eigenschaften.

Zu dieser Zeit verfügte die Wolfram-Nickel-Eisen-Legierung bereits über eine gute Dichte (17–18,5 g/cm<sup>3</sup>) und Bearbeitbarkeit, was sie zu einem Standardmaterial für militärische panzerbrechende Projektile und Trägheitslenkgeräte machte.

### 2. Erweiterung: Einführung von Molybdän und Komplexität der Legierungssysteme (1970er bis 1990er Jahre)

Vom Ende des Kalten Krieges bis zu dessen Ende wurden konventionelle Wolfram-Nickel-Eisen-Legierungen zunehmend mit Problemen wie mangelnder Kriechfestigkeit und unzureichender struktureller Stabilität in Hochtemperaturumgebungen konfrontiert, insbesondere in der Kernenergie, bei Hyperschallfahrzeugen und bei der Erforschung des Weltraums. Forscher begannen, mit der Einführung von Molybdän (Mo) in dieses System zu experimentieren und nutzten dessen hohen Schmelzpunkt und Hitzebeständigkeit, um die strukturelle Stabilität der Legierung bei hohen Temperaturen zu verbessern. Mo stärkte zudem die Bindephase und verbesserte so die Grenzflächenbindungsfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit.

In dieser Zeit wurde die Mikrostruktur von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen komplexer und die Materialeigenschaften deutlich optimiert. Das Los Alamos National Laboratory in den USA, das Institute of New Materials in der Sowjetunion und Sumitomo Metal Industries in Japan entwickelten nacheinander W-Mo-Ni-Fe-Legierungssysteme mit unterschiedlichen Verhältnissen für den Einsatz in Kernbrennstoffummantelungen, Abschirmungen in der Luft- und Raumfahrt sowie Hochtemperatur-Trägheitskomponenten.

### 3. Reife: Dual-Use und industrialisiert (seit dem frühen 21. Jahrhundert)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mit der Weiterentwicklung der Pulvermetallurgie, des isostatischen Pressens, des Präzisionsinterns und der additiven Fertigung haben sich Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen von einem „strategischen Material“ zu einer Schlüsselkomponente der militärisch-zivilen Integration und der hochwertigen industriellen Fertigung entwickelt. Sie finden nicht nur in der modernen Luft- und Raumfahrt, im Schiffbau und in Verteidigungssystemen breite Anwendung, sondern auch in zivilen Anwendungen wie der medizinischen Strahlentherapie, der Herstellung elektronischer Präzisionsgeräte, der Strahlenabschirmung und Hochtemperatur-Vakuumgeräten.

Insbesondere in hochwertigen medizinischen Geräten wie Bildgebungsgeräten, Schutzstrukturen für Gammastrahlenquellen oder in der elektromagnetischen Abschirmung von Mikrowellenkommunikationsgeräten ist die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung aufgrund ihrer Multifunktionalität, ihres steuerbaren Magnetismus und ihrer hervorragenden Dichte zu einem unersetzlichen Kernstrukturmaterial geworden.

## 2. Strategische Bedeutungsanalyse

Die Entwicklung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung ist nicht nur ein Durchbruch in der Materialtechnologie, ihr strategischer Wert spiegelt sich in folgenden Aspekten wider:

### 1. Materialien zur nationalen Verteidigungssicherheit

Diese Legierung gilt seit langem als wichtiges **Material für die Landesverteidigung**. Sie wird häufig in kinetischen Projektilkernen, Heckstabilisatoren, Trägheitsstrukturen für Antisatellitensysteme und Schiffspanzerungen eingesetzt und ist ein unverzichtbares Kernmaterial für moderne Präzisionsschlagsysteme. Die ausgewogene Festigkeit und Zähigkeit, die hohe Dichte und die Schlagzähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen verleihen ihnen erhebliche Vorteile hinsichtlich Panzerungsfestigkeit, Flugstabilität und seismischer Zuverlässigkeit.

In vielen Ländern unterliegt dieses Material **Exportkontrollen** und ist in Listen mit „Spezialmetallen“ für den Militärssektor aufgeführt. So regeln beispielsweise die US-amerikanischen ITAR-Vorschriften, die chinesische „Dual-Use-Güterliste“ und die REACH-Verordnung der EU die Verwendungsmöglichkeiten für den Export streng.

### 2. Schlüsselmaterialien für Kernenergie und Strahlenschutz

Wolfram und seine Legierungen zählen heute zu den wichtigsten neutronenresistenten Werkstoffen. Die Zugabe von Molybdän verbessert nicht nur die Stabilität des Materials in Hochtemperatur-Kernreaktoren, sondern erhöht auch seine Korrosionsbeständigkeit und die Gleichmäßigkeit der Neutronenabsorption. Daher spielen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen eine entscheidende Rolle in Systemen wie **Kernbrennstoffummantelungen, nuklearen thermoelektrischen Umwandlungsstrukturen und Neutronenabschirmungen**.

Darüber hinaus ist die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung zu einem wichtigen Kandidaten für die Forschung an **Hüllmaterialien für Fusionsreaktoren der neuen Generation und Targetmaterialien für ADS-Beschleuniger** geworden und hat eine offensichtliche **energiestrategische Bedeutung für das Land**.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Unterstützende Materialien für die High-End-Fertigung

Mit der Weiterentwicklung von Technologien wie Flugzeugtriebwerken, Weltraumsonden und Hochgeschwindigkeitszügen steigt die Nachfrage nach präziser Qualitätskontrolle und Komponenten mit hoher Trägheit. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen bieten hervorragende dynamische Balance, Wärmeleitfähigkeit und antimagnetische Eigenschaften und sind daher ideale Materialien für Schlüsselkomponenten wie **Gyroskop-Schwungräder, Trägheitsrotoren, Stabilisatoren und Lageregelungsgeräte für die Luft- und Raumfahrt**.

Darüber hinaus spielen seine hervorragende Wärmeableitungsfähigkeit und elektromagnetische Abschirmleistung auch in Spitzenbereichen wie **5G-Kommunikationsgeräten, Hochleistungslasersystemen und Industriebeschleunigern eine wichtige Rolle**.

### 4. Globale Strategie für seltene Ressourcen und Aufbau unabhängiger Sicherheitskapazitäten

Sowohl Wolfram als auch Molybdän zählen zu den strategischen Edelmetallressourcen. Wolfram ist weltweit besonders konzentriert, **wobei China fast 60 % der weltweiten Wolframreserven besitzt**. China ist auch bei den Molybdänreserven und der Molybdänproduktion weltweit führend. Die Entwicklung und unabhängige Kontrolle von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen gewährleistet nicht nur die Sicherheit der industriellen Wertschöpfungskette, sondern leistet auch einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der High-End-Fertigung und der militärisch-zivilen Integration.

Im Rahmen der Strategien „Durchbruch bei Schlüsseltechnologien“ und „Aufbau eines starken Landes im Bereich der Werkstoffe“ wurde die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung als strategischer Grundstein in viele große nationale Projekte und Pläne zur Entwicklung neuer Werkstoffe aufgenommen (wie etwa in die „Leitlinien zur Entwicklung der Industrie für neue Werkstoffe“ und den „Fahrplan zur Entwicklung von Werkstoffen für die militärisch-zivile Integration“).

### III. Zukunftsaussichten

Mit dem Aufkommen neuer Materialtechnologien wie Hochentropie-Legierungskonzepten, additiver Fertigung, Grenzflächen-Mikrostrukturkontrolle und Nanopartikelverstärkung besteht bei Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen auch in Zukunft noch viel Potenzial für Durchbrüche. Sie werden in folgenden Bereichen ein größeres Entwicklungspotenzial aufweisen:

- Optimierung der Organisationsstabilität und Entwurf von Verbundstrukturen für **extreme Einsatzumgebungen**;
- Anwendung komplexer Funktionsstrukturen durch Kombination von **additiver Fertigung und Topologieoptimierung** ;
- Angewandt auf zukünftige strategische Technologiesysteme wie **die Erforschung des Weltraums und die Kernfusionsenergie** ;
- Fördern Sie die **vollständige Durchdringung hochentwickelter ziviler Industrieketten** (wie etwa medizinischer, biologischer und Präzisionssteuerungstechnik).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen nicht nur eine Erweiterung und Optimierung traditioneller hochdichter Legierungen darstellen, sondern auch ein Schlüsselwerkstoff sind, der nationale Sicherheit, Energiestrategie und die Herstellung hochwertiger Geräte miteinander verbindet. Jeder Durchbruch in ihrer Entwicklung ist das Ergebnis der Synergieeffekte neuer Materialtechnologien und der Entwicklung wichtiger Anwendungsszenarien und nimmt eine unersetzliche strategische Position ein.

### **1.3 Anwendungstreiber und Materialvorteile der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung**

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen (W-Mo-Ni-Fe) haben sich aufgrund ihrer außergewöhnlichen physikalischen Eigenschaften, ihrer mechanischen Festigkeit und ihrer Umweltverträglichkeit als Hochleistungswerkstoffe in kritischen Anwendungen etabliert. Die Ausweitung und Vertiefung ihrer praktischen Anwendungsmöglichkeiten resultiert aus den sich entwickelnden technologischen Anforderungen und technischen Herausforderungen. Das Verständnis der treibenden Kräfte hinter der Anwendung dieses Legierungssystems kann uns helfen, seine Materialvorteile und seine strategische Position in zukunftsweisenden Bereichen wie Verteidigung, Energie und Fertigung besser zu verstehen.

#### **1. Analyse der wichtigsten Anwendungstreiber**

##### **1. Angetrieben durch hohe Dichte- und Trägheitsanforderungen**

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben in der Regel eine Dichte von **17,0 bis 18,8 g/cm<sup>3</sup>**. Ihr extrem hohes spezifisches Gewicht macht sie zu idealen Werkstoffen für Gegengewichte, Gleichgewichts- und Trägheitssteuerungssysteme. Da moderne Raumfahrzeuge, Raketen, Satelliten und andere Systeme ihre Fluglagegenauigkeit immer weiter steigern, steigt die Nachfrage nach hochdichten, kompakten und stabilen Gegengewichtsmaterialien deutlich.

Diese Legierungen werden häufig verwendet in:

- Gyroskop-Schwungräder, hochdichte Komponenten in Trägheitsnavigationssystemen;
- Schwerpunkteinstellung und Massenausgleich von Flugzeugen;
- Dynamische Ausgleichskomponenten von Lageregelungssystemen für Trägerraketen;
- Zu den zivilen Bereichen zählen Geräte mit hoher Trägheit wie Pendel für Uhren und Gegengewichte für Rennwagen.

##### **2. Angetrieben von der Anpassungsfähigkeit an extreme Umgebungen**

Wolfram und Molybdän besitzen hohe Schmelzpunkte, hohe Festigkeit und niedrigen Dampfdruck, wodurch sie in extremen Umgebungen wie hohen Temperaturen, starker Strahlung und starker Korrosion stabil bleiben. Mit der Entwicklung von Hyperschallfahrzeugen, Kernkraftwerken, Vakuumanlagen und Weltraumsonden ist die langfristige Betriebsstabilität von Materialien in rauen Umgebungen zu einer großen Herausforderung geworden.

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung aufgrund ihrer:

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

- Wärmeschockbeständigkeit;
- Beständig gegen Neutronen- und Gammastrahlenbestrahlung;
- Beständig gegen Korrosion durch geschmolzenes Metall und Wasserstoffversprödung;
- Fähigkeit, die Festigkeit über 1000 °C aufrechtzuerhalten;

Weit verbreitet in:

- Abschirmungsanordnungen und Stützstrukturen für Kernreaktoren;
- Fusionsreaktorhülle und Hochtemperatur-Austauschstruktur;
- Hochtemperatur-Energiespeichersystem aus geschmolzenem Salz und Ultrahochtemperatur-Ofenwand.

### 3. Angetrieben durch die Anforderungen an die Bearbeitbarkeit und Strukturformung

Reines Wolfram bietet zwar hervorragende Eigenschaften, ist aber insbesondere bei der Präzisionsumformung und der Herstellung komplexer Bauteile äußerst schwierig zu verarbeiten. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen hingegen verbessern durch die Zugabe von Bindephasen wie Ni und Fe die Schmiedbarkeit, Bearbeitbarkeit und Schweißbarkeit des Materials deutlich, während gleichzeitig eine hohe Dichte und Festigkeit erhalten bleiben.

Daher ist diese Art von Legierung zu einem wichtigen Material für die Herstellung von Präzisionsstrukturteilen geworden, wie zum Beispiel:

- Kann panzerbrechende Projektilkerne und Flugheckflossen verarbeiten;
- Gegengewichtssysteme mit komplexen Geometrien;
- Umformen von großformatigen Hohlkörpern und Sonderformteilen.

Es ist gut mit modernen Umformtechnologien wie Additive Manufacturing (AM), Heißisostatischem Pressen (HIP) und Präzisionswalzen kompatibel, was seinen industriellen Anwendungsbereich erweitert.

### 4. Angetrieben durch die Nachfrage nach multifunktionaler Integration und Verbundanwendungen

Mit dem zunehmenden Trend zur Miniaturisierung und hohen Effizienz von Geräten müssen Materialien mehrere Funktionen erfüllen, beispielsweise hohe Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Strahlungsbeständigkeit, elektromagnetische Abschirmung und schwachen Magnetismus.

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen bieten den Vorteil der „Struktur-Funktions-Integration“. Durch Anpassung des Ni/Fe-Verhältnisses und der Mo-Dotierung lassen sich folgende Eigenschaften erreichen:

- **Nichtmagnetische oder schwach magnetische Steuerung**, um die Anforderungen der medizinischen MRT-Umgebung und der Präzisionsnavigation zu erfüllen;
- **Hervorragende Wärmeleitfähigkeit**, kann als Wärmeableitungsbasis für elektronische Komponenten oder als Plasmaziel verwendet werden;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Elektromagnetische Abschirmleistung** , verwendet für die störungsfreie Konstruktion von Radarelektroniksystemen und Signalverarbeitungsgeräten;
- **Stoß- und ermüdungsbeständig** , geeignet für den Dauereinsatz unter dynamischen Belastungen.

## 2. Kernmaterialvorteile der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Leistungsdimension	Leistungsvorteile
<b>Hohe Dichteigenschaften</b>	≥17,0 g/cm <sup>3</sup> , besser als die meisten Metalllegierungen und daher das bevorzugte Material für Trägheitskomponenten und Schutzstrukturen
<b>Starke umfassende mechanische Eigenschaften</b>	Besitzt sowohl eine hohe Festigkeit (Zugfestigkeit ≥ 800 MPa) als auch eine gute Duktilität (Dehnung > 10 %)
<b>Stabiler Betrieb bei hohen Temperaturen</b>	Behält die strukturelle Integrität in Umgebungen über 1000 °C bei und bietet eine ausgezeichnete Wärmeschock- und Kriechfestigkeit
<b>Multifunktionales und anpassbares Design</b>	Es kann die Integration von antimagnetischen, Wärmeleitfähigkeits-, Strahlungsbeständigkeits-, Korrosionsbeständigkeits-, elektromagnetischen Abschirmungs- und anderen Funktionen realisieren
<b>Gute Verarbeitungs- und Umformeigenschaften</b>	Es ist gut schweißbar und bearbeitbar, eignet sich für die Herstellung komplexer Bauteile und ist mit der additiven Fertigung und dem isostatischen Pressen kompatibel.
<b>Starke Anpassungsfähigkeit an die Umwelt</b>	Es ist beständig gegen Neutronenbestrahlung, Korrosion, Salznebel und Hochtemperaturoxidation und eignet sich für eine Vielzahl von Umgebungen wie die Luft- und Raumfahrt, die Kernenergie und Schiffsplattformen.

## 3. Überblick über Branchenentwicklungstrends

Anwendungsbereiche	Spezifische Verwendung	Anwendungstrends
<b>Nationale Verteidigungsindustrie</b>	Panzerbrechender Projektilkern, Raketenheckfach, Radar-Antimagnetstruktur, Trägheitsgegengewicht	Die Nachfrage nach hochdichten, antimagnetischen und leicht zu verarbeitenden Verbundwerkstoffen hat deutlich zugenommen
<b>Luft- und Raumfahrt</b>	Gegengewicht zur Lageanpassung, Kreiselschwungrad, Lageregelungsantriebssystem	Der Trend zur Miniaturisierung, zum Leichtbau und zur multifunktionalen Integration ist offensichtlich
<b>Kernenergiesystem</b>	Abschirmung von Fusionsreaktoren, Brennstoffummantelung, Neutronenmoderalkomponenten	Materialstabilität und Strahlungsresistenz sind die zentralen Forschungsrichtungen
<b>medizinische Geräte</b>	Abschirmblöcke für Strahlentherapie-Beschleuniger, MRT-Gegengewichte, CT-Schutzkomponenten	Nichtmagnetische + hochdichte + ungiftige Legierungslösungen werden schrittweise standardisiert
<b>Kommunikationselektronik</b>	Wärmeleitende Halterung, Abschirmplatte gegen elektromagnetische Störungen, Rückwandplatine zur Wärmekontrolle	Funktionelle Verbundwerkstoffe ersetzen nach und nach die

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		herkömmlichen Strukturmaterialien aus Kupfer und Aluminium.
<b>High-End-Fertigung</b>	Laserfokussierungskomponenten, Präzisions-Leistungsstrukturen, Ultrahochtemperatur-Thermofelddurchführungen	Beschleunigen Sie Synergien und Integration mit fortschrittlicher Fertigung (AM, PVD)

#### IV. Umfassende Bewertung und zukünftige Entwicklungen

: Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich für viele High-End-Projekte zum bevorzugten Werkstoff entwickelt, da sie die hervorragenden Eigenschaften traditioneller hochdichter Legierungen mit systematischen Verbesserungen in der Bearbeitbarkeit, Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit an extreme Einsatzbedingungen verbinden. Ihr Wert wird in Bereichen wie der Fertigung künstlicher Intelligenz, Antriebssystemen für die Luft- und Raumfahrt und neuen Kernenergiesystemen weiter steigen.

Zu den wichtigsten Entwicklungsrichtungen gehören:

- **Kontrollierbare Organisationsstruktur** : Kornverfeinerung , Optimierung der Bindungsphase und Verbesserung der Grenzfläche;
- **Intelligenter Formungsprozess** : integriert mit 3D-Druck, heißisostatischem Pressen und intelligentem Walzen;
- **Grünes Design und Recycling** : Entwicklung von wenig giftigen, cadmiumfreien, recycelbaren Legierungsformeln;
- **Neuartiges mehrskaliges Simulationsdesign** : Vorhersage von Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften mithilfe von CALPHAD und Phasenfeldsimulation.

#### 1.4 Vergleichende Analyse von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und herkömmlichen Wolfram-basierten Legierungen

Wolframbasierte Legierungen sind eine Klasse hochdichter metallischer Werkstoffe, die hauptsächlich aus Wolfram (W) bestehen, ergänzt durch eine geringe Menge einer metallischen Bindephase (wie Nickel, Eisen und Kupfer). Sie finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, beim Militär, in der Kernenergie und in der High-End-Fertigung. Als verbesserte und weiterentwickelte Version wolframbasierter Legierungen behält Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen (TNI) die Eigenschaften der hohen Dichte traditioneller wolframbasierter Legierungen bei und optimiert gleichzeitig deren Mikrostruktur, Leistung und Funktionsvielfalt durch die Einführung von Molybdän (Mo) und die Regulierung des Ni/Fe-Verhältnisses erheblich. Dieser Abschnitt vergleicht systematisch die wichtigsten Unterschiede und Leistungsvorteile von TNI mit traditionellen wolframbasierten Legierungen.

#### 1. Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und Organisationsstruktur

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Vergleichsprojekt</b>	<b>Traditionelle Legierungen auf Wolframbasis (W-Ni-Fe oder W-Ni-Cu)</b>	<b>Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung (W-Mo-Ni-Fe)</b>
<b>Hauptelement</b>	W (85~98 Gew.-%)	W (80 ~ 93 Gew.-%) + Mo (2 ~ 10 Gew.-%)
<b>Bindermetall</b>	Ni-Fe oder Ni-Cu	Hauptsächlich Ni-Fe-System, das Verhältnis kann fein abgestimmt werden
<b>Elemente hinzufügen</b>	Keine oder geringe Mengen an Seltenerdelementen	Mo ist das wichtigste Verstärkungselement und einigen Legierungen werden Co oder Ti usw. hinzugefügt.
<b>Organisationsmorphologie</b>	Wolframpartikel + $\gamma$ -Phasenbinder	Wolfram + Molybdän-Mischkristallpartikel + verstärkte Ni-Fe-Mo-Bindungsphase
<b>Mikrostrukturelle Stabilität</b>	Mittel, nach dem Erhitzen leicht gröber	Höher, Mo hemmt Kornwachstum, hochtemperaturbeständige Struktur

Durch die Zugabe von Molybdän wird auf organisatorischer Ebene eine stabilere Hochtemperaturphase eingeführt, die Fließfähigkeit der Bindungsphase und die Qualität der Grenzflächenbindung verbessert und dadurch die Dichte und strukturelle Stabilität der Gesamtlegierung erhöht.

## 2. Vergleich der physikalischen und mechanischen Eigenschaften

Leistungsparameter	Traditionelle Wolframlegierungen	Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
<b>Dichte (g/cm<sup>3</sup>)</b>	17,0~18,5	17,2~18,8 (Mo reduziert die Dichte leicht, hat aber eine dichtere Struktur)
<b>Zugfestigkeit</b>	700~900 MPa	800~1050 MPa
<b>Streckgrenze</b>	500~650 MPa	600~850 MPa
<b>Verlängerung</b>	8 %~15 %	10 % bis 18 % (einige schwach magnetische Typen sind besser)
<b>Härte (HRC)</b>	25~35	30~42 (Mo-verstärkt)
<b>Thermische Stabilität</b>	850~950°C Behält die Festigkeit	≥1100 °C erhält immer noch die strukturelle Integrität
<b>Heißkorrosionsbeständigkeit</b>	Im Allgemeinen besonders instabil in sauren/halogenhaltigen Umgebungen	Gute Beständigkeit gegen geschmolzenes Salz, korrosive Atmosphäre und Hochtemperaturoxidation

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften weist die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung eine höhere Festigkeit, Zähigkeit und Lebensdauer auf als herkömmliche Legierungen auf Wolframbasis und eignet sich für Betriebsanforderungen unter komplexeren Belastungsbedingungen und in rauen Umgebungen.

## 3. Vergleich von Verarbeitungsleistung und Prozessanpassungsfähigkeit

Vergleichsprojekt	Traditionelle Wolframlegierungen	Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
-------------------	----------------------------------	---

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Warmverarbeitbarkeit</b>	Gut, geeignet für Warm Schmieden und Warmfließpressen	Auch gut, aber die Mobilität, die Mo mit sich bringt, muss richtig kontrolliert werden
<b>Bearbeitbarkeit</b>	Kann gedreht, gefräst, geschliffen usw. werden.	Die Bearbeitbarkeit ist besser als bei reinem Wolfram, etwas schlechter als bei herkömmlichen W-Ni-Cu-Systemen
<b>Schweißleistung</b>	Schlecht, empfindlich gegenüber thermischen Rissen	Mo wird hinzugefügt, um die Verbindungsleistung zu verbessern und sich an das Laserschweißen anzupassen
<b>Isostatische Verträglichkeit</b>	Geeignet für CIP und HIP	Besser geeignet für HIP, hohe Verdichtungsrate und starke Schnittstellenbindung
<b>Kompatibilität mit additiver Fertigung</b>	Die Pulveranpassungsfähigkeit muss angepasst werden	Es ist gut mit dem Laserauftragschweißen kompatibel und kann spezielle Qualitäten für den 3D-Druck entwickeln

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weisen eine größere Prozessanpassungsfähigkeit auf und eignen sich besonders für High-End-Verarbeitungsverfahren wie heißisostatisches Pressen, Präzisionsumformen und moderne additive Fertigung.

#### 4. Vergleich von Funktionalität und umfassender Anwendung

Merkmale	Traditionelle Wolframlegierungen	Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
<b>Magnetische Reaktionsfähigkeit</b>	Kann magnetisch oder nicht magnetisch ausgeführt werden	Es ist einfacher, schwach magnetische Typen zu erhalten, die für MRI und andere Umgebungen geeignet sind.
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Ausgezeichnet (Ni-Fe-System)	Behält eine gute Wärmeleitfähigkeit bei, Mo reduziert die Wärmestabilität leicht, verbessert sie jedoch
<b>Elektromagnetische Abschirmleistung</b>	Kann Röntgen- und Gammastrahlen abschirmen	Stärkere Abschirmwirkung, geeignet für tiefe Strahlentherapie und Beschleunigerstrukturen
<b>Strahlungsbeständigkeit</b>	Hoch, geeignet für den nuklearen Strahlenschutz	Höher, Mo verbessert die Neutronenabsorption und Gitterstabilität
<b>Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit</b>	Mittel, erfordert Oberflächenbeschichtung oder Umweltkontrolle	Hervorragend, insbesondere bei hohen Temperaturen, geschmolzenem Salz und saurer Atmosphäre mit besserer Stabilität

Die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung mit ihrer hervorragenden Funktionsintegration passt sich modernen komplexen Anwendungsumgebungen an, insbesondere in den Bereichen medizinische Behandlung, elektromagnetischer Schutz, Kernenergiesysteme usw.

#### 5. Analyse der Unterschiede in typischen Anwendungsbereichen

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendungsszenario	Traditionelle Wolframlegierungen	Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
Panzerbrechender Kern	Umfangreiche Nutzung	Gleiche Anwendung, mit besserer Schlagzähigkeit bei hohen Geschwindigkeiten
Trägheitsgegengewichtsstruktur für die Luftfahrt	Standardmaterialien	Geeignet für komplexere Fluglageregelungsstrukturen und schwach magnetische Umgebungen
Kernreaktorkomponenten	Abschirm- und Pufferstruktur	Kann für Verkleidungen, Wärmeaustausch und Hauptstrukturmaterialien verwendet werden
Strahlentherapiegeräte und medizinische Gewichte	Lokale Anwendung	Besser geeignet für MRI nicht-magnetisches und präzises Dosisausgleichssystem
Gegengewicht für elektronische Ausrüstung/Radarsystem	Eingeschränkte Anwendungsmöglichkeiten	Elektromagnetische Abschirmung und Wärmemanagementfunktionen sind wichtiger

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ersetzen zunehmend traditionelle Wolframlegierungen und werden zum bevorzugten Material für die neue Generation hochwertiger Geräte. Sie sind besonders wettbewerbsfähig hinsichtlich Funktionsintegration, Zuverlässigkeit und Langzeitbetriebsfähigkeit.

## VI. Zusammenfassung und Ausblick

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben die Anwendungsgrenzen traditioneller Wolframlegierungen hinsichtlich Designkonzepten, ausgewogener Leistung und erweiterter Funktionalität überschritten. Durch rationale Proportionierung und Mikrostrukturkontrolle erreichen diese Legierungen ein optimales Gleichgewicht zwischen Dichte, Festigkeit, Verarbeitbarkeit und Umweltverträglichkeit und erfüllen so die zunehmend integrierten, multifunktionalen und extremen Anforderungen der modernen Luftfahrt, Energie, Gesundheitsversorgung und Informationstechnologie.

Da die Nachfrage nach Metallwerkstoffen mit hoher Dichte und hoher Funktionalität steigt, ist zu erwarten, dass Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen auch in Zukunft die traditionellen Legierungen auf Wolframbasis in den folgenden Bereichen ersetzen werden:

- Lokalisierung und Aufrüstung von Militärmaterial;
- Neue Kernmaterialien für Fusionsreaktoren und Weltraumkernreaktoren;
- Multifunktionale Bauteile zum elektromagnetischen Schutz und zur Strahlenabschirmung;

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Hochleistungsfähige vorlegierte Pulver für die additive Fertigung mit Laser/Plasma.

## 1.5 Technologieentwicklung und Entwicklungstrends von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen im In- und Ausland

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen (W-Mo-Ni-Fe), ein wichtiger Bestandteil hochdichter Legierungswerkstoffe, findet zunehmend Anwendung über den traditionellen Militär- und Gegengewichtsbereich hinaus in zahlreichen High-End-Fertigungssektoren, darunter Luft- und Raumfahrt, Kernkraftschutz, medizinischer Strahlenschutz und neue Energieanlagen. Die technologische Entwicklung spiegelt sich nicht nur in der kontinuierlichen Verbesserung von Materialverhältnissen und Leistungsoptimierung wider, sondern auch in umfassenden Verbesserungen von Herstellungsprozessen, Verarbeitungstechnologien, Funktionsintegration, Normungssystemen und intelligenten Fertigungsansätzen. Die folgende systematische Analyse konzentriert sich auf drei Dimensionen: nationale und internationale Entwicklungspfade, technologische Meilensteine und zukünftige Trends.

### 1. Entwicklungsgeschichte der ausländischen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungstechnologie

#### 1. Anfangsphase (1950er-1970er Jahre)

Europa und die USA waren die ersten Länder, die während des Kalten Krieges hochdichte Wolframlegierungen (W-Ni-Fe) erforschten, um den Anforderungen panzerbrechender Geschosse und Raketengegengewichte gerecht zu werden. Die anfänglichen Herstellungsverfahren beruhten hauptsächlich auf der traditionellen Pulvermetallurgie-Verdichtung, gefolgt von Flüssigphasensintern. Mo war noch nicht weit verbreitet, und die Bindephase bestand häufig aus Ni oder Ni-Cu. Diese Legierungen brachten Herausforderungen mit sich, wie z. B. unzureichende Hochtemperaturbeständigkeit, übermäßig starken Magnetismus und eine ungleichmäßige Mikrostruktur.

#### 2. Reifephase (1980er bis 2000er Jahre)

Mo wurde schrittweise zu Wolfram-basierten Legierungssystemen hinzugefügt, um W-Mo-Ni-Fe-Wolframlegierungen für mittlere und hohe Temperaturen zu bilden und so deren Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit zu verbessern. Forschungseinrichtungen und Unternehmen wie Kennametal und ALMT in den USA, Plansee in Deutschland und CEA in Frankreich haben nacheinander eine Reihe schwach magnetischer, hochfester Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen entwickelt, die in Trägheitssystemen, Hochtemperaturkomponenten und Reaktorbaugruppen weit verbreitet sind.

In dieser Phase verläuft die Entwicklung der Kerntechnologien wie folgt:

- Der Mo-Gehalt wird im Bereich von 2 bis 10 % kontrolliert.
- Die Dotierungstechnologie mit Spurenelementen (wie Re und La) verbessert die Wärmeschockbeständigkeit und die mikrostrukturelle Stabilität.
- Das Ni/Fe-Verhältnis der Bindephase ist optimiert, um ein Design mit Kompromiss zwischen geringer Magnetisierung und hoher Festigkeit zu erreichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Isostatisches Pressen (CIP/HIP) wird in Verbindung mit dem Wärmebehandlungsprozess Warmwalzen verwendet.

### 3. Fortgeschrittenes Stadium (2010er Jahre bis heute)

Da Bereiche wie Flugzeugtriebwerke, Kernfusion und 3D-Druck höhere Anforderungen an multifunktionale Legierungen stellen, entwickeln sich ausländische Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Richtung „kontrollierbarer Organisation, intelligenter Vorbereitung und integrierter Funktionen“:

- hochreiner Nanopulver (Zerstäubungs-/Reduktionsbeschichtungsverbundstoff);
- Selektives Laserschmelzen (SLM) + Entwicklung von Legierungsvorpulvern für additive Fertigungsverfahren;
- Oberflächengradientenkontrolle und zusammengesetzte Funktionsschichten (wie Wolfram-Molybdän-Verbundschicht + Nickel-Eisen-Substrat);
- Amorphe Wolfram-Molybdän-Beschichtungen werden in Bereichen mit extremer Korrosionsbeständigkeit eingesetzt;
- Standardisiertes Legierungssystem für nichtmagnetische/schwachmagnetische hochpräzise Gegengewichte (ASTM B777 Klasse 3, nicht magnetisch).

## 2. Überblick über die Entwicklung der inländischen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungstechnologie

### 1. Anfangsphase (um 1990)

China begann Ende der 1980er Jahre mit der systematischen Forschung an Wolfram-basierten Schwermetallen. Diese wurden zunächst in panzerbrechenden Kernen für die militärische Luftfahrt und in Gewichten zur Lageregelung von Satelliten eingesetzt. Den anfänglichen Technologien, die größtenteils auf aus der Sowjetunion und dem Westen importierten W-Ni-Fe- oder W-Ni-Cu-Formeln basierten, mangelte es an struktureller Stabilität und Leistungskonsistenz.

### 2. Verbesserungsphase (ab 2000er Jahren)

Unter der Leitung von AVIC, der China Academy of Engineering Physics, der China National Nuclear Corporation und anderen Einheiten wurde Mo schrittweise in das traditionelle W-Ni-Fe-System eingeführt und es wurden im Inland produzierte W-Mo-Ni-Fe-Legierungen mit höherer Dichte und besserer thermischer Stabilität entwickelt.

Typische Ergebnisse sind:

- Trägheitsschwungrad-Gegengewichtsmaterial aus Wolfram-Molybdän-Legierung, gemeinsam entwickelt von CTIA GROUP und AVIC Special Materials;
- Hochfeste und thermoschockbeständige W-Mo-Ni-Fe-Legierungen wurden erfolgreich in Strahlungsabschirmblöcken von Kernreaktoren eingesetzt.
- Das National Defense Science and Technology Industry System hat eine Reihe von hochtemperaturkorrosionsbeständigen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Materialsorten entwickelt (z. B. W90Mo5Ni3Fe2).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Das wissenschaftliche Forschungssystem der nationalen Verteidigungs- und Militärindustrie hat mit der Einrichtung einer unabhängigen Datenbank für physikalische Eigenschaften und Prozesse begonnen.

### 3. Integrations- und Modernisierungsphase (2015 bis heute)

Die neue Generation im Inland produzierter Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen legt Wert auf umweltfreundliche Herstellung, intelligente Fertigung und hochwertige Funktionsintegration. Ihr technologischer Weg orientiert sich an internationalen Mainstream-Standards.

- Vorsynthese von Nano-Wolframpulver + hochtemperaturgemahlenem Legierungspulver;
- Integration des heißisostatischen Pulverpressens;
- Oberflächenlaserbeschichtung und Herstellung einer Gradienten-Korrosionsschutzstruktur;
- Das Institute of Metal Research, die Chinesische Akademie der Wissenschaften, das Harbin Institute of Technology, die Hunan University und andere Institutionen sind führend bei der Entwicklung inländischer additiver W-Mo-Ni-Fe-Herstellungsverfahren.
- Dem Standard GB/T 38771-2020 für Wolframlegierungen mit hoher Dichte wurden eine Reihe von Klauseln zum Mo-Dotierungsverhältnis hinzugefügt.

Derzeit hat CTIA GROUP ein relativ vollständiges Produktsystem aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen aufgebaut, das Bereiche wie panzerbrechende Kerne, Trägheitskomponenten, Wärmeableitungsgeräte, Schutzstrukturen und elektromagnetische Isolationskomponenten abdeckt.

### 3. Technologische Entwicklungstrends und strategische Ausrichtungen

#### 1. Entwicklung hin zur multifunktionalen Verbundintegration

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden sich künftig nicht mehr auf die traditionellen Funktionen „hohe Dichte + mechanische Eigenschaften“ beschränken, sondern folgende Eigenschaftskombination betonen:

- Hohe Wärmeleitfähigkeit + schwache magnetische Eigenschaften (wie z. B. MRT-Geräte);
- Korrosionsbeständigkeit + Strahlungsbeständigkeit (z. B. Strukturen von Weltraumkernreaktoren);
- Leitfähig + Neutronen-/Strahlenabsorption (z. B. Elektronenstrahl-Wärmequelle/Strahlentherapie-system);
- Festigkeit + Formbarkeit (für 3D-Druck oder plattenförmige Strukturteile);

#### 2. Integration von intelligenter Vorbereitung und additiver Fertigung

Die traditionelle Pulvermetallurgie rüstet auf in Richtung Intelligenz und Digitalisierung:

- Hochdichtes isostatisches Pressen (HIP) + intelligentes Sintern mit Temperaturregelung;
- Integriertes Design von additiver Fertigung (SLM, EBM) und CIP-Wärmebehandlung;
- Digitale Simulation von Mikrostrukturen (CALPHAD, Multiskalensimulation);
- Aufbau einer Prozess-Struktur-Performance integrierten Datenbankplattform;
- Hochdurchsatz-Screeningsystem für Legierungszusammensetzungen (basierend auf KI-Materialdesign);

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Nationale strategische Materialreserven und unabhängige und kontrollierbare Entwicklung

Wolfram und Molybdän sind beides strategisch seltene Rohstoffe in China. Da es sich um hochwertige Produkte handelt, unterliegen Entwicklung und Export von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen strengen politischen Kontrollen. Zukünftige nationale Entwicklungsschwerpunkte sind:

- Öffnen Sie die komplette Kette von Haushaltspulver → Legierungsbarren → Präzisionskomponenten → Terminalintegration;
- Erreichen Sie das Ziel, das Engpassproblem europäischer, amerikanischer und japanischer Legierungen in der Militärindustrie, der Luft- und Raumfahrt und der Kernenergie zu beseitigen.
- Erstellen Sie eine Datenbank mit W-Mo-Ni-Fe-Sonderqualitäten und -Prozessen, die dem „Standardsystem mit chinesischen Merkmalen“ entspricht.
- Fördern Sie umweltfreundliche Aufbereitungs- und Recyclingtechnologien für die neue Materialgeneration, wie etwa die Rückgewinnung von Legierungspulver und das Sintern mit niedrigem Kohlenstoffgehalt.

### IV. Zusammenfassung und Ausblick

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich zu einer wichtigen Entwicklungsrichtung im Bereich hochdichter Legierungswerkstoffe entwickelt. Dank ihrer hervorragenden Strukturstabilität, ihrer Fähigkeit zur Funktionsintegration und ihrer extremen Service-Anpassungsfähigkeit haben sie traditionelle Wolframlegierungen schrittweise ersetzt und kommen in zahlreichen strategischen Branchen zum Einsatz, beispielsweise in der Luftfahrt, der Kernenergie, der Medizin und der Elektronik.

#### Zu den wichtigsten Punkten der zukünftigen Entwicklung zählen:

- Die Materialzusammensetzung entwickelt sich hin zu einem hochstabilen und kontrollierbaren Mehrkomponentensystem;
- Der Prozess wird auf eine kostengünstige, hochdichte und intelligente Vorbereitung umgestellt;
- Die Anwendungen erweitern sich hin zu strukturell-funktionaler Integration und Service in extremen Umgebungen.
- Parallel dazu schreiten die Standards in Richtung Internationalisierung und Branchensegmentierung voran.

Mit der Beschleunigung des Lokalisierungsprozesses und der Integration von Industriekettentechnologien werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu einer der wichtigsten Säulen „strategischer Hochleistungsmetallwerkstoffe“.

#### 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

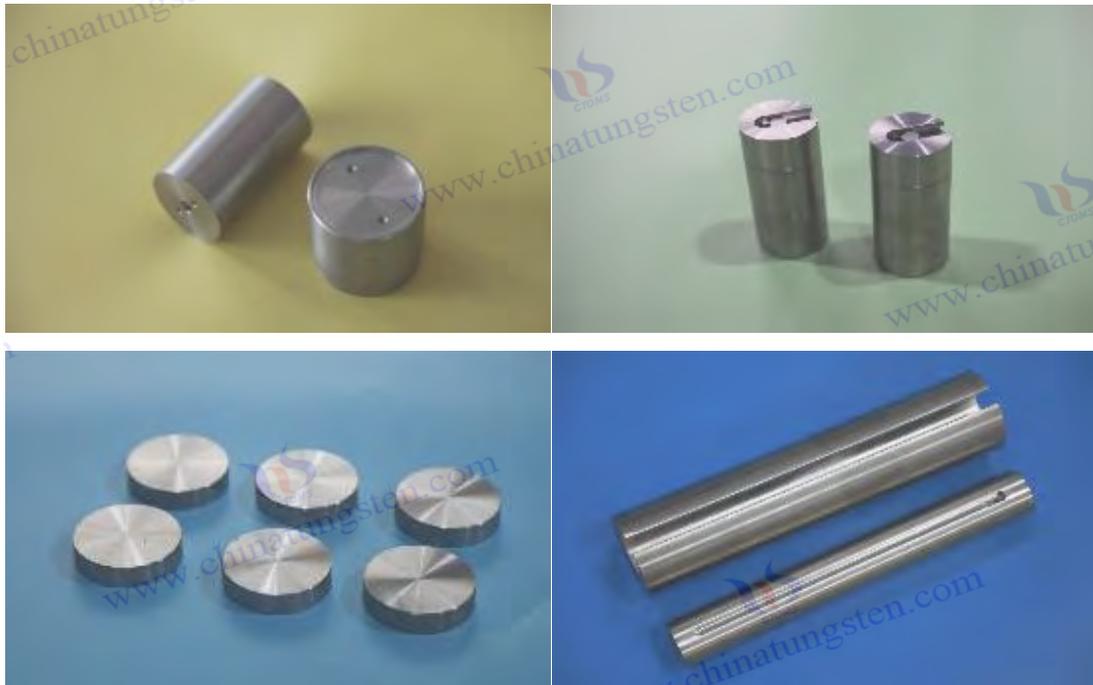
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

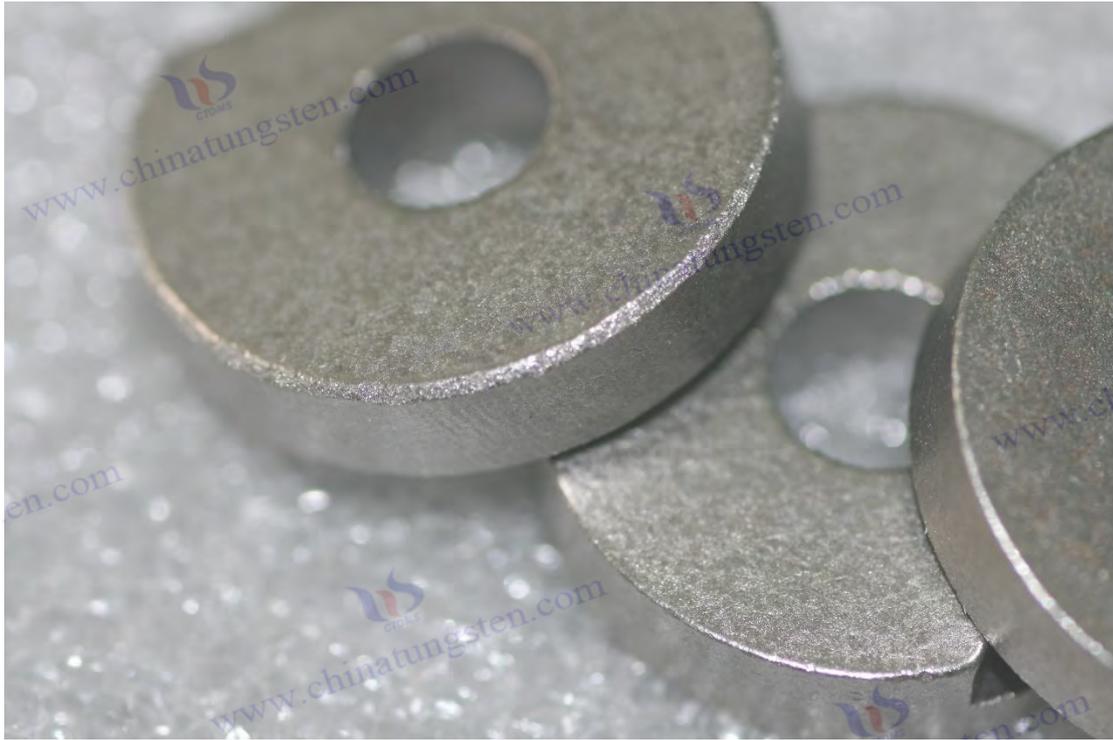
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 Chemische Zusammensetzung und Mikrostruktur der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

### 2.1 Die Rolle von Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen in Legierungen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen ist ein hochdichtes Legierungssystem, das aus vier Hauptelementen besteht: Wolfram (W), Molybdän (Mo), Nickel (Ni) und Eisen (Fe). Die Anteile und Wechselwirkungen dieser Elemente in der Legierung bestimmen die Mikrostruktur, die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Materials sowie sein Anwendungsspektrum. Das Verständnis der spezifischen Rolle jedes Elements in der Legierung ist entscheidend für die Legierungsentwicklung, Leistungsoptimierung und Prozesssteuerung.

#### 1. Die Rolle von Wolfram (W)

Wolfram ist das Hauptelement der Legierung und trägt maßgeblich zum Gewicht und zur Leistungsfähigkeit der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung bei. Zu seinen Hauptfunktionen gehören:

- **, ein Bestandteil hoher Dichte und Härte,**  
hat eine Dichte von ca.  $19,3 \text{ g/cm}^3$  und ist damit eines der dichtesten Elemente aller Industriemetalle. Dadurch verfügt die Legierung über ein extrem hohes spezifisches Gewicht und eignet sich daher gut als Gegengewicht und Schutzschild. Die hohe Härte und der hohe Schmelzpunkt ( $3422 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sorgen für eine hervorragende Verschleißfestigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit der Legierung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mechanische Eigenschaften:**  
Wolfram hat eine extrem hohe Festigkeit und Steifigkeit und bildet in der Legierung eine Wolframpartikel-Verstärkungsphase, die den größten Teil der äußeren Kraft aufnimmt und die Zugfestigkeit und Druckfestigkeit verbessert.
- **Gitterstabilität:**  
Der hohe Schmelzpunkt und die stabile kubisch-raumzentrierte Gitterstruktur von Wolfram sorgen für eine gute thermische Stabilität und stellen sicher, dass die Legierung in Umgebungen mit hohen Temperaturen nicht zu Kornwachstum und Erweichung neigt.

## 2. Die Rolle von Molybdän (Mo)

Als Legierungselement von Wolfram wird Molybdän häufig durch Legieren zu Wolframlegierungen hinzugefügt und spielt dabei die folgenden Schlüsselrollen:

- **Verstärkungseffekt:**  
Molybdän bildet in Wolframlegierungen eine feste Lösung, die die Matrixfestigkeit erhöht, die Streckgrenze und Kriechfestigkeit der Legierung verbessert und die Dichte der Legierung nicht wesentlich erhöht.
- **Verbesserung der thermischen Stabilität**  
Molybdän hat einen hohen Schmelzpunkt (2623 °C) und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten, wodurch das Wachstum von Wolfrankörnern bei hohen Temperaturen gehemmt und die Hochtemperaturfestigkeit und Wärmeschockbeständigkeit der Legierung deutlich verbessert werden kann.
- **Verbessern Sie die organisatorische Gleichmäßigkeit.**  
Mo kann die Verdichtung zwischen den Partikeln während des Sinterns fördern, die Legierungsdichte erhöhen, Porositätsdefekte reduzieren und die mechanischen Gesamteigenschaften verbessern.
- **Optimierung der magnetischen Eigenschaften**  
Durch die Zugabe von Molybdän lässt sich die magnetische Reaktion der Legierung anpassen. Insbesondere durch Anpassung des Ni/Fe-Verhältnisses können niedrigmagnetische Legierungen hergestellt werden, die den spezifischen Anforderungen in der Elektronik und Medizin gerecht werden.

## 3. Die Rolle von Nickel (Ni)

Nickel ist das wichtigste Bindemetallelement in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und spielt bei der Bindung und Verstärkung mehrere Rollen:

- **Die aus Nickel und Eisen gebildete Bindephase**  
umhüllt die Wolfram- und Molybdänpartikel und sorgt so für eine gute mechanische Bindung der Partikel untereinander und eine Verdichtung im pulvermetallurgischen Prozess.
- **Verbesserung der Plastizität und Zähigkeit der Legierung**  
Nickel weist eine gute Duktilität und Plastizität auf, wodurch die Gesamtzähigkeit von Wolfram-Molybdän-Legierungen deutlich verbessert, das Risiko eines Sprödbruchs verringert und die Bruchzähigkeit und Schlagfestigkeit verbessert werden kann.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Verbesserte Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit**  
Nickel verfügt über eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit, die die Stabilität der Legierung in feuchten, sauren und oxidierenden Umgebungen mit hohen Temperaturen verbessern und ihre Lebensdauer verlängern kann.
- **Anpassung magnetischer Eigenschaften**  
Nickel ist ein ferromagnetisches Element. Sein Gehalt und Anteil in der Legierung wirken sich direkt auf die magnetischen Reaktionseigenschaften des Materials aus und sind wichtige Parameter für die Entwicklung schwach- oder nichtmagnetischer Legierungen.

#### 4. Die Rolle von Eisen (Fe)

Eisen, ein weiterer Hauptbestandteil der Bindephase, bildet üblicherweise zusammen mit Nickel die Metallmatrix der Legierung und spielt dabei folgende Rollen:

- **Reduzieren Sie Kosten und passen Sie die mechanischen Eigenschaften an.**  
Eisen ist relativ günstig, und der Ersatz von Nickel in angemessenen Mengen kann die Legierungskosten effektiv senken. Gleichzeitig kann die Zugabe von Eisen die Härte, Festigkeit und Plastizität der Legierung anpassen.
- **Verbessern Sie die Festigkeit und Härte der Legierung. Durch**  
die Zugabe von Eisen wird die Mischkristallverfestigungswirkung der Legierung verbessert, die Gesamtfestigkeit erhöht und insbesondere die Verschleißfestigkeit innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs verbessert.
- **Durch die Anpassung von magnetischem**  
Eisen an ein stark magnetisches Element beeinflusst sein Gehalt die gesamten magnetischen Eigenschaften der Legierung. In Kombination mit dem Nickelanteil können verschiedene magnetische Designanforderungen erfüllt werden.
- **Fördern Sie das Sintern und die Gewebebildung.**  
Eisen und Nickel fördern gemeinsam die Bildung einer flüssigen Phase während des Sinterns der Legierung, verbessern den Verdichtungseffekt der Legierung, reduzieren Defekte und erhöhen die Ausbeute.

#### 5. Synergistische Effekte und umfassende Auswirkungen von Elementen

Die vier Elemente Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen interagieren in der Legierung miteinander und bilden eine komplexe Metallmatrix und ein verstärkendes Phasensystem. Der spezifische Synergieeffekt spiegelt sich wider in:

- **Organisationsoptimierung:**  
Das Mo-Element wirkt als Verstärkungs- und Kornstabilisator und bildet mit der Ni-Fe-Bindephase eine gleichmäßige und feine Mikrostruktur, wodurch die Dichte und Gleichmäßigkeit der Legierung effektiv verbessert wird.
- **Leistungsbalance**  
: Das Verhältnis von Ni und Fe wird angepasst, um eine optimale Übereinstimmung zwischen magnetischen und mechanischen Eigenschaften zu erreichen und so den unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Bereiche hinsichtlich Magnetismus, Festigkeit und Zähigkeit gerecht zu werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Prozessanpassungsfähigkeit**  
Durch die Gestaltung unterschiedlicher Elementverhältnisse ist die Legierung für eine Vielzahl von Pulvermetallurgie- und Wärmeverarbeitungsprozessen geeignet, wie z. B. isostatisches Pressen, heißisostatisches Pressen, Warmwalzen und additive Fertigung, und gewährleistet so Prozessflexibilität.
- **Die Anpassungsfähigkeit an die Umwelt**  
verbessert die Stabilität des Materials in Umgebungen mit hohen Temperaturen, starker Korrosion und Strahlung und erweitert seinen Anwendungsbereich.

## VI. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen vereinen die hohe Dichte und Festigkeit von Wolfram mit der Festigkeit und thermischen Stabilisierung von Molybdän sowie der Zähigkeit und den magnetischen Eigenschaften der Nickel-Eisen-Bindephase. So entsteht ein Hochleistungslegierungssystem, das hohe Dichte, Festigkeit, Zähigkeit, Hochtemperaturstabilität und multifunktionale Steuerbarkeit vereint. Ein tiefes Verständnis der Wirkmechanismen und Wechselwirkungen dieser Elemente ist der Schlüssel zur Weiterentwicklung der Entwicklung und industriellen Anwendung neuer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

### 2.2 Zusammensetzungsverhältnis und Konstruktionsprinzipien der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Die Leistung und Anwendungsmerkmale von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen hängen maßgeblich von ihrer Zusammensetzung und ihren Konstruktionsprinzipien ab. Ein angemessenes Elementverhältnis gewährleistet nicht nur die hervorragenden mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Legierung, sondern bestimmt auch ihre Prozessanpassungsfähigkeit, ihre Stabilität in der Betriebsumgebung und ihre Wirtschaftlichkeit. Im Folgenden werden die grundlegenden Rahmenbedingungen der Zusammensetzung, die verschiedenen Elementverhältnisse, Designüberlegungen und Optimierungsstrategien detailliert beschrieben.

#### 1. Grundgerüst des Zutatendesigns

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen bestehen hauptsächlich aus einer hochdichten Wolframmatrix, einem verstärkenden Molybdänelement und einer zähen Nickel-Eisen-Bindephase. Bei der Auslegung der Legierungszusammensetzung ist Folgendes zu berücksichtigen :

- **Basis mit hoher Dichte und Festigkeit** (dominiert durch Wolfram)
- **Hohe Temperaturbeständigkeit und Stabilität** (mit Molybdän verstärkt)
- **Zähigkeit und Verarbeitungseigenschaften** (Nickel-Eisen-Bindephase)
- **Kontrolle der magnetischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit**

Das Zutatendesign folgt dem Prinzip der Mehrzielbalance und konzentriert sich auf die Feinabstimmung eines bestimmten Leistungsparameters entsprechend dem Anwendungsszenario.

#### 2. Typischer Verhältnisbereich jedes Elements

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. Wolfram (W)-Gehalt

- Typischer Bereich: 80 %–98 % (Gewichtsprozent)
- Bei hoher Nachfragedichte können über 95 % erreicht werden
- Je höher der Wolframgehalt, desto größer sind Dichte und Härte, allerdings nimmt auch die Sprödigkeit zu und die Plastizität ab.

### 2. Molybdän (Mo)-Gehalt

- Typischer Bereich: 2 %–10 %
- Als Festkörperlösungsverstärkungselement kann die Erhöhung des Molybdängehalts die Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit deutlich verbessern
- Ein zu hoher Molybdängehalt kann die Dichte verringern und die Verdichtung der Legierung beeinträchtigen.

### 3. Nickel (Ni)-Gehalt

- Typischer Bereich: 3 %–10 %
- Nickel ist verantwortlich für die Bildung einer Bindungsphase, die Verbesserung der Zähigkeit und Plastizität sowie die Verbesserung der Verarbeitungsleistung
- Zu viel Nickel verringert die Festigkeit und Hitzebeständigkeit.

### 4. Eisengehalt (Fe)

- Typischer Bereich: 1 %–6 %
- Eisen als kostenoptimiertes Element, das magnetische Eigenschaften und Festigkeit reguliert
- Zu viel Eisen erhöht die magnetischen Eigenschaften und ist möglicherweise nicht für Anwendungen geeignet, die geringe magnetische Eigenschaften erfordern.

## 3. Designprinzipien und Optimierungsstrategien

### 1. Leistungsorientiertes Design

Passen Sie das Elementverhältnis entsprechend den Leistungsanforderungen bestimmter Anwendungen an, um das Ziel zu erreichen:

- **Hohe Dichte und hohe Festigkeit haben Priorität** : Erhöhung des Wolframgehalts, Kontrolle des Molybdängehalts auf niedrigem bis mittlerem Niveau, Reduzierung der Nickel-Eisen-Bindphase, aber Beibehaltung einer ausreichenden Zähigkeit.
- **Die Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen hat Priorität** : Erhöhen Sie den Molybdängehalt, verbessern Sie die thermische Stabilität und passen Sie die Nickel-Eisen-Legierung entsprechend an, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern.
- **Geringe magnetische Anforderungen** : Kontrollieren Sie den Eisengehalt streng und mäßigen Sie den Nickelgehalt, um sicherzustellen, dass die magnetische Permeabilität der Legierung auf ein Minimum reduziert wird.
- **Gute Plastizität und Verarbeitbarkeit** : Erhöhen Sie das Nickel-Eisen-Verhältnis entsprechend, um Festigkeit und Zähigkeit mit der Prozessanpassungsfähigkeit in Einklang zu bringen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Übereinstimmung von Schmelzpunkt und Wärmeausdehnung der Legierung

Sowohl Wolfram als auch Molybdän sind Metalle mit hohem Schmelzpunkt. Die Zugabe von Molybdän kann den Gesamtschmelzpunkt der Legierung senken, wodurch die Sinter- und Wärmebehandlungsprozesse leichter kontrollierbar werden. Gleichzeitig wird der Wärmeausdehnungskoeffizient an die Anforderungen nachfolgender Komponenten angepasst und die thermische Belastung reduziert.

## 3. Rationeller Einsatz von Kosten und Ressourcen

Die Preise für Molybdän und Nickel sind etwas höher als die für Wolfram, und ihre Ressourcen sind begrenzt. Daher muss bei der Entwicklung auf Kostenkontrolle geachtet werden:

- Reduzieren Sie das Nickel-Eisen-Verhältnis angemessen, um übermäßige Kostenverschwendung zu vermeiden.
- Optimieren Sie den Molybdängehalt so weit wie möglich und erfüllen Sie gleichzeitig die Leistungsanforderungen.

## 4. Prozessanpassungsdesign

- Bei der pulvermetallurgischen Herstellung ist eine gleichmäßige Pulvermischung sowie gute Fließ- und Verdichtungseigenschaften sicherzustellen. Bei der Gestaltung der Legierungszusammensetzung müssen die Pulvereigenschaften berücksichtigt werden.
- Das Verhältnis der Nickel-Eisen-Bindephase beeinflusst die Sintertemperatur und Keimbildungsrate der Flüssigphase und muss in Verbindung mit dem Sinterprozess optimiert werden.

## 4. Typische Beispiele für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Marke	W- Gehalt (%)	Mo- Gehalt (%)	Ni- Gehalt (%)	Fe- Gehalt (%)	Wichtige Leistungsmerkmale	Anwendungsbereiche
W90Mo5Ni3Fe2	90	5	3	2	Hohe Dichte, hohe Festigkeit, gute Zähigkeit	Militärische panzerbrechende Kerne und Trägheitsgegengewichte
W85Mo8Ni4Fe3	85	8	4	3	Hervorragende Hochtemperaturfestigkeit und gute Thermoschockbeständigkeit	Nukleare Schutzkomponenten
W92Mo2Ni4Fe2	92	2	4	2	Niedrigmagnetisches Design, geeignet für elektronische medizinische Geräte	Bauteile für den medizinischen Strahlenschutz

## 5. Zukünftige Trends im Komponentendesign

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Durch Mikrolegierungen und Dotierung mit mehreren Elementen**  
werden seltene Metalle (Re, Ta, La) als Spurenverstärker verwendet, um größere Leistungsverbesserungen zu erzielen.
- **Die Designzusammensetzung funktional abgestufter Legierungen**  
ändert sich schrittweise entlang der Dickenrichtung, wodurch die Kombination aus verschleißfester Schicht und Zähigkeitsschicht optimiert wird, um eine Verbundleistung zu erzielen.
- **Beim digitalen Legierungsdesign**  
wird computergestütztes Design (CALPHAD, maschinelles Lernen) verwendet, um optimale Zusammensetzungskombinationen vorherzusagen und F&E-Zyklen zu verkürzen.

## VI. Zusammenfassung

Die Zusammensetzung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung gewährleistet hohe Dichte, hohe Festigkeit und gute Zähigkeit. Durch die Anpassung der Wolfram-, Molybdän-, Nickel- und Eisen-Verhältnisse an die Anwendungsanforderungen wird ein optimales Verhältnis zwischen Leistung und Kosten erreicht. Mit technologischem Fortschritt und vielfältigen Anforderungen wird das Legierungsdesign in Zukunft präziser und intelligenter werden und den Einsatz von Hochleistungs-Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in einem breiteren Anwendungsspektrum fördern.

### 2.3 Mikrostruktur und Phasenstruktur der W-Mo-Ni-Fe-Legierung

Die Mikrostruktur und Phasenstruktur von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind entscheidende Faktoren für ihre physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Durch Manipulation der Mikrostruktur und Optimierung der Phasenstruktur können Festigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturstabilität der Legierung deutlich verbessert werden. Dieser Abschnitt beschreibt die typischen mikrostrukturellen Eigenschaften, Hauptphasenkomponenten und deren Entwicklungsmuster von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

#### 1. Mikrostrukturelle Zusammensetzung und Eigenschaften

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden üblicherweise pulvermetallurgisch hergestellt und ihre Mikrostruktur besteht hauptsächlich aus den folgenden Bestandteilen:

- **Die Hartphase (W-Mo-reiche Phase)**  
besteht aus Wolfram und Molybdän und bildet dichte, gleichmäßig verteilte, feinkörnige Hartmetallpartikel. Diese Phase ist die primäre tragende Phase der Legierung und trägt den Großteil der mechanischen Belastung. Die Zugabe von Molybdän fördert die Verfeinerung und gleichmäßige Verteilung der Wolframpartikel und verhindert so wirksam die Kornvergrößerung.
- **Die aus Nickel und Eisen gebildete Bindephase (Ni-Fe-Matrixphase)**  
umschließt die Hartphasenpartikel und verleiht der Legierung ihre allgemeine Zähigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Plastizität. Diese Phase ist typischerweise eine feste Lösung mit kubisch-flächenzentrierter (FCC) Struktur und weist eine gute Duktilität auf.

- Die Grenzfläche zwischen der Hartphase und der Bindungsphase im **Grenzflächenbereich ist ein wichtiger Faktor, der die Leistung der Legierung beeinflusst. Eine gute Grenzflächenbindung kann Spannungen effektiv übertragen und die Gesamtfestigkeit und Zähigkeit verbessern.**

## 2. Phasenstrukturanalyse

### 1. Wolfram

und Molybdän weisen ähnliche Gitterstrukturen und Atomgrößen auf und eignen sich daher gut für die Bildung einer kontinuierlichen Mischkristalllösung. Molybdän, ein härtendes Element in Mischkristallen, löst sich im Wolframgitter auf und erhöht dessen Festigkeit und Hochtemperaturstabilität. Die W-Mo-Mischkristalllösung behält eine kubisch-raumzentrierte Struktur (BCC) bei und gewährleistet so hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit.

### 2. Die Ni-Fe-basierte Bindephase

, eine Nickel-Eisen-Matrix, ist überwiegend eine kubisch-flächenzentrierte (FCC) Mischkristallstruktur. Ein hoher Nickelgehalt stabilisiert die FCC-Phase, während ein steigender Eisengehalt teilweise eine kubisch-raumzentrierte (BCC) Struktur bilden kann. Die Eigenschaften der Bindephase bestimmen die Plastizität und Zähigkeit der Legierung. Durch Anpassung des Ni/Fe-Verhältnisses können die magnetischen und mechanischen Eigenschaften optimiert werden.

### 3. Phase

und die Bindungsphase, die eine Übergangsschicht enthält. Typischerweise bildet sich keine signifikante spröde Phase, was die Festigkeit der Grenzflächenbindung gewährleistet. Die Dichte und Kontinuität der Grenzflächenstruktur spielen eine Schlüsselrolle bei der Verhinderung von Risswachstum.

## 3. Bildung und Kontrollfaktoren der Mikrostruktur

### • Pulvergröße und -verteilung

Die Partikelgröße von Wolfram- und Molybdän-Rohpulvern wirkt sich direkt auf die Mikrostruktur nach dem Sintern aus. Feine Pulver erhöhen die Dichte und fördern eine gleichmäßige Kornbildung.

### • Die Sinterprozessparameter

Temperatur, Atmosphäre und Haltezeit bestimmen das Wachstum der Hartphasenpartikel und den Fluss der Bindephase. Eine angemessene Kontrolle der Sinterparameter kann die Kornvergrößerung verhindern und eine dichte und gleichmäßige Struktur erzielen.

### • Wärmebehandlungsprozess Durch die

Wärmebehandlung können die innere Spannung und Korngröße der Legierung angepasst, die Grenzflächenbindung gefördert und die Zähigkeit und Ermüdungsbeständigkeit der Legierung verbessert werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **im Legierungszusammensetzungsverhältnis**  
hilft, die Körner der harten Phase zu verfeinern; das Nickel-Eisen-Verhältnis beeinflusst die strukturelle Stabilität und die mechanischen Eigenschaften der Bindungsphase.

#### 4. Typische Techniken zur Charakterisierung der Mikrostruktur

- **Mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurden**  
die Legierungsoberfläche und die Bruchmorphologie beobachtet und die Verteilung und Partikelgröße der Hartphase und der Bindephase analysiert.
- **der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)**  
wurden die Atomstruktur und Gitterdefekte der Schnittstelle analysiert, wodurch der Festigungsmechanismus der festen Lösung aufgedeckt wurde.
- **Mittels Röntgenbeugung (XRD)**  
wurden die Kristallstruktur und die Phasenzusammensetzung jeder Phase bestimmt und die Bildung der festen Lösung analysiert.
- **Die energiedispersive Spektrumanalyse (EDS)**  
wird verwendet, um die Verteilung der Elemente in jeder Phase der Mikrostruktur qualitativ und quantitativ zu analysieren.

#### 5. Einfluss der Mikrostruktur auf die Leistung

- **Festigkeit und Härte**  
Die feinen Hartphasenpartikel erhöhen die Lastverteilungskapazität und verbessern die Festigkeit und Härte der Legierung.
- **Die zähen und plastischen**  
Bindungsphasen verhindern wirksam die Rissausbreitung und verbessern die Bruchzähigkeit der Legierung.
- **Hohe Temperaturstabilität:**  
Molybdänverstärkte Hartphase und stabile Grenzflächenstruktur verbessern die strukturelle Stabilität der Legierung bei hohen Temperaturen und verlängern ihre Lebensdauer.
- Die Mikrostruktur mit guter **Korrosionsbeständigkeit und Strahlungsresistenz trägt dazu bei, das Eindringen korrosiver Medien und die Ausbreitung von Strahlenschäden zu verhindern und gewährleistet so die Umwelthanpassungsfähigkeit des Materials.**

#### VI. Zusammenfassung

Die Mikrostruktur und Phasenstruktur von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen basiert auf einer hochdichten W-Mo-Hartphase und einer zähen Ni-Fe-Bindephase. Durch optimierte Sinter- und Wärmebehandlungsprozesse wird die Hartphase verfeinert und die Grenzflächenbindung verbessert. Das Ergebnis ist ein Legierungsmaterial mit hoher Festigkeit, hoher Zähigkeit und hervorragender Hochtemperaturbeständigkeit. Durch den Einsatz von Nanotechnologie und fortschrittlichen Charakterisierungstechniken wird die Mikrostrukturkontrolle zukünftig noch präziser und bietet eine solide Grundlage für die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistungssteigerung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und die Erweiterung ihrer Anwendungsmöglichkeiten.

## 2.4 Einfluss der Verunreinigungskontrolle auf die Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Als Hochleistungs-Verbundwerkstoff auf Schwermetallbasis hängt die Leistung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung nicht nur vom richtigen Verhältnis der Hauptelemente und der kontrollierten Mikrostruktur ab, sondern auch vom Gehalt und der Verteilung der Verunreinigungselemente, die die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Materials sowie seine Lebensdauer maßgeblich beeinflussen. Eine effektive Verunreinigungskontrolle ist entscheidend für die Verbesserung der Gesamtqualität und Stabilität der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung.

### 1. Häufige Verunreinigungselemente und ihre Quellen

#### 1. Sauerstoff (O)

- Quelle: Oxidation während des Pulverisierungsprozesses, unreine Sinteratmosphäre oder Adsorption während der Verarbeitung
- Auswirkungen: Sauerstoff bildet Oxideinschlüsse, die zu einer Versprödung der Grenzfläche und einer Leistungsminderung führen.

#### 2. Kohlenstoff (C)

- Quelle: Pulveraufbereitung, Sinterschlacke, Schmiermittelrückstände etc.
- Auswirkungen: Kohlenstoff kann mit Wolfram und Molybdän Carbide bilden. In entsprechenden Mengen kann er die Struktur stärken, zu viel kann jedoch leicht zur Bildung spröder Phasen führen.

#### 3. Stickstoff (N)

- Quelle: Stickstoffeintrag aus der Atmosphäre, schlechte Abdichtung der Geräte
- Auswirkungen: Stickstoff kann Nitride bilden, die Härte und Sprödigkeit der Legierung verändern und die Schweißleistung beeinträchtigen.

#### 4. Schwefel (S) und Phosphor (P)

- Quelle: Rohstoffverunreinigungen, Verarbeitungsverschmutzung
- Auswirkungen: Bildung einer Verunreinigungsphase mit niedrigem Schmelzpunkt, die zu Sprödissen an den Korngrenzen führt und die Zähigkeit verringert.

#### 5. Wasserstoff (H)

- Quelle: Wasserzersetzung in der Atmosphäre, Wasserstoffaufnahme beim Sintern
- Auswirkungen: Verursacht Wasserstoffversprödung, wodurch die Bruchzähigkeit der Legierung erheblich beeinträchtigt wird.

## 2. Spezifische Auswirkungen von Verunreinigungen auf die Legierungseigenschaften

### 1. Einfluss mechanischer Eigenschaften

- Einschlüsse wie Oxide und Sulfide konzentrieren sich häufig an Korngrenzen, werden zu Rissquellen und führen zu Sprödbrüchen und verringerter Zähigkeit. Übermäßige

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ausfällung von Karbiden kann zu lokaler Härte und Sprödigkeit führen und so die Gesamtduktilität verringern .

- **Ermüdungsverhalten**

Verunreinigungseinschlüsse und nichtmetallische Einschlüsse können Ausgangspunkt für Ermüdungsrisse sein und die Lebensdauer verkürzen.

## 2. Einfluss physikalischer Eigenschaften

- **Wärmeleitende**

Verunreinigungsphasen weisen normalerweise eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf, und ein hoher Verunreinigungsgehalt zerstört die Wärmeleitfähigkeit der Legierung.

- **Elektrische und magnetische Eigenschaften**

Verunreinigungen wie Stickstoff und Schwefel haben einen erheblichen Einfluss auf die magnetische Reaktion, insbesondere in eisenbasierten Legierungen, was zu magnetischen Anomalien führen und Präzisionselektronikanwendungen beeinträchtigen kann.

## 3. Einfluss der chemischen Stabilität

- Einschlüsse, die durch **korrosionsbeständige Verunreinigungselemente gebildet werden, sind häufig die ersten Korrosionsstellen und verringern die Gesamtkorrosionsbeständigkeit des Materials.**

- **Oxidationsverhalten bei hohen Temperaturen:**

Ein zu hoher Sauerstoffgehalt führt zur Bildung einer nicht dichten Oxidschicht auf der Legierungsoberfläche, die sich leicht ablöst und die Oxidationskorrosion beschleunigt.

## 3. Technologien und Maßnahmen zur Verunreinigungskontrolle

### 1. Verbesserte Rohstoffreinheit

- Wählen Sie hochreines Wolfram-Molybdän-Pulver und hochwertiges Nickel-Eisen-Legierungspulver.
- Kontrollieren Sie den Gehalt an Verunreinigungen wie Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel in Rohstoffen streng.

### 2. Pulververarbeitungstechnologie

- Das Pulverisieren erfolgt unter Schutzgas, um die Aufnahme von Sauerstoff und Stickstoff zu reduzieren.
- Verwenden Sie eine Vakuumentgasung oder eine Wasserstoffreduktionsbehandlung, um den Sauerstoffgehalt zu reduzieren.

### 3. Sinteratmosphäre und Prozessoptimierung

- Verwenden Sie hochreines Argon oder Vakuumsintern, um das Eindringen von Sauerstoff und Stickstoff zu vermeiden.
- Kontrollieren Sie die Sintertemperatur und -zeit, um die übermäßige Ausfällung von Carbiden und Nitriden zu reduzieren.

### 4. Oberflächenbehandlung und Weiterverarbeitung

- Verwenden Sie eine saubere Verarbeitungsumgebung, um eine Kontamination durch Fremdstoffe zu vermeiden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Wärmebehandlung fördert die gleichmäßige Verteilung von Verunreinigungen und reduziert die Spannungskonzentration.

#### 4. Standards für den Verunreinigungsgehalt und Nachweisttechnologie

- **Die Standardgrenzwerte für**  
wichtige Verunreinigungselemente in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erfordern im Allgemeinen: Sauerstoffgehalt <100 ppm, Kohlenstoff <50 ppm, Schwefel <20 ppm und Stickstoff <50 ppm. Die spezifischen Standards werden je nach Anwendungsbereich angepasst.
- **Nachweismethode**
  - Gasanalysator (Leco Sauerstoff- und Stickstoffanalyse)
  - Kohlenstoff- und Schwefelanalysator
  - Elektronenstrahlmikroanalyse (EPMA)
  - Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF)
  - Thermogravimetrische Analyse (TGA)

#### 5. Die Bedeutung der Verunreinigungskontrolle für die zukünftige Entwicklung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Da die Herstellung hochwertiger Geräte und die Verteidigungstechnologie die Leistungsanforderungen an Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erhöhen, wird die Kontrolle von Verunreinigungen zu einem wichtigen Faktor bei der Bestimmung der Leistungsgrenze von Legierungen.

- **Durch den Einsatz intelligenter Fertigungstechnologie** werden eine Online-Überwachung und dynamische Kontrolle von Verunreinigungen ermöglicht.
- **Neue Technologien zur Entfernung von Verunreinigungen** wie Plasmareinigung und elektrolytische Raffination werden die Reinheit der Rohstoffe weiter verbessern.
- **Theoretische Forschungen zur mehrskaligen Verunreinigungskontrolle** werden zu einem tieferen Verständnis der Auswirkungen von Verunreinigungen auf die Mikrostruktur und die makroskopischen Eigenschaften beitragen.

#### VI. Zusammenfassung

Obwohl es sich bei Verunreinigungselementen um Spurenelemente handelt, haben sie einen tiefgreifenden Einfluss auf die Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. Durch eine systematische Strategie zur Verunreinigungskontrolle und ein umfassendes Management des gesamten Prozesses, von der Rohstoffauswahl bis zur Aufbereitung, können wir die Festigkeit, Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Betriebsstabilität des Materials deutlich verbessern und so eine solide Grundlage für den breiten Einsatz von Hochleistungs-Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen schaffen.

#### 2.5 Zusammensetzungs-Struktur-Eigenschafts-Beziehungsmodell einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die außergewöhnliche Leistung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen beruht auf der komplexen und ausgeklügelten Kombination von Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften. Die Entwicklung eines wissenschaftlichen Zusammensetzungs-Struktur-Eigenschafts-Modells ermöglicht ein systematisches Verständnis des inhärenten Zusammenhangs zwischen der mikrostrukturellen Entwicklung der Legierung und dem makroskopischen mechanischen Verhalten und liefert eine theoretische Grundlage und Orientierung für die Legierungsentwicklung und Leistungsoptimierung.

## 1. Komponenten-Organisations-Beziehung

Das Zusammensetzungsverhältnis der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung bestimmt direkt ihre mikrostrukturellen Eigenschaften, die sich insbesondere in folgenden Merkmalen äußern:

- **Partikelgröße und -verteilung der Hartphase**
  - Ein hoher Wolframgehalt fördert die dichte Anordnung und das grobe Wachstum der Hartphasenpartikel;
  - Die Zugabe von Molybdän wirkt sich positiv auf die Verfeinerung der Hartphasenkörner und eine gleichmäßige Dispersion aus.
- **Änderungen in der Morphologie und Zusammensetzung der Bindephase**
  - Das Verhältnis von Nickel zu Eisen beeinflusst die Kristallstruktur und Härte der Bindungsphase. Bei einem höheren Nickelanteil ist die Bindungsphase weicher und weist eine höhere Zähigkeit auf. Bei einem höheren Eisenanteil nimmt die Härte zu, die Zähigkeit jedoch ab.
  - Der Verunreinigungsgehalt in der Bindephase beeinflusst auch die Festigkeit der Grenzflächenbindung.
- **Grenzflächenstruktur und Diffusionsschichtdicke**
  - Eine angemessene Elementdiffusion und Grenzflächenkompatibilität bestimmen die Bindungsstärke zwischen der Hartphase und der Klebphase.

## 2. Organisation-Leistungs-Beziehung

Die Eigenschaften der Mikrostruktur bestimmen die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung:

- **Beziehung zwischen Korngröße und Festigkeit**

Der Kornverfeinerungseffekt (Hall-Petch-Beziehung) zeigt, dass eine Verringerung der Korngröße der harten Phase die Streckgrenze und Zugfestigkeit der Legierung deutlich erhöht.
- **Phasenzusammensetzung und Zähigkeit**

sorgen für gute Plastizität und Bruchzähigkeit und die Festigkeit der Grenzflächenbindung verbessert die Ermüdungsbeständigkeit.
- **Phasengrenzflächendefekte und Bruchverhalten**

Grenzflächendefekte, Einschlüsse und Löcher werden zur Quelle der Rissbildung und wirken sich direkt auf die Bruchart und Bruchzähigkeit aus.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Phasenverhältnis und Wärme- und Stromleitfähigkeit**  
Ein hoher Anteil an Hartphase trägt zur Verbesserung der Wärme- und Stromleitfähigkeit bei, zu viel Hartphase führt jedoch zu einer verringerten Zähigkeit.

### 3. Kompositions-Leistungs-Kopplungsmodell

Die Zusammensetzung beeinflusst die Mikrostruktur, die wiederum die Legierungseigenschaften bestimmt. Es entsteht ein gekoppeltes System aus Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften. Darauf aufbauend umfasst die Modellbildung im Allgemeinen:

- **Thermodynamische Berechnungen (CALPHAD)**  
simulieren Legierungsphasendiagramme und stabile Phasenbildung und sagen Phasenzusammensetzung und Übergangstemperaturen bei verschiedenen Zusammensetzungen voraus.
- **Das kinetische Modell**  
untersucht die Elementdiffusion, das Kornwachstum und die Ausscheidungsdynamik und deckt die Gesetze der Mikrostrukturentwicklung auf.
- **Das mechanische Verhaltensmodell**  
basiert auf den mikrostrukturellen Parametern, um das elastisch-plastische mechanische Modell der Legierung zu erstellen und die Festigkeit, Zähigkeit und Lebensdauer vorherzusagen.
- **Die Multiskalensimulation**  
erstreckt sich von der atomaren Ebene über die Mikrostruktur bis hin zur makroskopischen Leistung und nutzt Methoden der Finite-Elemente-, Phasenfeld- und Molekulardynamik, um eine umfassende Simulation zu erreichen.

### 4. Typische Anwendungsfälle des Modells

- **Bei der Vorhersage der Zusammensetzungsoptimierung**  
werden Computermodelle verwendet, um das optimale Verhältnis von Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen zu ermitteln und so die kombinierte Leistung aus Festigkeit und Zähigkeit zu maximieren.
- **Die Anpassung der Prozessparameter**  
basiert auf dem Mikrostruktur-Evolutionsmodell, wobei die Sintertemperatur und -zeit angepasst werden, um die ideale Korngröße und Phasenverteilung zu erreichen.
- **Bei der Leistungsfehleranalyse**  
werden Bruchmechanikmodelle verwendet, um die Auswirkungen mikrostruktureller Defekte auf das Ermüdungs- und Bruchverhalten zu analysieren und so die Qualitätskontrolle zu steuern.

### 5. Herausforderungen und Perspektiven der Modellentwicklung

- **Genaue Modellierung komplexer Mehrphasensysteme**  
W-Mo-Ni-Fe-Legierungen enthalten mehrere Phasen mit komplexen Schnittstellen und das Modell muss Wechselwirkungen und Heterogenität berücksichtigen .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Der Rechenressourcenbedarf von gekoppelten Berechnungen mit mehreren Maßstäben**  
erfordert die Unterstützung von Hochleistungsrechnern, um eine effektive Kopplung zwischen Modellen unterschiedlicher Maßstäbe zu erreichen.
- **Unterstützung und Überprüfung experimenteller Daten**  
Um zuverlässige Vorhersagen zu gewährleisten, muss sich das Modell zur Kalibrierung und Überprüfung auf eine große Menge genauer experimenteller Daten stützen.
- **Durch die Integration von Intelligenz und maschinellem Lernen**  
wird künstliche Intelligenztechnologie verwendet, um bei der Datenanalyse und Modelloptimierung zu helfen und so die Designeffizienz zu verbessern.

## VI. Zusammenfassung

Das Modell der Zusammensetzungs-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen ist ein zentrales Instrument zum Verständnis und zur Optimierung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. Durch systematische Modellkonstruktion und experimentelle Verifizierung können Legierungseigenschaften präzise vorhergesagt, das Legierungsdesign und die Prozessoptimierung gesteuert und eine solide wissenschaftliche Grundlage sowie technische Unterstützung für die Entwicklung leistungsstarker Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsmaterialien bereitgestellt werden.

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Kapitel 3 Physikalische und mechanische Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 3.1 Dichte, spezifisches Gewicht und Maßgenauigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte und hervorragenden mechanischen Eigenschaften häufig in Präzisionsgegengewichten, Hochleistungs-Strahlenschutz und speziellen Strukturkomponenten eingesetzt. Dichte, spezifisches Gewicht und Maßgenauigkeit sind wichtige Indikatoren für die Bewertung der Materialqualität und Leistungsstabilität und wirken sich direkt auf die Leistung und den Verarbeitungsaufwand der Legierung aus.

#### 1. Dichte- und spezifische Gewichtseigenschaften einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

##### 1. Definition und Bedeutung der Dichte:

Die Dichte bezeichnet die Masse einer Legierung pro Volumeneinheit und ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit und Verdichtung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. Legierungen mit hoher Dichte weisen im Allgemeinen eine verbesserte mechanische Festigkeit und einen besseren Strahlenschutz auf. Wolfram ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ) und Molybdän ( $10,2 \text{ g/cm}^3$ ) sorgen als Schwermetalle für die hohe Dichte der Legierung. Nickel und Eisen als Bindemetalle mit geringerer Dichte bestimmen gemeinsam die endgültige Legierungsdichte.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Theoretische Dichte und tatsächliche Dichte

- **Die theoretische Dichte** wird auf Grundlage des gewichteten Durchschnittswerts der einzelnen Komponenten berechnet und spiegelt die Dichte einer idealen dichten Struktur wider.
- **Die tatsächliche Dichte** wird durch den Herstellungsprozess beeinflusst, beispielsweise durch die Porosität zwischen den Pulverpartikeln und die Sinterdichte. Dies führt dazu, dass die tatsächliche Dichte etwas unter dem theoretischen Wert liegt. Die tatsächliche Dichte ist ein wichtiger Indikator für die Beurteilung der Sinterqualität und der anschließenden Bearbeitung.

## 3. Das spezifische Gewicht wird

üblicherweise mithilfe einer Flüssigkeitsverdrängungsmethode (z. B. Wasserverdrängung) oder eines Hydrometers gemessen, um Genauigkeit und Wiederholbarkeit zu gewährleisten. Genaue Messungen des spezifischen Gewichts und der Dichte helfen, Prozessfehler und interne Materialfehler zu identifizieren.

## 4. Die Dichtekontrolltechnologie

verbessert die Legierungsdichte und reduziert die Porosität durch Kontrolle der Pulverpartikelgröße, Optimierung des Sinterprozesses und Wärmebehandlungsverfahren, um hochdichte, defektarme Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsprodukte zu erhalten.

## 2. Maßgenauigkeit und deren Kontrolle

### 1. Definition und Anforderungen der Maßgenauigkeit:

Maßgenauigkeit bezeichnet die Abweichung zwischen den Abmessungen eines Legierungsprodukts und den Konstruktionsstandardmaßen. Die hohe Dichte von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erschwert die Verarbeitung, insbesondere bei Anwendungen wie hochpräzisen Gegengewichten und Mikrogeräten, bei denen die Maßtoleranzen streng kontrolliert werden müssen.

### 2. Faktoren, die die Maßgenauigkeit beeinflussen

- **Materialdichte und -gleichmäßigkeit** : Unterschiedliche Wärmeausdehnungen aufgrund ungleichmäßiger Dichte führen zu Maßänderungen.
- **Formgebungsprozess** : Pulvermetallurgische Formgebung, Sinterschrumpfung und Maßänderungen während der Wärmebehandlung müssen genau vorhergesagt und kontrolliert werden .
- **Bearbeitungstechnologie** : Die Genauigkeit der nachfolgenden Bearbeitung wie Schleifen und Polieren beeinflusst die endgültige Maßhaltigkeit .

### 3. Die Technologie zur Erkennung der Maßgenauigkeit

verwendet hochpräzise CNC-Messmaschinen (CMM), Drei-Koordinaten-Messmaschinen und Laserscanner, um sicherzustellen, dass die Abmessungen den Konstruktionsanforderungen entsprechen, insbesondere bei der Erkennung wichtiger Maßteile.

### 4. Maßnahmen zur Verbesserung der Dimensionsstabilität

verbessern die Dimensionsstabilität und die wiederholbare Verarbeitungsgenauigkeit durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimierung der Prozessparameter (wie Sintertemperatur und Haltezeit), Festlegung von Konstruktionstoleranzen und mehrere thermomechanische Behandlungen.

### 3. Einfluss von Dichte und Maßgenauigkeit auf die Legierungseigenschaften

- **Zusammenhang zwischen mechanischen Eigenschaften:**

Je höher die Dichte und je geringer die Porosität, desto besser sind Zugfestigkeit, Härte und Lebensdauer der Legierung. Eine strenge Kontrolle der Maßgenauigkeit gewährleistet die Leistungskonsistenz der Komponenten bei Montage und Gebrauch.

- **Zuverlässigkeit im Einsatz**

Hohe Dichte und Dimensionsstabilität gewährleisten den langfristig stabilen Betrieb von Komponenten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Umgebungen mit hohen Temperaturen, hohem Druck und Strahlung.

## IV. Zusammenfassung

Dichte, spezifisches Gewicht und Maßgenauigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind wichtige Indikatoren für Materialqualität und -leistung. Durch die Optimierung von Pulvereigenschaften, Herstellungstechniken und Verarbeitungsverfahren können wir die Dichte und Maßhaltigkeit des Materials effektiv verbessern und so eine solide Grundlage für die industrielle Anwendung von Hochleistungs-Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen schaffen.

### 3.2 Festigkeit, Duktilität und Bruchzähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Dank ihrer einzigartigen Zusammensetzung und Verbundstruktur vereinen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen hohe Festigkeit mit moderater Duktilität und weisen eine ausgezeichnete Bruchzähigkeit auf. Damit erfüllen sie die hohen Anforderungen an Hochleistungswerkstoffe in Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie und dem Präzisionsmaschinenbau. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Analyse der mechanischen Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, einschließlich Festigkeit, Duktilität und Bruchzähigkeit. Er untersucht die wichtigsten Faktoren, die diese Eigenschaften beeinflussen, und zeigt, wie sie verbessert werden können.

#### 1. Festigkeitseigenschaften

1. -

Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weisen typischerweise eine hohe Zugfestigkeit auf, die vor allem auf die verstärkende Wirkung der Wolfram- und Molybdän-Hartphasen und die Zähigkeitsunterstützung der Nickel-Eisen-Bindephase zurückzuführen ist. Die Streckgrenze spiegelt das kritische Spannungsniveau wider, bei dem die Legierung plastisch verformt wird, und ist ein wichtiger Parameter für Design und Anwendung.

2. **Einfluss von Zusammensetzung und Verfahren auf die Festigkeit**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Verhältnis der Inhaltsstoffe** : Erhöhen Sie den Wolfram- und Molybdängehalt, erhöhen Sie den Anteil der Hartphase und stärken Sie die Festigkeit der Legierung.
- **Sinterdichte** : Je höher die Dichte, desto geringer die Porosität und desto höher die Festigkeit .
- **Wärmebehandlung** : Ein angemessener **Wärmebehandlungsprozess** kann die Kornverfeinerung verbessern, die Festigkeit der Grenzflächenbindung erhöhen und somit die Gesamtfestigkeit verbessern.

### 3. Typische Festigkeitswerte

: Im Allgemeinen kann die Zugfestigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen 700–1200 MPa erreichen, und die Streckgrenze liegt je nach Formel und Verfahren bei etwa 400–900 MPa.

## 2. Duktilität (Plastizität)

### 1. Definition der Dehnung

: Dehnung ist die plastische Verformungsfähigkeit eines Materials vor dem Zugbruch, üblicherweise ausgedrückt als Prozentsatz der Dehnung nach dem Bruch. Sie ist ein wichtiger Indikator zur Bewertung der Zähigkeit und Formbarkeit eines Materials.

### 2. Faktoren, die die Duktilität beeinflussen

- **Zusammensetzung der Bindephase** : Ein hoher Nickelgehalt macht die Bindephase duktiler und verbessert die Gesamtplastizität; ein hoher Eisengehalt verringert die Plastizität leicht.
- **Korngröße** : **Durch** Kornverfeinerung kann die Korngrenzfläche vergrößert und die plastische Verformung gefördert werden.
- **Verunreinigungen und Defekte** : Einschlüsse und Poren können die Duktilität erheblich verringern.

### 3. Typischer Dehnungsbereich:

Die Dehnung einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung beträgt im Allgemeinen 5 % bis 15 %, was gegenüber Materialien aus reinem Wolfram oder reinem Molybdän offensichtliche Vorteile bietet.

## 3. Bruchzähigkeit

### 1. Definition der Bruchzähigkeit:

Die Bruchzähigkeit spiegelt die Fähigkeit eines Materials wider, der Rissausbreitung zu widerstehen und ist ein wichtiger Indikator zur Bewertung der strukturellen Sicherheit, insbesondere bei Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, die unter extremen Arbeitsbedingungen eingesetzt werden.

### 2. Bruchmodus

Die Grenzflächenbindungsstärke, die Korngrenzstruktur und die Defektkontrolle der Wolfram-Molybdän-Hartphase und der Nickel-Eisen-Bindephase wirken sich direkt auf den Bruchmodus aus, der sich als duktiler Bruch oder spröder Bruch äußern kann.

### 3. Maßnahmen zur Verbesserung der Bruchzähigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Optimieren Sie das Verhältnis der Inhaltsstoffe, um sicherzustellen, dass die Bindungsphase kontinuierlich und duktil ist.
- Verfeinern Sie die Korngröße und stärken Sie die Grenzflächenbindung.
- Verunreinigungen und Einschlüsse werden streng kontrolliert, um die Entstehung von Rissen zu reduzieren.

#### 4. Der Bruchzähigkeitsindex

typischer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen (K\_IC) liegt im Allgemeinen zwischen 15 und 30 MPa·m<sup>0,5</sup>, und einige hochzähe modifizierte Materialien können höhere Werte erreichen.

#### 4. Umfassende Leistungsoptimierung

Festigkeit, Duktilität und Bruchzähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen stehen in einem engen Verhältnis zueinander. Im Allgemeinen führt eine zunehmende Festigkeit zu einer Abnahme von Duktilität und Zähigkeit. Durch Mikrolegierungen, Nanostrukturdesign und optimierte thermomechanische Verfahren lässt sich ein Gleichgewicht zwischen hoher Festigkeit und Zähigkeit erreichen, um den Anforderungen verschiedener Anwendungen gerecht zu werden.

#### V. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit ihrer hervorragenden Festigkeit, guten Duktilität und zuverlässigen Bruchzähigkeit haben ein breites Anwendungspotenzial in zahlreichen Bereichen gezeigt. Ein gründliches Verständnis der Mechanismen, die der Entstehung und Regulierung dieser mechanischen Eigenschaften zugrunde liegen, ist für die Entwicklung und Anwendung leistungsstarker Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen von entscheidender Bedeutung.

#### 3.3 Härte, Verschleißfestigkeit und Schlagzähigkeit der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen vereinen die hohe Härte von Wolfram und Molybdän mit der guten Zähigkeit von Nickel-Eisen-Legierungen. Dies führt zu hervorragenden mechanischen Eigenschaften, Verschleißfestigkeit und Schlagzähigkeit. Dieser Abschnitt bietet eine detaillierte Einführung in die Härte, Verschleißfestigkeit und Schlagzähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und analysiert die wichtigsten Faktoren, die diese Eigenschaften beeinflussen.

#### 1. Härteeigenschaften

##### 1. Härte-Definition und Messmethoden:

Härte bezeichnet die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegenüber lokaler plastischer Verformung und wird üblicherweise anhand der Vickershärte (HV), Rockwellhärte (HRC) und Brinellhärte (HB) gemessen. Die Härte von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Legierungen wird üblicherweise mit der Vickershärteprüfung gemessen, die sich zur Messung feiner Strukturen eignet.

## 2. Faktoren, die die Härte beeinflussen

- **Legierungszusammensetzung** : Je höher der Gehalt an Wolfram- und Molybdän - Hartphasen, desto größer die Härte.
- **Sinterdichte** : Eine dichte Struktur erhöht die Härte und verringert die Porosität.
- **Wärmebehandlungsprozess** : Durch eine geeignete Wärmebehandlung können Härte und Verschleißfestigkeit verbessert werden.
- **Korngröße** : Durch die Kornverfeinerung wird die Anzahl der Korngrenzen erhöht und die Härte verbessert (Hall-Petch-Effekt).

## 3. Typischer Härtebereich:

Die Härte von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen liegt üblicherweise zwischen HV350 und 650. Eine hohe Härte bedeutet eine hohe Verschleißfestigkeit, kann aber zu Lasten der Zähigkeit gehen.

## 2. Verschleißfestigkeit

### 1. Überblick über die Verschleißfestigkeit:

Verschleißfestigkeit ist die Fähigkeit eines Materials, Oberflächenverschleiß und mechanischer Reibungserosion zu widerstehen, was in direktem Zusammenhang mit der Lebensdauer einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung in Reibungs- und Aufprallumgebungen steht.

### 2. Verschleißfester Mechanismus

- Hartphasenpartikel widerstehen abrasivem Verschleiß und Abrieb effektiv.
- Die Zähigkeit der Bindungsphase verhindert die Rissausbreitung und verringert Abplatzungen und Ermüdungverschleiß.
- Hervorragende Verbindungsschnittstelle reduziert Partikelablösung.

### 3. Methoden zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit

- Erhöhen Sie den Wolfram- und Molybdängehalt, um das Hartphasennetzwerk zu stärken.
- Durch Wärmebehandlung der Oberfläche und Beschichtungstechnologien (wie etwa PVD-Beschichtung) wird die Oberflächenhärte verbessert.
- Die Verstärkung durch Nanopartikel verbessert die Matrixfestigkeit und Verschleißfestigkeit.

### 4. Bei der Prüfung der Verschleißfestigkeit

wird eine Verschleißprüfmaschine (z. B. Kugel-auf-Scheibe-Verschleißtest) verwendet, um den Reibungskoeffizienten und die Verschleißrate zu messen und die Verschleißfestigkeit des Materials zu bewerten.

## 3. Auswirkungen auf die Leistung

### 1. Definition der Schlagfestigkeit:

Die Schlagfestigkeit spiegelt die Fähigkeit eines Materials wider, Energie zu absorbieren und einem Bruch unter plötzlicher Belastung oder Aufprallkraft zu widerstehen. Sie ist ein

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wichtiger Indikator zur Bewertung der Schlagfestigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

## 2. Faktoren, die die Schlagleistung beeinflussen

- **Zusammensetzungsverhältnis** : Das Verhältnis von Nickel und Eisen in der Bindephase ist angemessen, was die Schlagzähigkeit verbessern kann .
- **Mikrostruktur** : Gleichmäßig verteilte Hartphase und kontinuierliches Bindungsphasennetzwerk verbessern die Stoßabsorptionskapazität.
- **Defektkontrolle** : Reduzieren Sie Einschlüsse, Poren und Mikrorisse , um stoßbedingte Brüche zu verhindern.

## 3. Typische Indikatoren für die Schlagzähigkeit

Die Schlagzähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen (ausgedrückt als absorbierte Charpy-Schlagenergie) liegt je nach Materialzusammensetzung und Verfahren typischerweise zwischen 5 und 25 J/cm<sup>2</sup>.

## 4. Prozessmaßnahmen zur Verbesserung der Schlagleistung

- Zur Optimierung der Organisationsstruktur wird ein thermomechanisches Behandlungsverfahren eingesetzt.
- Die Nanoverstärkungstechnologie verbessert die Plastizität und Zähigkeit.
- Verbessern Sie die Ermüdungs- und Risswachstumsbeständigkeit durch Oberflächenbeschichtung und Wärmebehandlung.

## 4. Umfassende Leistungskontrolle

Bei Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen besteht ein Spannungsverhältnis zwischen Härte, Verschleißfestigkeit und Schlagzähigkeit. Hohe Härte geht oft mit erhöhter Sprödigkeit einher, während gute Schlagzähigkeit ein gewisses Maß an Plastizität und Zähigkeit erfordert. Durch die gezielte Gestaltung der Legierungszusammensetzung, die Optimierung des Herstellungsprozesses und den Einsatz moderner Oberflächenbehandlungstechniken lässt sich eine synergetische Verbesserung sowohl der hohen Härte als auch der guten Zähigkeit erreichen.

## V. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind aufgrund ihrer außergewöhnlichen Härte, Verschleißfestigkeit und Schlagzähigkeit zu unverzichtbaren Schlüsselwerkstoffen in zahlreichen anspruchsvollen Industriezweigen geworden. Ein umfassendes Verständnis und die effektive Nutzung ihrer mechanischen Eigenschaften erleichtern die Entwicklung leistungsstarker Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, die den Anforderungen komplexer Betriebsbedingungen gerecht werden.

### 3.4 Wärmeleitfähigkeit, thermische Stabilität und Wärmeausdehnungsverhalten von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hervorragenden thermophysikalischen Eigenschaften häufig in Hochtemperaturumgebungen und kritischen Wärmeleitungsanwendungen eingesetzt. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf ihre

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeleitfähigkeit, thermische Stabilität und Wärmeausdehnung und analysiert die mikroskopischen Mechanismen, die diese Eigenschaften beeinflussen, sowie die Prozesssteuerungsmethoden.

## 1. Wärmeleitfähigkeit

### 1. Übersicht zur Wärmeleitfähigkeit:

Wolfram und Molybdän sind beides hochwärmeleitfähige Metalle mit Wärmeleitfähigkeiten von ca.  $173 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  bzw.  $138 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , was den Legierungen eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit verleiht. Nickel-Eisen-Legierungen weisen eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf (unter ca.  $90 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ). Das Verhältnis und die Verteilung dieser Metalle beeinflussen die Gesamtwärmeleitfähigkeit der Legierung direkt.

### 2. Die Wärmeleitfähigkeit von Legierungen

wird hauptsächlich durch die Elektronenleitung des Metalls und die Schwingungsleitung des Gitters erreicht. Die Wolfram- und Molybdän-Hartphase dient als primärer Wärmeleitungs kanal, während die Nickel-Eisen-Phase als Barriere- und Pufferschicht fungiert. Interne Grenzflächen, Korngrenzen und Fremdkörper im Material streuen Elektronen und Phononen und verringern so die Wärmeleitfähigkeit.

### 3. Faktoren, die die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen

- **Zusammensetzungsverhältnis** : Je höher der Wolfram- und Molybdängehalt, desto besser die Wärmeleitfähigkeit.
- **Dichte** : Die Porosität wird reduziert, wodurch der Wärmewiderstand sinkt.
- **Mikrostruktur** : Gleichmäßig verteilte Hartphase und gute Grenzflächenbindung fördern die Wärmeübertragung.
- **Verarbeitungstechnologie** : Sintertemperatur und Wärmebehandlung beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit durch Kontrolle der Mikrostruktur .

### 4. Typischer Wärmeleitfähigkeitsbereich:

Die Wärmeleitfähigkeit einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung liegt im Allgemeinen zwischen  $60$  und  $140 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , und der spezifische Wert variiert je nach Verhältnis und Prozessunterschieden.

## 2. Thermische Stabilität

### 1. thermischer Stabilität

versteht man die Fähigkeit eines Materials, bei hohen Temperaturen stabile physikalische, chemische und mechanische Eigenschaften beizubehalten. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen müssen eine gute Oxidationsbeständigkeit und thermische Rissbildung sowie strukturelle Stabilität bei hohen Temperaturen aufweisen.

### 2. Leistung bei hohen Temperaturen:

Die hohen Schmelzpunkte von Wolfram und Molybdän ( $3422 \text{ }^\circ\text{C}$  für Wolfram und  $2623 \text{ }^\circ\text{C}$  für Molybdän) gewährleisten die thermische Stabilität der Legierungsgrundlage. Die Nickel-Eisen-Bindephase kann bei hohen Temperaturen weich werden oder eine Phasenumwandlung durchlaufen, was die Gesamtleistung beeinträchtigt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Oxidations- und Korrosionsverhalten: Die

Hochtemperaturoxidation ist ein wesentlicher Faktor, der die Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen einschränkt. Die Bildung und Dichte der Oxidschicht sind entscheidend für die Schutzeigenschaften des Materials. Sie erfordern typischerweise den Einsatz in bestimmten Atmosphären (Vakuum, Argon) oder Schutzbeschichtungen.

#### 4. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Stabilität

- Optimieren Sie die Legierungszusammensetzung und kontrollieren Sie das Nickel-Eisen-Verhältnis.
- Oberflächenwärmebehandlung und Beschichtungstechnik (Keramik, Oxidbeschichtung).
- Nanoverstärkung und Kornverfeinerung verbessern die thermische Stabilität.

### 3. Wärmeausdehnungsverhalten

#### 1. Übersicht über den Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE):

Der Wärmeausdehnungskoeffizient gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich ein Material bei Erwärmung seine Größe ändert. Er ist ein wichtiger Parameter bei der Konstruktion thermomechanischer Strukturen. Wolfram-Molybdän-Legierungen haben typischerweise einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten, was die Dimensionsstabilität in Hochtemperaturumgebungen fördert.

#### 2. Auswirkungen von Zusammensetzung und Organisation auf den CTE

- Der lineare Ausdehnungskoeffizient von Wolfram und Molybdän ist relativ niedrig und beträgt etwa  $4,5-5,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .
- Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Nickel-Eisen-Legierung ist relativ hoch, etwa  $11-13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , was sich auf den WAK der gesamten Legierung auswirkt.
- Je höher der Wolfram- und Molybdängehalt in der Legierung ist, desto niedriger ist der WAK und desto besser ist die thermische Dimensionsstabilität.

#### 3. Anpassung der Wärmeausdehnung und Anwendung aufgrund

der CTE-Eigenschaften der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung eignet sie sich zur Anpassung der Wärmeausdehnung an Materialien wie Keramik und Halbleiter, wodurch die Wärmespannung verringert und die Haltbarkeit der Komponenten verbessert wird.

#### 4. Technische Methoden zur Kontrolle der Wärmeausdehnung

- Der WAK kann durch Anpassung des Elementverhältnisses präzise gesteuert werden.
- Nanostrukturdesign und Herstellung von Verbundwerkstoffen zur Erzielung einer funktional abgestuften Wärmeausdehnung.
- Zur Kontrolle der thermischen Oberflächenausdehnung wird eine mehrschichtige Verbundbeschichtung verwendet.

### IV. Umfassende Bewertung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zeichnen sich durch die Kombination aus hoher Wärmeleitfähigkeit, hoher thermischer Stabilität und geringer Wärmeausdehnung aus und erfüllen die strengen thermophysikalischen Leistungsanforderungen der Luft- und Raumfahrt, der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nuklearindustrie und der elektronischen Kühlung. Durch Zusammensetzungsdesign und Prozessoptimierung können ihre Wärmeleitfähigkeit und thermomechanische Stabilität weiter verbessert werden.

## V. Zusammenfassung

Die Wärmeleitfähigkeit, die thermische Stabilität und das Wärmeausdehnungsverhalten von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind grundlegend für ihre Anwendung unter Hochtemperatur- und Wärmebelastungsbedingungen. Ein tiefes Verständnis und eine präzise Kontrolle dieser thermophysikalischen Eigenschaften bilden eine solide Grundlage für die breite Anwendung der Legierung in der modernen Fertigung und unter extremen Betriebsbedingungen.

## 3.5 Elektrische Eigenschaften, magnetische Reaktion und Strahlungsbeständigkeit der W-Mo-Ni-Fe-Legierung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weisen aufgrund ihrer einzigartigen Elementkombination und Mikrostruktur hervorragende elektrische Eigenschaften, einstellbare magnetische Reaktionseigenschaften und eine gute Strahlungsbeständigkeit auf. Sie finden breite Anwendung in elektronischen Geräten, der Nuklearindustrie und in Umgebungen mit Hochleistungsmagnetfeldern. Der folgende Artikel beschreibt die Mechanismen und Einflussfaktoren dieser Eigenschaften.

### 1. Elektrische Eigenschaften

#### 1. Leitfähigkeit und

spezifischer Widerstand: Wolfram und Molybdän sind beides hochleitfähige Metalle. Reines Wolfram hat eine Leitfähigkeit von etwa  $1,79 \times 10^7$  S/m, Molybdän eine von  $1,87 \times 10^7$  S/m. Die Zugabe von Nickel-Eisen zur Legierung verringert die Gesamtleitfähigkeit aufgrund der geringeren Leitfähigkeit, und der spezifische Widerstand steigt mit zunehmendem Nickel-Eisen-Gehalt.

#### 2. Auswirkungen von Zusammensetzung und Prozess auf die elektrischen Eigenschaften

- Das hohe Verhältnis der Wolfram- zur Molybdän-Hartphase trägt zur Aufrechterhaltung einer hohen elektrischen Leitfähigkeit bei.
- Je höher die Sinterdichte, desto geringer der spezifische Widerstand.
- Wärmebehandlung und Korngröße beeinflussen die Migrationswege und Streuung der Elektronen, was wiederum den spezifischen Widerstand beeinflusst.

#### 3. Typische elektrische Leistungsindikatoren:

Der spezifische Widerstand einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung liegt im Allgemeinen im Bereich von 20 bis 80  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , und der genaue Wert hängt vom Zusammensetzungsverhältnis und den Prozessbedingungen ab.

### 2. Magnetische Reaktionsleistung

#### 1. Metalle

verleihen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen eine gewisse magnetische

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reaktion. Wolfram und Molybdän tragen als paramagnetische Elemente wenig zu den gesamten magnetischen Eigenschaften bei.

## 2. Kontrolle der magnetischen Eigenschaften

- Durch die Anpassung des Nickel-Eisen-Gehalts und -Verhältnisses können die magnetische Permeabilität und Koerzitivfeldstärke der Legierung gesteuert werden.
- Die Mikrostruktur und Korngröße der Legierung beeinflussen die magnetische Domänenstruktur und damit die magnetische Reaktion.
- Durch die Wärmebehandlung wird der innere Spannungszustand verändert und auch die magnetischen Eigenschaften beeinflusst.

## 3. Typische Anwendungen für magnetische Leistung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig in magnetischen Abschirmmaterialien, Komponenten mit hoher magnetischer Permeabilität und elektronischen Komponenten verwendet, um den Anforderungen spezieller Magnetfeldumgebungen gerecht zu werden.

## 3. Strahlungsbeständigkeit

### 1. Die Strahlungsumgebung beeinflusst

die Kernenergie, die Luft- und Raumfahrt sowie die Hochenergiephysik. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind häufig hochintensiver Strahlung (wie Neutronen und Gammastrahlen) ausgesetzt und müssen daher eine gute Strahlungstoleranz aufweisen.

### 2. Auswirkungen von Strahlung auf Materialien

- Die Entstehung und Ansammlung von Strukturdefekten kann zur Versprödung des Materials führen.
- Gitterverzerrungen führen zur Verschlechterung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften.
- Durch Strahlung verursachte chemische Veränderungen können die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigen.

### 3. Strahlungsresistenzmechanismus einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

- Die hohen Schmelzpunkte und dichten Gitterstrukturen von Wolfram und Molybdän tragen dazu bei, die Ausbreitung von Strahlungsdefekten zu unterdrücken.
- Die Duktilität der Nickel-Eisen-Bindephase mildert das strahlungsinduzierte Mikrorisswachstum.
- Das Legierungsdesign verbessert die Strahlungsbeständigkeit durch Optimierung der Mikrostruktur.

### 4. Maßnahmen zur Verbesserung der Strahlenresistenz

- Feinsteuerung der Legierungszusammensetzung und Kornstruktur.
- Verwenden Sie Nanoverstärkung und ein Design mit zusammengesetzter Phasenstruktur.
- Führen Sie vor der Bestrahlung eine entsprechende Wärmebehandlung und Stabilisierungsbehandlung durch.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Umfassender Leistungsausblick

Die Kombination aus elektrischen Eigenschaften, magnetischer Reaktion und Strahlungsresistenz von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen macht sie zu idealen Funktionswerkstoffen für extreme Umgebungen. Zukünftige Fortschritte in der Legierungsentwicklung und -verarbeitung werden ihre Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit weiter verbessern und ihre Anwendung in einem breiteren Spektrum von Bereichen vorantreiben.

#### V. Zusammenfassung

Die elektrischen Eigenschaften, die magnetische Reaktion und die Strahlungsresistenz von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen bilden zusammen ihren Kernvorteil in Hightech-Anwendungen. Ein tiefes Verständnis dieser Eigenschaften und ihrer Regulierungsmechanismen ist entscheidend für Durchbrüche und Innovationen in der Materialleistung.

#### 3.6 Analyse der Korrosionsbeständigkeit und chemischen Stabilität der W-Mo-Ni-Fe-Legierung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen müssen aufgrund ihrer Einsatzanforderungen in extremen Umgebungen eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und chemische Stabilität aufweisen. In diesem Abschnitt werden der Korrosionsmechanismus, die Einflussfaktoren und technische Maßnahmen zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit detailliert beschrieben.

#### 1. Grundlegende Eigenschaften der Korrosionsbeständigkeit

##### 1. Korrosionsarten:

Bei Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen können in der Praxis verschiedene Korrosionsarten auftreten, darunter Flächenkorrosion, Lochkorrosion, Spaltkorrosion und Spannungskorrosion.

- Die Ursache für die gleichmäßige Korrosion sind vor allem chemische Reaktionen in Säure- und Laugenlösungen.
- Lochfraß und Spaltkorrosion treten häufig in mikroskopischen Defekten auf der Legierungsoberfläche oder in Schweißbereichen auf.
- Spannungsrisskorrosion hängt eng mit dem Spannungszustand des Materials und Umweltfaktoren zusammen.

##### 2. Die Legierung

weist eine ausgezeichnete chemische Inertheit auf und ist daher besonders stabil in oxidierenden und sauren Umgebungen mit hohen Temperaturen. Die Nickel-Eisen-Bindephase ist anfällig für Angriffe durch korrosive Medien und daher ein korrosionsempfindlicher Bereich.

#### 2. Schlüsselfaktoren, die die Korrosionsbeständigkeit beeinflussen

##### 1. Zutatenverhältnis

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Je höher der Wolfram- und Molybdängehalt, desto stärker ist die Korrosionsbeständigkeit der Legierung.
- Ein zu hohes Nickel-Eisen-Verhältnis kann die allgemeine Korrosionsbeständigkeit verringern.

#### 2. Mikrostruktur und Dichte

- Die dichte und gleichmäßige Mikrostruktur hilft, das Eindringen korrosiver Medien zu blockieren.
- Poren, Risse und Einschlüsse werden zu Ausgangspunkten für Korrosion.

#### 3. Oberflächenzustand

- Eine hohe Oberflächenrauheit kann leicht zu lokaler Korrosion führen.
- Der Oberflächenoxidfilm und die Passivierungsschicht können das Substrat wirksam schützen.

#### 4. Umweltfaktoren

- Saure, alkalische oder salzhaltige Umgebungen beschleunigen den Korrosionsprozess.
- Erhöhte Temperaturen erhöhen im Allgemeinen die Korrosionsrate.

### 3. Korrosionsbeständigkeitsmechanismus

#### 1. Die Schutzwirkung von Wolfram- und Molybdänkomponenten:

Wolfram und Molybdän können auf der Oberfläche einen dichten und stabilen Oxidfilm bilden, der das Eindringen von Sauerstoff und korrosiven Medien in das Innere des Metalls verhindert und die chemische Stabilität erhöht.

#### 2. Korrosionsempfindlichkeit der Nickel-Eisen-Phase

Als Bindungsphase ist Nickel-Eisen anfälliger für elektrochemische Korrosion als Wolfram und Molybdän. Lokale Korrosion kann zur Verschlechterung der Materialeigenschaften führen.

#### 3. Passivierungs- und Regenerationsfähigkeit

Der auf der Legierungsoberfläche gebildete Passivfilm hat eine selbstreparierende Funktion, die dazu beiträgt, die Ausbreitung von Korrosion zu verhindern.

### 4. Technische Maßnahmen zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit

#### 1. Optimierung der Materialzusammensetzung

- Erhöhen Sie den Wolfram- und Molybdängehalt und reduzieren Sie das Nickel-Eisen-Verhältnis.
- Spuren korrosionsbeständiger Elemente (wie Chrom und Titan) werden hinzugefügt, um die Stabilität des Schutzfilms zu verbessern.

#### 2. Wärmebehandlung und Oberflächenmodifizierung

- Verbessern Sie Dichte und Gleichmäßigkeit durch entsprechende Wärmebehandlung.
- Die Oberfläche wird mit korrosionsbeständigen Beschichtungen, wie Keramikbeschichtungen und PVD-Beschichtungen, besprüht.
- Durch die Oberflächenpassivierung entsteht ein stabiler Oxidfilm.

#### 3. Strukturelles Design und Verbesserung des Herstellungsprozesses

- Reduzieren Sie innere Defekte und Porosität von Materialien.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Kontrollieren Sie Schweiß- und Verbindungsprozesse, um lokale Korrosion zu verhindern.

### 5. Passende Anwendungsumgebung und Korrosionsbeständigkeit

Aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit eignet sich die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung für den Einsatz in Kernenergie, chemischen Anlagen und korrosiven Hochtemperaturatmosphären. Um jedoch die beste Lebensdauer und Leistung zu erzielen, sollten die Materialzusammensetzung und die Schutzmaßnahmen entsprechend den spezifischen Arbeitsbedingungen angemessen ausgewählt werden.

### VI. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weisen dank der chemischen Stabilität von Wolfram und Molybdän sowie einer rationalen Materialentwicklung eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit auf. Angesichts der Umweltschwankungen ist die Kombination von Wärmebehandlung und Oberflächentechnik ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der chemischen Stabilität und Verlängerung der Lebensdauer.

#### 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

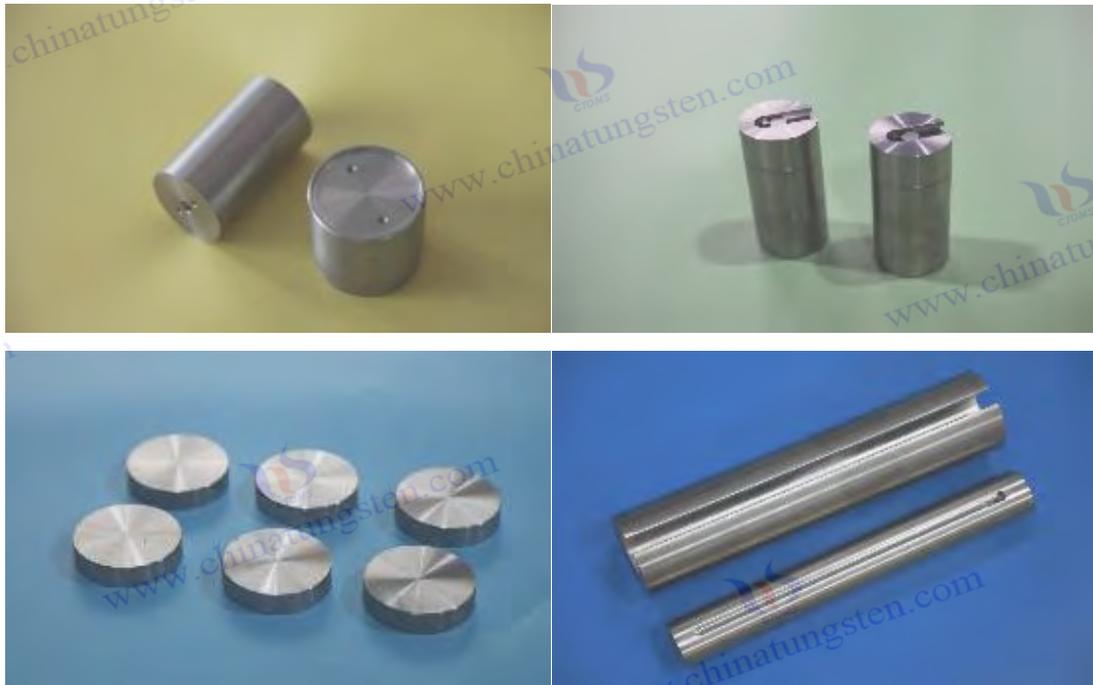
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 Herstellungs- und Verarbeitungstechnologie von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 4.1 Rohstoffvorbereitung und Pulvereigenschaften der W-Mo-Ni-Fe-Legierung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind eine typische Klasse pulvermetallurgischer Hochleistungswerkstoffe. Ihre Herstellung beginnt mit der Auswahl hochwertiger Rohstoffe und einem wissenschaftlich fundierten Pulververarbeitungsprozess. Dieser Abschnitt behandelt systematisch die Zusammensetzung der Rohstoffe, die Kontrolle der Pulvereigenschaften und deren Einfluss auf die Weiterverarbeitung und liefert die theoretische Grundlage für die Optimierung der Legierungseigenschaften.

#### 1. Zusammensetzung und Anforderungen der Rohstoffe

##### 1. Hauptmetallelemente

- **Wolframpulver (W)** : Es ist die Hauptverfestigungsphase der Legierung. Üblicherweise wird hochreines ( $\geq 99,9\%$ ) grauschwarzes Wolframpulver verwendet. Die Partikelmorphologie kann kugelförmig, dendritisch oder schwammförmig sein, was sich auf das Press- und Sinterverhalten auswirkt.
- **Molybdänpulver (Mo)** : Zur Verbesserung der Hochtemperaturleistung und Korrosionsbeständigkeit wird im Allgemeinen hochreines zerstäubtes Molybdänpulver oder im Reduktionsverfahren hergestelltes Molybdänpulver verwendet.
- **Nickelpulver (Ni)** : Als Bindephasenmetall trägt es zur Verbesserung der Plastizität und Duktilität bei. Reduziertes Nickelpulver oder elektrolytisches Nickelpulver wird häufig verwendet und weist eine gute Dispergierbarkeit auf.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Eisenpulver (Fe)** : Verbessert die Gesamtfestigkeit und Zähigkeit der Legierung. Es handelt sich im Allgemeinen um ein hochreines Eisenpulver, das durch Zerstäubung oder elektrolytische Reduktion hergestellt wird.
- 2. **Anforderungen zur Kontrolle von Verunreinigungen**
  - Verunreinigungselemente wie Schwefel (S), Phosphor (P), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Wasserstoff (H) usw. beeinträchtigen die Sinterdichte und die mechanischen Eigenschaften der Legierung erheblich. Daher muss jedes Metallpulver strenge metallurgische oder elektronische Grenzwerte für Verunreinigungen erfüllen.

## 2. Analyse der Pulverkennparameter

### 1. Partikelgrößenverteilung

- Die Pulverpartikelgröße wird im Allgemeinen zwischen 0,5 und 20  $\mu\text{m}$  kontrolliert. Obwohl feine Partikel die Verdichtung fördern, weisen sie eine schlechte Fließfähigkeit und einen hohen Sauerstoffgehalt auf; während grobe Partikel die Verdichtung und Formgebung nicht fördern.
- Um Fließfähigkeit und Gleichmäßigkeit zu gewährleisten, wird zur Optimierung häufig **eine mehrstufige, abgestufte Dosiertechnik** eingesetzt.

### 2. Morphologische Merkmale

- Sphärische Pulver weisen gute Fließ- und Verdichtungseigenschaften auf und eignen sich daher für das isostatische Pressen und die additive Fertigung.
- Unregelmäßige Pulver (z. B. schwammartige) neigen zur mechanischen Verzahnung und eignen sich zum Formen, allerdings ist die Sinterschrumpfung schwer zu kontrollieren.

### 3. Oberflächeneigenschaften

- Pulverparameter wie spezifische Oberfläche, Dicke des Oberflächenoxidfilms und Benetzbarkeit haben einen wichtigen Einfluss auf die Sinterbindung und Mikrostruktur.
- Oberflächenaktive Zusätze oder Vorbehandlungen (z. B. Passivierung, Reduktionsvorkalzinerung) können die Pulverreaktivität optimieren.

## 3. Pulvermisch- und Vorbehandlungsprozess

### 1. Hybride Methoden

- Normalerweise werden **Kugelmühlen, V-Mischer, Doppelkegel-Rührmischer** und andere Methoden zum gleichmäßigen Mischen verwendet, um eine gleichmäßige Verteilung verschiedener Metallpulver zu gewährleisten und eine Entmischung zu verhindern.
- Um den Presseffekt zu verbessern und den Formverschleiß zu verringern, können während des Mischvorgangs **Schmiermittel (wie Zinkstearat und Paraffin) hinzugefügt werden**.

### 2. Vorlegierungstechnologie

- Um die Gleichmäßigkeit und Sinteraktivität der Legierung zu verbessern, verwenden einige Technologien **mechanisches Legieren** oder **gemeinsames Abscheiden**, um vorlegiertes Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Pulver vorzufertigen und so die Fähigkeit zur Grenzflächenbindung zu verbessern.

### 3. Entgasung und Trocknung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **im Vakuum getrocknet oder in einer inerten Atmosphäre entgast**, um Feuchtigkeit und adsorbierte Gase zu entfernen und so die Bildung von Poren oder die Ausfällung von Einschlüssen während des späteren Sinterns zu verhindern.

#### 4. Einfluss der Rohstoffqualität auf die Legierungseigenschaften

##### 1. Beeinflusst Dichte und Sinterschrumpfung

- Je feiner die Pulverpartikelgröße und je gleichmäßiger die Verteilung, desto besser ist die Bildung eines dichten Sinterkörpers möglich.
- Je höher der Verunreinigungsgehalt, desto leichter kann es zur Bildung einer zweiten Phase oder von Ausscheidungen an den Korngrenzen kommen, wodurch die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigt werden.

##### 2. Beeinflusst die mikrostrukturelle Stabilität

- Die Pulvermorphologie und die spezifische Oberfläche haben einen wichtigen Einfluss auf die Diffusionsrate der Grenzfläche und die Migrationsfähigkeit der Komponenten und bestimmen den Entwicklungsverlauf der Mikrostruktur während des Sinterprozesses.

##### 3. Beeinflusst die Produktkonsistenz und Chargenstabilität

- Instabile Rohstoffe führen zu Leistungsschwankungen von Charge zu Charge, wodurch es schwierig wird, die für High-End-Anwendungen erforderliche Produktkonsistenz und -zuverlässigkeit zu erreichen.

#### V. Zusammenfassung

Hochwertige Wolfram-, Molybdän-, Nickel- und Eisenrohstoffe sind unerlässlich, um die gewünschten Leistungsziele für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu erreichen. Durch Optimierung der Pulverpartikelgrößenverteilung, Kontrolle des Verunreinigungsgrads sowie verbesserte Misch- und Vorbehandlungsprozesse können wir die Formdichte, die Sintergleichmäßigkeit und die Endanwendungsleistung effektiv verbessern. Sorgfältiges Rohstoffmanagement ist ein entscheidender Schritt im gesamten Legierungsherstellungsprozess.

#### 4.2 Pulvermetallurgische Press- und Umformtechnologie von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts, ihrer hohen Dichte und ihrer komplexen Mehrelementzusammensetzung typischerweise pulvermetallurgisch hergestellt. Pressen und Formen sind wichtige Schritte, die die Formgenauigkeit, Dichte und mechanischen Eigenschaften des fertigen Materials beeinflussen. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf gängige Pulverpressverfahren, darunter Formpressen, kaltisostatisches Pressen (CIP), heißisostatisches Pressen (HIP) und neuartige Umformtechnologien. Dabei werden deren Prinzipien, wichtige Prozesspunkte und Anwendungsbereiche analysiert.

#### 1. Uniaxiales Matrizenpressen

##### 1. Das Grundprinzip des

Formpressens besteht darin, loses Pulver mithilfe einer starren Form durch ein- oder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zweiachsigen Druck zu einem „Grünkörper“ mit bestimmter Form und Festigkeit zu verdichten. Dieses Verfahren eignet sich für Produkte mit regelmäßiger Form und kleiner bis mittlerer Größe.

## 2. Hauptmerkmale

- Das Verfahren ist einfach, effizient und für die Massenproduktion geeignet.
- Entlang der Pressrichtung besteht ein Gradient der Gründichte, wobei die Dichte im mittleren Bereich relativ gering ist.
- Es kommt leicht zu Rissbildung oder Delamination und die Pulverfüll- und Pressgeschwindigkeit muss präzise gesteuert werden.

## 3. Kernpunkte der Prozesskontrolle

- Gestalten Sie die Formstruktur und den Entformungswinkel sinnvoll, um Risse nach dem Pressen zu vermeiden.
- Schmiermittel werden verwendet, um die Reibung der Form zu verringern und die Gleichmäßigkeit der Dichte zu verbessern.
- Der optimale Verdichtungsdruck liegt üblicherweise zwischen 150 und 600 MPa, abhängig von der Fließfähigkeit des Pulvers und der Zielgröße.

## 2. Kaltisostatisches Pressen (CIP)

### 1. Grundprinzip:

CIP verwendet ein flüssiges Medium (wie Öl oder Wasser), um isotropen Druck auf das Pulver in der Gummi-Form auszuüben, wodurch ein hochdichter und isotrop gleichmäßiger Presseffekt erzielt wird.

### 2. Vorteile

- Die Dichte des Kompakts ist gleichmäßig und es gibt fast keinen Richtungsunterschied.
- Es können Teile mit komplexen Formen oder großen Abmessungen hergestellt werden.
- Es eignet sich zur Herstellung von Strukturteilen, die nach dem Sintern anschließend spanend bearbeitet werden.

### 3. Schlüsselparameter

- Der üblicherweise verwendete Druckbereich liegt zwischen 100 und 400 MPa.
- Die Presszeit beträgt in der Regel 1 bis 5 Minuten, abhängig vom Formvolumen und der Pulverart.
- Die Gründichte kann 65 % bis 75 % der theoretischen Dichte erreichen.

### 4. Prozessüberlegungen

- Das Formdesign muss eine gute Druckbeständigkeit und Dichtleistung aufweisen.
- Lufteinschlüsse oder Pulverschichtungen sollten während des Pressvorgangs vermieden werden.

## 3. Heißisostatisches Pressen (HIP)

### 1. Technisches Prinzip:

HIP ist ein isotropes Pressverfahren, das bei hohen Temperaturen (1000 bis 1400 °C) und hohem Druck (100 bis 200 MPa) durchgeführt wird. Das Pulver wird durch Heißpressen festphasengesintert und verdichtet.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Prozessvorteile

- Es können Produkte mit einer Dichte nahe der theoretischen Dichte (>98 %) erhalten werden.
- Reduzieren Sie die Restporosität und verbessern Sie die Hochtemperaturfestigkeit und Bruchzähigkeit.
- Geeignet für die Präzisionsfertigung von Hochleistungsstrukturteilen, Nuklearkomponenten und Luftfahrtkomponenten.

## 3. Nachteile und Herausforderungen

- Die Kosten sind hoch und die Ausrüstungsinvestitionen sind groß.
- Die Anforderungen an die Form sind sehr streng und es werden häufig versiegelte Behälter aus Glas, Stahl oder Graphit verwendet.

## 4. Pulverspritzguss (PIM)

### 1. Technische Einführung:

PIM ist eine Near-Net-Shape-Formtechnologie, die sich für kleine Teile mit komplexen Formen eignet. Wolfram-, Molybdän-, Nickel- und Eisenpulver werden mit thermoplastischen Bindemitteln vermischt und durch eine Spritzgussmaschine in die Formhöhle gespritzt, um die Teile zu formen.

### 2. Geltungsbereich

- Elektronische Komponenten, winzige Strukturteile, Teile für medizinische Geräte usw.
- Geeignet für eine hocheffiziente, massenautomatisierte Produktion.

### 3. Kritische Kontrollpunkte

- Der Klebstoff muss langsam und gleichmäßig entfernt werden, um Risse zu vermeiden.
- Die Injektionsparameter (Temperatur, Druck) müssen den rheologischen Eigenschaften des Pulvers entsprechen.

## 5. Neue Formgebungstechnologien wie Gießguss und 3D-Druck

### 1. Gelgießen

wird eine Lösung mit einem Pulver zu einem gelartigen Brei vermischt, der dann in eine Form gespritzt und verfestigt wird. Dieser Brei wird anschließend getrocknet und gesintert, um eine dichte Struktur zu erzeugen. Zu den Vorteilen gehört die Möglichkeit, komplexe Formen mit minimalen Schrumpfungshohlräumen herzustellen.

### 2. Mittels additiver Fertigung (3D-Druck),

darunter selektives Lasersintern (SLS) und Metallspritzgießen (MJM), können komplexe Teile direkt und ohne Formen hergestellt werden. Allerdings müssen die Probleme der hohen Dichte und der Schnittstellenbindung noch gelöst werden.

## VI. Zusammenfassung

Die Umformungstechnologie für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen hat sich vom traditionellen Gesenkpresen zu einer Vielzahl von Verfahren entwickelt, darunter hochgleichmäßiges CIP-Verfahren, verdichtendes HIP-Verfahren und endkonturnahes Spritzgießen. Die Wahl des Umformungsverfahrens erfordert eine umfassende Berücksichtigung von

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Produktgröße, Leistungsanforderungen, Kosten und Prozessanpassungsfähigkeit. Die Umformungsqualität wirkt sich direkt auf die Gesamtleistung der Legierung beim anschließenden Sintern, der Wärmebehandlung und der Anwendung aus.

### 4.3 Sinterprozess und Verdichtungskontrolle der W-Mo-Ni-Fe-Legierung

Das Sintern ist ein zentraler Schritt bei der pulvermetallurgischen Herstellung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. Seine Qualität bestimmt direkt die Dichte, die mechanischen Eigenschaften, die Mikrostruktur und die Lebensdauer der Legierung. Wolfram und Molybdän haben als Refraktärmetalle hohe Sintertemperaturen und langsame Diffusionsraten, während Nickel und Eisen als Flüssigphasen-Sinter- und Bindephasen fungieren. Dieser Abschnitt erläutert systematisch den Sintermechanismus, die wichtigsten Prozessparameter und Verdichtungsstrategien für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und untersucht die Mikrostrukturentwicklung und die Eigenschaftssteuerung unter verschiedenen Atmosphären.

#### 1. Sintermechanismus einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram und Molybdän werden aufgrund ihrer hohen Schmelzpunkte (3410 °C bzw. 2620 °C) hauptsächlich durch **Festphasendiffusion gesintert**. Nickel und Eisen hingegen haben niedrigere Schmelzpunkte und können, insbesondere in einem bestimmten Anteil, eine flüssige Phase bilden, die die Benetzung, Diffusion und Neuordnung der Pulvergrenzfläche fördert und so zum Flüssigphasensintern (LPS) führt. Der gesamte

**Sinterprozess** lässt sich grob in folgende Schritte unterteilen:

##### 1. Vorbrennphase (500~900°C)

- Entfernen Sie Schmiermittel, Bindemittel, Feuchtigkeit und adsorbierte Gase aus Pulvern.
- Der anfängliche Sinterhals ist gebildet und es sind noch Poren vorhanden.

##### 2. Festphasendiffusionsstufe (1000~1300°C)

- Zwischen den Wolfram- und Molybdänpulverpartikeln kommt es zunächst zu einem Sinterhalswachstum, wobei die Dichte langsam zunimmt.
- In dieser Phase beginnt sich die Organisationsstruktur zu stabilisieren.

##### 3. Flüssigphasenunterstützte Sinterphase (1300–1500 °C)

- Nিকে Eisen beginnt lokal zu schmelzen und bildet eine flüssige Phase, die die Poren füllt und die Dichte erhöht.
- Die flüssige Phase unterstützt die Neuordnung der Partikel, fördert die Elementdiffusion und senkt die Sintertemperatur.

##### 4. Homogenisierungsstufe (Hochtemperaturisolierung)

- Elemente diffundieren weiter, das Gewebe wird homogenisiert und die Poren schrumpfen oder schließen sich weiter.

#### 2. Kontrolle der Sinteratmosphäre

Die Sinteratmosphäre hat einen entscheidenden Einfluss auf intermetallische Reaktionen, Redoxverhalten und Verunreinigungsbildung. Gängige Atmosphären sind:

##### 1. Wasserstoffatmosphäre (H<sub>2</sub>)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Stark reduzierende Eigenschaft, hilft, Oxide auf der Pulveroberfläche zu entfernen.
- Es kann die Oxidation von Wolfram verhindern und die Sinterverdichtung erleichtern.
- Der Feuchtigkeitsgehalt muss streng kontrolliert werden ( $< -60\text{ °C}$  Taupunkt), um eine Reoxidation zu vermeiden.

### 2. Argon ( Ar ) oder Argon-Wasserstoff-Gemisch

- Inerte Schutzatmosphäre, geeignet für Wolfram-, Molybdän-, Nickel- und Eisen-Mehrphasensysteme.
- Je nach Materialzusammensetzung lässt sich das Gleichgewicht zwischen Reduzierung und Schutz anpassen.

### 3. Vakuumsintern

- Die Vermeidung jeglicher atmosphärischer Störungen trägt zur Bildung einer reinen Sintergrenzfläche bei.
- Geeignet für hochreine Wolfram- und Molybdänmaterialien, jedoch mit hohem Energieverbrauch und hohen Gerätekosten.

## 3. Kontrolle der Sinterparameter

### 1. Temperaturkontrolle

- Üblicher Sintertemperaturbereich:  $1350\text{ °C} - 1550\text{ °C}$ .
- Wenn flüssigphasenunterstütztes Sintern verwendet wird, kann die Temperatur entsprechend auf  $1250\text{ °C}$  bis  $1350\text{ °C}$  gesenkt werden.

### 2. Heizrate

- Zu schnelles Erhitzen führt zu einer dichten Oberfläche und geschlossenen inneren Poren, wodurch der Defekt „außen dicht und innen locker“ entsteht.
- Es empfiehlt sich, die Temperatur schrittweise zu erhöhen: stufenweise Temperaturregelung + Isolationsmaßnahmen.

### 3. Haltezeit

- In der Regel dauert es 1 bis 3 Stunden, abhängig von Werkstückgröße, Atmosphäre und Material.
- Fördert eine gleichmäßige Diffusion und mikrostrukturelle Stabilisierung.

### 4. Kühlmethode

- Um thermische Spannungen oder Risse durch plötzliche Temperaturabfälle zu vermeiden, wird üblicherweise eine kontrollierte Kühlung verwendet.

## 4. Strategie zur Kontrolle der Verdichtung

### 1. Optimieren Sie die Pulverpartikelgröße und die Gleichmäßigkeit der Mischung

- Verwenden Sie ein abgestuftes Pulvermischsystem, um die Schüttdichte zu erhöhen.
- Eine sinnvolle Kombination der Pulverpartikelgrößen kann die Sinterschrumpfung verringern und die Dichte verbessern.

### 2. Fügen Sie eine kleine Menge Sinterhilfe oder Flüssigphasenförderelement hinzu

- Durch Zugabe einer angemessenen Menge Ni-Fe kann das Flüssigphasensintern gefördert werden, eine übermäßige Zugabe sollte jedoch vermieden werden, um eine strukturelle Entmischung zu verhindern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Elemente wie Cr und Co können auch die Sinterbenetzbarkeit und die organisatorische Gleichmäßigkeit verbessern.
3. **Zweistufiges Sintern**
- Führen Sie zunächst einen Vorbrand bei niedriger Temperatur und einen Hauptbrand bei hoher Temperatur durch, um die Sintereffizienz und die Dichtekontrolle zu verbessern.
4. **Nachbearbeitung: Heißisostatisches Pressen (HIP)**
- Nach dem Sintern werden mittels HIP die restlichen Poren weiter entfernt, wodurch Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsprodukte mit einer Dichte nahe der theoretischen Dichte (>99,5 %) erzielt werden können.

## 5. Merkmale der mikrostrukturellen Entwicklung

- Während des Flüssigphasensinterprozesses neigen Wolfram- und Molybdänkörner zur Umlagerung und Rekristallisation, und das Kornwachstum muss kontrolliert werden.
- Die Nickel-Eisen-Phase dringt zwischen die Wolfram-Molybdän-Partikel ein und bildet eine gute Verbindungsschnittstelle.
- Wenn die Temperatur nicht richtig kontrolliert wird, können Defekte wie poröse Strukturen, Schichtung und Elementtrennung auftreten.

## VI. Zusammenfassung

Der Sinterprozess ist ein entscheidender Faktor für Dichte, Festigkeit und strukturelle Gleichmäßigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. Durch gezielte Steuerung von Sintertemperatur, Atmosphäre, Isolationsverhältnissen und Flüssigphasen-Sintermechanismus können Diffusionsbindung und Verdichtung im Material effektiv gefördert und die synergistischen Verstärkungseffekte der einzelnen Komponenten maximiert werden. In Kombination mit anschließendem heißisostatischem Pressen oder einer Oberflächenwärmebehandlung können die Hochtemperaturstabilität und Lebensdauer des Materials weiter verbessert werden.

### 4.4 Wärmebehandlung und Mikrostrukturkontrolle der W-Mo-Ni-Fe-Legierung

Die Leistungsfähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen hängt nicht nur von ihrer Zusammensetzung und Sinterqualität ab, sondern auch vom anschließenden Wärmebehandlungsprozess. Ein geeigneter Wärmebehandlungsprozess kann die Kornstruktur optimieren, innere Spannungen eliminieren, eine gleichmäßige Elementdiffusion fördern und die Zwischenphasenbindung stärken, wodurch die mechanischen Eigenschaften und die Betriebsstabilität des Materials verbessert werden. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die verschiedenen Wärmebehandlungsverfahren, die Mechanismen der Mikrostrukturentwicklung und Strategien zur Mikrostrukturkontrolle für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit dem Ziel, einen systematischen Zusammenhang zwischen Wärmebehandlungsparametern und Materialeigenschaften herzustellen.

### 1. Grundlegender Zweck und Funktion der Wärmebehandlung

- Beseitigen Sie beim Sintern entstandene Restspannungen und Texturabweichungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Optimieren Sie die Korngröße und die Phasengrenzverteilung, um eine Kornvergrößerung zu verhindern.
- Stärkung der Grenzflächenbindung zwischen der festen Lösungsphase und der Bindungsphase;
- Förderung der weiteren Verbreitung von Legierungselementen und Verbesserung der organisatorischen Einheitlichkeit;
- Verbessern Sie Plastizität, Zähigkeit, Rissbeständigkeit und Ermüdungsbeständigkeit.

## 2. Gängige Wärmebehandlungstechnologien und ihre Prinzipien

### 1. Lösungsbehandlung

- **Anwendbarer Temperaturbereich** : im Allgemeinen 1100 °C bis 1350 °C;
- **Behandlungsprinzip** : Durch langfristige Wärmekonservierung bei hohen Temperaturen werden die Nickel- und Eisenelemente der Legierung vollständig im Wolfram-Molybdän-Skelett gelöst, was die Ausdehnung der Phasengrenzflächen-Übergangszone fördert .
- **Wirkung** : Verbessert die Materialzähigkeit, verbessert die Kontinuität und Gleichmäßigkeit der Bindungsphase und reduziert die Quelle der Mikrorissbildung.

### 2. Alterungsbehandlung

- **Anwendbarer Temperaturbereich** : 600 °C bis 900 °C;
- **Prinzip und Zweck** : Förderung der Ausfällung einiger übersättigter Festlösungs-elemente zur Bildung dispersionsverstärkender Phasen (wie Ni<sub>3</sub>Fe , FeMo usw.), wodurch die Streckgrenze und die Ermüdungsbeständigkeit der Legierung verbessert werden;
- **Hinweis** : Die Alterungszeit und -temperatur müssen kontrolliert werden, um zu verhindern, dass grobe Niederschläge die Zähigkeit zerstören.

### 3. Heißisostatisches Pressen (HIP)

- **Typische Parameter** : Temperatur 1200 °C – 1400 °C , Druck 100–200 MPa;
- **Funktion** : Die Verdichtung erfolgt gleichzeitig mit der Wärmebehandlung, um Poren und Mikrorisse weiter zu beseitigen.
- **Anwendungsbereich** : Hochwertige Teile aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, wie z. B. Komponenten für die Nuklearindustrie und Strukturteile für die Luft- und Raumfahrt .

### 4. Schnelles Glühen

- **Geeignet für dünne Platten und kleine Teile** , durch die Verwendung der Methode des schnellen Erhitzens und schnellen Abkühlens zur Stabilisierung der Struktur;
- **Vorteile** : Verhinderung der Kornvergrößerung, Erhaltung der Feinstruktur und Verbesserung der Festigkeit und Lebensdauer.

## 3. Mechanismus der Mikrostrukturentwicklung während der Wärmebehandlung

### 1. Veränderungen der Kornmorphologie

- Durch Wärmebehandlung kann die Rekristallisation der Körner gefördert und nicht gleichachsige Körner, die beim Sintern übrig geblieben sind, beseitigt werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Durch die Kontrolle der Wärmebehandlungstemperatur und -dauer können feine gleichachsige Kristalle gebildet werden, was zur Verbesserung der Gleichmäßigkeit und Rissbeständigkeit beiträgt.
- 2. **Grenzflächenverstärkende Wirkung**
  - Während des Wärmebehandlungsprozesses diffundieren Nickel- und Eisenelemente an die Schnittstelle zwischen Wolfram- und Molybdänpartikeln, bilden eine Übergangsschicht mit hoher Bindungsenergie und verbessern die Bindungsstärke der Schnittstelle.
- 3. **Regelung des Trennungsverhaltens**
  - Bei der Alterungsbehandlung trägt die Ausfällung feiner intermetallischer Verbindungen dazu bei, Versetzungen zu fixieren und die Materialfestigkeit zu verbessern.
  - Wenn die ausgefällte Phase zu groß oder ungleichmäßig verteilt ist, kann es leicht zu Sprödbruch kommen.
- 4. **Restspannungsabbau**
  - Durch die Wärmebehandlung können durch Sintern, Pressen oder Bearbeiten entstandene innere Spannungen abgebaut und eine Rissausbreitung bei der späteren Verwendung verhindert werden.

#### 4. Strategie zur Regulierung der Mikrostruktur

1. **Mehrstufiges Wärmebehandlungssystemdesign**
  - Beispielsweise kann die Kombination aus „Hochtemperaturlösung + Alterung bei mittlerer Temperatur“ sowohl die Plastizität als auch die Festigkeit berücksichtigen ;
  - „Vorbehandlung bei niedriger Temperatur + Homogenisierung bei hoher Temperatur“ trägt dazu bei, Elemente vollständig zu diffundieren und Korngrenzen zu reinigen.
2. **Kornverfeinerungsansatz**
  - Hinzufügen von feinkörnigen Verstärkungselementen (wie Re, Ta usw.) oder Kontrolle von Temperatur und Zeit, um das Rekristallisationswachstum zu hemmen;
  - Das Einfrieren von Gewebe wird durch lokales schnelles Abkühlen erreicht, wodurch Strukturen im Nano- oder Submikrometerbereich erhalten bleiben.
3. **Aufbau der Schnittstellenübergangsschicht**
  - Durch Anpassen der Wärmebehandlungsatmosphäre (beispielsweise durch das Enthalten von Spuren von C oder N) wird im Grenzflächenbereich eine stabile Interdiffusionsschicht erzeugt, um die Bindung zu verbessern.

#### 5. Wärmebehandlungsgeräte und Prozessparameterkontrolle

- **Gerätetyp** : hauptsächlich Vakuum-Wärmebehandlungsöfen, Wasserstoffschutzöfen, Atmosphärenkontrollkastenöfen, HIP-Gerät usw.
- **Prozesskontrollpunkte** :
  - Temperaturgleichmäßigkeit (Schwankung  $< \pm 5$  °C);
  - Heiz- und Kühlraten (um einen Thermoschock zu vermeiden);
  - Reinheit der Atmosphäre (z. B. Wasserstofftaupunkt  $< -60$  °C);
  - Haltezeit der Wärmebehandlung (muss je nach Dicke und Größe angepasst werden).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### **Fazit:**

Die Wärmebehandlung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ist mehr als ein einfacher Glüh- oder Härtingsprozess; sie beinhaltet einen mikrostrukturellen Optimierungsprozess, der Materialphysik, Thermodynamik und Phasendiagrammtheorie integriert. Die präzise Steuerung des Wärmebehandlungsverlaufs und der mikrostrukturellen Entwicklung maximiert das Potenzial der Legierung und erreicht eine einzigartige Kombination aus hoher Dichte, hoher Festigkeit und hoher Stabilität. Die Wärmebehandlungstechnologie entwickelt sich zudem hin zu intelligenten, kontrollierbaren und umweltfreundlichen Ansätzen.

### **4.5 Bearbeitung und Oberflächenbehandlung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen stellen aufgrund ihrer hohen Dichte, Härte, ihres hohen Schmelzpunkts und ihrer komplexen Mehrphasenstruktur zahlreiche Herausforderungen bei der Bearbeitung und Oberflächenbehandlung dar. Durch die Optimierung der Prozessparameter, die Auswahl geeigneter Geräte und Werkzeuge sowie den Einsatz fortschrittlicher Oberflächenbehandlungstechnologien lassen sich jedoch hochpräzise, hochwertige Bearbeitungen und verbesserte Funktionalität erzielen. Dieser Abschnitt erläutert systematisch wichtige technische Ansätze und Anwendungsstrategien, vom Schneiden und Schleifen bis hin zur Oberflächenhärtung und Beschichtung.

#### **1. Bearbeitungseigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen vereinen **den hohen Schmelzpunkt und die hohe Festigkeit von Wolfram und Molybdän mit der moderaten Plastizität und Bearbeitbarkeit der Nickel-Eisen-Bindungsphase** und weisen die folgenden Verarbeitungseigenschaften auf:

- **Hohe Härte und Sprödigkeit** : Wolfram- und Molybdänphasen führen zu einer hohen Schnittfestigkeit des Materials und neigen zu Kanteneinbrüchen und Rissen;
- **Geringe Wärmeleitfähigkeit** : Bei der Verarbeitung entsteht viel Wärme und das Werkzeug verschleißt schnell.
- **Das Phänomen des Werkzeugklebens ist offensichtlich** : Nicketeisen bleibt bei Hitzeeinwirkung leicht am Werkzeug haften, was die Qualität der bearbeiteten Oberfläche beeinträchtigt.
- **Gewebeheterogenität** : Die mehrphasige Mikrostruktur führt zu unterschiedlichen Verarbeitungsreaktionen und erfordert eine präzise Kontrolle .

#### **2. Bearbeitungsprozesspfad**

##### **1. Drehen**

- Geeignet für die Primär- und Feinbearbeitung von Stangen und Rohren;
- , **Hartmetallwerkzeuge (WC-Co-Serie)** zu verwenden , und die Beschichtung kann TiAlN , AlCrN usw. sein.

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

- Die Schnittparameter sollten eine mittlere **bis niedrige Geschwindigkeit** ( $V_c = 40\text{--}80\text{ m/min}$ ), **eine geringe Vorschubgeschwindigkeit und eine moderate Schnitttiefe sein**.
- Als Kühlmittel wird ein Kühlmittel auf Ölbasis oder ein Hochdruckkühlsystem empfohlen.

## 2. Fräsen

- Wird zum Bilden komplexer geometrischer Strukturen oder zur Konturverarbeitung verwendet;
- Die Anzahl der Werkzeugzähne und der Schnittweg müssen kontrolliert werden, um ein Einbrechen der Materialkanten zu vermeiden.
- Es wird empfohlen, einen Schaftfräser oder Rundfräser zu verwenden. Ein moderater Neigungswinkel kann die Stoßbelastung verringern.

## 3. Schleifen

- Es ist das am häufigsten verwendete **Hochveredelungsverfahren für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**;
- Es wird empfohlen, CBN- (kubisches Bornitrid) oder Diamantschleifscheiben zu verwenden;
- Durch Nass- und Feinschleifen kann die Oberflächengüte deutlich verbessert werden ( $R_a < 0,2\ \mu\text{m}$ );
- Es ist notwendig, thermische Risse und Verbrennungen zu vermeiden und die Temperatur und den Durchfluss der Schneidflüssigkeit zu kontrollieren.

## 4. Bohren, Gewindeschneiden und Nuten

- Der Vorgang ist schwierig, daher wird empfohlen, einen speziellen Bohrer mit Spanrillendesign zu verwenden.
- Beim Gewindeschneiden sollten Sie die Verwendung von Kaltformgewindebohrern in Erwägung ziehen, um Gewinderisse zu vermeiden.
- Bei dünnen Platten oder dünnwandigen Teilen sollten Stützvorrichtungen verwendet werden, um Vibrationen und Verformungen zu vermeiden.

## 3. Oberflächenbehandlungstechnologie und Anwendung

Um die Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit, Ermüdungsbeständigkeit und Funktionalität von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu verbessern, werden häufig die folgenden Oberflächenbehandlungsmethoden verwendet:

### 1. Oberflächenpolieren (mechanisches / elektrolytisches Polieren)

- Durch mechanisches Polieren können Bearbeitungsspuren entfernt und die Oberfläche verbessert werden.
- Elektrolytisches Polieren eignet sich für Präzisionsteile und kann Mikrorisse und Spannungskonzentrationen an der Oberfläche reduzieren.

### 2. Beiz- und Passivierungsbehandlung

- Verwenden Sie eine verdünnte Salpetersäure-/Flusssäuremischung, um die Oberfläche zu beizen und Zunder und Mikropartikel zu entfernen.
- Nachfolgende Passivierungsbehandlungen wie Chromatieren können zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit beitragen.

### 3. Oberflächenbeschichtung (PVD/CVD)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **PVD (Physical Vapor Deposition)** : wie TiN-, CrN- und TiAlN-Beschichtungen zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit und des Reibungsverhaltens;
- **CVD (Chemical Vapor Deposition)** : Bildet eine hochdichte und stark haftende Keramikfilmschicht.

#### 4. Laserbeschichtung und Ionenimplantation

- Mit einem Hochenergielaser wird das Beschichtungsmaterial geschmolzen, um eine metallurgische Verbindungsschicht mit dem Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Substrat zu bilden.
- Durch Ionenimplantation können die Oberflächenhärte, die elektrische Leitfähigkeit oder die Korrosionsbeständigkeit von Komponenten verbessert werden, die in extremen Umgebungen eingesetzt werden.

#### 5. Wärmebehandlung zur Oberflächenmodifizierung

- Durch lokale Wärmebehandlung (z. B. Induktionserwärmung) können die Härte und Dauerfestigkeit lokaler Bereiche verbessert werden.
- Die Plasma-Oberflächenmodifizierungstechnologie bietet die Vorteile geringer Verformung und geringer Verschmutzung und eignet sich für hochpräzise Komponenten.

#### 4. Bearbeitung von Fehlerarten und Kontrollmaßnahmen

Fehlertyp	Ursachenanalyse	Kontrollmaßnahmen
<b>Werkzeugabsplitterung</b>	Hohe Schnittkraft und übermäßiger Vorschub	Reduzieren Sie die Schnittgeschwindigkeit und verwenden Sie verschleißfeste Werkzeuge
<b>Oberflächenkratzer/Lochfraß</b>	Die Schneidflüssigkeit ist nicht sauber und die Schleifscheibe ist verstopft	Ersetzen Sie die Schleifscheibe und verstärken Sie das Filtersystem
<b>Thermische Risse und Verbrennungen</b>	Schleifwärmestau und unzureichende Kühlung	Verbesserte Kühlung und Nassschleifen
<b>Mikrorissausbreitung</b>	Mikrodefekte an der Grenzfläche mehrphasiger Strukturen	Wärmebehandlung zur Optimierung der Schnittstellenbindung und zum Hinzufügen von Mikrolegierungselementen
<b>Abblättern der Beschichtung</b>	Unzureichende Haftung oder unzureichende Oberflächenvorbereitung	Oberflächenvorbehandlung (Sandstrahlen, Beizen), Auswahl des geeigneten Beschichtungssystems

#### 5. Trends in der Digitalisierung und Automatisierung der Prozesstechnik

- Verwenden Sie ein **CNC-Bearbeitungszentrum** für eine hochpräzise Schnittpfadsteuerung.
- Verwenden Sie **Bearbeitungssimulationssoftware**, um Prozessparameter vorab zu bewerten und Defekte vorherzusagen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- In einigen High-End-Herstellungsprozessen werden **Industrieroboter und Echtzeit-Überwachungssysteme eingeführt, um die Stabilität und Konsistenz der Verarbeitung zu verbessern.**
- Richten Sie **einen Online-Überwachungsmechanismus für den Werkzeugverschleiß ein**, um eine geschlossene Rückkopplungskontrolle der Verarbeitungsqualität zu erreichen.

## VI. Zusammenfassung

Die hochpräzise Bearbeitung und Oberflächenbehandlung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen stellt zwar eine Herausforderung dar, doch durch die Kombination geeigneter Werkzeugauswahl, Prozessoptimierung und Oberflächenmodifizierung lassen sich Funktionsintegration, verbesserte Leistung und längere Lebensdauer erreichen. Mit der Weiterentwicklung der CNC-Technologie, der Oberflächentechnik und automatisierter Bearbeitungsverfahren werden die Bearbeitbarkeit und Anwendungsflexibilität von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weiter steigen und den Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen in der Kernenergie, der Luftfahrt und der Medizin gerecht werden.

### 4.6 Additive Fertigung und fortschrittliche Umformverfahren von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen (W-Mo-Ni-Fe) finden aufgrund ihrer hohen Dichte, ihres hohen Schmelzpunkts, ihrer hohen Festigkeit und ihrer hervorragenden Strahlungsbeständigkeit breite Anwendung in anspruchsvollen Bereichen wie der Nuklearindustrie, der Luft- und Raumfahrt, dem Militär und der Medizin. Traditionelle pulvermetallurgische Formgebungsverfahren wie Gießen, isostatisches Pressen und Sintern stoßen jedoch bei der Herstellung komplexer Strukturen oder hochpräziser Teile an ihre Grenzen. Mit dem Aufkommen der additiven Fertigung (AM) und fortschrittlicher Formgebungstechnologien werden die Herstellungsverfahren für W-Mo-Ni-Fe-Legierungen in Richtung höherer Effizienz, höherer Präzision und komplexerer Funktionen erweitert.

In diesem Abschnitt werden der Entwicklungsstand, die wichtigsten Prozesstechnologien, die Herausforderungen bei der Umformung und die zukünftigen Trends von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen im Bereich der additiven Fertigung systematisch erörtert.

#### 1. Machbarkeitsanalyse einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung für die additive Fertigung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulver weist die folgenden typischen Eigenschaften auf, die es für Anwendungen in der additiven Fertigung geeignet machen:

- Durch Zerstäubung können hochdichte sphärische Pulver hergestellt werden, die für die Laser-/Elektronenstrahl-Pulverbettfusion geeignet sind.
- Die Legierung weist eine gewisse Plastizität auf und kann nach dem Schmelzen eine kontinuierliche und dichte Struktur erhalten.
- Durch Wärmebehandlung können Geweberegulierung und Stressabbau erreicht werden;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Es eignet sich zur Herstellung komplexer Teile wie speziell geformter, hohler Teile und Teile mit Kühlstrukturen.

Es gibt jedoch Herausforderungen:

- Aufgrund der hohen Schmelzpunkte (W 3420°C, Mo 2620°C) ist ein sehr hoher Energieeinsatz erforderlich;
- Die Schmelzpunkte verschiedener Elemente variieren stark, was leicht zu Entmischungen und Mikrorissen führen kann.
- Spannungskonzentrationen während des Umformungsprozesses können Risse oder Löcher verursachen.

## 2. Additive Fertigungstechnologiepfad für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 1. Laser-Pulverbettfusion (LPBF)

- **Technische Punkte :**
  - Verwenden Sie einen Hochleistungslaser, um die Pulverschicht Punkt für Punkt zu schmelzen.
  - Der Scanpfad muss optimiert werden, um thermische Gradienten zu reduzieren.
- **Anwendbares Pulver :** 20–45 µm sphärisches W-Mo-Ni-Fe-Pulver, hergestellt durch Zerstäubung;
- **Umformungseigenschaften :** hohe Umformungsgenauigkeit ( $< \pm 50 \mu\text{m}$ ), geeignet zur Herstellung komplexer geometrischer Strukturen ;
- **Herausforderung :** Anfällig für Risse, Verformungen und Elementtrennung.

### 2. Elektronenstrahlschmelzen (EBM)

- **Technische Punkte :**
  - Pulverschmelzen mit einem Elektronenstrahl in einer Vakuumumgebung;
  - Die Vorwärmtemperatur kann 800 bis 1000 °C erreichen und ist für Legierungen mit hohem Schmelzpunkt geeignet.
- **Vorteile :** Reduziert thermische Belastung und geeignet für große Strukturen;
- **Anwendungsszenarien :** Wird zur Herstellung großer nuklearer Geräte und Strukturkomponenten für die Luft- und Raumfahrt verwendet .

### 3. Laserauftragschweißen und gerichtete Energieabscheidung (DED/LENS)

- **Prinzip :** Laserschmelzen unter Pulverzufuhr und schichtweiser Aufbau der Struktur;
- **Vorteile :** Geeignet für die Reparatur von Teilen und die Konstruktion funktional abgestufter Materialien (FGM);
- **Die Umformgeschwindigkeit ist hoch** , die Oberflächenrauheit ist jedoch relativ hoch und erfordert eine Nachbearbeitung.

### 4. Binder Jetting

- **Prinzip :** Das Pulver wird mit einem Bindemittel in Form gebracht und anschließend durch Sintern verdichtet.
- **Vorteile :** hohe Geschwindigkeit, geringer Energieverbrauch, geeignet für die Serienproduktion komplexer Teile;
- **Herausforderung :** Große Sinterschrumpfung und hohe Anforderungen an die Maßgenauigkeit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Fortschrittliche Umformverfahren als Ergänzung zu technischen Wegen

#### 1. Heißisostatisches Pressen (HIP)

- **Kombiniert mit additiver Fertigung :**
  - Verdichtung additiv geformter Teile;
  - Besonders geeignet für Bauteile mit Mikroporen, Rissen und großen Eigenspannungen;
- **Typische Parameter :** Temperatur 1300–1500 °C, Druck 100–200 MPa, Haltezeit 2–4 Stunden.

#### 2. Mikrostretch- und Mikroprägetechnik ( Mikroformung )

- Wird zur Herstellung von W-Mo-Ni-Fe-Dünnpplattenteilen oder Mikrokomponenten mit Strukturen im Mikrometerbereich verwendet;
- Die Kombination von Laserschneiden mit Mikrobearbeitungssteuerung ermöglicht die Miniaturisierung hochpräziser Komponenten.

#### 3. Funktional gradierte Werkstoffe (FGM) und Multi-Material Integrated Forming

- Durch Methoden wie DED kann ein Gradientendesign des Wolfram- und Molybdängehalts in verschiedenen Bereichen der Struktur erreicht werden.
- Es kann die lokale Hitzebeständigkeit/Strahlungsbeständigkeit von Teilen verbessern und das Gesamtgewicht reduzieren.

### 4. Strategie zur Prozessoptimierung und Materialeistungskontrolle

#### 1. Kontrolle der Pulverpartikelgröße und Fließfähigkeit

- Verwenden Sie Gaszerstäubungs- oder Plasma-Sphäroidisierungstechnologie, um Pulver mit hoher Sphärizität herzustellen.
- Kontrollieren Sie den Sauerstoffgehalt (<300 ppm), um die Sinterausdehnung und das Rissrisiko zu verringern.

#### 2. Optimierung des Energieeinsatzes und der Scanstrategie

- Steuern Sie Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Überlappungsrate präzise, um lokales Sintern oder Reißen zu verhindern.
- Durch Schichtstrategie und Wärmefeldsteuerung können Restspannungen reduziert werden.

#### 3. Nachbearbeitungs- und Wärmebehandlungsverknüpfung

- Nach der Formgebung müssen innere Defekte durch Glühen, Altern oder HIP beseitigt werden.
- Eine Behandlung zur Rehomogenisierung der Mikrostruktur trägt zur Verbesserung der mechanischen Gesamteigenschaften bei.

#### 4. Multiskalensimulation und Qualitätskontrolle

- Wenden Sie eine Finite-Elemente-Simulation an, um Schmelzbadströmung, Spannungsverteilung und Abkühlungsverhalten vorherzusagen.
- Die Bewertung der strukturellen Zuverlässigkeit erfolgt mithilfe von Technologien wie CT-Scans und zerstörungsfreier Ultraschallprüfung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## V. Anwendungserkundung und zukünftige Entwicklungstrends

- **Kernkraftbereich** : Herstellung komplexer Neutronenabsorptionsstrukturen und poröser Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Funktionskomponenten ;
- **Schutz für die Luft- und Raumfahrt** : leichte, hochsichere Komponenten (wie etwa die Schwungrad-Unwuchtstruktur von Satelliten);
- **Militärische Hochenergiegewaffen** : speziell geformte panzerbrechende Kerne, Trägheitsgeräte für Sucher ;
- **Multimaterialintegration** : Integrieren Sie Titanlegierungen, Aluminiumlegierungen, Keramik und andere Materialien, um multifunktionale Strukturkomponenten zu konstruieren.
- **Grüne Fertigung** : Reduzieren Sie Materialabfälle bei der additiven Fertigung und fördern Sie die Entwicklung nachhaltiger Fertigungssysteme.

## VI. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weisen ein erhebliches technologisches Potenzial und Anwendungsaussichten in der additiven Fertigung und der modernen Umformung auf. Zwar sind sie noch mit Prozessherausforderungen wie hohen Schmelzpunkten, Mehrelementeigerung und Umformfehlern konfrontiert, doch kontinuierliche Fortschritte in der Anlagentechnik, im Materialdesign und in der numerischen Simulation werden die Herstellung komplexer Strukturen verbessern und ihre breite Anwendung in extremen Umgebungen und der High-End-Fertigung vorantreiben.

### 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

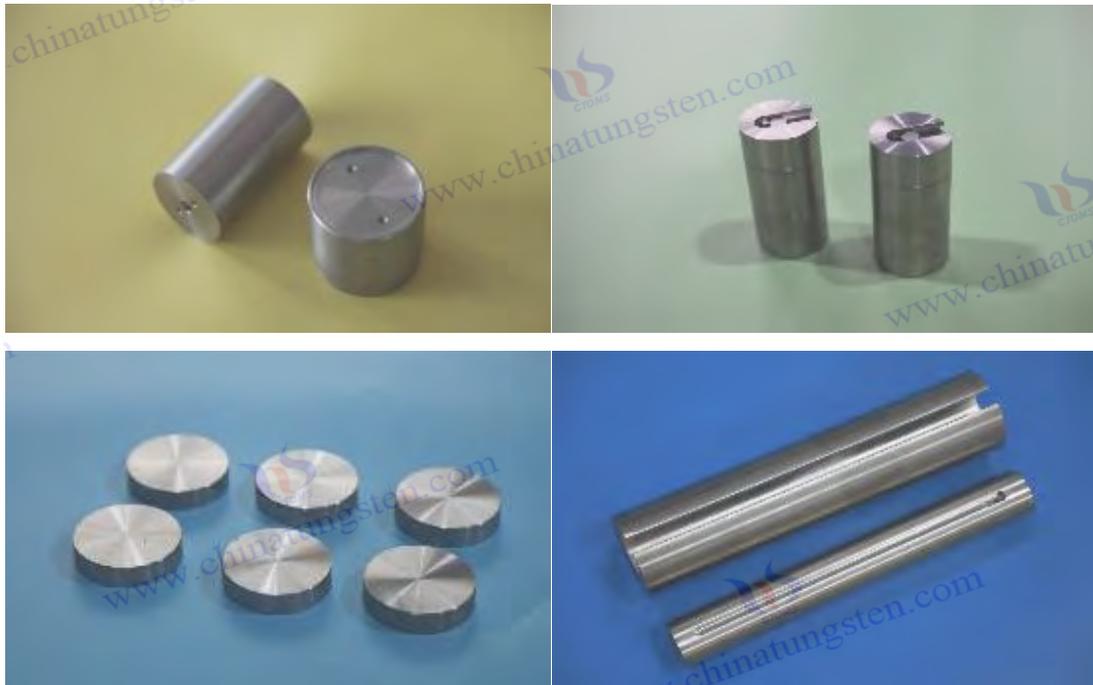
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 Leistungsprüfung und Qualitätsbewertung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 5.1 Zusammensetzungsanalyse und Elementprüfung einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen (W-Mo-Ni-Fe) ist eine Hochleistungslegierung mit hoher Dichte. Ihre mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften hängen stark vom Gehalt und der Gleichmäßigkeit der einzelnen Elemente in der Legierung ab. Daher sind genaue Zusammensetzungsanalysen und Elementprüfungen entscheidende Grundlagen der Qualitätskontrolle. Dies beeinflusst nicht nur die Produktkonsistenz und Rückverfolgbarkeit, sondern auch die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Materials in kritischen Anwendungen wie Kernenergie, Militär und Luft- und Raumfahrt.

In diesem Abschnitt werden systematisch die Methoden zur Erkennung der chemischen Zusammensetzung, die Techniken der Elementaranalyse, die gängigen Standards zur Verunreinigungskontrolle und die Methoden zur Bewertung der Zusammensetzung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen vorgestellt und technische Unterstützung bei der Legierungsherstellung, Prozessüberwachung und Endprüfung bereitgestellt.

#### 1. Analysemethoden der wichtigsten Legierungselemente

##### 1. Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Prinzip** : Nachdem die Probe aufgelöst wurde, wird sie in ein Hochtemperaturplasma injiziert, um die Intensität des charakteristischen Spektrums jedes Elements zu analysieren.
- **Vorteile** :
  - Großer Erfassungsbereich, ermöglicht die gleichzeitige Analyse wichtiger Elemente wie Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen;
  - Hohe Genauigkeit, geeignet für Chargentests;
- **Anwendung** : Wird häufig bei der Komponentenanalyse und Gleichmäßigkeitsbewertung von Produkten im mittleren und späten Stadium verwendet.

## 2. Röntgenfluoreszenzspektrometrie (XRF)

- **Prinzip** : Nachdem die Probe durch Röntgenstrahlen angeregt wurde, wird die Intensität der Fluoreszenzstrahlung analysiert, um den Elementgehalt zu bestimmen;
- **Vorteile** :
  - Zerstörungsfrei, schnell und für feste Proben geeignet;
  - Die Genauigkeit ist etwas geringer als bei unserem ICP, aber es ist für ein schnelles Screening geeignet;
- **Einschränkungen** : Unempfindlich gegenüber leichten Elementen (wie O, C, N).

## 3. Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)

- **Wird zur quantitativen Analyse von Elementen mit mittlerem Gehalt wie Nickel und Eisen verwendet ;**
- Es verfügt über eine hohe Genauigkeit, jedoch einen begrenzten Messdurchsatz und eignet sich zur präzisen Bestimmung einzelner Elemente.

## 2. Nachweismethoden für Verunreinigungselemente und Gaselemente

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen unterliegen strengen Anforderungen an die Kontrolle von Verunreinigungen (wie C, O, N, H, S und P), insbesondere in Hochtemperatur- und Bestrahlungsumgebungen. Spurenverunreinigungen können zudem zu Korngrenzenversprödung, Gasausscheidung oder Festigkeitsverlust führen.

### 1. Sauerstoff-, Stickstoff- und Wasserstoffanalysator (ONH-Analyse)

- **Anwendbare Instrumente** : Wärmeleitfähigkeits-ONH-Analysator;
- **Prinzip** : O, N und H, die nach dem Schmelzen bei hohen Temperaturen freigesetzt werden, werden separat erfasst;
- **Bedeutung** : Wird zur Bewertung der Gasrückhaltung in Pulvern oder dichten Teilen verwendet, insbesondere nach der additiven Fertigung.

### 2. Kohlenstoff- und Schwefelanalysator (CS-Analyse)

- **Wird verwendet, um den Gehalt an freiem Kohlenstoff, Graphit und Karbid zu erkennen ;**
- **Anwendbare Technologie** : Infrarot-Kohlenstoff- und Schwefelanalyse;
- **Kontrollstandard** : Hochreine Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erfordern einen C- und S-Gehalt von weniger als 0,01 % .

### 3. Analyse der Elementgleichmäßigkeit und Mikrobereichszusammensetzung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Um eine Entmischung der Zusammensetzung und Phasentrennung während des Schmelzens oder Sinterns zu verhindern, sind außerdem eine Mikrobereichsanalyse und eine Bewertung der Zusammensetzungsgleichmäßigkeit erforderlich:

#### 1. Rasterelektronenmikroskopie (REM) + energiedispersive Spektroskopie (EDS)

- Beobachten Sie das Elementverteilungsmuster und die Ausfällung der Sekundärphase .
- Geeignet zur Erkennung von Einschlüssen, Partikelagglomerationen und Entmischungen im Mikromaßstab .

#### 2. Elektronenstrahlmikroskopie (EPMA)

- Höhere Auflösung und niedrigere Nachweisgrenze ;
- Es kann für Mehrpunktscans verwendet werden, um die Änderungen des Zusammensetzungsgradienten des gesamten Querschnitts zu analysieren .

#### IV. Standards für die Kontrolle der Inhaltsstoffe und Qualitätsanforderungen

Für unterschiedliche Anwendungsbereiche gelten unterschiedliche Toleranzen für Zusammensetzungsschwankungen bei Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen:

Element	Inhaltsbereich (Gew.-%)	Typischer Kontrollbereich (Militär-/Atomklasse)
W	85–95	±0,5 %
Mo	1–5	±0,2 %
Ni	2–6	±0,2 %
Fe	1–4	±0,2 %
C	≤0,02	≤0,005
O	≤0,03	≤0,01
N	≤0,015	≤0,005
S/P	≤0,01	≤0,003

Hinweis: Die Daten in der obigen Tabelle sind Richtwerte. Die tatsächlichen Bereiche richten sich nach den Produktklassen und Normen (wie GB/T, ASTM, AMS usw.).

#### 5. Testprozess und Qualitätskontrollstrategie

##### 1. Rohstoffstadium

- Erkennung der Pulverzusammensetzung (ICP, ONH, CS);
- Überprüfung der Chargenkonsistenz der Zutaten.

##### 2. Sinter-/Formphase

- Überprüfung der Schüttgutzusammensetzung;
- Mikrobereichsanalyse und Verunreinigungsüberwachung.

##### 3. Fertigproduktphase

- Chargenprobenahme + Bestätigung der Elementgleichmäßigkeit;
- Vergleichen Sie mit der Zutatendatenbank, um die Einhaltung des Verhältnisses sicherzustellen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## VI. Zusammenfassung

Die Analyse der Zusammensetzung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ist nicht nur der erste Schritt in der Qualitätsbewertung, sondern auch ein entscheidender Schritt zur Optimierung des Herstellungsprozesses und zur Gewährleistung der Produktkonsistenz. Da High-End-Anwendungen zunehmend höhere Materialstabilität und -zuverlässigkeit erfordern, werden künftig verstärkt integrierte multitechnische Prüfmethoden (wie ICP-MS, TOF-SIMS und XPS) und Prozessüberwachungssysteme zum Einsatz kommen, um einen geschlossenen Regelkreis der Zusammensetzungskontrolle vom Pulver bis zum fertigen Produkt zu erreichen.

### 5.2 Mikrostruktur- und Dichtekarakterisierung der W-Mo-Ni-Fe-Legierung

Als typische hochdichte Verbundlegierung wird die endgültige Leistung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung (W-Mo-Ni-Fe) maßgeblich durch ihre Mikrostruktur und Gesamtdichte bestimmt. Die Mikrostruktur spiegelt nicht nur die innere Phasenzusammensetzung, Kornverteilung, Grenzflächeneigenschaften und Verunreinigungseinschlüsse der Legierung wider, sondern bestimmt auch ihre mechanischen Eigenschaften (wie Festigkeit, Zähigkeit und Härte), thermophysikalischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und -ausdehnung), elektromagnetischen Eigenschaften und Betriebsstabilität. Daher ist die systematische und detaillierte Charakterisierung der Mikrostruktur und Dichte ein Schlüsselement bei der Beurteilung der Qualität von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

In diesem Abschnitt geht es um Methoden zur Mikrostrukturanalyse und Dichtemessung der Legierung, häufige Strukturdefekte und deren Auswirkungen auf die Leistung. Außerdem werden fortgeschrittene mehrskalige Charakterisierungstechniken und Methoden zur Qualitätsbewertung vorgestellt.

#### 1. Mikrostrukturanalysetechnologie

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

- **Zweck** : Beobachtung bei geringer Vergrößerung und vorläufige Bewertung der Korngröße, Poren und Phasenverteilung;
- **Probenvorbereitung** : Es wird mechanisches Polieren + chemisches Ätzen verwendet, und die üblicherweise verwendete Ätzlösung ist eine Mischung aus HCl + FeCl<sub>3</sub> + Alkohol ;
- **Beobachtungspunkte** :
  - Verteilung der Korngrenzen;
  - Übergangsbedingungen für Mehrphasengrenzflächen;
  - Ausfällung kugelförmiger oder dendritischer Strukturen.

##### 2. Rasterelektronenmikroskopie (REM)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **verwenden :**
  - Beobachten Sie sorgfältig die Oberflächenmorphologie der Legierung, die Sinterhalsverbindung und die Porenmorphologie.
  - Analysieren Sie die Grenzflächenbindung, Korngrenzenausscheidung und Einschlussarten von Legierungen.
- **Es wird häufig in Verbindung mit der energiedispersiven Spektroskopie (EDS) verwendet,** um die Elementzusammensetzung jedes Phasenbereichs zu bestimmen.

### 3. Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)

- **Anwendbare Objekte :** nanoverstärkte Phase, Versetzungsstruktur und Niederschlagsanalyse;
- **Technische Merkmale :**
  - Beobachtbare Gitterstruktur und Grenzflächenstruktur;
  - Zeigen Sie das Vorhandensein von W-Mo, Ni-Fe-Feststofflösungen oder interstitiellen Phasen mit hoher Auflösung an.
- **Probenvorbereitung :** Erforderlich ist die Probenvorbereitung **mittels** Ionenstrahl-Dünnschicht oder FIB-Technologie (Fokussierter Ionenstrahl).

### 4. Röntgenbeugung (XRD)

- **Zweck :** Qualitative und quantitative Analyse der Kristallphasenstruktur und Identifizierung von festen Lösungen, Niederschlägen, Oxiden usw.
- **Typische Informationen :**
  - W und Mo haben eine kubisch-raumzentrierte Struktur;
  - Ni-Fe kann eine  $\gamma$ -Feststofflösung bilden;
  - Die beobachteten Änderungen der Peakintensität der zweiten Phase können den Sintereffekt und den Einfluss der Wärmebehandlung widerspiegeln.

### 5. Elektronenrückstreubeugung (EBSD)

- **Vorteile :**
  - Kornausrichtung, Texturverteilung und Korngrenzeigenschaften genau ermitteln;
  - Es kann zur Analyse von Kornverzerrungen und dynamischer Rekristallisation verwendet werden, die während der Verarbeitung auftreten.
- **Typische Anwendungen :** Analyse der Entwicklung der Kornmorphologie nach Extrusion, Walzen oder additiver Fertigung.

## 2. Methoden zur Dichtemessung und Porositätsanalyse

Die Dichte einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung ist ein wichtiger Indikator für ihre mechanische Integrität, Wärmeleitfähigkeit und Lebensdauer. Je höher die Dichte, desto besser sind ihre physikalischen Eigenschaften und ihre Haltbarkeit.

## 1. Archimedische Methode

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Geeignet für gesinterte Schüttgüter ;**
- **Methode :**
  - Verdrängung mit einer Flüssigkeit (z. B. Ethanol oder destilliertes Wasser) und Messung der Auftriebsänderung;
  - Berechnungsformel:  $\rho = W_{\text{Luft}} / (W_{\text{Luft}} - W_{\text{Flüssigkeit}}) \times \rho_{\text{Flüssigkeit}}$  ;
- **Vorteile :** einfache Bedienung, gute Wiederholbarkeit, geeignet für Chargentests.

## 2. Heliumpyknometer (Gasverdrängungsmethode)

- **Geeignet für poröse Materialien und Pulverproben ;**
- **Prinzip :** Messen Sie das von der Probe verdrängte Gasvolumen und berechnen Sie die wahre Dichte basierend auf der Masse.
- **Vorteile :** Der Einfluss geschlossener Zellen kann eliminiert werden und die Messergebnisse liegen näher an der tatsächlichen Dichte.

## 3. Röntgen-Computertomographie (X-CT)

- **3D- Bildgebung :** Ermitteln Sie die Verteilung von Defekten wie Poren, Rissen und fehlender Verschmelzung innerhalb der Probe.
- **Auflösung :** bis zu 1~3  $\mu\text{m}$  ;
- **verwenden :**
  - Analysieren Sie Porosität, Porengrößenverteilung und Defektvolumenanteil;
  - Unterstützen Sie die zerstörungsfreie Qualitätsbewertung additiv gefertigter Fertigprodukte.

## 3. Typische Merkmale der Organisationsstruktur und Identifizierung von Mängeln

### 1. Phasenverteilung und Grenzflächenstruktur

- W-Mo-Partikel haben normalerweise eine Hauptskelettstruktur und sind kugelförmig oder polygonal;
- Ni-Fe stellt eine kontinuierliche Phase dar, die an der Grenzfläche zwischen den Partikeln verteilt ist und manchmal einen eutektischen Füllbereich bildet;
- Zu viel Ni kann während des Flüssigphasensinterns zur Ausfällung niedrigschmelzender intermetallischer Ni-W- oder Ni-Mo-Verbindungen führen und muss entsprechend kontrolliert werden.

### 2. Fehlertyp

Fehlertyp	Ursache	Auswirkungen auf die Leistung
Ungesinterte Löcher	Unzureichende Sintertemperatur und kurze Sinterzeit	Reduzierte Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit
Riss	Zu schnelle Abkühlrate und thermische Spannungsakkumulation	Reduzieren Sie die Ermüdungslebensdauer
Ausgefällte Verunreinigungsphase	Übermäßige Verunreinigungselemente (wie Si, O)	Verursacht Versprödung und verringert die Duktilität

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Phasentrennung</b>	Ungleichmäßige Elementverteilung und unzureichende Sinterung	Reduzieren Sie die Materialisotropie
-----------------------	--	--------------------------------------

#### 4. Organisation und Dichtekontrollstrategie

- **Pulveroptimierung** : Die Verwendung von kugelförmigem W-Mo-Ni-Fe-Vormischpulver mit enger Partikelgrößenverteilung unterstützt die Verdichtung während des Sinterprozesses.
- **Sinterkontrolle** : Optimierung der Temperatur (1350–1500 °C), Haltezeit und Atmosphäre (H<sub>2</sub> / Ar ), um das Wachstum des Verbindungshalses zu fördern;
- **Nachbearbeitungskontrolle** : Durch Heißisostatisches Pressen (HIP) werden Mikroporen beseitigt und die Gesamtdichte auf über 99,5 % erhöht.
- **Kontrolle der Mikrostruktur** : Wärmebehandlung + plastische Verformung (wie Schmieden und Walzen) können die Kornverfeinerung fördern und die Gleichmäßigkeit der Textur verbessern.

#### V. Zusammenfassung

Mikrostruktur und Dichte von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen bestimmen nicht nur deren intrinsische physikalische Eigenschaften, sondern wirken sich auch direkt auf ihre Betriebssicherheit und technische Zuverlässigkeit aus. Die Kombination von optischen und Elektronenmikroskopietechniken mit mehrdimensionaler Dichtemessung ermöglicht eine umfassende Qualitätsbewertung vom Makro- bis zum Nanometerbereich. Unterstützt durch Fortschritte in der intelligenten Prüfung und digitalen Charakterisierung werden die Mikrostrukturkontrolle und die Konsistenz des Endprodukts von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zukünftig weiter verbessert und so der Grundstein für ihren breiten Einsatz in der High-End-Fertigung gelegt.

#### 5.3 Mechanische Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und Vergleich mit Normen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen (W-Mo-Ni-Fe) finden aufgrund ihrer hohen Dichte, Festigkeit, hervorragenden Zähigkeit und Strahlungsbeständigkeit breite Anwendung in wichtigen Anwendungen wie Militär, Luft- und Raumfahrt, Nukleartechnik und Medizintechnik. Ihre mechanischen Eigenschaften sind nicht nur ein zentrales Kriterium bei der Materialauswahl, sondern auch eine entscheidende Grundlage für Qualitätsbewertung, Produktionskontrolle und Prozessoptimierung. Um sicherzustellen, dass die Werkstoffe die Sicherheits- und Funktionsanforderungen verschiedener Anwendungen erfüllen, müssen ihre mechanischen Eigenschaften systematisch geprüft und nach internationalen Normen standardisiert werden.

In diesem Abschnitt werden die Prüfgegenstände für die mechanischen Eigenschaften, allgemeine Prüfmethode, ein Vergleich der Standardsysteme (ASTM, GB, ISO, MIL usw.) von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sowie die Bedeutung der Bewertung und Vorsichtsmaßnahmen bei der Anwendung der Prüfergebnisse umfassend vorgestellt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. Wichtigste Prüfgegenstände für mechanische Eigenschaften

Typische mechanische Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind:

Leistungsindikatoren	Testsignifikanz
<b>Zugfestigkeit</b>	Die Festigkeitsgrenze des Materials bei maximaler Belastung
<b>Streckgrenze</b>	Der kritische Spannungswert, bei dem das Material eine irreversible Verformung erzeugt
<b>Bruchdehnung</b>	Schlüsselparameter, die die Plastizität des Materials charakterisieren und die Duktilität widerspiegeln
<b>Abschnittsschrumpfung</b>	Charakterisieren Sie Einschnürungs- und Verformungsfähigkeiten, um die Bewertung der Verarbeitungsanpassung zu unterstützen
<b>Härte (HV/HB)</b>	Charakterisiert die lokale Druckfestigkeit und spiegelt indirekt die Verschleißfestigkeit und den Verarbeitungsaufwand wider
<b>Schlagzähigkeit</b>	Kennzeichnet die Fähigkeit, Stoßbelastungen zu absorbieren und ist ein wichtiges Kriterium für Sprödigkeit oder Duktilität
<b>Ermüdungsleben</b>	Bewerten Sie die Lebensdauer von Materialien unter wechselnden Belastungen
<b>Hohe Temperaturfestigkeit/Kriechfestigkeit</b>	Mechanische Stabilität unter Hochtemperatur-Betriebsbedingungen

## 2. Häufig verwendete Testmethoden und -geräte

### 1. Zugversuch

- **Geltende Normen :**
  - ASTM E8 (Standardmethode für Zugprüfungen an metallischen Werkstoffen)
  - GB/T 228.1 (Methoden zur Zugprüfung metallischer Werkstoffe bei Raumtemperatur)
  - ISO 6892-1 (Internationale Norm für Zugprüfungen an metallischen Werkstoffen)
- **Prüfgerät :** Universal - Materialprüfmaschine
- **Probenform :** Rundstab **oder** flache Standardzugprobe
- **Parameterausgabe :**
  - Zugfestigkeit (UTS)
  - Streckgrenze (YS)
  - Dehnung (EL)
  - Flächenreduzierung (RA)

### 2. Härteprüfung

- **Vickershärte (HV) :** dient zur präzisen Messung der Mikrohärte nach dem Sintern oder der Wärmebehandlung
  - Normen: ASTM E384, GB/T 4340, ISO 6507
- **Brinellhärte (HB) :** geeignet zur Prüfung der Gesamthärte großer Schmiede- oder Walzteile
  - Normen: ASTM E10, GB/T 231, ISO 6506

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Schlagzähigkeitsprüfung

- **Prüfmethode** : Charpy - Schlagversuch
- **Normen** : ASTM E23, GB/T 229, ISO 148
- **Parameterausgabe** : Stoßabsorptionsenergie (J), Sprödbbruchverhältnis
- **Anwendbare Temperatur** : Normaltemperatur oder niedrige Temperatur (-40 °C oder sogar -196 °C)

### 4. Ermüdungsprüfung

- **Prüfverfahren** : Hochlastfestigkeit (HCF), Niedriglastfestigkeit (LCF )
- **Normen** : ASTM E466, GB/T 3075, ISO 1099
- **Ausgabedaten** : Spannungs-Lebensdauer-Kurve (SN) , Dauerfestigkeit

### 5. Hochtemperatur-Leistungstest

- **Kriech- und Bruchfestigkeitstests** : werden verwendet, um das Verformungs- und Bruchverhalten von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen im Langzeitbetrieb bei 600 °C bis 1000 °C zu bewerten
- **Normen** : ASTM E139, GB/T 2039, ISO 204

## 3. Vergleich der Normen für mechanische Eigenschaften

### 1. Übersicht über gemeinsame Standards in verschiedenen Ländern/Systemen

Performance-Projekt	China (GB/T)	Vereinigte Staaten (ASTM)	Europäisch/International (ISO)
strecken	GB/T 228.1	ASTM E8/E8M	ISO 6892-1
Härte	GB/T 231/4340	ASTM E10/E384	ISO 6506/6507
Auswirkungen	GB/T 229	ASTM E23	ISO 148-1
Kriechen	GB/T 2039	ASTM E139	ISO 204
Ermüdung	GB/T 3075	ASTM E466	ISO 1099

### 2. Typischer Leistungsbereich einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung (als Referenz)

Leistungsindikatoren	Zahlenbereich	Testbedingungen
Zugfestigkeit	800 – 1100 MPa	Raumtemperatur
Streckgrenze	600 – 900 MPa	Raumtemperatur
Verlängerung	10 % – 30 %	Raumtemperatur
Härte (HV)	200 – 350	
Schlagzähigkeit	> 30 J (Charpy-Test)	Normaltemperatur
Kriechbruchlebensdauer	> 100 h (1000°C)	Dauerhaftes Laden

Hinweis: Die spezifische Leistung variiert je nach Sinterdichte, Wärmebehandlungsmethode, Legierungsverhältnis usw. Bitte beachten Sie bei der tatsächlichen Verwendung den Testbericht oder die Zertifizierungsdaten des Herstellers.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Hauptfaktoren, die die mechanische Leistung beeinflussen

- **Pulverqualität** : Größe, Reinheit und Verteilung der Pulverpartikel wirken sich direkt auf Dichte und Festigkeit aus.
- **Dichte** : Je geringer die Porosität, desto besser die Zug- und Schlageigenschaften;
- **Korngröße** : Kleine Körner erhöhen die Festigkeit (Hall-Petch-Effekt), können aber die Duktilität verringern ;
- **Wärmebehandlungssystem** : Der Abschreck-, Alterungs- oder Glühprozess bestimmt das Gleichgewicht zwischen Festigkeit und Zähigkeit der Legierung.
- **Phasenzusammensetzung** : Die Gleichmäßigkeit der kontinuierlichen Ni-Fe-Phase ist entscheidend für die Plastizität und die Schlagzähigkeitseigenschaften .
- **Strukturelle Defekte** : Einschlüsse, Risse, Delamination und Entmischung können zu Leistungsschwankungen führen.

#### V. Zusammenfassung und Vorschläge

Die Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erfordert die Einhaltung strenger internationaler Normen sowie präzise Prüfmethode und standardisierte Verfahren zur Probenvorbereitung. Verschiedene Prüfpunkte ergänzen sich gegenseitig und ermöglichen gemeinsam eine wissenschaftliche Bewertung der umfassenden Leistungsfähigkeit des Materials. Für unterschiedliche Anwendungsszenarien (z. B. panzerbrechende Projektilkerne, Kernreaktorkomponenten oder Trägheitsfahrzeuge) sind gezielte Leistungsanforderungen und Prüfverfahren erforderlich.

Mit der steigenden Nachfrage nach funktionalen Verbundwerkstoffen und extremen Einsatzumgebungen werden in Zukunft Hochdurchsatz-Testtechnologien, Multiskalen-Modellanalysen, Vorhersagen mithilfe künstlicher Intelligenz usw. schrittweise in das Bewertungssystem für die mechanischen Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen Einzug halten und so ein vollständiges Leistungsmanagement des Prozesses vom Materialdesign bis zur Anwendungsbereitstellung ermöglichen.

#### 5.4 Prüfmethode für thermische und elektrische Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer außergewöhnlich hohen Dichte, hervorragenden mechanischen Eigenschaften und stabilen physikalischen Eigenschaften häufig in Umgebungen mit hohen Temperaturen, hoher Strahlung und extremen Bedingungen eingesetzt. Ihre thermophysikalischen und elektrischen Eigenschaften wirken sich direkt auf die Wärmeableitungseffizienz, die elektromagnetische Verträglichkeit und die Betriebsstabilität der Legierung in praktischen technischen Anwendungen aus. Daher ist die genaue Prüfung und Analyse der thermophysikalischen und elektrischen Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ein entscheidender Schritt in der Materialforschung und -entwicklung, der Qualitätskontrolle und der Leistungsoptimierung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Testmethoden und Instrumententechnologien für Schlüsselindikatoren wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, spezifische Wärmekapazität, Temperaturleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, magnetische Reaktion und Strahlungsbeständigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

## 1. Prüfverfahren für thermische Eigenschaften

### 1. Wärmeleitfähigkeitsmessung

- **Testprinzip** : Misst die Fähigkeit eines Materials , Wärme zu leiten, normalerweise mithilfe einer stationären oder einer transienten Methode.
- **Häufig verwendete Ausrüstung** :
  - **Laser-Flash-Analyse (LFA)**
    - Prinzip: Erhitzen Sie eine Seite der Probe mit Laserimpulsen, messen Sie die Temperaturreaktion auf der anderen Seite, berechnen Sie die Wärmeleitfähigkeit und folgern Sie daraus die Wärmeleitfähigkeit.
    - Anwendungsbereich: Raumtemperatur bis Hochtemperatur (bis 2000°C);
    - Norm: ASTM E1461;
  - **Steady-State-Methode**
    - Die Wärmeleitfähigkeit wird berechnet, indem eine konstante Temperaturdifferenz angewendet und der Wärmestrom und der Temperaturgradient gemessen werden.
    - Geeignet für große Proben und niedrige Temperaturbereiche.
- **Hinweise** :
  - Die Probengröße und der Oberflächenzustand haben einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse.
  - Die Messgenauigkeit von Materialien mit hoher Dichte ist höher.

### 2. Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE)

- **Testprinzip** : Das Verhältnis der Längenänderung eines Materials beim Erhitzen zu seiner ursprünglichen Länge ändert sich normalerweise mit der Temperatur ;
- **Messgerät** : Dilatometer ;
- **Normen** : ASTM E228, GB/T 3366, ISO 11359;
- **Testbereich** : **Raumtemperatur** bis hohe Temperatur (im Allgemeinen bis zu 1000 °C und darüber);
- **Anwendung** :
  - Vorhersage von thermischer Spannung und thermischer Verformung;
  - Arbeiten Sie mit der thermischen Anpassung der entworfenen Strukturteile zusammen.

### 3. Spezifische Wärme und Wärmeleitfähigkeit

- **Spezifische Wärmekapazität** : Die Fähigkeit eines Materials pro Masseneinheit, Wärme zu absorbieren und einen Temperaturanstieg zu verursachen, üblicherweise gemessen durch Differenzial-Scanning-Kalorimetrie (DSC);

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Wärmeleitfähigkeit** : die Geschwindigkeit , mit der sich Wärme in einem Material ausbreitet, die mit der Laserblitzmethode ermittelt werden kann;
- **Beziehung** : Wärmeleitfähigkeit = Wärmeleitfähigkeit  $\times$  spezifische Wärmekapazität  $\times$  Dichte.

## 2. Prüfmethoden für elektrische und physikalische Eigenschaften

### 1. Leitfähigkeits- und Widerstandsmessungen

- **Vier-Sonden-Methode**
  - Normen: ASTM B193, GB/T 24523;
  - Messen Sie den Probenwiderstand und berechnen Sie die Leitfähigkeit oder den spezifischen Widerstand.
  - Vorteile: Effektive Vermeidung des Einflusses des Kontaktwiderstands, geeignet für Metall- und Legierungsmaterialien;
- **Hall-Effekt-Messung**
  - Wird verwendet, um die Trägerkonzentration und -mobilität zu bestimmen und den Leitfähigkeitsmechanismus von Legierungen zu bewerten.
  - Angewandt auf die Untersuchung der elektronischen Struktur von Hochleistungs-Wolfram-Molybdän-Legierungen.

### 2. Magnetische Reaktionserkennung

- **Hystereseschleifenmessung**
  - Instrumente: Vibrating Sample Magnetometer (VSM), supraleitendes Quanteninterferenzgerät (SQUID);
  - Messen Sie die Änderung der Magnetisierungsintensität durch ein externes Magnetfeld, um festzustellen, ob das Material paramagnetisch, ferromagnetisch oder antiferromagnetisch ist.
- **AC-Magnetpermeabilitätstest**
  - Bewerten Sie die magnetische Reaktion von Materialien in Wechselstrom-Magnetfeldern für die Verwendung beim Design elektronischer Geräte.

### 3. Strahlenbeständigkeitstest

- **Strahlungsumgebungssimulation**
  - Führen Sie Bestrahlungstests mit Neutronenquellen und Gammastrahlenquellen durch.
  - Beobachten Sie die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, der Mikrostruktur und der elektrischen Eigenschaften der Legierung.
- **Leistungstest nach Bestrahlung**
  - Umfasst Tests der Bruchzähigkeit, Härte, des elektrischen Widerstands und der Wärmeleitfähigkeit zur Bewertung der strahlungsbedingten Materialzersetzung.

### 4. Vorbereitung der Testprobe und Vorsichtsmaßnahmen

- Die Probe sollte repräsentativ sein und Oberflächenoxidation und mechanische Beschädigungen vermeiden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Der Testtemperaturbereich und die Atmosphärenkontrolle (z. B. Inertgas) beeinflussen die Testergebnisse.
- Wiederholte Tests gewährleisten die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Daten.

## V. Zusammenfassung

Die thermophysikalischen und elektrischen Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen bilden die Grundlage für ihre Leistungsfähigkeit in Anwendungen. Moderne Instrumente, darunter Laser-Flash-Methoden, Wärmeausdehnungsmessgeräte, Vier-Sonden-Messungen und magnetische Reaktionstests, ermöglichen die präzise Messung wichtiger Daten wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungsverhalten, elektrische Leitfähigkeit und magnetische Eigenschaften des Materials und bilden so die wissenschaftliche Grundlage für die Optimierung des Materialdesigns und technische Anwendungen. In Kombination mit mehrfeldgekoppelten Leistungstests und Simulationen werden wir unser Verständnis und unsere Kontrolle der multiphysikalischen Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zukünftig weiter verbessern.

## 5.5 Oberflächenzustand und Defekterkennungstechnologie von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Als Hochleistungsschwermetall hat die Oberflächenbeschaffenheit der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung direkten Einfluss auf ihre mechanischen Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit und Lebensdauer. Darüber hinaus sind winzige Oberflächendefekte wie Risse, Poren und Einschlüsse oft Schlüsselfaktoren für vorzeitiges Materialversagen. Daher ist die genaue und effiziente Erkennung des Oberflächenzustands und der inneren Defekte der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung entscheidend für die Gewährleistung der Materialqualität und Anwendungssicherheit.

In diesem Abschnitt werden die Technologie zur Oberflächencharakterisierung und die gängigen Methoden zur Defekterkennung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen systematisch vorgestellt, darunter Sichtprüfung, zerstörungsfreie Prüftechnologien (Ultraschallprüfung, Röntgenbildgebung, Magnetpulverprüfung, Wirbelstromprüfung usw.) sowie neue digitale Prüf- und Analysetechnologien mit Unterstützung künstlicher Intelligenz.

## 1. Charakterisierung des Oberflächenzustands einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

### 1. Messung der Oberflächenrauheit

- **Instrumente und Methoden :**
  - Profilometer (berührend, berührungslos);
  - Laser-Scanning-Mikroskopie;
  - Die Rasterkraftmikroskopie (AFM) wird zur Messung der Rauheit im Nanobereich eingesetzt.
- **Schlüsselparameter :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Ra (arithmetischer Mittenrauwert);
- Rz (Zehn-Punkt-Höhenrauheit);
- Rt (maximale Höhenrauheit).
- **Anwendungsbedeutung :**
  - Bewerten Sie die Auswirkungen von Bearbeitungsprozessen (wie Schleifen und Polieren).
  - Beeinflusst die Beschichtungshaftung und das Ermüdungsverhalten;
  - Übermäßige Rauheit kann zu Spannungskonzentrationen und erhöhter Korrosion führen.

## 2. Oberflächenmorphologie und Mikrostrukturanalyse

- **Rasterelektronenmikroskopie (REM) :**
  - Wird verwendet, um Oberflächenrisse, Partikelverteilung und den Zustand der Oxidschicht zu beobachten;
- **Energiedispersive Spektroskopie (EDS) :**
  - Analysieren Sie die Verteilung der Oberflächenelemente und erkennen Sie Einschlüsse und Verunreinigungen.
- **Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) :**
  - Qualitative Analyse der chemischen Zusammensetzung und des Oxidationszustands der Oberfläche.

## 2. Defekterkennungstechnologie

### 1. Sichtprüfung

- **Methode :**
  - Manuelle Sichtprüfung;
  - Automatisierte Bildverarbeitungssysteme, die hochauflösende Kameras und Bildverarbeitungsalgorithmen kombinieren.
- **Vorteile :**
  - Intuitiv und schnell;
  - Geeignet zum Erkennen großflächiger Oberflächendefekte wie Kratzer, Poren und Ablösungen.

### 2. Ultraschallprüfung (UT)

- **Prinzip :**
  - Nutzen Sie die Ausbreitungs- und Reflexionseigenschaften von Ultraschallwellen in Materialien, um innere Defekte zu erkennen.
- **Methode :**
  - Impuls-Echo-Verfahren, Transmissionsverfahren;
  - Die Phased-Array-Ultraschalltechnologie (PAUT) ermöglicht hochauflösende Bildgebung.
- **Anwendungsbereich :**
  - Erkennen Sie innere Risse, Einschlüsse, Zwischenschichttrennungen und Poren.
- **Vorteil :**
  - Hohe Empfindlichkeit, zerstörungsfrei;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Kann für dicke Platten und komplexe Strukturen verwendet werden.

### 3. Röntgen und Computertomographie (CT)

- **Röntgeninspektion :**
  - Nutzen Sie die Durchdringungskraft von Röntgenstrahlen, um innere Strukturen sichtbar zu machen.
  - Geeignet zum Auffinden größerer Defekte wie Poren, Einschlüsse und Risse.
- **Industrielle CT :**
  - Dreidimensionale zerstörungsfreie Bildgebungstechnologie zur genauen Lokalisierung und Messung des Defektvolumens;
  - Besonders effektiv bei komplexen Geometrien und mehrschichtigen Strukturen.

### 4. Magnetpulverprüfung (MPT)

- **Anwendbare Materialien :** Geeignet für magnetisch leitfähige Materialien. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen reagieren im Allgemeinen magnetisch.
- **Prinzip :** Nach der Magnetisierung tritt das Magnetfeld am Defekt aus und das adsorbierte Magnetpulver erscheint;
- **Vorteile :** hohe Empfindlichkeit, einfache Bedienung, geeignet zum Erkennen von Oberflächen- und oberflächennahen Defekten.

### 5. Wirbelstromprüfung (ECT)

- **Prinzip :** Erkennen von Oberflächen- und oberflächennahen Defekten leitfähiger Materialien mithilfe des Prinzips der elektromagnetischen Induktion;
- **Anwendung :** Hochempfindliche Erkennung von Mikrorissen, Korrosion und Beschichtungsfehlern;
- **Vorteile :** berührungslos, schnell, geeignet für die Oberflächen- und Flacherkennung.

### 3. Fortschrittliche Digitalisierung und intelligente Erkennungstechnologie

- **Digitale Bildverarbeitung und KI- Unterstützung :**
  - In Kombination mit Algorithmen des maschinellen Lernens kann eine automatische Fehleridentifizierung und -klassifizierung erreicht werden.
  - Verbessern Sie die Erkennungseffizienz und -genauigkeit und reduzieren Sie menschliche Fehler.
- **Rekonstruktion der Oberflächentopographie :**
  - Erfassen Sie komplexe Topografiedaten präzise, um die anschließende Verarbeitung und Leistungsbewertung zu unterstützen.
- **Online- Erkennungssystem :**
  - Integrieren Sie Sensoren und automatische Steuerung, um eine Echtzeit-Qualitätsüberwachung der Produktionslinie zu erreichen.

### IV. Prüfnormen und Anforderungen an die Qualitätskontrolle

- **Zugehörige Normen :**
  - ASTM E165 (Standard für die Magnetpulverprüfung);
  - ASTM E213 (Ultraschallprüfnorm);
  - ISO 17638 (industrielle CT-Prüfung);

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- GB/T 13810 (Terminologie für zerstörungsfreie Prüfungen) usw.
- **Qualitätskontrolle :**
  - Richten Sie einen vollständigen Testprozess ein, um die Zuverlässigkeit der Testdaten sicherzustellen.
  - Mehrere Erkennungsmethoden ergänzen sich gegenseitig, um die Vollständigkeit der Fehlererkennung zu verbessern.

## V. Zusammenfassung

Die Technologie zur Oberflächenbeschaffenheit und Defekterkennung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ist entscheidend für die Gewährleistung einer stabilen Materialleistung und sicheren Anwendung. Durch die Integration mehrerer zerstörungsfreier Prüfverfahren mit modernen digitalen und intelligenten Analysemethoden ist eine hochpräzise und effiziente Erkennung von Oberflächen- und inneren Defekten in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen möglich. Mit fortschreitender Prüftechnologie werden die Automatisierung und Intelligenz der Materialprüfung in Zukunft zunehmen und eine solide Grundlage für die High-End-Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen bilden.

## 5.6 Zerstörungsfreie Prüfung und Lebensdauerbewertung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie, dem Militär und der High-End-Fertigung. Diese Anwendungen sind oft mit komplexen Bedingungen wie hoher Belastung, hohen Temperaturen und starker Strahlung verbunden. Um die Sicherheit und Zuverlässigkeit dieser Legierungen im Betrieb zu gewährleisten, sind präzise zerstörungsfreie Prüfungen (ZfP) und ein wissenschaftliches Lebensdauerbewertungssystem unerlässlich. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf ZfP-Techniken und Methoden zur Lebensdauervorhersage für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

### 1. Die Rolle der zerstörungsfreien Prüftechnologie bei der Betriebsüberwachung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind hochdichte und hochfeste Werkstoffe, die unter inneren und oberflächlichen Defekten leiden können, die zu Leistungseinbußen und plötzlichen Ausfällen führen können. Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) erkennen Risse, Einschlüsse, Poren und Ermüdungsschäden frühzeitig und ermöglichen so eine Echtzeitüberwachung des Materialzustands.

#### 1. Wichtigste zerstörungsfreie Prüfverfahren

- **Die Ultraschallprüfung (UT)**

nutzt die Ausbreitungseigenschaften von Schallwellen in Materialien, um innere Defekte zu erkennen. Sie eignet sich für dicke Platten und komplex geformte Teile aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. Die Phased-Array-Ultraschallprüfung (PAUT) ermöglicht eine dreidimensionale Bildgebung und weist eine hohe Positionierungsgenauigkeit auf.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Die Röntgenprüfung (Röntgen- und Gammastrahlen)**  
identifiziert innere Defekte in Materialien durch durchdringende Bildgebung und eignet sich zum Erkennen größerer Poren und Risse. Die industrielle CT-Technologie kann hochauflösende dreidimensionale Bilder der Defektstruktur liefern.
- **Die Magnetpulverprüfung (MT)**  
eignet sich zum Erkennen von Oberflächen- und oberflächennahen Defekten. Die magnetischen Reaktionseigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen machen diese Methode effektiv.
- **Die Wirbelstromprüfung (ECT)**  
zielt auf oberflächliche und flache Mikrorisse sowie Korrosion ab, verfügt über eine hohe Erkennungsempfindlichkeit und eignet sich besonders für elektronische und Präzisionsteile.
- **Bei der Schallemissionsprüfung (AE)**  
werden die elastischen Wellensignale überwacht, die von Materialien abgegeben werden, wenn diese Spannungen ausgesetzt werden. So können Rissausbreitung und Ermüdungsschäden in Echtzeit erfasst werden.

## 2. Methode zur Bewertung der Lebensdauer

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind in der Praxis häufig komplexen Belastungen und extremen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Ein sinnvolles Lebensdauerbewertungssystem basiert nicht nur auf den Materialeigenschaften, sondern muss auch Daten aus zerstörungsfreien Prüfungen und Betriebsbedingungen berücksichtigen.

### 1. Vorhersage der Ermüdungslebensdauer

- **Ermüdungstests**  
Unter Laborbedingungen wurden Tests zur Ermüdung bei niedriger Zykluszahl (LCF) und hoher Zykluszahl (HCF) durchgeführt, um Wöhlerkurven und Bruchzähigkeitsparameter zu erhalten.
- **Die Schadenstoleranztheorie**  
sagt die Ermüdungslebensdauer während des Betriebs basierend auf der anfänglichen Fehlergröße und der Risswachstumsrate des Materials voraus.
- **Das Bruchmechanikmodell**  
verwendet Bruchmechanikparameter (wie Spannungsintensitätsfaktor  $K$  und  $J$ -Integral), um das Risswachstum zu analysieren.

### 2. Auswirkungen einer Umgebung mit hohen Temperaturen und Strahlung

- **Die Hochtemperatur-Kriechanalyse**  
bewertet die Kriechverformung und Lebensdauer von Materialien unter langfristiger Hochtemperaturbelastung.
- **Bei der Bewertung von Strahlenschäden**  
wird der strahlungsbedingte Materialabbau berücksichtigt, um die Modelle zur Lebensdauer vorhersage anzupassen.

### 3. Bewertung der Ermüdungslebensdauer von Mehrfeldkupplungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Unter Berücksichtigung der Auswirkungen verschiedener Umweltfaktoren wie Temperatur, Spannung, Strahlung und Korrosion auf Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden fortschrittliche numerische Simulationen und experimentelle datengesteuerte Modelle verwendet, um eine genaue Lebensdauervorhersage zu erreichen.

### 3. Integrierte Anwendung zerstörungsfreier Prüfungen und Lebensdauerbewertung

- **Das Online-Überwachungssystem**  
ermöglicht durch Sensoranordnung eine Echtzeit-Gesundheitsüberwachung wichtiger Teile der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung.
- **Bei der datengesteuerten intelligenten Wartung**  
kommen Technologien für maschinelles Lernen und Big Data-Analyse in Kombination mit NDT-Daten zum Einsatz, um die verbleibende Lebensdauer vorherzusagen und Entscheidungen zu Reparatur und Austausch zu treffen.
- **Das vollständige Lebenszyklusmanagement**  
umfasst Design, Herstellung, Verwendung und Verschrottung und schafft ein vollständiges System zur Materialstatusverfolgung und Lebenszyklusverwaltung.

### IV. Zukünftige Entwicklungstrends

- **Die hochempfindliche multimodale zerstörungsfreie Prüftechnologie**  
integriert Schallemissions-, Ultraschall-, Wirbelstrom- und optische Prüfungen, um die Möglichkeiten zur Defektidentifizierung zu verbessern.
- **Digitale Zwilling- und Simulationstechnologie**  
kombinieren Materialmikrostruktur und Servicedaten, um eine mehrskalige Lebensdauersimulation zu erreichen.
- **Die intelligente Plattform für das Materialgesundheitsmanagement**  
ermöglicht eine intelligente Diagnose und Frühwarnung des Betriebszustands von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

### V. Zusammenfassung

Zerstörungsfreie Prüfungen und Lebensdauerermessungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind Kerntechnologien für deren sicheren und stabilen Einsatz in High-End-Anwendungen. Durch die Integration mehrerer zerstörungsfreier Prüfverfahren mit fortschrittlichen Ermüdungs- und Umwelteinwirkungsmodellen können frühzeitige Warnungen vor Materialverschleiß und eine genaue Lebensdauervorhersage erreicht werden. Intelligente und digitale Technologien werden in Zukunft das Zuverlässigkeitsmanagement von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen deutlich verbessern und ihren breiten Einsatz unter extremen Betriebsbedingungen fördern.

#### 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

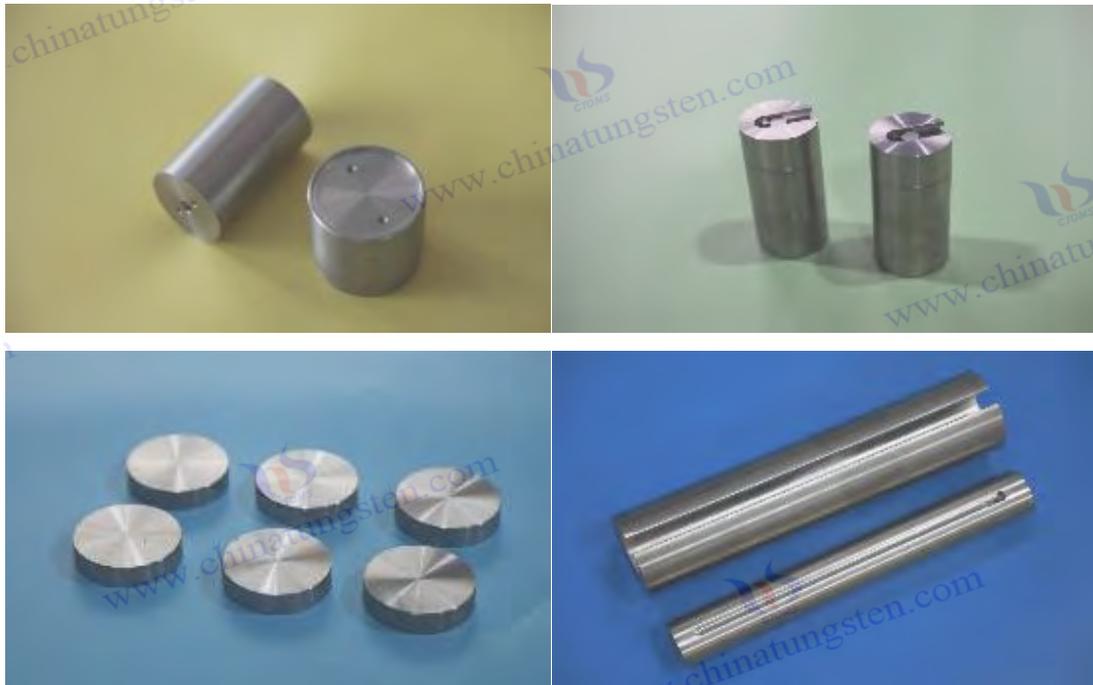
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

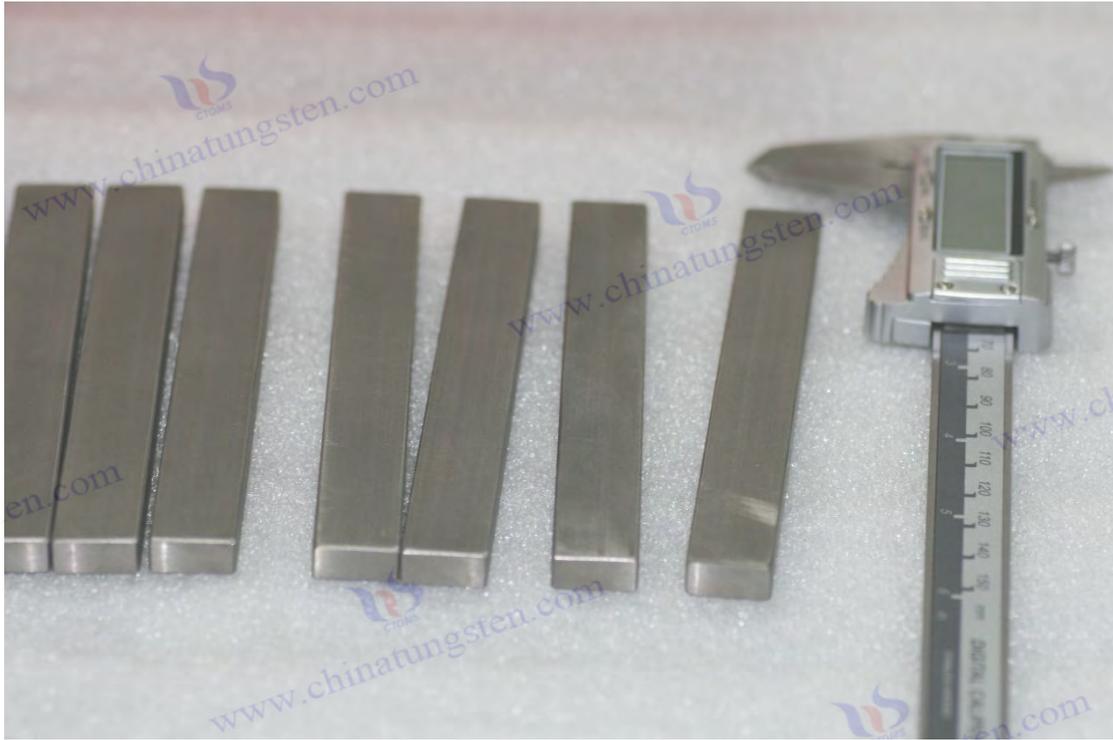
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 6 Typische Anwendungen und Industriefälle von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 6.1 Strukturelle und abschirmende Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der Kernenergie

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich aufgrund ihrer außergewöhnlich hohen Dichte, hohen Festigkeit und hervorragenden Strahlungsbeständigkeit zu wichtigen Struktur- und Strahlenschutzmaterialien in der Kernenergie entwickelt. Mit der Entwicklung der Kernenergietechnologie stiegen die Anforderungen an die Materialleistung. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit ihren einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften finden breite Anwendung in Schlüsselbereichen wie Kernreaktorkomponenten, Neutronenabsorbern und der Entsorgung radioaktiver Abfälle.

#### 1. Physikalische und strahlenschützende Vorteile der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram und Molybdän sind mit ihrer extrem hohen Dichte (ca.  $19,3 \text{ g/cm}^3$  für Wolfram und  $10,2 \text{ g/cm}^3$  für Molybdän) und Ordnungszahl wirksame Abschirmmaterialien für Gammastrahlen und Neutronen. Nickel-Eisen als Bindemittel verleiht der Legierung nicht nur hervorragende mechanische Eigenschaften, sondern erhöht auch ihre Strahlenbeständigkeit. Die Verbundstruktur der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung erreicht ein optimales Gleichgewicht zwischen Abschirmwirkung und mechanischer Festigkeit und erfüllt die Anforderungen an hohe Festigkeit und Dichte für Kernkraftwerke.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Anwendung in Strukturkomponenten von Kernreaktoren

### 1. Wolfram

-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig als Neutronenreflektoren und Gammastrahlenschutz in Kernreaktoren eingesetzt. Sie reduzieren Strahlungslecks und schützen kritische Geräte und Bediener. Ihre hohe Dichte reduziert effektiv die Strahlungsdurchlässigkeit und verlängert die Lebensdauer der Geräte.

### 2. Steuerstäbe und Neutronenabsorber

: Durch die Verwendung einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung kann ein bestimmter Neutronenabsorptionsquerschnitt erreicht, hocheffiziente Steuerstabmaterialien hergestellt und die Kettenreaktionsrate von Kernreaktoren präzise eingestellt werden.

3. In Umgebungen mit hoher Strahlung sorgen die hohe Festigkeit und Zähigkeit sowie die ausgezeichnete Strahlungsbeständigkeit der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung dafür, dass strahlungsbeständige Strukturteile nicht unter Sprödbruch und starker Verformung leiden, wodurch die strukturelle Integrität des Kernreaktors erhalten bleibt.

## 3. Behandlung und Abschirmung radioaktiver Abfälle

Schutzbarrieren aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden häufig in Lager- und Transportbehältern für Atommüll eingesetzt. Ihre hohe Dichte blockiert radioaktive Strahlen effektiv, verhindert Strahlungslecks und gewährleistet die Sicherheit von Umwelt und Personal. Darüber hinaus unterstützt die mechanische Stabilität der Legierung die Langzeitlagerung und reduziert Sicherheitsrisiken durch Materialalterung.

## 4. Nuklearmedizin und Strahlenschutzrüstung

In der Nuklearmedizin werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zur Herstellung von Abschirmkomponenten und Präzisionsbauteilen in Strahlentherapiegeräten verwendet. Ihre hohe Dichte gewährleistet eine präzise Strahlungskontrolle, verbessert die Behandlungswirksamkeit und schützt gleichzeitig das medizinische Personal vor den Auswirkungen der Strahlung.

## V. Branchenfallanalyse

### 1. Inländische Hersteller von Materialien aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen für die Kernenergie

haben komplette Produktionslinien für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen eingerichtet, die mit modernster Pulvermetallurgie und Präzisionsverarbeitungsanlagen ausgestattet sind. Ihre Produkte finden breite Anwendung in inländischen Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren.

### 2. Anwendungsbeispiele auf dem internationalen Markt für Kernenergie:

Produkte aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden in Atommächte wie Europa, die USA, Japan und Südkorea exportiert, um deren Bedarf an hochleistungsfähigen Strahlenschutzmaterialien zu decken und den weltweiten Austausch und die Zusammenarbeit im Bereich der Kernenergie-Materialtechnologie zu fördern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## VI. Zukünftige Entwicklungstrends

- **Hochleistungs-Verbundwerkstoffe aus Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen**  
verbessern die Strahlungsbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften von Materialien durch Nanotechnologie und Mikrolegierung und erhöhen so die Sicherheit und Lebensdauer von Kernenergieanlagen.
- **Die Integration intelligenter Überwachungs- und Lebensdauervorhersagetechnologie**  
mit zerstörungsfreier Prüftechnologie ermöglicht eine Online-Gesundheitsüberwachung und vorausschauende Wartung von Komponenten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Kernenergieanlagen.
- **Grüne Kernenergie und nachhaltige Materialentwicklung**  
fördern den umweltfreundlichen Herstellungsprozess und die Recyclingtechnologie von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Kernenergiematerialien, was im Einklang mit der nachhaltigen Strategie der zukünftigen Kernenergieentwicklung steht.

## VII. Zusammenfassung

Als wichtiges Struktur- und Abschirmmaterial im Kernenergiesektor unterstützen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit ihren einzigartigen physikalischen Eigenschaften und hervorragenden Strahlenschutzigenschaften den sicheren und stabilen Betrieb der Kernenergie-Technologie. Mit den Fortschritten in der Materialwissenschaft und der Kernenergie-Technologie werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der Kernenergie-Industriekette eine immer wichtigere Rolle spielen und die effiziente und umweltfreundliche Entwicklung der Kernenergie fördern.

### 6.2 Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in militärischen Projektilkernen und Trägheitskomponenten

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich aufgrund ihrer hohen Dichte, hohen Festigkeit sowie hervorragenden Verschleiß- und Hochtemperaturbeständigkeit zu einem Schlüsselwerkstoff in der Rüstungsindustrie für die Herstellung panzerbrechender Projektilkerne und Schlüsselkomponenten von Trägheitsleitsystemen entwickelt. Ihre einzigartigen physikalischen und mechanischen Eigenschaften erfüllen die strengen Anforderungen militärischer Ausrüstung hinsichtlich Durchschlagskraft, Genauigkeit und Haltbarkeit.

#### 1. Hauptvorteile der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung im panzerbrechenden Projektilkern

1. **Hohe Dichte führt zu konzentrierter kinetischer Energie**  
. Die Dichte von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen liegt üblicherweise zwischen 17 und 18 g/cm<sup>3</sup> und ist damit deutlich höher als die von Stahl. Dadurch kann der panzerbrechende Kern beim Aufprall auf das Ziel mit hoher Geschwindigkeit enorme kinetische Energie konzentrieren und so eine hervorragende Durchschlagswirkung erzielen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Hervorragende mechanische Festigkeit und Zähigkeit

Die hohe Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit der Legierung sorgen dafür, dass der Kern beim Durchdringen der Panzerung nicht so leicht bricht oder verformt wird, wodurch die Eindringtiefe und die Trefferwirkung verbessert werden.

## 3. Hohe Temperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit

Die augenblicklich hohe Temperatur und die starke Reibung, die durch einen Aufprall mit hoher Geschwindigkeit entstehen, stellen extrem hohe Anforderungen an die Materialeistung. Die hohe Temperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung gewährleisten die Stabilität der Kernform und erhalten die Penetrationseffizienz.

## 2. Anwendung militärischer Trägheitskomponenten

### 1. eine wichtige Strukturkomponente in Trägheitsnavigationssystemen

, wird aufgrund seiner hohen Dichte und Festigkeit häufig zur Herstellung von Rotoren, Gyroskopgehäusen und Gegengewichten in Trägheitsnavigationssystemen verwendet und verbessert dadurch die Stabilität und Vibrationsfestigkeit des Systems.

### 2. Aufgrund ihrer Dimensionsstabilität und guten Verarbeitungseigenschaften **eignen sich Legierungen für hochpräzise mechanische Teile für Trägheitskomponenten mit komplexen Formen und gewährleisten so den langfristig zuverlässigen Betrieb von Präzisionsinstrumenten.**

## 3. Typische Anwendungsfälle

- **stellt einen bestimmten Typ panzerbrechender Projektilkerne her,**

bei dem anstelle des herkömmlichen Hartmetalls eine Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung zum Einsatz kommt. Dadurch wird die Durchschlagskraft des Kerns um 20 % erhöht und die Kampfkraft des Waffensystems deutlich gesteigert.

- **Komponenten für leistungsstarke Trägheitsnavigationssysteme**

Hochwertige Trägheitsnavigationsgeräte im In- und Ausland verwenden zur Herstellung der Rotorkomponenten eine Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung, wodurch eine höhere Genauigkeit und Entstörungsfähigkeit erreicht werden.

## 4. Herstellungsprozess und technische Anforderungen

- **Bei der Pulvermetallurgie**

werden hochreine Wolfram- und Molybdänpulver sowie ein streng temperaturkontrollierter Sinterprozess verwendet, um sicherzustellen, dass die Legierung dicht und gleichmäßig ist und Leistungsmängel vermieden werden.

- **Präzisionsbearbeitung**

in Kombination mit fortschrittlichen Schleif- und Poliertechnologien ermöglicht die hochpräzise Herstellung komplexer Komponenten.

- **Durch eine Oberflächenverstärkungsbehandlung**

werden die Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Legierung durch

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenbeschichtung oder Wärmebehandlung verbessert, wodurch die Lebensdauer des Kerns und der Trägheitskomponenten verlängert wird.

## V. Entwicklungstrends und Herausforderungen

- **Durch Nanoverstärkung und Mikrostrukturoptimierung**  
werden die umfassenden mechanischen Eigenschaften und die Zähigkeit von Materialien durch Nanopartikelverstärkung und Mikrolegierungstechnologie weiter verbessert.
- Unter Gewährleistung der Leistung **werden im Rahmen des Leichtbaudesigns Verbundwerkstoffe mit geringer Dichte entwickelt, um einen Teil der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung zu ersetzen und so eine allgemeine Gewichtsreduzierung der Ausrüstung zu erreichen.**
- **Eine verbesserte Anpassungsfähigkeit an die Umwelt**  
ist auf extreme Temperaturen und komplexe Gefechtsfeldumgebungen ausgerichtet, optimiert die Korrosionsbeständigkeit und thermische Stabilität des Materials und verbessert die Zuverlässigkeit der Komponenten.

## VI. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen spielen mit ihrer hervorragenden Dichte, Festigkeit und Verschleißfestigkeit eine Schlüsselrolle in Raketenkernen und Trägheitskomponenten der Militärindustrie. Durch kontinuierliche Materialinnovation und Weiterentwicklung der Verarbeitungstechnologie werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen die strengen Anforderungen an Hochleistungsmaterialien künftiger Militärausrüstung erfüllen und die Modernisierung der Militärtechnologie vorantreiben.

### 6.3 Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Hochtemperaturstrukturen der Luft- und Raumfahrt

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich aufgrund ihrer außergewöhnlich hohen Dichte, Festigkeit und Hochtemperaturstabilität zum bevorzugten Material für kritische Hochtemperaturstrukturen in der Luft- und Raumfahrtindustrie entwickelt. Da Leistung und Sicherheit von Raumfahrzeugen immer weiter verbessert werden, spielen diese Legierungen eine entscheidende Rolle bei Triebwerkskomponenten, der Wärmedämmung und Hochtemperaturstrukturen.

#### 1. Leistungsvorteile bei hohen Temperaturen

Wolfram und Molybdän, Metalle mit hohem Schmelzpunkt (Wolfram ca. 3422 °C, Molybdän ca. 2623 °C), verleihen der Legierung eine ausgezeichnete Hochtemperaturbeständigkeit und thermische Stabilität. Die Nickel-Eisen-Matrix erhöht nicht nur die mechanische Festigkeit, sondern verbessert auch die Wärmeausdehnungskompatibilität und Oxidationsbeständigkeit des Materials und gewährleistet so den langfristigen stabilen Einsatz der Legierung in komplexen thermischen Umgebungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Anwendung von Schlüsselkomponenten von Flugzeugtriebwerken

- **für Düsen- und Brennkammerstrukturen**  
machen es für den Einsatz als wichtige Hochtemperaturkomponenten wie Düsen und Brennkammern geeignet, die extremen Luftströmungen und hohen Temperatureinwirkungen standhalten können.
- **Die Turbinenschaufeln und Stützstrukturen**  
verbessern die Kriechfestigkeit und Lebensdauer der Schaufeln bei hohen Temperaturen und gewährleisten so einen langfristigen und effizienten Betrieb des Motors.

## 3. Wärmedämmung und Schutzmaterialien für Raumfahrzeuge

Die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung spielt eine doppelte Rolle bei der Wärmedämmung: Sie schützt vor Hochtemperaturstrahlung und leitet Wärme. Ihre hohe Dichte verhindert effektiv die Wärmeübertragung auf empfindliche Strukturen und bietet gleichzeitig eine hervorragende Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit, was die Zuverlässigkeit der Wärmeschutzsysteme von Raumfahrzeugen erhöht.

## 4. Strukturteile und Gegengewichte für die Luft- und Raumfahrt

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte und mechanischen Stabilität häufig in Strukturkomponenten und Gegengewichtssystemen von Raumfahrzeugen eingesetzt. Ihre hohe Festigkeit gewährleistet die strukturelle Sicherheit, während ihre präzise Dimensionsstabilität für dynamisches Gleichgewicht und Systemzuverlässigkeit sorgt.

## 5. Herausforderungen bei Fertigungstechnologie und -prozessen

- **Pulvermetallurgie und Wärmebehandlung optimieren**  
und kontrollieren die Legierungsdichte und Mikrostruktur und verbessern so die Hochtemperaturleistung und thermische Stabilität.
- **Bei der komplexen Formverarbeitung**  
kommen hochpräzise Bearbeitungs- und Oberflächenverfestigungstechnologien zum Einsatz, um die Fertigungsanforderungen komplexer Luft- und Raumfahrtkomponenten zu erfüllen.
- **Mithilfe der Antioxidationsbeschichtungstechnologie**  
werden hocheffiziente, hochtemperaturbeständige Beschichtungen entwickelt, um die Lebensdauer von Legierungen in oxidierenden Umgebungen mit hohen Temperaturen zu verlängern.

## VI. Typische Branchenfälle

- **Durch den Einsatz von Düsen aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in einem bestimmten Flugzeugtriebwerkstyp konnte**  
durch Verbesserungen der Legierungszusammensetzung und des Herstellungsprozesses eine extrem lange Lebensdauer der Düsen in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohem Druck erreicht werden.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Entwicklung von Hochtemperatur-Wärmedämmstoffen für Raumfahrzeuge**  
Viele Luft- und Raumfahrtagenturen im In- und Ausland verwenden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen als Wärmedämmstoffe, um die Sicherheit wichtiger Systeme zu gewährleisten.

## 7. Zukünftige Entwicklungstrends

- **Die intelligente Überwachung von Hochtemperaturumgebungen**  
integriert Sensoren, um den Status von Hochtemperaturkomponenten in Echtzeit zu überwachen und Materialfehler zu verhindern.
- **Forschung und Entwicklung neuer Verbundwerkstoffe:**  
Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden mit Keramik und anderen Hochtemperaturmaterialien kombiniert, um die Gesamtleistung zu verbessern.
- **Durch die Konstruktion einer leichten Hochtemperaturlegierung**  
wird die Legierungsdichte durch Mikrolegierung und Nanoverstärkung reduziert, um das Ziel von geringem Gewicht und hoher Leistung zu erreichen.

## 8. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich mit ihren außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften und ihrer thermischen Stabilität bei hohen Temperaturen zu einer wichtigen Wahl für Hochtemperatur-Strukturwerkstoffe in der Luft- und Raumfahrt entwickelt. Dank kontinuierlicher Materialinnovation und Prozessverbesserungen sind ihre Anwendungsaussichten in der zukünftigen Luft- und Raumfahrttechnik vielversprechend und werden auch weiterhin den sicheren und zuverlässigen Betrieb von Hochleistungsgeräten in der Luft- und Raumfahrt unterstützen.

### 6.4 Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der medizinischen Strahlentherapie und im hochdichten Schutz

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, hohen Festigkeit und hervorragenden Strahlenschutzigenschaften breite Anwendung im medizinischen Bereich, insbesondere in der Strahlentherapie und im Strahlenschutz. Ihre hervorragenden physikalischen Eigenschaften gewährleisten nicht nur die Präzision der Behandlung, sondern bieten auch einen wirksamen Schutz für medizinisches Personal und Patienten.

#### 1. Wichtige Anwendungen in der medizinischen Strahlentherapie

1. **Strahlenschutz für Strahlentherapiegeräte.**  
Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen können als hochdichtes Material Röntgen- und Gammastrahlen wirksam absorbieren und abschirmen, die Strahlenbelastung auf nicht behandelte Bereiche verringern und das normale Gewebe des Patienten vor Schäden schützen.
2. **Strukturlegierungen mit hoher Dichte**  
werden in Strahlentherapiegeräten zur Herstellung von Isolationsplatten, Kollimatoren und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schutzabdeckungen verwendet, um sicherzustellen, dass die Strahlen den Zielbereich präzise bestrahlen, die Behandlungswirkung verbessern und Nebenwirkungen reduzieren.

### 3. Verpackung und Schutzbehälter für radioaktive Quellen

Behälter aus einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung verfügen über hervorragende Schutzeigenschaften und werden zum Einkapseln radioaktiver Medikamente und Nuklide verwendet, um Strahlungslecks zu verhindern und die Betriebssicherheit zu gewährleisten.

## 2. Vorteile hochdichter Schutzmaterialien

- **Hervorragende Abschirmleistung**

Die hohe Dichte und die hohe Ordnungszahl der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung verleihen ihr eine erhebliche Absorptionskapazität für hochenergetische Strahlung und machen sie zu einem idealen medizinischen Strahlenschutzmaterial.

- **Gute mechanische Eigenschaften**

gewährleisten eine Abschirmwirkung, während die Legierung eine gute Festigkeit und Zähigkeit beibehält und die strukturellen Sicherheitsanforderungen medizinischer Geräte erfüllt.

- **Dimensionsstabilität und Verarbeitungsanpassungsfähigkeit**

Präzisionsformungs- und -verarbeitungsfunktionen unterstützen die Herstellung komplexer Strukturteile und passen sich den vielfältigen Designanforderungen medizinischer Geräte an.

## 3. Typische Anwendungsfälle in der medizinischen Strahlentherapie

- **Abschirmkomponenten in Strahlentherapiesystemen mit Linearbeschleunigern**

Viele moderne in- und ausländische Linearbeschleuniger verwenden zur Herstellung von Schutzklingen und Abschirmabdeckungen eine Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung, wodurch die Gerätesicherheit und Behandlungsgenauigkeit deutlich verbessert werden.

- **Transport- und Lagerbehälter für Radionuklide.**

Legierungsbehälter werden im nuklearmedizinischen Bereich häufig verwendet, um den sicheren Transport und die Lagerung von Radiopharmaka zu gewährleisten.

## 4. Produktionsprozess und Qualitätskontrolle

- **Beim Verfahren der Pulvermetallurgie mit hoher Dichte**

werden hochreine Rohstoffe und Präzisionssintertechnologie verwendet, um sicherzustellen, dass das Material dicht und porenfrei ist, wodurch die Abschirmeffizienz verbessert wird.

- **Oberflächenbehandlung und Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit**

Durch Oberflächenbeschichtung und Wärmebehandlung werden die Korrosionsbeständigkeit und Lebensdauer der Legierung verbessert.

- **den strengen Qualitätsprüfstandards**

gehören die Analyse der chemischen Zusammensetzung, die Beobachtung der

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrostruktur und die Prüfung der Wirksamkeit der Strahlenabschirmung, um sicherzustellen, dass das Produkt die medizinischen Sicherheitsanforderungen erfüllt.

## V. Entwicklungstrends und technologische Innovationen

- **Bei der Forschung und Entwicklung funktionaler Verbundschutzmaterialien**  
werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit Polymermaterialien kombiniert, um leichte und effiziente Strahlenschutzmaterialien zu entwickeln und so das Gewicht medizinischer Geräte zu reduzieren.
- **Intelligente medizinische Schutzausrüstung**  
integriert Sensoren und Überwachungssysteme, um eine Echtzeitüberwachung und -kontrolle der Strahlung während der Strahlentherapie zu erreichen.
- **Umweltfreundliche Herstellungsverfahren**  
fördern die grüne Fertigungstechnologie, reduzieren die Umweltbelastung während des Produktionsprozesses und erfüllen die Anforderungen der Medizinbranche an eine nachhaltige Entwicklung.

## VI. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen spielen mit ihrer außergewöhnlich hohen Dichte und ihren strahlenabschirmenden Eigenschaften eine unersetzliche Rolle in der medizinischen Strahlentherapie und im Strahlenschutz. Dank der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Materialwissenschaft und Medizintechnik werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen auch in Zukunft zur Gewährleistung der Behandlungssicherheit und zur Verbesserung der Geräteleistung beitragen.

### 6.5 Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Präzisionsformen und verschleißfesten mechanischen Komponenten

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen bieten mit ihrer hohen Härte, Festigkeit und hervorragenden Verschleißfestigkeit erhebliche Vorteile bei der Herstellung von Präzisionsformen und verschleißfesten mechanischen Komponenten. Ihre überlegenen physikalischen und mechanischen Eigenschaften verlängern nicht nur die Lebensdauer der Formen, sondern verbessern auch die Haltbarkeit und Zuverlässigkeit mechanischer Komponenten unter rauen Betriebsbedingungen erheblich.

#### 1. Hauptvorteile der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung in Präzisionsformen

##### 1. Hohe Härte und Verschleißfestigkeit:

Die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung weist eine ausgezeichnete Härte auf, die dem Verschleiß der Form unter Hochfrequenz- und Hochdruckbedingungen wirksam widerstehen, die Stabilität der Formgröße aufrechterhalten und die Präzision und Oberflächenqualität des Werkstücks sicherstellen kann.

##### 2. Gute Beständigkeit gegen thermische Ermüdung

Bei der Hochgeschwindigkeitsumformung und Wärmebehandlung wird die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Formoberfläche wiederholten thermischen Zyklen ausgesetzt. Die hohe thermische Stabilität der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung ermöglicht es ihr, thermischer Ermüdung standzuhalten und das Auftreten von Rissen und Verformungen zu reduzieren.

### 3. **Dimensionsstabile**

Legierungen weisen bei hohen Temperaturen und mechanischer Belastung nur geringe Dimensionsänderungen auf. Dadurch wird sichergestellt, dass Form und Größe von Präzisionsformen auch nach längerem Gebrauch unverändert bleiben und die Anforderungen an eine hochpräzise Fertigung erfüllt werden.

## 2. **Anwendungsvorteile in mechanischen Verschleißteilen**

### 1. **Verlängern Sie die Lebensdauer mechanischer Komponenten.**

Die hohe Verschleißfestigkeit der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung reduziert den Verschleiß mechanischer Teile erheblich, verringert die Häufigkeit von Wartung und Austausch und verbessert die Gesamtbetriebseffizienz der Geräte.

### 2. **Ist an extreme Arbeitsbedingungen anpassbar**

und behält auch bei hohen Temperaturen, hohem Druck und in korrosiven Umgebungen ihre stabile Leistung. Sie wird häufig für wichtige verschleißfeste Teile in Bergbaumaschinen, metallurgischen Anlagen, Papiermaschinen und anderen Industriezweigen verwendet.

### 3. **Gute Verarbeitungsleistung**

Durch die Optimierung der Wärmebehandlung und des Oberflächenhärtungsprozesses kann eine hochpräzise Verarbeitung komplex geformter Teile erreicht werden, um die Designanforderungen verschiedener mechanischer Teile zu erfüllen.

## 3. **Typische Anwendungsfälle**

- **Die Kernkomponenten der Spritzgussform,**

der Formkernstab und der Formführungsstift aus einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung, verbessern die Lebensdauer und Formgenauigkeit der Form erheblich und senken die Produktionskosten.

- **Verschleißfeste Auskleidung für Bergbauausrüstungen**

Verschleißfeste Auskleidungen aus Legierungen werden für Erzbrecher und Förderanlagen verwendet, wodurch die Lebensdauer der Ausrüstung effektiv verlängert und die Produktionseffizienz verbessert wird.

- **Mechanische Hochgeschwindigkeitslagerringe**

profitieren von ihrer hohen Festigkeit und Verschleißfestigkeit. Lagerringe aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung halten der Reibung und dem Verschleiß durch Hochgeschwindigkeitsrotation stand.

## 4. **Anforderungen an den Herstellungsprozess**

- **Bei der Pulvermetallurgie mit hoher Dichte**

wird die Hochdichte-Sinter-Technologie verwendet, um die Gleichmäßigkeit und Dichte des

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materials sicherzustellen und die mechanischen Eigenschaften sowie die Verschleißfestigkeit zu verbessern.

- **Präzisionsbearbeitung und Oberflächenbehandlung**  
wird durch CNC-Schleif-, Polier- und Wärmebehandlungstechnologien eine hohe Präzision und Oberflächenqualität von Formen und verschleißfesten Teilen erreicht.
- **den Technologien zur Oberflächenverstärkung**  
zählen PVD-Beschichtung und Laserabschreckung usw., die die Oberflächenhärte und Korrosionsbeständigkeit weiter verbessern und die Lebensdauer verlängern.

## V. Entwicklungstrends

- **Technologie zur Verstärkung der Nanostruktur:**  
Nanopartikel verstärken die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung, verbessern die Verschleißfestigkeit und Zähigkeit und erzielen so einen Durchbruch bei der Leistung von Formmaterialien.
- **Grüne Fertigung und Recycling**  
fördern einen niedrigen Energieverbrauch und hocheffiziente Fertigungstechnologien, fördern das Recycling und die Wiederverwendung von Legierungsmaterialien und reduzieren die Umweltbelastung.
- **Smart Manufacturing integriert**  
intelligente Überwachung und Prozesssteuerung, um die Digitalisierung und Automatisierung der Herstellung von Formen und verschleißfesten Komponenten zu erreichen.

## VI. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hervorragenden Verschleißfestigkeit und mechanischen Festigkeit häufig in Präzisionsformen und verschleißfesten mechanischen Komponenten eingesetzt. Durch die kontinuierliche Verbesserung der Materialtechnologie und der Fertigungsprozesse wird ihre Position in der High-End-Fertigung künftig noch weiter zunehmen und die Branche zu einer effizienten, präzisen und nachhaltigen Entwicklung führen.

### 6.6 Verbundanwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der komplexen Umwelttechnik

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit ihren hervorragenden physikalischen und mechanischen Eigenschaften sowie ihrer chemischen Stabilität finden breite Anwendung in technischen Anwendungen in einer Vielzahl komplexer Umgebungen. Unter extremen Betriebsbedingungen wie hohen Temperaturen, hohem Druck, starker Strahlung und Korrosion kann ein einzelnes Material die Leistungsanforderungen oft nur schwer erfüllen. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erzielen jedoch in Kombination mit anderen Materialien multifunktionale Synergien und erhöhen so die Sicherheit und Haltbarkeit technischer Strukturen deutlich.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. Designkonzept multifunktionaler Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen verwenden üblicherweise eine Metallverbund-, Keramikverstärkungs- oder Oberflächenbeschichtungstechnologie, um die hohe Dichte, Festigkeit und Hitzebeständigkeit der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung mit den Eigenschaften anderer Materialien zu kombinieren und so ein multifunktionales Verbundsystem mit Festigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Strahlungsbeständigkeit zu bilden.

## 2. Typische Composite-Anwendungsszenarien

### 1. Verbundabschirmmaterialien für die Nuklearindustrie

bestehen aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, die mit Polymeren, Keramik oder bleihaltigen Materialien kombiniert werden, um hocheffiziente Abschirmkörper gegen Neutronen- und Gammastrahlen zu konstruieren. Dabei wird sowohl auf Gewichtskontrolle als auch auf Abschirmwirkung geachtet. Sie werden häufig in Kernreaktoren, der Strahlentherapie und der Behandlung radioaktiver Abfälle eingesetzt.

### 2. Verbundstrukturteile in korrosiven Hochtemperaturumgebungen

werden mit hochtemperaturbeständigen Keramikbeschichtungen oder Verstärkungen aus Aluminiumoxid- und Siliziumkarbidfasern sowie Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsverbundwerkstoffen kombiniert, um die Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen zu verbessern. Sie eignen sich für Schlüsselkomponenten von Gasturbinen, Hochtemperaturöfen und anderen Geräten.

### 3. Verschleißfeste Verbundkomponenten für Umgebungen mit extremer mechanischer Belastung

verwenden eine oberflächengehärtete Schicht und keramikpartikelverstärkte Verbundwerkstoffe, um die Verschleißfestigkeit und Lebensdauer von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu verbessern. Sie finden breite Anwendung in Bergbaumaschinen, metallurgischen Anlagen und im Schiffsbau.

### 4. Die Verbundschutzstruktur für Raumfahrzeuge

besteht aus einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, der sowohl eine leichte Struktur als auch eine hochfeste Schutzleistung berücksichtigt und in Schutzschilden und Trägheitsgegengewichtssystemen für Raumfahrzeuge verwendet wird.

## 3. Herstellungsprozess und technische Herausforderungen

### • Grenzflächenbindung und Spannungscoordination

Die Qualität der mehrphasigen Grenzflächenbindung in Verbundwerkstoffen wirkt sich direkt auf die Gesamtleistung aus. Es ist notwendig, die Festigkeit der Grenzflächenbindung und die Anpassung der Wärmeausdehnung durch fortschrittliche Verbindungstechnologie und Optimierung der Grenzflächentechnik zu verbessern.

### • Die kollaborative Multimaterial-Verarbeitungstechnologie

kombiniert Pulvermetallurgie, heißisostatisches Pressen, Laserauftragschweißen und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

additive Fertigung, um die Herstellung komplexer Formen und leistungsstarker Verbundstrukturen zu ermöglichen.

- **Das Performance-Gradient-Design**  
erreicht durch das materialfunktionale Gradient-Design eine effektive Kombination aus Oberflächenhärte und robuster Innenschicht und verbessert so die Schlagfestigkeit und Verschleißfestigkeit.

#### IV. Typische Branchenfälle

- **Verbundwerkstoffe zur Strahlenabschirmung in Kernkraftwerken**  
Viele Kernkraftwerke verwenden Verbundwerkstoffe auf Basis einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung, um ein optimales Gleichgewicht zwischen Abschirmwirkung und struktureller Festigkeit zu erreichen.
- **Die Schutzschicht von Hochtemperatur-Gasturbinenschaufeln**  
besteht aus einer Keramikbeschichtung und einer Matrix aus einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung, um die Widerstandsfähigkeit der Schaufeln gegen Hochtemperaturkorrosion und Verschleiß zu verbessern.
- **Im Schiffsbau werden korrosionsbeständige und verschleißfeste Verbundkomponenten**  
in Schiffspumpen, Ventilen und Plattformstrukturen eingesetzt, wodurch deren Lebensdauer erheblich verlängert wird.

#### V. Zukünftige Entwicklungstrends

- **Das intelligente Verbundwerkstoffsystem**  
entwickelt intelligente Verbundwerkstoffe aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit Selbstreparatur- und Sensorüberwachungsfunktionen, um die Sicherheit von technischen Strukturen zu verbessern.
- **Grüne Fertigung und recycelbare Verbundwerkstoffe**  
fördern umweltfreundliche Fertigungstechnologien, erhöhen die Materialrecyclingraten und erfüllen die Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung.
- **Das leistungsstarke, multifunktionale integrierte Strukturdesign**  
vereint Struktur, Funktion und Umweltpassungsfähigkeit, um ein intelligentes Verbundmaterial aus einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung zu schaffen, das für extreme Arbeitsbedingungen geeignet ist.

#### VI. Zusammenfassung

Die kombinierte Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der komplexen Umwelttechnik hat deren Funktionalität und Anwendungsbereich erheblich erweitert. Durch Materialmischung und Multiprozessintegration erfüllen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen nicht nur die Leistungsanforderungen extremer Arbeitsbedingungen, sondern bieten auch vielfältige Lösungen für den Ingenieurbereich und fördern so Innovation und die Weiterentwicklung verwandter Industrietechnologien.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 7 Standardsystem und Konformitätsanforderungen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 7.1 Zusammenfassung der chinesischen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungssorten und Industriestandards (GB/YS)

Als Hochleistungsmetallwerkstoff verfügt die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung in China über ein breites Anwendungsspektrum und einen breiten regulatorischen Rahmen. Um die Produktion zu regulieren, die Produktqualität sicherzustellen und die gesunde Entwicklung der Branche zu fördern, haben Regierung und Industrie eine Reihe relevanter Normen formuliert, die Legierungsqualitäten, Zusammensetzung, Leistung und Prüfmethode klar definieren.

#### 1. Hauptmarkensystem der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung in China

Die Güteklassen der chinesischen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen basieren hauptsächlich auf Zusammensetzung und Leistung, kombiniert mit den Benennungsregeln der nationalen Normen (GB) und Industrienormen (YS), darunter hauptsächlich:

- **Legierung mit hoher Dichte** : basierend auf Wolfram (W) und Molybdän (Mo) mit hohem Gehalt, mit Nickel (Ni) und Eisen (Fe) als Bindemetalle. Die Sorten werden meist nach dem Wolframgehalt und den wichtigsten Leistungsindikatoren benannt, z. B. WMoNiFe-90, WMoNiFe-95 usw.
- **Spezielle Funktionslegierungssorten** : Spezielle Sorten sind für verschiedene Anwendungsbereiche (wie Hochtemperaturbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verschleißfestigkeit) mit klaren Zusammensetzungsanpassungen und Leistungsindikatoren konzipiert.

## II. Übersicht über die wichtigsten nationalen Normen (GB)

Chinas nationale Normen decken die Rohstoffe, die Zusammensetzungskontrolle, die mechanischen und chemischen Eigenschaften sowie die Prüfmethode von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ab. Zu den repräsentativen Normen gehören:

- **In den Allgemeinen Technischen Bedingungen GB/T XXXX-XXXX für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**  
sind der chemische Zusammensetzungsbereich, die mechanischen Eigenschaften, die Maßtoleranzen und die Anforderungen an die Oberflächenqualität der Legierungen festgelegt.
- **Die GB/T XXXX-XXXX-Prozessspezifikation für die Pulvermetallurgie von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**  
legt Prozesskontrollstandards für die Pulveraufbereitung sowie Press- und Sinterprozesse fest.
- **GB/T XXXX-XXXX Zu den Leistungstestmethoden für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**  
gehören die Beobachtung der Mikrostruktur, Dichteprüfung, Härteprüfung und Prüfmethode für mechanische Eigenschaften.

## 3. Unterstützung nach Industriestandard (YS)

- Industriestandards werden hauptsächlich von den entsprechenden Abteilungen wie Metallurgie, Werkstoff- und Rüstungsindustrie formuliert und bieten detailliertere Spezifikationen für bestimmte Verwendungszwecke und technische Anforderungen, um die Qualität und Sicherheit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Schlüsselbereichen zu gewährleisten.
- Beispielsweise eignen sich **die technischen Anforderungen der Hochleistungslegierung YS/T XXXX-XXXX aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen** für anspruchsvolle Bereiche wie die Luft- und Raumfahrt und die Nuklearindustrie.

## IV. Rolle und Umsetzung des Normungssystems

- **Garantieren Sie die Produktqualität**  
durch ein einheitliches Marken- und Leistungsindexsystem, um Konsistenz und Austauschbarkeit von Produkten verschiedener Hersteller zu erreichen.
- **Fördern Sie Standards für die industrielle Modernisierung**  
, um die standardisierte Anwendung neuer Materialien und neuer Prozesse zu fördern und den industriellen technologischen Fortschritt und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt zu verbessern.
- **Unterstützen Sie die Exporte, um sie an internationale Standards anzupassen**  
, nationale Standards mit internationalen Standards in Einklang zu bringen und die

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

internationale Anerkennung inländischer Produkte aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu verbessern.

## 5. Entwicklungstrend der Standardisierung

### • Verfeinerung und Verbesserung des Standardsystems:

Mit der Entwicklung der Technologie werden stärker segmentierte Anwendungsstandards und Testmethoden eingeführt, um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden.

### • Standards für umweltfreundliche Produktion und Umweltschutz

legen Wert auf die Festlegung von Standards für den Umweltschutz im Produktionsprozess, das Materialrecycling und die nachhaltige Nutzung.

### • Standards für die Unterstützung intelligenter Fertigung

fördern die Etablierung intelligenter Produktions-, Online-Qualitätsüberwachungs- und digitaler Managementstandards.

## VI. Zusammenfassung

Das chinesische Standardsystem für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen umfasst Materialqualitäten, Prozessspezifikationen, Leistungsprüfungen und weitere Aspekte und bietet der Branche eine solide technische Grundlage. Mit dem technologischen Fortschritt und der steigenden Marktnachfrage wird das Standardsystem kontinuierlich verbessert und unterstützt so die gesunde und nachhaltige Entwicklung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie.

## 7.2 Spezifikationen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in ASTM/MIL-Standards

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen finden aufgrund ihrer hohen Dichte, Festigkeit und hervorragenden Gesamtleistung breite Anwendung in Schlüsselsektoren wie der Luft- und Raumfahrt, dem Militär und der Kernenergie. Um die Zuverlässigkeit und Sicherheit dieser Anwendungen zu gewährleisten, haben die USA mehrere relevante Normen festgelegt, vor allem ASTM (American Society for Testing and Materials) und MIL (Military Standards). Diese Normen beschreiben die Materialanforderungen, Prüfmethode und Qualitätskontrollprozesse für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

### 1. ASTM-Standardsystem

Als international renommierte Organisation für Werkstoffnormen hat ASTM Normen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen veröffentlicht, die die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften, den Herstellungsprozess und die Prüfmethode der Legierungen abdecken. Zu den häufig verwendeten Normen gehören:

- **ASTM B777** – Technische Spezifikation für schwere Legierungsstäbe auf Wolframbasis definiert den chemischen Zusammensetzungsbereich, die mechanischen Eigenschaften (z. B. Zugfestigkeit, Härte) und Maßtoleranzen für hochdichte Legierungen wie Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ASTM E8/E8M** – Zugprüfverfahren für metallische Werkstoffe  
legt Standardverfahren für Zugprüfungen fest und ist auf die Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen anwendbar.
- **ASTM E18** – Härteprüfnorm, die die Härtemessverfahren Rockwell, Vickers und Brinell abdeckt und eine genaue Bestimmung der Härte von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen gewährleistet.
- **ASTM E112** – Evaluation of Metal Microstructures  
bietet Methoden zur mikrostrukturellen Beobachtung und Korngrößenbestimmung zur Unterstützung der mikrostrukturellen Analyse von Legierungen.

## 2. Militärstandard MIL

Als wichtige Spezifikation für die Qualitätskontrolle militärischer Materialien legt der MIL-Standard strengere Anforderungen für die Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen fest, darunter:

- **MIL-DTL-46008** – Materialspezifikation für hochdichte Wolframlegierungen. Diese Spezifikation definiert die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften, die Wärmebehandlungsprozesse und die Prüfmethoden für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und stellt sicher, dass Militärlegierungen den Anforderungen extremer Einsatzumgebungen gerecht werden.
- **MIL-STD-810** – Umwelttechnische Überlegungen und Labortestmethoden  
– Obwohl es die Materialzusammensetzung nicht direkt einschränkt, bietet es eine Testgrundlage für die Betriebsumgebung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, wie z. B. Temperatur, Stöße, Vibration usw.
- **MIL-STD-461** – Anforderungen zur Kontrolle elektromagnetischer Interferenzen (EMI)  
spezifiziert die elektromagnetische Verträglichkeit von Komponenten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, die in militärischer Ausrüstung verwendet werden.

## 3. Vergleich der Standard-Kerninhalte

Aspekt	ASTM-Normen	MIL-Standard
<b>Geltungsbereich</b>	Wolframbasierte Legierungsmaterialien für zivile und teilweise militärische Zwecke	Speziell für militärische Hochleistungs - Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung entwickelt
<b>Kontrolle der chemischen Zusammensetzung</b>	Detaillierte Bestimmungen für die Gehaltsbereiche von Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen	Strengere Vorschriften, mit Schwerpunkt auf der Reinheit und Stabilität der Inhaltsstoffe
<b>Mechanische Eigenschaften</b>	Indikatoren wie Zugfestigkeit, Härte und Dehnung	Besonderer Fokus auf Ermüdungsbeständigkeit und Hochtemperaturleistung
<b>Testmethoden</b>	Standardisierte Zug-, Härte- und Gefügeprüfungen	Umfassender Simulationstest kombiniert mit Serviceumgebung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Qualitätsmanagement	Standardisierung	des	Schwerpunkt auf Prozesskontrolle und Zuverlässigkeit der Serviceleistung
	Produktionsprozesses und Endkontrolle	der	

#### IV. Umsetzung und Zertifizierung

- Qualitätssicherung in der Lieferkette:**  
 Hersteller von W-Mo-Ni-Fe-Legierungen müssen ein umfassendes Qualitätsmanagementsystem gemäß ASTM- und MIL-Standards einrichten, um die Konsistenz und Zuverlässigkeit ihrer Produkte zu gewährleisten.
- Prüfgeräte und Laborzertifizierung**  
 müssen mit Prüfgeräten ausgestattet sein, die den Anforderungen der Normen entsprechen, und das Labor muss eine Zertifizierung bestehen, um die Genauigkeit und Rückverfolgbarkeit der Prüfergebnisse sicherzustellen.
- Aktualisierung der Standards und technische Verbesserung**  
 Standardorganisationen überarbeiten regelmäßig relevante Spezifikationen, um den Standardisierungsgrad von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Kombination mit dem Fortschritt der Materialtechnologie und den Anwendungsanforderungen zu verbessern.

#### V. Entwicklungstrends

- Internationale Standards integrieren**  
 ASTM- und MIL-Standards werden schrittweise mit internationalen Standards wie ISO verknüpft, um die Standardisierung und gegenseitige Anerkennung der globalen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie zu fördern.
- Leistungsorientierte Standard-Upgrades**  
 haben sich von der traditionellen Zusammensetzung und Größenkontrolle hin zu funktionaler Leistung, Lebensdauer und Anpassungsfähigkeit an die Umwelt verlagert.
- Intelligente Fertigung und digitales Qualitätsmanagement**  
 führen digitale Erkennungstechnologien und Big-Data-Analysen ein, um eine Echtzeit-Qualitätsüberwachung und vorausschauende Wartung zu erreichen.

#### VI. Zusammenfassung

ASTM- und MIL-Standards bieten systematische Spezifikationen für Design, Produktion und Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und gewährleisten die Sicherheit und Stabilität der Materialien in kritischen Anwendungen. Mit dem technologischen Fortschritt werden die relevanten Standards kontinuierlich weiterentwickelt, was kontinuierliche Innovationen und Verbesserungen in der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie vorantreibt.

#### 7.3 EU/ISO-Normen für Werkstoffanforderungen an Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Als wichtiger Hochleistungswerkstoff unterliegen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weltweit strengen Qualitäts- und Sicherheitsstandards, insbesondere in den EU-Mitgliedsstaaten und der Internationalen Organisation für Normung (ISO). Diese EU- und ISO-Normen decken nicht nur die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften ab, sondern auch Umweltschutz, Materialicherheit und nachhaltige Herstellung. So gewährleisten sie die Konformität und Wettbewerbsfähigkeit der Legierung auf dem internationalen Markt.

## 1. EU-Standardrahmen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Die EU reguliert Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsmaterialien durch zahlreiche Verordnungen und Standardsysteme, deren Kerninhalte Folgendes umfassen:

- **Normen**  
liefern technische Spezifikationen für die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften und die Maßtoleranzen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. Beispielsweise befasst sich EN 12502-1 mit der Qualitätskontrolle von hochdichten Legierungen auf Wolframbasis.
- **REACH-Verordnung (Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe)**  
Die REACH-Verordnung verpflichtet Hersteller und Lieferanten von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, alle chemischen Substanzen in ihren Produkten zu registrieren, zu bewerten und zu melden, gefährliche Substanzen zu kontrollieren und sicherzustellen, dass die Materialien die Umwelt- und Sicherheitsanforderungen erfüllen.
- **Die RoHS-Richtlinie (Restriction of Hazardous Substances)**  
beschränkt die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe wie Blei, Quecksilber und Cadmium in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und verwandten elektronischen Produkten und fördert die Verwendung grüner und umweltfreundlicher Materialien.
- **Konformität mit der CE-Kennzeichnung:**  
Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen müssen als Hauptkomponentenmaterial bei Verwendung in mechanischen Geräten und elektronischen Produkten den CE-Zertifizierungsstandards entsprechen, um sicherzustellen, dass die Produkte den Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltauflagen der EU entsprechen.

## 2. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung im ISO International Standard System

Die ISO, eine weltweit anerkannte internationale Normungsorganisation, hat zahlreiche Normen zu Materialeigenschaften, Prüfmethoden und Qualitätsmanagement veröffentlicht. Zu den wichtigsten Punkten zählen:

- **ISO 9001 – Qualitätsmanagementsystem**  
Hersteller von W-Mo-Ni-Fe-Legierungen müssen ein Qualitätsmanagementsystem einrichten, das ISO 9001 entspricht, um die Standardisierung von Produktdesign, Herstellung und Service zu gewährleisten.
- **ISO 4948 – Klassifizierung metallischer Werkstoffe,**  
einschließlich der Klassifizierungsprinzipien für Wolfram- und Molybdänlegierungen,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bietet einen international harmonisierten Standard für die Nomenklatur und Klassifizierung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

- **ISO 6507/ISO 6508** – Härteprüfnormen  
legen Prüfverfahren für die Vickers- und Brinellhärte fest und sind auf die Beurteilung der Härteleistung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen anwendbar.
- **ISO 6892** – Zugprüfverfahren  
werden verwendet, um die Zugeigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu bestimmen und sicherzustellen, dass das Material die mechanischen Konstruktionsspezifikationen erfüllt.
- **ISO/TR 16266** – Technischer Bericht zum Umweltmanagement seltener Metalle, der sich auf die Umweltverträglichkeitsprüfung und das Umweltmanagement von Wolfram und seinen Legierungen konzentriert und eine umweltfreundliche Herstellung fördert.

### 3. Umfassende Anforderungen der EU/ISO-Normen

- **Die Zusammensetzungs- und Leistungsanforderungen**  
legen den Gehaltsbereich und die Verunreinigungsgrenzen von Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen klar fest, um eine stabile und zuverlässige Materialleistung zu gewährleisten.
- **der Einhaltung von Umweltvorschriften**  
steht die Einschränkung und Ersetzung gefährlicher Stoffe in Materialien im Vordergrund, die Einhaltung der EU-Umweltvorschriften und die Unterstützung nachhaltiger Entwicklungsstrategien.
- **Sicherheits- und Gesundheitsstandards**  
zielen auf Sicherheitsvorkehrungen während der Herstellungs- und Anwendungsverfahren ab, um die Gesundheit der Arbeitnehmer und die Sicherheit der Benutzer zu schützen.
- **Die Prüf- und Zertifizierungsverfahren**  
erfordern strenge Prüfungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften, zerstörungsfreie Prüfungen und eine Kontrolle des Produktionsprozesses, um die Produktqualität sicherzustellen.

### IV. Herausforderungen bei der Umsetzung und Reaktionsstrategien

- **Aufgrund der Vielfalt und der häufigen Aktualisierung der Vorschriften**  
müssen Unternehmen weiterhin die regulatorischen Entwicklungen in der EU und auf internationaler Ebene im Auge behalten und ihre Produktions- und Managementsysteme rechtzeitig anpassen.
- **Durch die Abwägung technischer Standards und Umweltschutzanforderungen**  
bei gleichzeitiger Gewährleistung der Materialleistung wird die Entwicklung und Anwendung umweltfreundlicher Technologien gefördert.
- **Verbinden Sie sich mit dem internationalen Zertifizierungssystem**  
und stärken Sie die Zusammenarbeit mit internationalen Zertifizierungsstellen, um eine gegenseitige Anerkennung von Standards zu erreichen und den Exporthandel zu fördern.

### V. Zukünftige Entwicklungstrends

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Die Standardisierung grüner Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsmaterialien**  
stärkt die Formulierung von Standards für umweltfreundliche Materialien und fördert kohlenstoffarme Fertigungs- und Recyclingtechnologien.
- **Intelligente Fertigungs- und digitale Qualitätsmanagementstandards**  
führen Big Data- und künstliche Intelligenztechnologien ein, um eine intelligente Überwachung und Optimierung der Produktion von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu erreichen.
- **Die Integration und koordinierte Entwicklung globaler Standards**  
fördert die Koordination und Konsistenz von ISO-, EN-, ASTM- und anderen regionalen Standards und fördert die einheitlichen Standards der globalen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie.

#### **Zusammenfassung:**

Die EU- und ISO-Normen regeln umfassend die Herstellung und Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und decken die Anforderungen für deren gesamten Lebenszyklus ab – von der chemischen Zusammensetzung bis zur Umweltverträglichkeit, von den mechanischen Eigenschaften bis zum Qualitätsmanagement. Unternehmen müssen internationale regulatorische Anforderungen berücksichtigen und ihre Technologie und ihr Management kontinuierlich verbessern, um eine qualitativ hochwertige, umweltfreundliche und nachhaltige Entwicklung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie zu fördern.

#### **7.4 Umweltvorschriften und Materialsicherheitszertifizierung (RoHS/REACH) für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

Angesichts der weltweiten Bedeutung von Umweltschutz und nachhaltiger Entwicklung müssen bei der Herstellung und Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen als strategisch wichtigem Werkstoff eine Reihe internationaler Umweltvorschriften und Zertifizierungsanforderungen für Materialsicherheit strikt eingehalten werden, insbesondere die RoHS- und REACH-Verordnungen der EU. Diese Vorschriften betreffen nicht nur die Rohstoffbeschaffung, die Produktionsprozesse und das Produktdesign von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, sondern auch deren internationalen Handel und Marktzugang.

##### **1. RoHS-Richtlinie (Restriction of Hazardous Substances)**

- **zielt darauf ab**  
, die Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten einzuschränken und so Schäden an Umwelt und Gesundheit durch Blei, Quecksilber, Cadmium und polybromierte Biphenyle (PBDP) zu verhindern. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, ein Schlüsselmaterial in Branchen wie der Elektronik und der Luftfahrt, müssen die RoHS-Beschränkungen einhalten.
- **Bei den relevanten beschränkten Substanzen in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

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

liegt der Schwerpunkt auf den Gehaltsgrenzen von Blei (Pb), Cadmium (Cd), Quecksilber (Hg), sechswertigem Chrom (Cr6+), polybromierten Biphenylen (PBB) und polybromierten Diphenylethern (PBDE). Dabei ist zu beachten, dass der Gehalt in Produkten und Materialien die angegebenen Grenzwerte (normalerweise 0,1 % oder 0,01 %) nicht überschreiten darf.

- **Compliance-Strategie:**

Hersteller von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen müssen die Beschaffung von Rohstoffen streng kontrollieren, die Verwendung von Rohstoffen mit eingeschränkten Substanzen vermeiden und ein umfassendes System zur Verfolgung der Lieferkette und Prüfung der Inhaltsstoffe einrichten, um sicherzustellen, dass ihre Produkte den RoHS-Anforderungen entsprechen.

- **Zertifizierungsprozess und Kennzeichnung:**

Unternehmen müssen die RoHS-Konformität ihrer Produkte durch eine unabhängige Prüfstelle überprüfen lassen, eine Konformitätserklärung einholen und entsprechende Kennzeichnungen auf ihren Produkten und Verpackungen anbringen, um die Anforderungen für den Marktzugang in der EU zu erfüllen.

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

- REACH wurde 2007 in der EU offiziell eingeführt und stellt die bislang umfassendste und strengste Verordnung zum Chemikalienmanagement dar. Sie schreibt vor, dass alle in der EU hergestellten oder in den Markt importierten chemischen Substanzen registriert, bewertet und zugelassen werden müssen, um ihre sichere Verwendung zu gewährleisten.

- **Auswirkungen auf Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen:**

Wenn die Metallelemente und Legierungszusätze in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der REACH-Verordnung aufgeführt sind, müssen Unternehmen eine entsprechende Registrierung und Bewertung durchführen. Insbesondere bei metallischen Werkstoffen in Pulverform müssen die potenziellen Risiken für Umwelt und Gesundheit aufgrund der Partikelgröße und Oberflächenbehandlung besonders beachtet werden.

- **Anforderungen an Sicherheitsdatenblätter (MSDS):**

Produkte aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen müssen mit einem Sicherheitsdatenblatt ausgestattet sein, das den REACH-Anforderungen entspricht und die Inhaltsstoffe, Gefahreninformationen, den sicheren Betrieb und Notfallmaßnahmen detailliert beschreibt, um das Informationsrecht der Benutzer und der Lieferkette zu schützen.

- **Verantwortungsvolle Hersteller, Importeure und nachgeschaltete Anwender in der Lieferkette**

müssen zusammenarbeiten, um Informationstransparenz und die Umsetzung der Verantwortung sicherzustellen und ein umweltfreundliches Lieferkettenmanagement zu fördern.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Weitere relevante Umweltzertifizierungen und -vorschriften

- **RoHS 3 und nachfolgende Aktualisierungen**

Die RoHS-Richtlinie wird ständig aktualisiert und um eine Liste eingeschränkt verwendbarer Substanzen ergänzt. Unternehmen, die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen herstellen, müssen eine dynamische Überwachung aufrechterhalten und umgehend auf Änderungen der Vorschriften reagieren.

- **Die internationalen Umweltvorschriften nähern sich einander an.**

Kalifornien, Südkorea, Japan, China und andere Länder haben ebenfalls ähnliche Vorschriften wie RoHS/REACH eingeführt und fördern damit die Internationalisierung der Umweltschutzstandards in der globalen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie.

- **Grüne Fertigung und Kreislaufwirtschaft**

Unternehmen aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen setzen schrittweise auf grünes Design, Energieeinsparung und Emissionsreduzierung sowie Materialrecycling, um der globalen Strategie für nachhaltige Entwicklung gerecht zu werden.

### IV. Herausforderungen bei der Umsetzung und Gegenmaßnahmen

- **Komplexe und sich ständig ändernde Vorschriften**

erfordern die Einrichtung eines speziellen Teams zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften, um die regulatorischen Entwicklungen zu verfolgen und das Produktdesign und das Lieferkettenmanagement anzupassen.

- **Test- und Zertifizierungskosten:**

Stärken Sie die internen Testkapazitäten, arbeiten Sie mit Zertifizierungsstellen zusammen, senken Sie die Compliance-Kosten und verbessern Sie die Testeffizienz.

- **Technologische Innovationen treiben**

die Forschung und Entwicklung von Legierungsformeln und Produktionsprozessen mit geringer Umweltbelastung voran und fördern eine unbedenkliche Herstellung.

### V. Zusammenfassung

Umweltvorschriften und Material sicherheitszertifizierungen sind zu wesentlichen Bestandteilen der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie geworden. Durch die vollständige Einhaltung von Vorschriften wie RoHS und REACH sowie die Verbesserung des Sicherheitsdatenmanagements und der umweltfreundlichen Fertigungssysteme steigern Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsunternehmen nicht nur ihre Wettbewerbsfähigkeit, sondern tragen auch zum globalen Umweltschutz bei und fördern eine qualitativ hochwertige, nachhaltige Entwicklung der Branche.

### 7.5 Qualitätssystem für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der Luftfahrt, Nukleartechnik und Medizin (AS9100 / ISO13485)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen gelten als strategischer Schlüsselwerkstoff und werden zunehmend in anspruchsvollen Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie und der Medizintechnik eingesetzt. Diese Bereiche stellen extrem hohe Anforderungen an Materialqualität, Sicherheit und Rückverfolgbarkeit. Daher ist die Implementierung entsprechender Qualitätsmanagementsysteme die Grundlage für die Gewährleistung der Leistung und Zuverlässigkeit von Produkten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

## 1. Anwendung des Qualitätsmanagementsystems AS9100 im Luft- und Raumfahrtbereich

- **AS9100 – Einführung**

AS9100 ist ein speziell für die Luft- und Raumfahrtindustrie entwickelter Standard für Qualitätsmanagementsysteme, der auf ISO 9001 basiert. Er verschärft die Anforderungen an Sicherheit, Einhaltung gesetzlicher Vorschriften, Risikomanagement und kontinuierliche Verbesserung.

- **Anwendungsmöglichkeiten von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen:**

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden in wichtigen Luft- und Raumfahrtanwendungen wie Trägheitsgewichten, elastischen Komponenten und Hochtemperatur-Strukturteilen eingesetzt. Das AS9100-System stellt sicher, dass die Materialversorgung strengen technischen Spezifikationen und Herstellungsprozessen entspricht.

- **Systemanforderungen**

- **Risikomanagement** : Identifizieren und kontrollieren Sie Risiken **in** Bezug auf die Materialeistung und die Lieferkette.
- **Designkontrolle** : Unterstützt **die** standardisierte Verwaltung von Legierungsformeln und -prozessen.
- **Prozessüberwachung** : Implementieren Sie eine Qualitätskontrolle während des gesamten Prozesses, einschließlich Rohstoffen, Verarbeitung, Prüfung und Lieferung.
- **Supply Chain Management** : Gewährleisten Sie die Qualitätssicherung des Lieferanten und die Einhaltung der Branchenvorschriften.
- **Rückverfolgbarkeit** : Erreichen Sie eine vollständige Prozessverfolgung von Chargen und Anwendungskomponenten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

## II. Qualitätsmanagement und Sicherheitsstandards im Kernenergiesektor

- **Merkmale der Kernenergiebranche:**

Im Bereich der Kernenergie werden extrem hohe Anforderungen an die Strahlungsstabilität, Hochtemperaturbeständigkeit sowie Sicherheit und Zuverlässigkeit der Materialien gestellt. Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden hauptsächlich in Neutronenabsorptionsstrukturen und Abschirmvorrichtungen verwendet.

- **Geltende Normen**

- **ISO 19443** : Spezifische Anforderungen an das Qualitätsmanagement in der Nuklearindustrie.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **NQA -1** : Der US-amerikanische Qualitätssicherungsstandard für die Nuklearindustrie, der Design, Beschaffung, Herstellung und Inspektion abdeckt.
- **ASME Nuclear Equipment Code** : Standardisiert die Konstruktion und Herstellung von Geräten und Materialien für Kernkraftwerke.
- **Wichtige Punkte der Implementierung eines Qualitätssystems**
  - **Überprüfung der Materialeistung** : Strenge Prüfung der Strahlungsstabilität und Korrosionsbeständigkeit.
  - **Sicherheitsmanagement** : Sicherstellen, dass Materialien und Produkte den Vorschriften **zur** nuklearen Sicherheit entsprechen.
  - **Dokumentenkontrolle und Aufzeichnungsführung** : Erfüllen Sie die Anforderungen der Kernenergiebranche an langfristige Rückverfolgbarkeit und Auditierung.

### 3. ISO 13485 Qualitätsmanagementsystem im medizinischen Bereich

- **Einführung in ISO 13485**

ISO 13485 ist ein Qualitätsmanagementsystemstandard für die Medizinproduktebranche, der den Schwerpunkt auf Risikomanagement, Designkontrolle und Einhaltung gesetzlicher Vorschriften legt, um die Sicherheit und Wirksamkeit medizinischer Materialien und Geräte zu gewährleisten.
- **Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**

werden in der Medizin in Strahlentherapiegeräten, medizinischen Abschirmmaterialien und hochdichten Strukturkomponenten eingesetzt. Die Materialien müssen Biokompatibilität und strenge Qualitätsstandards erfüllen.
- **Kernanforderungen des Qualitätssystems**
  - **Design- und Entwicklungskontrolle** : Stellen Sie sicher, dass die Materialzusammensetzung und -leistung den Anforderungen für medizinische Geräte entsprechen.
  - **Risikomanagement und klinische Bewertung** : Bewerten Sie die Materialsicherheit und die Anwendungsrisiken.
  - **Lieferketten- und Beschaffungsmanagement** : Sicherstellung der Konformität von Rohstoffen und Halbfertigprodukten.
  - **Verifizierung und Validierung** : Stellen Sie durch strenge Tests die Produktqualität und stabile Leistung sicher.

### 4. Integration branchenübergreifender Qualitätsmanagementsysteme

- **Strategie zur Systemintegration:**

Unternehmen, die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen herstellen, müssen in der Regel mehrere Industriestandards gleichzeitig erfüllen. Durch die Integration von AS9100, ISO 13485 und Standards der Kernenergieindustrie kann eine einheitliche Plattform für das Qualitätsmanagement geschaffen werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Kontinuierliche Verbesserung und Innovation**  
nutzen das Qualitätssystem, um die Optimierung des Produktionsprozesses voranzutreiben, technologische Innovationen zu fördern und die Materialleistung zu verbessern.
- **Das Informationsmanagement**  
führt Informationssysteme wie ERP und MES ein, um die digitale Verwaltung von Produktdaten, Prozesssteuerung und Qualitätsrückverfolgbarkeit zu realisieren.

## 5. Die Rolle des Qualitätssystems bei der Förderung der Entwicklung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie

- **Steigern Sie die Wettbewerbsfähigkeit Ihrer Produkte.**  
Strenge Qualitätskontrollen und Zertifizierungen stärken das Marktvertrauen und unterstützen die Entwicklung hochwertiger Anwendungsbereiche.
- **Sorgen Sie für Sicherheit und Konformität,**  
um Sicherheits- und behördliche Anforderungen in Hochrisikobereichen wie der Luftfahrt, der Kernenergie und der Medizin zu erfüllen und die Nutzungsrisiken zu reduzieren.
- **Fördern Sie den internationalen Handel**  
durch international anerkannte Qualitätszertifizierungen, vereinfachen Sie Exportprozesse und erweitern Sie globale Märkte.

## VI. Zusammenfassung

Die Luftfahrt-, Kernenergie- und Medizinbranche stellt extrem hohe Anforderungen an das Qualitätsmanagement von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. AS9100, ISO 13485 und verwandte Qualitätsstandards für die Kernenergie bieten der Branche einen systematischen Managementrahmen. Die umfassende Implementierung und Optimierung dieser Qualitätssysteme wird dazu beitragen, die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie zu einer qualitativ hochwertigen, standardisierten und internationalen Entwicklung zu führen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Kapitel 8 Spezifikationen für Verpackung, Lagerung, Transport und Verwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 8.1 Verpackungs- und Transportschutzdesign der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Da Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ein hochdichtes, leistungsstarkes und strategisch wichtiges Material sind, sind Verpackung und Transport entscheidend für die Gewährleistung von Produktqualität, stabiler Leistung und sicherer Lieferung. Richtig konzipierte Verpackungslösungen und Transportschutzmaßnahmen können physische Schäden, Umwelteinflüsse und chemische Korrosion wirksam verhindern und so die Materialintegrität und -leistung gewährleisten.

#### 1. Grundlegende Anforderungen an Verpackungen aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

##### 1. zur Schutzintegrität

sollte sichergestellt werden, dass Legierungsstäbe oder -teile während der Handhabung und des Transports vor mechanischen Stößen, Vibrationen und Druck geschützt sind und Verformungen, Brüche oder Oberflächenschäden vermieden werden.

##### 2. Molybdän

-Nickel-Eisen-Legierungen weisen eine ausgezeichnete chemische Stabilität auf, können jedoch bei längerem Kontakt mit Feuchtigkeit oder korrosiven Gasen oxidieren oder korrodieren. Die Verpackung muss versiegelt oder feuchtigkeitsdicht sein, um das Eindringen von Wasserdampf und korrosiven Medien zu verhindern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Angemessene Größe und Stapelung

Der Verpackungsplan sollte entsprechend der Größe, des Gewichts und der Form der Legierungsprodukte angemessen gestaltet sein, um Spannungskonzentrationen oder Verformungen durch unsachgemäße Stapelung zu vermeiden.

### 4. Klare Kennzeichnung und Identifizierung:

Produktmodell, Chargennummer, Gewicht und ggf. Gefahrstoffinformationen sollten auf der Außenseite der Verpackung vermerkt sein, um eine schnelle Identifizierung und Rückverfolgbarkeit während Transport und Lagerung zu gewährleisten.

## 2. Gängige Verpackungsformen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 1. Holzkistenverpackung

- Verwenden Sie verstärkte Holzkisten, die innen mit stoßdämpfenden Materialien (wie Schaumstoff, EPE-Schwamm) ausgestattet sind, um die Produktoberfläche zu schützen.
- Geeignet für mittelgroße und große Legierungsstangen und Fertigprodukte, leicht maschinell zu handhaben.

### 2. Metalltablets und -gestelle

- Verwenden Sie bei großen Mengen oder großformatigen Produkten Paletten mit Gurten oder Antirutschmatten, um die Transportstabilität zu gewährleisten.

### 3. Kunststoffolie und Vakuumverpackung

- Hochreine oder leicht oxidierende Produkte werden in Vakuum- oder Stickstoffverpackungen verpackt, um ihre Haltbarkeit deutlich zu verlängern.
- Eine Verpackung aus Kunststoffolie in Kombination mit Trockenmittel verhindert wirksam das Eindringen von Feuchtigkeit.

### 4. Verbundverpackungslösungen

- Bei High-End-Produkten wird ein mehrschichtiges Schutzsystem verwendet, das eine innere Pufferschicht, einen Vakuumbbeutel und eine äußere Schachtel kombiniert, um die umfassende Schutzleistung zu verbessern.

## 3. Wichtige Punkte der Transportschutzgestaltung

### 1. Antivibrations- und stoßfestes Design

- Verwenden Sie Polstermaterialien (Schaum, Gummipolster, Luftkissen usw.), um die Auswirkungen von Transportvibrationen auf die Legierungsstruktur zu reduzieren.
- Entwerfen Sie stoßfeste Vorrichtungen, um zu verhindern, dass sich Objekte bewegen und Kollisionen verursachen.

### 2. Umweltanpassungsdesign

- Wählen Sie je nach Transportweg und klimatischen Bedingungen Verpackungsmaterialien, die wasserdicht, feuchtigkeitsbeständig und salznebelbeständig sind.
- Installieren Sie Luftentfeuchter in Versandcontainern, um die Luftfeuchtigkeit zu kontrollieren.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Einhaltung der Vorschriften für den Transport gefährlicher Güter

- Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulver kann bei bestimmten Partikelgrößen und -zuständen als Gefahrgut eingestuft werden und muss gemäß internationalen Transportvorschriften (wie IATA und IMDG) deklariert und geschützt werden.
- Die Verpackung muss den Anforderungen an Feuerfestigkeit, Explosionsschutz und Auslaufsicherheit entsprechen.

### 4. Qualitätskontrolle und Inspektion der Verpackung

- **die Qualität der Verpackungsmaterialien**  
den Transportanforderungen entspricht, sollten diese regelmäßig auf Druckfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Dichtungseigenschaften geprüft werden.
- **Überwachung des Verpackungsprozesses:**  
Formulieren Sie Standardarbeitsanweisungen für die Verpackung, überwachen Sie die Verpackungsqualität streng und verhindern Sie menschliche Bedienungsfehler.
- **Werksinspektion**  
Nach Abschluss der Verpackung sollten eine optische Prüfung und ein Versiegelungstest durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Verpackung intakt ist.

### 5. Fallstudie: Design einer Exportverpackung für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

- Ein Hersteller von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen verwendet eine mehrschichtige Schutzverpackungslösung, um die Anforderungen anspruchsvoller Kunden im Ausland zu erfüllen.
- Die Produkte werden zunächst in feuchtigkeitsdichten Vakuumbeuteln verpackt, dann in schaumstoffgefüllte Polsterboxen gelegt und schließlich in verstärkte Holzkisten mit stoßfesten Riemen und klaren Etiketten an der Außenseite gelegt.
- Nach Tests des Transports über lange See- und Landwege weisen die Produkte keine Oberflächenschäden oder Leistungsveränderungen auf und die Kundenzufriedenheit ist hoch.

### VI. Fazit:

Wissenschaftlich fundierte Verpackungen und Transportschutzkonzepte sichern nicht nur die Qualität und Leistungsfähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsprodukten, sondern steigern auch die Kundenzufriedenheit und die Wettbewerbsfähigkeit. Mit dem Trend zu vielfältigeren und hochwertigeren Materialien wird sich auch die Verpackungstechnologie in Zukunft hin zu intelligenten und umweltfreundlichen Methoden entwickeln und so die nachhaltige Entwicklung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie nachhaltig unterstützen.

### 8.2 Lagerbedingungen und Korrosionsschutzanforderungen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aufgrund ihrer hohen Dichte, hohen Leistungsfähigkeit und komplexen Zusammensetzung erfordern Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen während der Lagerung strenge Umweltkontrollen, um ihre physikalischen Eigenschaften und ihre chemische Stabilität zu schützen. Richtige Lagerbedingungen und wissenschaftliche Korrosionsschutzmaßnahmen sind entscheidend für die Gewährleistung der Legierungsqualität und eine längere Produktlebensdauer.

## 1. Grundlegende Anforderungen an die Speicherumgebung

### 1. Temperaturkontrolle

- Die Lagerumgebung sollte eine konstante und geeignete Temperatur aufweisen, normalerweise zwischen 5 °C und 35 °C, um drastische Temperaturschwankungen zu vermeiden, die zu Änderungen der inneren Spannung der Legierung führen können.
- Vermeiden Sie Umgebungen mit hohen Temperaturen, um nachteilige Veränderungen der inneren Zusammensetzung oder Mikrostruktur der Legierung zu verhindern.

### 2. Feuchtigkeitskontrolle

- Die relative Luftfeuchtigkeit sollte zwischen 40 % und 60 % liegen, um eine durch zu hohe Luftfeuchtigkeit verursachte Oberflächenoxidation und Korrosion zu verhindern.
- Verwenden Sie Trockenmittel oder Entfeuchtungsgeräte, um die Umgebung trocken zu halten und Kondensation zu verhindern.

### 3. Sauberkeit und Belüftung

- Der Lagerbereich sollte sauber und frei von Staub, Öl und korrosiven Gasen gehalten werden.
- Eine gute Luftzirkulation trägt dazu bei, Feuchtigkeitsansammlungen und das Korrosionsrisiko zu verringern.

## 2. Korrosionsschutzmaßnahmen und technische Mittel

### 1. Oberflächenschutzbehandlung

- Die Oberfläche der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung wird passiviert, um einen stabilen Oxidfilm zu bilden und so die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern.
- Bedecken Sie die Oberfläche mit einer Schutzschicht, beispielsweise einem rosthemmenden Öl, Industriewachs oder einer speziellen Korrosionsschutzfarbe, um Feuchtigkeit und Sauerstoff fernzuhalten.

### 2. Korrosionsschutzdesign der Verpackung

- Verwenden Sie feuchtigkeitsdichte, versiegelte Verpackungen, wie Vakuumverpackungen oder mit Stickstoff gefüllte Verpackungen, um den Kontakt mit der Außenluft zu reduzieren.
- Geben Sie der Verpackung Trockenmittel oder Konservierungsmittel hinzu, um Feuchtigkeit zu absorbieren und Korrosionsreaktionen zu verhindern.

### 3. Regelmäßige Wartung und Inspektion

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Überprüfen Sie regelmäßig die Oberfläche gelagerter Legierungen und beseitigen Sie Anzeichen von Rost oder Oxidation umgehend.
- Passen Sie die Korrosionsschutzmaßnahmen den Umgebungsbedingungen an, um einen langfristigen Schutz zu gewährleisten.

### 3. Lagerbehälter und Stapelvorschriften

#### 1. Auswahl des Behältermaterials

- Um eine Korrosion des Behälters selbst und damit eine Beeinträchtigung der Legierung zu vermeiden, werden Behälter aus rostfreiem Stahl, Kunststoff oder korrosionsbeständigem Metall bevorzugt.
- Die Innenseite des Behälters sollte glatt und frei von scharfen Kanten sein, um ein Verkratzen der Legierungsoberfläche zu vermeiden.

#### 2. Stapelmethode

- Stapeln Sie richtig, um Verformungen oder Oberflächenschäden durch übermäßigen Druck zu vermeiden.
- Verwenden Sie eine Isoliermatte oder -schale, um zu verhindern, dass die Legierung in direkten Kontakt mit dem Boden oder Metalloberflächen kommt.

#### 3. Identifikations- und Partitionsverwaltung

- Kennzeichnen Sie Legierungsspezifikationen, Chargen und Lagerdaten deutlich, um die Verwaltung und Verwendung zu vereinfachen.
- Legierungen unterschiedlicher Art und Beschaffenheit werden in getrennten Bereichen gelagert, um Verwechslungen und Kreuzkontaminationen zu vermeiden.

### 4. Lagerungsempfehlungen für besondere Umgebungen

#### 1. feuchten Bereichen

- Fügen Sie feuchtigkeitsgeschützte Einrichtungen hinzu, wie etwa Klimaanlage-Entfeuchter oder geschlossene Lagerhallen.
- Um die Wasserdichtigkeit der Verpackung zu gewährleisten, ist an der Verpackung ein Dichtungsring angebracht.

#### 2. Küsten- und Salzwasserumgebung

- Verstärkte Korrosionsschutzbeschichtung durch ein mehrschichtiges Schutzsystem.
- Verkürzen Sie die Lagerzeit und geben Sie Versand und Verwendung Vorrang.

#### 3. Langzeitlagerung

- Führen Sie strengere Umweltüberwachungs- und regelmäßige Wartungsmaßnahmen durch.
- Mit Konservierungsmitteln vorbeschichtet und in einer Einrichtung mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit gelagert.

### 5. Einfluss der Lagerung auf die Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Bei unsachgemäßer Lagerung kann es leicht zu Oberflächenoxidation, Korrosion und sogar zu mikrostrukturellen Veränderungen kommen, die die mechanischen Eigenschaften und die Lebensdauer beeinträchtigen.
- Eine gute Lagerumgebung kann die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Materials effektiv erhalten und die Stabilität der nachfolgenden Verarbeitung und Anwendung gewährleisten.

## VI. Zusammenfassung

Die Lagerung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erfordert vielfältige Maßnahmen, darunter Umweltkontrolle, Korrosionsschutz, Verpackungsdesign und Wartungstests. Wissenschaftliche Lagerbedingungen und strenge Korrosionsschutzmaßnahmen können die ursprünglichen Eigenschaften der Legierung optimal erhalten, Lagerrisiken minimieren und eine solide Grundlage für die effiziente Anwendung des Materials schaffen.

## 8.3 Nationale und internationale Transportspezifikationen und Deklarationsrichtlinien für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Als wichtiger, strategischer Hochleistungswerkstoff unterliegen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen aufgrund ihrer einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften sowie potenzieller Transportrisiken strengen nationalen und internationalen Transportvorschriften und Deklarationspflichten. Die ordnungsgemäße Einhaltung der relevanten Vorschriften gewährleistet nicht nur die Transportsicherheit, sondern erfüllt auch die Anforderungen des internationalen Handels und vermeidet so rechtliche Risiken und finanzielle Verluste.

## 1. Transportklassifizierung und Risikobewertung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 1. Transportklassifizierung

- Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind in Form von Barren, Stäben oder Pulver erhältlich. Barren und Stäbe gelten im Allgemeinen als allgemeine Industrieprodukte, während pulverförmige Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen als Gefahrgut eingestuft werden können und spezielle Transportgenehmigungen erfordern.
- Die Gefahren der Pulverform liegen hauptsächlich in der Entflammbarkeit, Explosivität und Staubexplosionsgefahr, die gemäß den internationalen Normen zur Klassifizierung gefährlicher Güter bewertet werden müssen.

### 2. Risikobewertung

- Bewerten Sie mögliche physische Schäden, chemische Reaktionen und Sicherheitsrisiken anhand der Produktform, Verpackung und Transportmethoden.
- Treffen Sie je nach Risikostufe geeignete Sicherheitsvorkehrungen und Transportbedingungen.

## 2. Inländische Transportvorschriften

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. Straßentransport

- Beachten Sie die „Verordnung zum Umgang mit gefährlichen Stoffen“ und die „Verordnung zum Umgang mit gefährlichen Gütern im Straßenverkehr“.
- Für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in Pulverform ist eine Gefahrguttransportgenehmigung erforderlich und es müssen konforme Fahrzeuge und Verpackungen verwendet werden.
- Setzen Sie die Fahrzeugladegrenzen, Transportrouten und Sicherheitsbetriebsverfahren strikt um.

## 2. Schienenverkehr

- Gemäß den „Vorschriften zur Beförderung gefährlicher Güter auf der Schiene“ erfordert die Pulverform eine Gefahrgutdeklaration und eine spezielle Verpackung.
- Verbessern Sie das Sicherheitsmanagement bei Be- und Entladevorgängen, um Staubaustritt und Umweltverschmutzung zu verhindern.

## 3. Wassertransport

- Halten Sie die „Vorschriften für den Transport gefährlicher Güter auf dem Wasserweg“ ein und stellen Sie sicher, dass die Verpackungs- und Transportbedingungen den Anforderungen zum Brandschutz, Explosionsschutz und Leckageschutz entsprechen.
- Sorgen Sie für eine Ladungsverstärkung und Feuchtigkeitskontrolle, um Erosion durch Meerwasser und feuchtigkeitsbedingte Korrosion zu vermeiden.

## 4. Luftverkehr

- Führen Sie die Deklarationsverfahren gemäß den „Managementmaßnahmen für den Transport gefährlicher Güter in der Zivilluftfahrt“ durch.
- Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulver muss einer strengen Verpackungskontrolle unterzogen werden, um sicherzustellen, dass es keine Gefahr für die Flugsicherheit darstellt.

## 3. Internationale Transportvorschriften

### 1. Modellvorschriften der Vereinten Nationen für den Transport gefährlicher Güter

- Stahl- und Volllegierungsbarren werden grundsätzlich nicht als Gefahrgut eingestuft, unterliegen aber dennoch den Zoll- und Ein- und Ausfuhrbestimmungen.

### 2. Internationaler Code für die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen (IMDG-Code)

- Für den Seetransport geeignetes Gefahrgut aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung mit Vorschriften zu Verpackung, Kennzeichnung, Belüftung und Notfallmaßnahmen.
- Der Pulvertransport erfordert eine strenge Kontrolle der Verpackungsintegrität und Maßnahmen zur Staubvermeidung.

### 3. Vorschriften für Gefahrgüter der International Air Transport Association (IATA)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulver muss gemäß den Gefahrgutvorschriften klassifiziert, deklariert und verpackt werden.
- Halten Sie Beschränkungen und Embargos ein, um die Flugsicherheit zu gewährleisten.

#### 4. Übereinkommen über den internationalen Landverkehr

- Wenden Sie europäische ADR-Vorschriften, Straßentransportabkommen usw. an, um die Sicherheit und Konformität des grenzüberschreitenden Straßentransports zu gewährleisten.
- Frachtkennzeichnung und Versanddokumente müssen den örtlichen Vorschriften entsprechen.

### IV. Antragstellung und Dokumentenvorbereitung

#### 1. Gefahrguterklärung

- Beim Transport von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulver muss ein Formular zur Deklaration gefährlicher Güter vollständig ausgefüllt werden, in dem die Art des Stoffes, das Risikoniveau und die Sicherheitsmaßnahmen angegeben sind.
- Stellen Sie ein Sicherheitsdatenblatt (MSDS) und ein konformes Verpackungszertifikat bereit.

#### 2. Zollanmeldung

- Bereiten Sie eine detaillierte Handelsrechnung, Packliste, Ursprungszeugnis und andere Dokumente vor.
- Überprüfen Sie Richtlinien wie Import- und Exportbeschränkungen, Quoten und Lizenzen, um die Einhaltung sicherzustellen.

#### 3. Transportversicherung

- Es wird empfohlen, eine Frachttransportversicherung abzuschließen, um die Risiken von Schäden, Verlusten und Verzögerungen während des Transports abzudecken.

### V. Verpackungskennzeichnungen und Sicherheitsmaßnahmen

#### 1. Verpackungskennzeichnung

- Es müssen deutliche Gefahrgutschilder und Transportetiketten angebracht werden.
- Der Inhalt der Kennzeichnung sollte den Produktnamen, die Gefahrenkategorie, Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung und die Notrufnummer enthalten.

#### 2. Sicherheitsbetriebsverfahren

- Beim Transport, Be- und Entladen sowie bei der Lagerung müssen die Sicherheitsverfahren strikt eingehalten werden.
- Ausgestattet mit der notwendigen Feuerlösch- und Leckage-Notfallausrüstung und Personalschulung.

### 6. Fallanalyse

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Ein Exporteur von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulver hat detaillierte Verpackungs- und Deklarationsverfahren für den europäischen Markt entwickelt, um die Einhaltung der IMDG- und ADR-Vorschriften zu gewährleisten.
- Durch strenge Verpackungsinspektionen, Risikobewertungen und Dokumentenvorbereitungen haben wir einen unfallfreien Transport und ein gesteigertes Kundenvertrauen erreicht.

## VII. Zusammenfassung

Das Transportmanagement von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen unterliegt zahlreichen Vorschriften und Standards, insbesondere der Gefährlichkeit pulverförmiger Produkte, die besondere Aufmerksamkeit erfordert. Die systematische Einhaltung nationaler und internationaler Transportvorschriften und Deklarationsrichtlinien zur Gewährleistung einer sicheren, effizienten und konformen Logistik und eines konformen Transports ist für die stabile Entwicklung der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustriekette von entscheidender Bedeutung.

### 8.4 Vorsichtsmaßnahmen und Wartungspläne für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen während der Verwendung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind Hochleistungsverbundwerkstoffe und finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Kernenergie und in der Medizin. Um eine stabile Materialleistung zu gewährleisten und die Lebensdauer zu verlängern, sind die strikte Einhaltung relevanter Vorsichtsmaßnahmen und die Umsetzung eines wissenschaftlich fundierten und effektiven Wartungsplans unerlässlich.

#### 1. Vorsichtsmaßnahmen bei der Verwendung

##### 1. Vermeiden Sie mechanische Stöße und Überlastungen

- Obwohl Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen eine hohe Festigkeit und Härte aufweisen, können sie bei Stoßbelastungen, die über den Auslegungsbereich hinausgehen, Risse oder Verformungen aufweisen.
- Vermeiden Sie während des Gebrauchs starke mechanische Stöße wie Stürze und Stöße und seien Sie bei der Montage und dem Transport besonders vorsichtig.

##### 2. Kontrollieren Sie die Temperatur Ihrer Arbeitsumgebung

- Der Wärmeausdehnungskoeffizient und die thermische Stabilität einer Legierung bestimmen ihre Leistung in Umgebungen mit hohen Temperaturen.
- Die Betriebstemperatur sollte entsprechend der Hochtemperaturbeständigkeitsgrenze des Materials gesteuert werden, um mikrostrukturelle Veränderungen oder Leistungseinbußen durch die Umgebung mit hohen Temperaturen zu vermeiden.

##### 3. Verhindern Sie chemische Korrosion

- Obwohl Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen eine gewisse Korrosionsbeständigkeit aufweisen, führt eine langfristige Einwirkung korrosiver

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Medien wie Säuren, Laugen und Salznebel zu Oberflächenoxidation und Leistungseinbußen.

- Die Legierung sollte vor direktem Kontakt mit korrosiven Chemikalien geschützt werden und bei Bedarf sollten Korrosionsschutzbeschichtungen oder Schutzmaßnahmen angewendet werden.

#### 4. Verhindern Sie elektromagnetische Störungen

- Einige Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen weisen bestimmte magnetische Reaktionseigenschaften auf. Bei ihrer Verwendung sollte darauf geachtet werden, den Einfluss starker elektromagnetischer Felder zu vermeiden, um eine abnormale Leistung zu verhindern.

#### 5. Regelmäßige Inspektion und Überwachung

- Erstellen Sie einen Plan für regelmäßige Leistungsinspektionen, der sich auf die Überwachung der mechanischen Eigenschaften, des Oberflächenzustands und der mikrostrukturellen Veränderungen der Legierung konzentriert.
- Bei wichtigen Strukturteilen sollte die zerstörungsfreie Prüftechnik zum Einsatz kommen, um mögliche Risse oder Defekte rechtzeitig zu erkennen.

## 2. Wartungs- und Pflegeplan

### 1. Reinigung und Oberflächenschutz

- Reinigen Sie die Legierungsoberfläche regelmäßig mit einem milden, nicht ätzenden Reinigungsmittel, um die Ansammlung von Flecken und ätzenden Substanzen zu verhindern.
- Tragen Sie Schutzfett oder -folie auf freiliegende Oberflächen auf, um das Risiko von Oxidation und Korrosion zu verringern.

### 2. Wartung der Umweltkontrolle

- Sorgen Sie für eine stabile Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Betriebsumgebung der Legierung, um Schwankungen der Materialeigenschaften durch Umweltveränderungen zu vermeiden.
- In feuchten oder korrosiven Umgebungen werden Entfeuchtungsgeräte und Schutzabdeckungen empfohlen.

### 3. Reparatur mechanischer Schäden

- Bei kleineren Kratzern und Oberflächendefekten kann mechanisches Polieren oder eine lokale Reparaturbeschichtung verwendet werden.
- Stark beschädigte Teile sollten umgehend ausgetauscht werden, um zu verhindern, dass sich Risse ausbreiten und zu strukturellen Schäden führen.

### 4. Regelmäßige Leistungstests

- Basierend auf dem Nutzungszyklus werden Härteprüfungen, Zugfestigkeitsprüfungen und Mikrostrukturanalysen durchgeführt, um den Gesundheitszustand des Materials zu bewerten.
- Bei wichtigen Geräten und Strukturteilen werden zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Ultraschall und Röntgen eingesetzt, um die Sicherheit zu gewährleisten.

### 5. Datensatz- und Tracking-Management

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Erstellen Sie Wartungsakten und dokumentieren Sie Wartungszeiten, Prüfergebnisse und Reparaturmaßnahmen detailliert.
- Die Datenanalyse dient als Grundlage für nachfolgende Wartungspläne und Leistungsoptimierungen.

### 3. Wartungspunkte für spezielle Anwendungsumgebungen

#### 1. Umgebung mit hohen Temperaturen

- Überprüfen Sie regelmäßig die Hochtemperaturoxidation von Materialien und entfernen Sie rechtzeitig die Oxidschicht und thermische Schäden.
- Erhöhen Sie den Wärmebehandlungszyklus entsprechend, um die Legierungseigenschaften wiederherzustellen.

#### 2. nukleare Strahlungsumgebung

- Überwachen Sie die Auswirkungen der Strahlung auf die Struktur und Eigenschaften von Materialien und ergreifen Sie Strahlenschutzmaßnahmen.
- Beachten Sie bei der Wartung die Strahlenschutzbestimmungen, um eine Kreuzkontamination zu vermeiden.

#### 3. Mechanische Vibrationsumgebung

- Verstärken Sie die Befestigung und Stoßdämpfung der Verbindungsteile, um Ermüdungsrisse zu vermeiden.
- Überprüfen Sie regelmäßig die Schwingungsermüdung, um Ausfällen im Vorfeld vorzubeugen.

## IV. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erfordern während ihrer gesamten Lebensdauer Wartung. Richtige Vorsichtsmaßnahmen und Wartungspläne können die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Materials deutlich verbessern. Durch die Kombination von wissenschaftlichem Management und technischem Know-how stellen wir sicher, dass Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in einer Vielzahl von Anwendungen optimale Leistung erbringen und anspruchsvolle technische Anforderungen erfüllen.

### 8.5 Technologiepfade zur Wiederverwendung und zum Recycling von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Angesichts der Ressourcenknappheit und der steigenden Umweltschutzanforderungen ist die Wiederverwendung und das Recycling von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu einem wichtigen Weg geworden, um eine nachhaltige Materialentwicklung zu erreichen, die Produktionskosten zu senken und die Umweltbelastung zu verringern. Dieser Abschnitt stellt systematisch die Recyclingtechnologien, Wiederverwendungsmethoden und aktuellen industriellen Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen vor.

## 1. Quellen und Klassifizierung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsschrott

### 1. Abfallquellen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Während des Produktionsprozesses anfallende Abfälle, fehlerhafte Produkte und verschrottete Legierungsprodukte.
- Komponenten und Strukturen aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen am Ende ihrer Lebensdauer.
- Feste Partikel mit Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung in Verarbeitungsschlacke, Schleifpulver und Schneidflüssigkeit.

## 2. Mülltrennung

- Schrott aus massiven Legierungen: Blöcke, Stangen und Strukturteile usw.
- Pulverabfall: Restpulver aus der Verarbeitung und Vermahlung.
- Verbundwerkstoffschrott: Verbundstruktur mit Wolfram-, Molybdän-, Nickel- und Eisenlegierungsbestandteilen.

## 2. Überblick über Recycling-Technologiepfade

### 1. Physikalisches Recyclingverfahren

- Das Recycling von Feststoffabfällen aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen erfolgt hauptsächlich durch mechanisches Sortieren, Zerkleinern, Sieben, magnetische Trennung und andere Verfahren.
- Die Vorteile liegen in der einfachen Verarbeitung, dem geringen Energieverbrauch und der Eignung zum Recycling relativ reiner physikalischer Abfälle.
- Der Nachteil besteht darin, dass Verunreinigungen nicht vollständig entfernt werden können und die Rückgewinnungsreinheit begrenzt ist.

### 2. Chemische Rückgewinnung

- Es umfasst Verfahren wie Säurelaugung, alkalische Laugung, Lösungsmittelextraktion und Fällung und eignet sich zur Rückgewinnung von Wolfram- und Molybdänelementen aus Pulverabfällen und Verbundabfällen.
- Durch Auflösung und Trennung werden hochreine Wolfram- und Molybdänkonzentrate gewonnen.
- Die Technologie ist komplex und erfordert umfassende Umweltschutzeinrichtungen, um Sekundärverschmutzung zu verhindern.

### 3. Metallurgische Rückgewinnungsmethode

- Die Abfalllegierung wird durch Hochtemperaturschmelzen reduziert, um eine Legierungsreproduktion aus Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen zu erreichen.
- den häufig verwendeten Geräten gehören Lichtbogenöfen, Induktionsöfen usw.
- Es eignet sich für hochreine Abfälle und Recycling im großen Maßstab und weist eine hohe Rückgewinnungsrate und gute Legierungsleistung auf.

### 4. Abfallrecycling aus der additiven Fertigung

- Die beim additiven Fertigungsprozess entstehenden Pulverrückstände werden durch Sieben, Wärmebehandlung und erneutes Mischen recycelt.
- Reduzieren Sie effektiv die Produktionskosten und gewährleisten Sie eine stabile Materialleistung.

## 3. Wiederverwendungsmethoden und Anwendungsbereiche

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. Anwendung des Wiederaufbereitungsprozesses

- Der Abfall wird recycelt und zu Pulver verarbeitet, aus dem dann durch Pulvermetallurgie neue Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsmaterialien hergestellt werden.
- Wird zur Herstellung militärischer Projektilkerne, hochleistungsfähiger Strukturteile und nuklearer Abschirmkomponenten verwendet.

### 2. Materialmodifikation und Leistungsverbesserung

- Um die Leistung zu optimieren, werden recycelten Materialien Nanopartikel oder andere Legierungselemente hinzugefügt.
- Entwickeln Sie Materialien mit funktionalem Gradienten und erweitern Sie deren Anwendungsbereiche.

### 3. Umweltschutz und Kreislaufwirtschaft

- Durch Recycling können wir den Druck auf den Abbau von Wolfram- und Molybdänressourcen verringern und eine umweltfreundliche Produktion erreichen.
- Unterstützen Sie die nachhaltige Entwicklung der Industriekette für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und fördern Sie den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft.

## 4. Herausforderungen der Recyclingtechnologie und zukünftige Entwicklungsrichtungen

### 1. Problem der Verunreinigungskontrolle

- In Abfallmaterialien enthaltene Verunreinigungen und schädliche Elemente haben erhebliche Auswirkungen auf die Qualität der recycelten Materialien, und es müssen effiziente Trenntechnologien entwickelt werden.

### 2. Umweltvorschriften und Technologie-Upgrades

- Strenge Umweltvorschriften erfordern eine Kontrolle der Umweltverschmutzung im Recyclingprozess und fördern die Entwicklung umweltfreundlicher Recyclingtechnologien.

### 3. Kosten-Nutzen-Bilanz des Recyclings

- Die technischen Kosten sind hoch und der Prozess muss optimiert werden, um den wirtschaftlichen Nutzen zu maximieren.

### 4. Zusammenarbeit in der Recyclingindustriekette

- Fördern Sie die gemeinsame Nutzung von Ressourcen und die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und bauen Sie ein umfassendes Recycling- und Verwertungssystem für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen auf.

## 5. Typische Recyclingprozesse

- Ein großer Hersteller von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen verwendet das Schmelzreduktionsverfahren zum Recycling von Abfällen und erreicht dabei eine jährliche Rückgewinnungsrate von über 85 %.
- Durch die Verwendung chemischer Auslaugung in Kombination mit der Lösungsmittelextraktionstechnologie konnten Wolfram- und Molybdänelemente

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erfolgreich extrahiert werden, wodurch die Effizienz des Altpulverrecyclings verbessert wurde.

## VI. Zusammenfassung

Die Wiederverwendung und das Recycling von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind ein wichtiger Bestandteil des Ressourcenrecyclings und des Umweltschutzes. Mit dem technologischen Fortschritt und der wachsenden Nachfrage der Industrie werden Recyclingprozesse kontinuierlich optimiert, was zu verbesserten Rückgewinnungsraten und Materialeigenschaften führt. Das Recycling von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen wird sich künftig umweltfreundlich, intelligent und effizient entwickeln und der Werkstoffindustrie helfen, ihre nachhaltigen Entwicklungsziele zu erreichen.

### 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

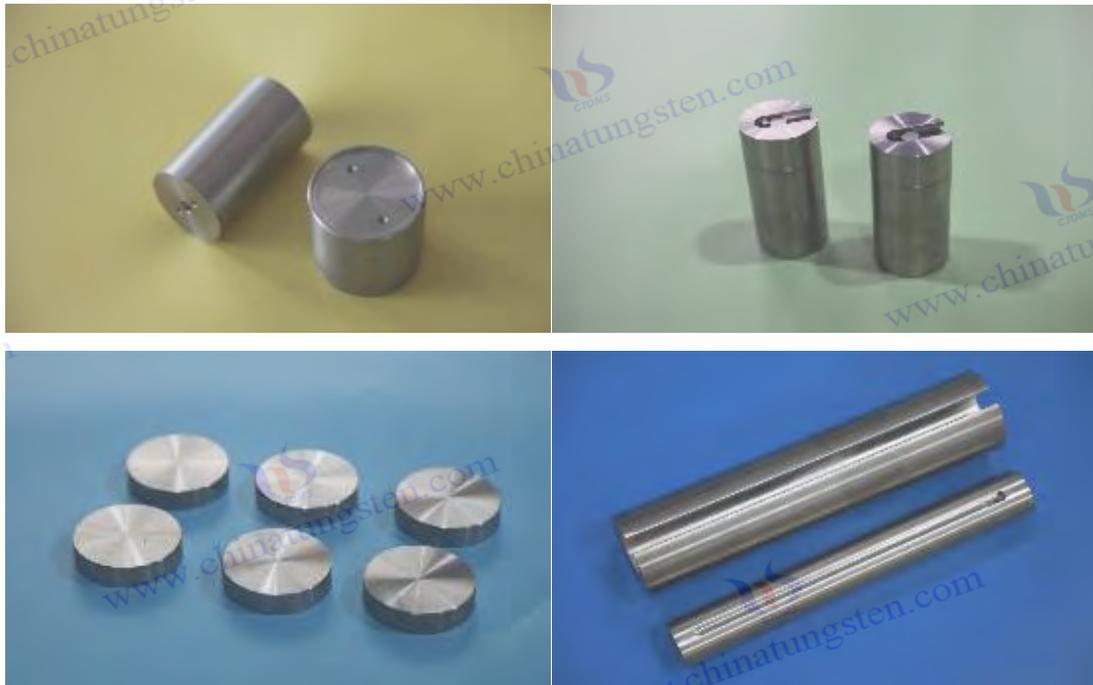
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 9 Marktstruktur und Entwicklungstrend der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

### 9.1 Globale Wolfram und Molybdän-Ressourcenverteilung und Legierungsindustriekettenanalyse

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen (Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen) ist ein leistungsstarkes strategisches Metall und wird häufig in der Luft- und Raumfahrt, im Militär, in der Kernenergie, in der Elektronik und in der High-End-Fertigung eingesetzt. Seine Entwicklung wird maßgeblich von der globalen Verteilung der Wolfram- und Molybdänressourcen und der Struktur der Lieferkette beeinflusst. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die geografische Verteilung und die aktuellen Reserven der globalen Wolfram- und Molybdänressourcen sowie deren Auswirkungen auf die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen (Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen)-Industriekette.

#### 1. Aktuelle Verteilung der weltweiten Wolframressourcen

##### 1. Wichtige mineralproduzierende Länder

- **China** : Der weltweit größte Wolframvorkommen- Besitzer und -Produzent mit über 60 % der globalen Reserven und dem größten Produktionsland. Chinas Wolframminen befinden sich hauptsächlich in Provinzen wie Jiangxi, Hunan, Fujian, Yunnan und Guangdong.
- **Russland** : Das Land verfügt über reiche Wolframerzvorkommen, die sich hauptsächlich im Fernen Osten und in Sibirien konzentrieren, und ist ein wichtiger Wolframerzexporteur.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Kanada** : Wolframvorkommen sind relativ reichlich vorhanden und hauptsächlich in Quebec und British Columbia verbreitet.
- **Andere Länder** : Österreich, Portugal, Vietnam, die Vereinigten Staaten und andere Länder bauen ebenfalls Wolfram ab, aber die Produktion ist relativ gering.

## 2. Ressourcenreserven und Bergbaustatus

- Die weltweiten Wolframressourcen sind stark konzentriert, die Ressourcenverteilung ist ungleichmäßig und die Marktversorgung hängt stark von den wichtigsten Produktionsgebieten ab.
- Bergbaukosten, Umweltschutzrichtlinien und der Stand der Bergbautechnologie wirken sich direkt auf die effektive Versorgung mit Wolframressourcen aus.

## 2. Aktuelle Verteilung der weltweiten Molybdänressourcen

### 1. Wichtige mineralproduzierende Länder

- **China** : Molybdänvorkommen sind reichlich vorhanden und kommen vor allem in Sichuan, der Inneren Mongolei, Gansu, Qinghai und anderen Orten vor. Die dortige Molybdänproduktion zählt zu den weltweit höchsten.
- **Vereinigte Staaten** : Das Land ist der weltweit größte Molybdänproduzent mit großen Bergbaugebieten in Colorado und New Mexico.
- **Chile** : Ein wichtiges Molybdän produzierendes Land in Südamerika, wo das meiste Molybdän in Form von Kupfer-Molybdän-Erzen vorkommt.
- **Kanada, Peru und Mexiko** abgebaut .

### 2. Ressourcenfunktionen

- Molybdänminerale werden oft mit Kupfererzen in Verbindung gebracht und die Ressourcenentwicklung wird stark vom Kupfermarkt beeinflusst.
- Die Rückgewinnungsrate und Verarbeitungseffizienz von Molybdän beeinflussen die Versorgungssicherheit.

## 3. Struktur der Industriekette für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 1. Vorgelagerte Rohstoffversorgung

- Der Abbau und die Verarbeitung von Wolfram-Molybdän-Erzen bilden die Grundlage der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie.
- Die Qualität und Reinheit der Rohstoffe wirken sich direkt auf die Legierungseigenschaften und die Produktionskosten aus.

### 2. Midstream-Legierungsvorbereitung

- Vorbereitung, Dosierung, pulvermetallurgische Formgebung, Sintern und Nachbearbeitung von Wolfram- und Molybdänpulver zur Herstellung von Legierungsstäben, -platten usw.
- Das technische Niveau bestimmt die Produktqualität und -leistung und wirkt sich direkt auf die Wettbewerbsfähigkeit nachgelagerter Anwendungsfelder aus.

### 3. Nachgelagerter Anwendungsmarkt

- Die Hauptnachfragebranchen sind die Luft- und Raumfahrt, die Rüstungsindustrie, die Kernenergie, die Medizintechnik und die elektronische Informationsindustrie.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die vielfältigen Anwendungsbereiche und komplexen Nachfrageeigenschaften treiben die kontinuierliche Weiterentwicklung von Legierungsmaterialien voran.

#### 4. Recycling und Wiederverwendung

- Durch das Recycling von Abfallmaterialien aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen entsteht eine geschlossene industrielle Kette und der Ressourcenverbrauch wird reduziert.

### 4. Aktueller Status des globalen Marktes für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

#### 1. Marktgröße und -struktur

- In den letzten Jahren ist der globale Markt für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen stetig gewachsen und profitierte von der Entwicklung der High-End-Fertigung und strategischer aufstrebender Industrien.
- China nimmt auf dem Weltmarkt eine beherrschende Stellung ein und verfügt über ein komplettes Rohstoffversorgungs- und Fertigungssystem.
- Industrieländer wie Europa, die USA, Japan und Südkorea konzentrieren sich auf die Forschung, Entwicklung und Anwendung von Hochleistungslegierungen.

#### 2. Merkmale der Lieferkette

- Es ist stark konzentriert und die wichtigsten Verbindungen beruhen auf einigen wenigen führenden Unternehmen.
- Die Preise schwanken stark und werden maßgeblich von den Rohstoffpreisen, der Handelspolitik und der Marktnachfrage beeinflusst.

### 5. Herausforderungen und Chancen für die Industriekette

#### 1. Herausforderung

- Versorgungsrisiken ergeben sich aus der geografischen Konzentration der Ressourcen.
- Die Umweltvorschriften werden immer strenger und die Kosten für Abbau und Verarbeitung steigen.
- Internationale Handelskonflikte können den Umlauf von Rohstoffen und Legierungsprodukten beeinträchtigen.

#### 2. Gelegenheit

- Technologische Innovationen fördern die Verbesserung der Legierungsleistung und die Erweiterung ihrer Anwendungsmöglichkeiten.
- Fortschritte in der Recyclingtechnologie fördern den Ressourcenkreislauf und die umweltfreundliche Produktion.
- Die Nachfrage nach Hochleistungslegierungen aus Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen in strategisch wichtigen Schwellenindustrien wächst weiterhin.

## VI. Zusammenfassung

Die globale Verteilung der Wolfram- und Molybdänressourcen hat erhebliche Auswirkungen auf die Stabilität und das Entwicklungspotenzial der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie. Dank seiner reichhaltigen Ressourcen und technologischen Vorteile nimmt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

China eine Schlüsselposition auf dem globalen Markt für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ein. Angesichts der Herausforderungen in den Bereichen Ressourcen, Umwelt und Markt werden die Förderung technologischer Innovationen und die Zusammenarbeit innerhalb der Industriekette künftig die wichtigsten Treiber für eine nachhaltige und gesunde Entwicklung der Branche sein.

## 9.2 Marktnachfragestatus und Wachstumsprognose für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen sind ein strategischer Hochleistungswerkstoff und erfreuen sich aufgrund ihrer überlegenen Dichte, Festigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und Strahlungsresistenz einer steigenden Nachfrage in zahlreichen Industriezweigen. In diesem Abschnitt wird die aktuelle globale und regionale Marktnachfrage nach Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen analysiert und basierend auf Branchentrends und technologischen Entwicklungen das zukünftige Marktwachstum prognostiziert.

### 1. Aktuelle Marktnachfrage

#### 1. Branchenanstrengungstreiber

- **Luft- und Raumfahrt** : Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden aufgrund ihrer hohen Dichte und Festigkeit häufig in Flugzeuggegendewichten, Trägheitsnavigationsgeräten und Wärmeschutzmaterialien eingesetzt. Die Nachfrage steigt stetig, da die Investitionen in die Forschung und Entwicklung neuer Raumfahrzeug- und Flugzeugtriebwerke steigen.
- **Rüstungsindustrie** : Die Nachfrage nach Hochleistungslegierungen aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen für panzerbrechende Projektilkerne, Trägheitskomponenten für Raketen und Schutzpanzerungen ist weiterhin hoch. Die Modernisierung der Militärausrüstung und verstärkte nationale Verteidigungsanstrengungen treiben das anhaltende Wachstum dieses Sektors voran .
- **Kernenergieindustrie** : Diese Materialien werden in Schlüsselkomponenten wie Neutronenabsorptionsstäben und Strahlenschutzmaterialien verwendet und erfordern eine extrem hohe Stabilität und Strahlungsbeständigkeit. Die Entwicklung der Kernenergie und Fortschritte bei der Behandlung radioaktiver Abfälle treiben die Marktnachfrage an .
- **Elektronik und Präzisionsinstrumente** : Wolfram -Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen spielen eine wichtige Rolle bei der Wärmeableitung und Abschirmung hochpräziser elektronischer Geräte und Instrumente. Die rasante Entwicklung der Informationstechnologiebranche treibt die steigende Nachfrage nach Legierungen voran.
- **Medizinische Geräte** : Schutzschilde und hochdichte Strukturkomponenten in Strahlentherapiegeräten erfordern Materialien mit guter Biokompatibilität und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

guten mechanischen Eigenschaften. Die Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen nimmt ständig zu.

## 2. Regionale Marktmerkmale

- **Chinesischer Markt** : Als weltweit größter Lieferant von Wolfram- und Molybdänressourcen und Produktionsstandort für Legierungsprodukte wächst die Nachfrage in China kontinuierlich, insbesondere in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Militär und Kernenergie. Staatliche Unterstützung und eine beschleunigte Modernisierung der Industrie treiben die Expansion der Inlandsnachfrage voran.
- **Europäische und amerikanische Märkte** : Der Schwerpunkt liegt auf der technologischen Forschung und Entwicklung sowie High-End-Anwendungen von Hochleistungslegierungen. Die Nachfrage liegt hauptsächlich bei Produkten mit hoher Wertschöpfung und nach Maß, und die Marktgröße wächst stetig.
- **Japan, Südkorea und andere asiatische Länder** : Sie sind auf importierte Ressourcen angewiesen und legen Wert auf die technologische Verbesserung und innovative Anwendung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen mit erheblichem Marktpotenzial.

## 2. Marktwachstumstreiber

### 1. Neue Technologien vorantreiben

- Die Entwicklung neuer Technologien wie intelligente Fertigung und additive Fertigung hat die Herstellungseffizienz und Produktleistung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen verbessert und ihren Anwendungsbereich erweitert.

### 2. Erhöhte Ausgaben für Verteidigung und Luft- und Raumfahrt

- Die Erhöhung der Verteidigungsbudgets und der Luft- und Raumfahrtprojekte in verschiedenen Ländern hat die Nachfrage nach Hochleistungslegierungen aus Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen direkt ansteigen lassen.

### 3. Strategie zur Entwicklung der Kernenergie

- Der weltweite Anteil der Kernenergieerzeugung nimmt allmählich zu und die Anforderungen an die Sicherheit und den Umweltschutz der Kernenergie steigen, was die Marktexpansion für entsprechende Legierungsmaterialien fördert.

### 4. Umweltvorschriften und Ressourcenrecycling

- Die Förderung umweltfreundlicher Fertigungs- und Ressourcenrecyclingtechnologien wird die Optimierung der Industriekette für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen vorantreiben und die Effizienz der Materialnutzung verbessern.

## 3. Marktwachstumsprognose

### 1. Prognose der globalen Marktgröße

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Es wird erwartet, dass der globale Markt für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in den nächsten fünf Jahren eine jährliche Wachstumsrate von etwa 5 bis 7 % aufweisen wird.
- Zu den wichtigsten Wachstumspunkten werden neue Anwendungsbereiche und die Nachfrage im High-End-Markt zählen.

## 2. Regionale Wachstumstrends

- **China** : Die Marktnachfrage wächst am schnellsten, die jährliche Wachstumsrate wird auf 7–9 % geschätzt.
- **Europa und die Vereinigten Staaten** : Stetiges Wachstum mit Schwerpunkt auf der Umstellung auf Hochleistungslegierungen und kundenspezifische Produkte.
- **Andere asiatische Länder** : Angetrieben durch Industrialisierung und technologische Modernisierung wird das Marktpotenzial allmählich freigesetzt.

## 3. Technologische Innovationen treiben die Marktaufwertung voran

- Nanostrukturierte Legierungen, multifunktionale Verbundwerkstoffe und intelligente Fertigungstechnologien werden die Leistungsverbesserung von Produkten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen vorantreiben und die Transformation der Marktstruktur in Richtung hoher Wertschöpfung fördern.

## IV. Herausforderungen und Risiken

### 1. Rohstoffpreisschwankungen

- Die Instabilität der Rohstoffpreise für Wolfram und Molybdän kann sich auf die industrielle Kette auswirken und die Herstellungskosten erhöhen.

### 2. Internationale Handels- und Politikrisiken

- Handelskonflikte, Zollpolitik und Umweltschutzstandards können den grenzüberschreitenden Verkehr und die Wettbewerbsfähigkeit von Legierungsprodukten auf dem Markt beeinträchtigen.

### 3. Konkurrenz durch alternative Materialien

- Die Entwicklung neuer leichter und hochfester Materialien stellt eine potenzielle Bedrohung für den traditionellen Markt für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen dar.

## V. Zusammenfassung

Als strategisch wichtiger Werkstoff diversifiziert sich die Marktnachfrage nach Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und wächst stetig. Industrielle Innovation und Anwendungserweiterung werden die wichtigsten Treiber der zukünftigen Marktentwicklung sein. Angesichts der Herausforderungen im Ressourcen- und Politikbereich müssen alle Glieder der Industriekette zusammenarbeiten, um die technologischen Fähigkeiten und die Ressourceneffizienz zu verbessern und so ein stetiges Wachstum und eine nachhaltige Entwicklung im Markt für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu erreichen.

## 9.3 Einführung in die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung von CTIA GROUP

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Als führendes Unternehmen im Bereich Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in China und weltweit hat sich CTIA GROUP (CITIM) mit seinen starken technischen Forschungs- und Entwicklungskapazitäten, seiner umfassenden industriellen Lieferkette und seinen hochwertigen Produkten zu einem Branchenstandard entwickelt. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Entwicklungsgeschichte, die technologischen Vorteile, das Produktportfolio und die Marktleistung von CTIA GROUP im Bereich Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

## 1. Unternehmensentwicklungsgeschichte und strategische Positionierung

### 1. Gründungshintergrund und Entwicklung:

Tungsten Intelligent Manufacturing nutzt Chinas reichhaltige Wolfram- und Molybdänvorkommen und hat schrittweise eine komplette Lieferkette aufgebaut, die Rohstoffbeschaffung, Pulveraufbereitung, Legierungsherstellung und Weiterverarbeitung umfasst. Das Unternehmen widmet sich der Forschung, Entwicklung und Herstellung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, um den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, des Militärs, der Kernenergie und der High-End-Fertigung gerecht zu werden.

### 2. Strategische Positionierung

- Konzentrieren Sie sich auf Hochleistungsprodukte aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und fördern Sie Innovationen in der Materialtechnologie.
- Erstellen Sie ein Modell für umweltfreundliche Fertigung und Kreislaufwirtschaft, um die Effizienz der Ressourcennutzung zu verbessern.
- Erweitern Sie aktiv internationale Märkte und steigern Sie die globale Wettbewerbsfähigkeit und den Einfluss Ihrer Marke.

## 2. Kerntechnologie und F&E-Kapazitäten

### 1. Fortschrittliche Pulvermetallurgie-Technologie: China

Tungsten Intelligent Manufacturing verfügt über eine Reihe von Pulveraufbereitungs- und metallurgischen Verfahren mit unabhängigen geistigen Eigentumsrechten. Das Unternehmen ist in der Lage, den Wolfram- und Molybdängehalt sowie die Verteilung der Legierungselemente präzise zu steuern und so hochdichte und sehr gleichmäßige Legierungsmaterialien herzustellen.

### 2. Bei der Mikrostrukturkontrolle und Leistungsoptimierung

kommen technische Mittel wie Nanopartikelverstärkung und Mikrolegierungsdesign zum Einsatz, um die Zähigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu verbessern und so den strengen Anforderungen verschiedener Anwendungsumgebungen gerecht zu werden.

### 3. Intelligente Fertigung und Qualitätskontrolle

führen digitale Produktionsmanagementsysteme ein, um eine Echtzeitüberwachung der Prozessparameter und Datenanalyse zu erreichen und so die Stabilität und Konsistenz der Produktqualität sicherzustellen.

## 3. Hauptproduktsystem

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Stäbe aus hochdichter Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung**  
eignen sich für anspruchsvolle Bereiche wie Trägheitsgegengewichte in der Luft- und Raumfahrt und den Strahlenschutz gegen nukleare Strahlung.
2. **Platten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen**  
werden häufig in Hochtemperaturschutz-, mechanischer Verschleißfestigkeits- und elektronischen Wärmeableitungsstrukturen verwendet.
3. **Maßgeschneiderte Legierungsmaterialien**  
entwickeln diversifizierte Legierungsverhältnisse und spezielle Funktionsmaterialien entsprechend den Kundenanforderungen, wie beispielsweise hochtemperaturbeständige, strahlungsbeständige, wärme- und elektrisch leitfähige Legierungen.

#### IV. Marktentwicklung und Partner

1. **Position auf dem Inlandsmarkt:**  
CTIA GROUP hält einen führenden Anteil am Inlandsmarkt für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, verfügt über eine stabile Lieferkette und umfassende technische Dienstleistungen und wurde von mehreren großen nationalen Projekten und Militäreinheiten anerkannt.
2. **Internationale Marktexpansion**  
Wir planen aktiv Auslandsmärkte, bauen strategische Partnerschaften mit namhaften Unternehmen und wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen in Europa, Amerika, Japan, Südkorea und anderen Ländern auf und fördern den Technologeaustausch und den Produktexport.
3. **Das Kundendienstsystem**  
bietet Dienstleistungen aus einer Hand, von der technischen Beratung über die Musterentwicklung bis hin zur Massenproduktion, um sicherzustellen, dass die vielfältigen Bedürfnisse der Kunden erfüllt werden.

#### V. Zukünftiger Entwicklungsplan

1. **Angetrieben von technologischen Innovationen**  
erhöhen wir weiterhin unsere Investitionen in Forschung und Entwicklung, um die wichtigsten technischen Schwierigkeiten bei Hochleistungslegierungen aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen zu überwinden und den Mehrwert unserer Produkte zu steigern.
2. **Grüne Fertigung und nachhaltige Entwicklung**  
fördern die Verbesserung von Umweltschutzprozessen und das Recycling von Ressourcen, setzen das Konzept der grünen Fertigung um und fördern die nachhaltige Entwicklung der Industriekette.
3. **Die Globalisierungsstrategie wird vertieft**  
, um den internationalen Marktanteil zu erweitern, den internationalen Einfluss der Marke zu stärken und ein Image als Marktführer in der globalen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie aufzubauen.

#### VI. Zusammenfassung

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Als führendes Unternehmen im Bereich Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ist Chinatungsten Intelligent Manufacturing mit seinem umfassenden technischen Know-how und seiner umfassenden industriellen Lieferkette weiterhin führend im technologischen Fortschritt und der Marktentwicklung der Branche. Auch in Zukunft wird Chinatungsten Intelligent Manufacturing die Prinzipien einer innovationsgetriebenen und umweltfreundlichen Entwicklung beibehalten, die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie auf ein höheres Niveau bringen und den Wert der industriellen Kette maximieren.

## 9.4 Analyse der Rohstoffpreisschwankungen und der Kostenstruktur von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Als strategischer Hochleistungswerkstoff werden die Herstellungskosten und der Marktpreis von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen maßgeblich von Rohstoffpreisschwankungen beeinflusst. Eine eingehende Analyse der Preisdynamik wichtiger Rohstoffe wie Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen und ihres Beitrags zu den Gesamtproduktionskosten ist entscheidend für eine rationale Kostenkontrolle und die Entwicklung von Marktstrategien. Dieser Abschnitt analysiert systematisch Preis und Kosten von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen aus der Perspektive des aktuellen Rohstoffmarktes, der Preisschwankungen, der Kostenstruktur und des Risikomanagements.

### 1. Marktstatus und Preisentwicklung wichtiger Rohstoffe

#### 1. Wolfram-Rohstoffe

- Wolfram ist das wichtigste Element in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen. Die weltweiten Wolframvorkommen konzentrieren sich auf wenige Länder wie China und Russland.
- Aufgrund der Ressourcenknappheit, der Verschärfung der Umweltschutzrichtlinien und der Bergbaubeschränkungen schwankte der Preis für Wolframkonzentrat in den letzten Jahren stark und zeigte einen zyklischen Aufwärtstrend.
- Die Wolframpreise haben den größten Einfluss auf die Produktionskosten der Legierung und machen etwa 30–50 % der gesamten Materialkosten aus.

#### 2. Molybdän-Rohstoffe

- Molybdän, ein wichtiges Element zur Verbesserung der Legierungsleistung, wird hauptsächlich in China, den USA und Chile produziert.
- Die Molybdänpreise werden von der Nachfrage der Stahlindustrie und des internationalen Mineralienmarktes beeinflusst und schwanken stark.
- Molybdän wird in Legierungen in geringeren Mengen verwendet als Wolfram, sein Preis ist jedoch höher und macht etwa 10–15 % der Legierungskosten aus.

#### 3. Nickelrohstoffe

- Nickel wird hauptsächlich verwendet, um die Zähigkeit und Formbarkeit von Legierungen zu verbessern, und sein Preis wird durch die Nachfrage der Edelstahl- und Batterieindustrie bestimmt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Nickelpreise waren in den letzten Jahren starken Schwankungen unterworfen und wurden maßgeblich von der globalen Wirtschaftslage sowie den Angebots- und Nachfrageverhältnissen beeinflusst.
- Nickel macht etwa 15–25 % der Legierungskosten aus.

#### 4. Eisenrohstoffe

- Als Matrixelement hat Eisen einen relativ stabilen Preis und niedrige Kosten, wobei es etwa 10 % der Gesamtkosten der Legierung ausmacht.

## 2. Kostenstrukturanalyse der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

### 1. Materialkosten

- Die Beschaffung von Rohstoffen ist der größte Kostenfaktor bei der Legierungsherstellung und macht etwa 60–80 % der Gesamtkosten aus. Schwankungen der Wolfram- und Nickelpreise wirken sich am stärksten auf die Gesamtkosten aus.

### 2. Bearbeitungs- und Herstellungskosten

- Hierzu zählen die Kosten für die Pulveraufbereitung, das Pressen, Sintern, die Wärmebehandlung und die maschinelle Bearbeitung. Mit dem technologischen Fortschritt und der zunehmenden Automatisierung sinken die Stückkosten für die Verarbeitung allmählich.

### 3. Qualitätsprüfung und F&E-Kosten

- Ein Qualitätskontrollsystem auf hohem Niveau und kontinuierliche Investitionen in technologische Forschung und Entwicklung sind die Garantie für die Sicherstellung der Produktleistung und Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt und machen etwa 5–10 % der Gesamtkosten aus.

### 4. Logistik- und Verwaltungskosten

- Einschließlich der Kosten für den Transport der Rohstoffe, die Verpackung des fertigen Produkts, die Lagerung und die Verwaltungskosten, die etwa 5 % der Gesamtkosten ausmachen.

## 3. Rohstoffpreis-Schwankungsfaktoren und Risikomanagement

### 1. Marktangebot und -nachfrage

- Die Mineralvorkommen an Wolfram und Molybdän sind begrenzt und die Nachfrage konzentriert sich auf den Bereich der High-End-Fertigung. Das Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage führt zu häufigen Preisschwankungen.

### 2. Internationale Handelspolitik

- Zollanpassungen, Exportbeschränkungen und das internationale politische Umfeld wirken sich auf die Importkosten von Rohstoffen und die Stabilität der Lieferkette aus.

### 3. Umweltvorschriften und Beschränkungen der Ressourcenentwicklung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die Umweltauflagen für den Bergbau werden strenger und die Produktionskosten steigen, was sich auf die Versorgung mit Rohstoffen und deren Preise auswirkt.

#### 4. Risikomanagementstrategie

- Multi-Channel-Beschaffung und Diversifizierung der Lieferkette.
- Sichern Sie sich die Preise durch langfristige Einkaufsverträge.
- Stärken Sie das Materialrecycling und verringern Sie die Abhängigkeit von Primärressourcen.
- Technologische Innovationen verbessern die Materialnutzungseffizienz, optimieren Verhältnisse und senken die Kosten.

### IV. Zusammenfassung

Die Kostenstruktur von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen hängt stark von den Preisen wichtiger Rohstoffe ab. Insbesondere Marktschwankungen bei Wolfram und Nickel wirken sich erheblich auf die Gesamtproduktionskosten aus. Unternehmen sollten die Trends auf den internationalen Rohstoffmärkten genau beobachten und durch eine Kombination aus technologischen Innovationen und Beschaffungsstrategien ihre Kostenkontrolle stärken, um eine stabile Versorgung und nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten und so die Wettbewerbsfähigkeit und Marktreaktionsfähigkeit der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie zu verbessern.

### 9.5 Politische Impulse und die strategische Position von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der High-End-Fertigung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen haben sich aufgrund ihrer außergewöhnlichen physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften zu einem unverzichtbaren strategischen Werkstoff in anspruchsvollen Fertigungssektoren wie der Luft- und Raumfahrt, dem Militär, der Kernenergie und der Elektronik entwickelt. Angesichts des globalen technologischen Fortschritts und der sich verändernden geopolitischen Rahmenbedingungen treiben staatliche Richtlinien die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie zunehmend voran und regulieren sie, was ihre strategische Position in der modernen Fertigung weiter stärkt. Dieser Abschnitt untersucht systematisch die Entwicklungsmöglichkeiten, Herausforderungen und die strategische Bedeutung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in diesem politisch getriebenen Kontext.

### I. Nationale strategische Ressourcenattribute und politische Unterstützung

#### 1. Die Bedeutung strategischer Ressourcen

- Wolfram und Molybdän sind wichtige strategische Mineralressourcen für China und stehen in direktem Zusammenhang mit der Landesverteidigung und der Entwicklung von Hightech-Industrien. Als wichtiges Anwendungsmaterial tragen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen dazu bei, Chinas Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Viele Regierungen haben Wolfram- und Molybdänressourcen sowie die damit verbundenen Legierungsindustrien in den Rahmen strategischer Reserven und wichtiger Unterstützungsmaßnahmen aufgenommen.

## 2. Politische Unterstützung und Branchenberatung

- Die Länder haben Richtlinien zum Schutz der Bodenschätze, zur Regulierung des Umweltschutzes, zur Förderung technologischer Innovationen und zur Unterstützung der industriellen Modernisierung eingeführt, um den technologischen Fortschritt bei Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu fördern und die Industriestrukturen zu optimieren.
- Nationale Richtlinien wie „Made in China 2025“ und der „High-End Manufacturing Development Plan“ unterstützen eindeutig die Forschung und Entwicklung sowie die Industrialisierung von Hochleistungslegierungsmaterialien.

## 3. Technische Standards und Aufbau eines Qualitätssystems

- Die Regierung fördert die Formulierung einheitlicher Industriestandards und Zertifizierungssysteme, um die Qualität und Sicherheit von Produkten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zu gewährleisten und die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern.

## 2. Wichtige Anwendungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in der High-End-Fertigung

### 1. Luft- und Raumfahrt

- Wird für Trägheitsgegengewichte, Raketenkerne, Hochtemperatur-Strukturteile usw. verwendet, um die Leistung und Sicherheit von Flugzeugen zu gewährleisten.
- Hohe Festigkeit, hohe Dichte und ausgezeichnete thermische Stabilität erfüllen die Anforderungen extremer Umgebungen.

### 2. Herstellung militärischer Ausrüstung

- Als panzerbrechendes Kernmaterial und Panzerschutzstruktur bietet es hervorragende Schutz- und Durchschlagsleistung.
- Seine zentrale Stellung in der Rüstungsindustrie macht es zu einem strategischen Garanten der nationalen Sicherheit.

### 3. Kernenergie und Strahlenschutz

- Abschirmmaterialien aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden in Kernreaktoren und Strahlentherapiegeräten verwendet, um die Strahlensicherheit zu gewährleisten.
- Die hohe Dichte absorbiert Neutronen und Gammastrahlen effektiv.

### 4. High-End-Elektronik und Präzisionsinstrumente

- Wird in elektronischen Wärmeableitungsstrukturen, magnetischen Abschirmteilen und hochpräzisen Instrumentenkomponenten verwendet, um die Leistung und Zuverlässigkeit der Geräte zu verbessern.

## 3. Politisch bedingte Trends in der industriellen Entwicklung

### 1. Grüne Fertigung und nachhaltige Entwicklung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Umweltschutzgesetze und -vorschriften fördern die Entwicklung umweltfreundlicher Produktionsprozesse und Ressourcenrecyclingtechnologien, um die Umweltbelastung zu verringern.
- Fördern Sie die ökologische Transformation der Industriekette für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

## 2. Innovationsgetriebene technologische Upgrades

- Mit politischer Unterstützung werden wir die Investitionen in Forschung und Entwicklung erhöhen und die Anwendung von Nanoverstärkung, Mehrelementlegierungsdesign und intelligenten Fertigungstechnologien fördern.
- Verbessern Sie die Materialeistung und erweitern Sie neue Anwendungsbereiche.

## 3. Industrielle Kettenintegration und internationale Zusammenarbeit

- Fördern Sie die Ressourcenintegration und die Zusammenarbeit in der Industriekette, um die Sicherheit der globalen Lieferkette zu verbessern.
- Stärkung der Zusammenarbeit mit internationalen Spitzenunternehmen und wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen, um die internationale Stimme zu stärken.

# IV. Herausforderungen und Reaktionsstrategien

## 1. Ressourcenabhängigkeit und Versorgungsrisiken

- Die Wolfram- und Molybdänressourcen sind konzentriert und geopolitische und handelspolitische Spannungen können zu einer instabilen Versorgung führen.
- Es ist notwendig, die diversifizierte Entwicklung von Ressourcen und das Recycling von Materialien zu beschleunigen.

## 2. Technische Engpässe und Marktwettbewerb

- Die Herstellungstechnologie für Hochleistungslegierungen aus Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen ist komplex und erfordert große Investitionen in Forschung und Entwicklung.
- Es ist notwendig, die eigenständige Innovationsfähigkeit zu stärken und das Niveau der Industrietechnologie zu verbessern.

## 3. Anpassung an Veränderungen im politischen Umfeld

- Die Umweltschutz- und Sicherheitsvorschriften im In- und Ausland werden strenger und die Produktionskosten steigen.
- Es ist notwendig, den Prozessablauf zu optimieren und das Niveau der umweltfreundlichen Fertigung zu verbessern.

# V. Zusammenfassung

Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen gelten als wichtiges Basismaterial für die High-End-Fertigung und erfahren aufgrund ihrer einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften sowie ihrer strategischen Ressourceneigenschaften starke politische Unterstützung und Aufmerksamkeit seitens der Industrie. Angetrieben von politischen Vorgaben und technologischen Innovationen wird die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie ihre Wettbewerbsfähigkeit weiter steigern, zur unabhängigen, kontrollierbaren und qualitativ

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hochwertigen Entwicklung der High-End-Fertigung beitragen und zu einer wichtigen Säule für die Wahrung der nationalen strategischen Sicherheit sowie des wissenschaftlichen und technologischen Fortschritts werden.

## 9.6 Zukünftige technologische Durchbrüche und industrielle Verbesserungsrichtungen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Mit dem kontinuierlichen Fortschritt von Wissenschaft und Technologie und der Diversifizierung der industriellen Anforderungen steht die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung als wichtiges strategisches Hochleistungsmaterial vor technologischen Innovationen und industrieller Modernisierung, die für die Entwicklung der High-End-Fertigung von entscheidender Bedeutung sind. In diesem Abschnitt werden die potenziellen technologischen Durchbrüche, Innovationsrichtungen und industriellen Modernisierungspfade der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung in der Zukunft eingehend untersucht und der Branche geholfen, neue Chancen zu nutzen und Herausforderungen zu meistern.

### 1. Kernrichtungen zukünftiger technologischer Durchbrüche

#### 1. Hohe Verdichtung und verbesserte Gewebegleichmäßigkeit

- Durch die Optimierung des Pulvermetallurgieprozesses, der Sintertechnologie und der Wärmebehandlungsparameter werden eine ultrahohe Dichte und eine verfeinerte und gleichmäßige Mikrostruktur der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung erreicht, wodurch die umfassenden mechanischen Eigenschaften und die Lebensdauer verbessert werden.
- Wenden Sie fortschrittliche neue Verfahren wie Plasmasintern und schnelles Heißpressen an, um Produktionszyklen zu verkürzen und die Fehlerrate zu senken.

#### 2. Nanostruktur- und Multiskalen-Verbundverstärkungstechnologie

- Durch die Einführung von Verstärkungen der zweiten Phase, wie etwa Nanopartikeln und Nanofasern, kann eine Verstärkung auf Nanoebene erreicht und die Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit verbessert werden.
- Entwickeln Sie mehrskalige Verbundwerkstoffdesigns, koordinieren Sie die Synergie zwischen Strukturen unterschiedlicher Größenordnungen und verbessern Sie die Gesamtleistung der Materialien.

#### 3. Design und Funktionsentwicklung von Mehrkomponenten-Legierungssystem

- Durch die Kombination computergestützter Materialwissenschaft mit Hochdurchsatzexperimenten entwickeln wir neue Mehrkomponentenlegierungen, um multifunktionale Verbundeigenschaften wie hohe Festigkeit und Zähigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu erreichen.
- Entwickeln Sie Funktionslegierungen mit speziellen physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise hoher Wärmeleitfähigkeit, geringer magnetischer Reaktion oder hoher Strahlungsbeständigkeit.

#### 4. Intelligente Fertigung und digitale Prozesssteuerung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Fördern Sie intelligente Geräte zur Pulveraufbereitung, Formgebung und Wärmebehandlung, um eine Online-Überwachung und präzise Steuerung des Prozesses zu ermöglichen und eine gleichbleibende Produktqualität sicherzustellen.
- Nutzen Sie Big Data und künstliche Intelligenz, um Prozessparameter zu optimieren, eine flexible Fertigung zu erreichen und schnell auf die Marktnachfrage zu reagieren.

## 5. Grüne Fertigungs- und Kreislaufwirtschaftstechnologien

- Förderung energie- und emissionsarmer Herstellungsverfahren in Kombination mit Abfallrecycling und Wiederverwendungstechnologien, um Ressourcenrecycling und eine umweltfreundliche Produktion zu erreichen.
- Entwickeln Sie effiziente Technologien zum Recycling und zur Trennung von Materialien, um die Abhängigkeit von Rohstoffen zu verringern und eine nachhaltige Entwicklung der Branche sicherzustellen.

## 2. Schlüsselfade zur industriellen Modernisierung

### 1. Industrielle Modernisierung durch technologische Innovation

- Stärken Sie die Grundlagenforschung und die angewandte Forschung und Entwicklung, fördern Sie die tiefe Integration von Industrie, Wissenschaft, Forschung und Anwendung und bilden Sie kontinuierliche Innovationsfähigkeiten aus.
- Der Schwerpunkt liegt auf der Überwindung der Engpässe bei den Herstellungsprozessen und der Grenzen der Materialeistung, um den hohen Anforderungen in der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie, der Landesverteidigung usw. gerecht zu werden.

### 2. Industrielle Kettenintegration und Verbesserung der High-End-Supportfunktionen

- Optimieren Sie die Koordination vor- und nachgelagerter Industrieketten und verbessern Sie unterstützende Kapazitäten wie Rohstoffe, Geräteherstellung und Testdienste.
- Gewinnen Sie Lieferanten für Schlüsseltechnologien und Kernausrüstung, um eine Lokalisierung und unabhängige Kontrolle der Industriekette zu erreichen.

### 3. Marktorientierung und Anwendungserweiterung

- Konzentrieren Sie sich auf Bereiche mit hoher Wertschöpfung und expandieren Sie in aufstrebende Märkte wie die medizinische Versorgung, High-End-Elektronik und neue Energien.
- Stärken Sie die internationale Marktentwicklung und steigern Sie den Markeneinfluss und die internationale Wettbewerbsfähigkeit.

### 4. Talentförderung und industrieökologisches Bauen

- Richten Sie ein umfassendes Schulungssystem für technische Talente ein, um die Verbesserung der beruflichen, technischen und Managementfähigkeiten zu fördern.
- Fördern Sie den Bau von Industrieparks und Innovationsplattformen, um ein gesundes industrielles Ökosystem zu schaffen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Ausblick

Die zukünftige Entwicklung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen wird auf der Integration von Materialwissenschaft, Fertigungstechnologie und digitaler Innovation beruhen, um einen Sprung nach vorne bei Leistung und Fertigungskapazitäten zu erzielen. Durch technologische Durchbrüche und industrielle Modernisierungen wird erwartet, dass Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in einem breiteren Spektrum von High-End-Fertigungsbereichen eine Schlüsselrolle spielen, zur Verwirklichung nationaler strategischer Ziele beitragen und verwandte Branchen in eine neue Ära hochwertiger, nachhaltiger Entwicklung führen.



## Kapitel 10 Forschungsgrenzen und zukünftige Richtungen von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 10.1 Fortschrittliche Designkonzepte und Mikrolegierungstrends von W-Mo-Ni-Fe-Legierungen

Mit der rasanten Entwicklung der modernen Materialwissenschaft und den steigenden Anforderungen der High-End-Fertigung entwickelt sich die Designphilosophie von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zunehmend vom traditionellen, erfahrungsbasierten Design hin zu einer Kombination aus wissenschaftlichen Berechnungen und Mikrolegierungstechniken. Mikrolegierungen, kombiniert mit fortschrittlichen Designkonzepten, sind ein wichtiger Weg zur Leistungssteigerung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und bieten eine solide Grundlage für bahnbrechende Materialleistungen und erweiterte Funktionalität.

#### 1. Kernelemente fortgeschrittener Designkonzepte

##### 1. Computergestütztes Materialdesign

- Mithilfe von First-Principles-Berechnungen, Phasendiagrammberechnungen und Multiskalensimulationen können wir die Wechselwirkungen zwischen Legierungselementen und den Gesetzen der Mikrostrukturentwicklung genau vorhersagen und die Zusammensetzungsoptimierung steuern.
- Durch Hochdurchsatzexperimente und maschinelles Lernen können Legierungsverhältnisse schnell überprüft werden, um eine individuelle Leistungsanpassung zu erreichen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Mehrzieloptimierungsdesign

- Unter Berücksichtigung mehrerer Leistungsindikatoren wie Festigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und thermischer Stabilität wird eine mehrzielige Optimierungsmethode verwendet, um verschiedene Leistungsindikatoren auszugleichen.
- Konzentrieren Sie sich auf die allgemeine Leistungsanpassung der Materialien und die Prozessanpassungsfähigkeit, um die Breite und Zuverlässigkeit der Legierungsanwendungen zu verbessern.

## 3. Funktionales Materialdesign

- In Kombination mit den Anforderungen der Betriebsumgebung wird ein multifunktionales Legierungssystem mit speziellen Funktionen wie Wärmeleitfähigkeit, elektromagnetischer Abschirmung, Strahlungsbeständigkeit oder Korrosionsbeständigkeit entwickelt.
- Durch Schnittstellentechnik und Verbunddesign werden der Legierung neue Funktionseigenschaften verliehen, um den Anforderungen komplexer Arbeitsbedingungen in mehreren Bereichen gerecht zu werden.

## 2. Entwicklungstrend der Mikrolegierungstechnologie

### 1. Präzise Zugabe von Spurenelementen

- Durch die Zugabe von Spuren von Vanadium, Titan, Niob, Zirkonium und anderen Elementen zur traditionellen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Matrix werden Kornverfeinerung und Ausscheidungshärtung durch die Bildung feiner Partikel der zweiten Phase oder eine Festlösungshärtung erreicht.
- Verbessern Sie effektiv die Zähigkeit, thermische Stabilität und Verschleißfestigkeit der Legierung und steigern Sie ihre Betriebsleistung erheblich.

### 2. Verstärkungsmechanismus durch nanoskalige Mikrolegierungen

- Nanoskalige Verstärkungsphasen oder -strukturen werden verwendet, um eine Verstärkung der Materialgrenzflächen und eine Stabilisierung der Korngrenzen zu erreichen.
- Die gleichmäßige Verteilung der Nanopartikel fördert die Gleichmäßigkeit des Gewebes, reduziert Defekte und verbessert die Gesamtleistung des Materials.

### 3. Mikrolegierung und Prozesskopplungsoptimierung

- Die Morphologie und Verteilung der Mikrolegierungselemente werden durch die Kombination von Prozessparametern wie Pulveraufbereitung, Sintern und Wärmebehandlung optimiert.
- Erreichen Sie eine koordinierte Regelung des Komponentendesigns und des Prozessverlaufs, um die Materialdichte und -gleichmäßigkeit zu verbessern.

### 4. Überlegungen zum Umweltschutz und zur umweltfreundlichen Herstellung

- Optimieren Sie das Zugabeverhältnis von Mikrolegierungselementen und reduzieren Sie die Verwendung seltener oder schädlicher Elemente, um die Anforderungen der umweltfreundlichen Fertigung zu erfüllen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Verbessern Sie die Recyclingfähigkeit und nachhaltige Nutzung von Materialien und fördern Sie die grüne Transformation der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie.

### III. Zukunftsaussichten

Die umfassende Integration fortschrittlicher Designkonzepte und Mikrolegierungstechnologie wird die Leistungsfähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen auf ein höheres Niveau heben. Durch intelligentes Design und präzise Steuerung werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen maßgeschneiderte Leistung, vielfältige Funktionen und eine effiziente Fertigung ermöglichen. Sie erfüllen die hohen Anforderungen an Hochleistungsmaterialien in der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie, dem Militär und anderen Bereichen und fördern den Durchbruch und die Anwendung einer neuen Generation von High-End-Fertigungstechnologien.

### 10.2 Forschung zu Nanokompositen und Gradientenmaterialien aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Mit dem kontinuierlichen Fortschritt der Materialwissenschaft werden Nanotechnologie und Gradientenstrukturdesign zunehmend auf Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen angewendet. Durch die Einführung von Nanokompositen und Gradientenmaterialstrukturen kann die Gesamtleistung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen deutlich verbessert und den Anforderungen komplexerer und anspruchsvollerer Anwendungen gerecht werden. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf den Forschungsfortschritt der Nanokompositentechnologie und des Gradientenmaterialdesigns sowie deren Anwendungsaussichten in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

#### 1. Anwendung von Nanokompositen in Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

##### 1. Einführung der nanoverstärkten Phase

- Durch die Zugabe von Nanopartikeln (wie z. B. Carbide, Oxide, Nitride usw.) wird eine feine und gleichmäßig verteilte zweite Phase gebildet, die die Festigkeit und Härte der Legierung deutlich verbessert.
- Der Verstärkungsmechanismus der Nanopartikel-Grenzfläche verhindert wirksam Versetzungsbewegungen und verbessert die Streckgrenze und Lebensdauer des Materials.

##### 2. Herstellungstechnologie von Nanokompositstrukturen

- Durch den Einsatz von Pulveraufbereitungstechnologien wie mechanischem Legieren, Sprühtrocknen und Kugelmahlen werden Nanopartikel gleichmäßig im Matrixpulver verteilt.
- Durch die Kombination fortschrittlicher Sintertechnologien (wie etwa Spark-Plasma-Sintern und heißisostatisches Pressen) wird die Verdichtung und gleichmäßige Struktur von Nanokompositen gewährleistet.

##### 3. Einfluss von Nanokompositen auf die thermische Stabilität

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Die nanoverstärkte Phase verbessert die Hochtemperaturleistung der Legierung, stabilisiert die Korngrenzen und hemmt das Kornwachstum.
- Verbessern Sie die Haltbarkeit und Betriebssicherheit von Materialien in extremen Umgebungen (hohe Temperaturen, Strahlung).

## 2. Gradientenmaterialdesign und Funktionsintegration

### 1. Das Konzept und die Vorteile von Gradientenmaterialien

- Unter Gradientenmaterialien versteht man Materialsysteme, deren chemische Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Eigenschaften sich entlang einer bestimmten Richtung graduell verändern.
- Durch Gradientendesign kann eine räumliche Optimierung der Materialeigenschaften erreicht werden, um den differenzierten Anforderungen verschiedener Regionen an Eigenschaften wie Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit gerecht zu werden.

### 2. Verfahren zur Realisierung einer Gradientenstruktur einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung

- Additive Fertigungstechnologien wie das schichtweise Aufbringen von Pulver und das Laserauftragschweißen werden verwendet, um den Zusammensetzungsgradienten und die Gewebeverteilung zu steuern.
- Der Wärmebehandlungsprozess reguliert die Organisationsstruktur verschiedener Regionen, um eine Gradientenleistung zu erzielen.

### 3. Vorteile von Gradientenwerkstoffen hinsichtlich Thermoschock- und Ermüdungsbeständigkeit

- Die Gradientenstruktur kann Spannungskonzentrationen im Material wirksam verringern und die Thermoschockzähigkeit verbessern.
- Verlängern Sie die Lebensdauer des Materials und verbessern Sie die Betriebsstabilität.

## 3. Synergistische Effekte von Nanokompositen und Gradientenmaterialien

- Durch die Kombination von Nanokompositentechnologie mit Gradientendesign entwickeln wir funktional integrierte Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, um eine lokale Verstärkung und eine allgemeine Leistungsoptimierung zu erreichen.
- Diese Verbundstrategie verbessert nicht nur die Festigkeit und Härte des Materials, sondern erhöht auch seine Zähigkeit und Hitzebeständigkeit und erfüllt so die Anforderungen einer Vielzahl komplexer Anwendungsszenarien.

## 4. Zukünftige Forschungsrichtungen

- Entwickeln Sie effizientere Fertigungstechnologien für die gleichmäßige Dispersion und Gradientenstruktur von Nanopartikeln.
- Erkunden Sie das tiefgreifende Verständnis der mikroskopischen Mechanismen von Materialien durch Nanokomposite und Gradientendesign.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Fördern Sie die praktische Anwendung von Nanokomposit-Gradientenmaterialien aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in extremen Umgebungen wie der Luft- und Raumfahrt, der Kernenergie usw.

### 10.3 Untersuchung der Integration von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und additiver Hochdurchsatzfertigung

Die rasante Entwicklung der additiven Fertigung (AM), insbesondere der Hochdurchsatz-Rapid-Prototyping-Technologien, hat die Herstellung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen revolutioniert. Traditionelle pulvermetallurgische Verfahren sind zwar ausgereift, weisen jedoch Einschränkungen bei der Herstellung komplexer Formen, der Materialausnutzung und der Fertigungseffizienz auf. Die integrierte Erforschung der Hochdurchsatz-AM bietet neue Entwicklungsmöglichkeiten und technologische Wege für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

#### 1. Überblick über die Hochdurchsatz-Additive-Fertigungstechnologie

##### 1. Technische Eigenschaften

- Um eine schichtweise Bildung einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung zu erreichen, werden fortschrittliche Verfahren wie selektives Laserschmelzen (SLM), Elektronenstrahlschmelzen (EBM) und Tintenstrahldruck eingesetzt.
- Durch Hochdurchsatzprozesse können die Materialabscheidungsraten und die Fertigungseffizienz erheblich verbessern, um den Anforderungen der Massenproduktion gerecht zu werden.

##### 2. Technologische Vorteile

- Die äußerst freien Möglichkeiten zur Gestaltung geometrischer Formen überwinden die Beschränkungen herkömmlicher Formen und Verarbeitungen.
- Eine genaue Materialausnutzung reduziert Abfall und spart Kosten.
- Passen Sie Prozessparameter flexibel an, um eine lokale Optimierung und ein Gradientendesign der Leistung zu erreichen.

#### 2. Herstellung und Anpassungsfähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulver

##### 1. Optimierung der Pulvereigenschaften

- Die Partikelgrößenverteilung, Morphologie und Fließfähigkeit von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulver werden untersucht, um seine Eignung für Pulversprüh- und Schmelzprozesse mit hohem Durchsatz sicherzustellen.
- Entwickeln Sie eine Technologie zur Herstellung von sphärischem und hochreinem Pulver, um die Formqualität und -dichte zu verbessern.

##### 2. Pulveraktivitäts- und Stabilitätskontrolle

- Kontrollieren Sie die Oxidation und den Verunreinigungsgehalt des Pulvers, um die Materialstabilität und die Gleichmäßigkeit des Gewebes während des Druckens sicherzustellen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Optimieren Sie Pulverlager- und Fördersysteme, um eine kontinuierliche und effiziente Produktion sicherzustellen.

### 3. Optimierung und Leistungssteigerung von Prozessparametern im Additiven Fertigungsverfahren

#### 1. Schmelzbaddynamik und Mikrostrukturkontrolle

- Die Auswirkungen wichtiger Parameter wie Energiezufuhr des Laser-/Elektronenstrahls, Scangeschwindigkeit und Schichtdicke auf das Schmelzbadverhalten und die erstarrte Mikrostruktur wurden untersucht.
- Erreichen Sie eine Kornverfeinerung, eine gleichmäßige Struktur und verbessern Sie die mechanischen Eigenschaften und die Lebensdauer.

#### 2. Eigenspannungs- und Deformationskontrolle

- Entwickeln Sie Strategien zum Wärmefeldmanagement und zur Spannungsbeseitigung, um thermische Spannungen und Verformungen während des Druckens zu reduzieren.
- In Kombination mit einer anschließenden Wärmebehandlung werden Materialeigenschaften und Maßhaltigkeit optimiert.

### 4. Anwendungserkundung der additiven Fertigung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

#### 1. Herstellung komplex geformter Strukturbauteile

- Herstellung von Hochleistungskomponenten aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, wie beispielsweise komplexe Trägheitsgegengewichte für die Luft- und Raumfahrt und nukleare Abschirmstrukturen.
- In Kombination mit einem topologieoptimierten Design wird sowohl ein geringes Gewicht als auch eine hohe Leistung erreicht.

#### 2. Maßgeschneiderte, funktional abgestufte Materialherstellung

- Durch Ausnutzung der Fähigkeit zur Kontrolle der Zwischenschichtzusammensetzung durch additive Fertigung werden funktional abgestufte Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen hergestellt, um eine Integration mehrerer Leistungen zu erreichen.
- Fördern Sie die Entwicklung der High-End-Fertigung in Richtung Intelligenz und Personalisierung.

### V. Herausforderungen und Zukunftsaussichten

#### 1. Technische Schwierigkeiten

- Der hohe Schmelzpunkt von Legierungen auf Wolfram-Molybdän-Basis erschwert die Formgebung.
- Kontrolle von Defekten wie Poren und Rissen, die während des additiven Herstellungsprozesses leicht entstehen.
- Hoher Energieverbrauch und hohe Kosten für die Gerätewartung.

#### 2. Zukünftige Entwicklungsrichtung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Entwickeln Sie hocheffiziente, energiesparende Anlagen und Prozesse für die additive Fertigung.
- Fördern Sie die Optimierung der tiefen Kopplung von Materialien und Prozessen, um eine qualitativ hochwertige Vorbereitung zu erreichen.
- Entdecken Sie intelligente Fertigungs- und Echtzeitüberwachungstechnologien, um die Stabilität des Herstellungsprozesses sicherzustellen.

Die Integration einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung und der additiven Fertigungstechnologie mit hohem Durchsatz wird zu Durchbrüchen bei der Materialleistung und dem Strukturdesign führen und die kontinuierliche Modernisierung und Innovation in der Luftfahrt, der Kernenergie und der Herstellung hochwertiger Geräte unterstützen.

## 10.4 Entwicklung der Betriebsleistung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in extremen Umgebungen

Als Hochleistungsfunktionswerkstoffe finden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen breite Anwendung in extremen Umgebungen, beispielsweise in der Kernenergie, der Luft- und Raumfahrt und im Militärbereich. Ihre Leistungsentwicklung unter rauen Bedingungen wie hohen Temperaturen, intensiver Strahlung, hoher Belastung und korrosiven Medien steht in direktem Zusammenhang mit der Sicherheit und Zuverlässigkeit des Materials. Dieser Abschnitt analysiert systematisch die Mechanismen der Leistungsentwicklung, Einflussfaktoren und Minderungsstrategien für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in extremen Umgebungen.

### 1. Änderungen in Struktur und Leistung in Umgebungen mit hohen Temperaturen

#### 1. Kornvergrößerung und Phasenumwandlungsverhalten

- Bei Hochtemperaturbetrieb kann es in der festen Lösung auf Wolfram-Molybdän-Basis und in der Nickel-Eisen-Matrix zu Kornwachstum kommen, was zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt.
- Einige Legierungskomponenten können bei hohen Temperaturen Phasenänderungen durchlaufen, die die thermische Stabilität und strukturelle Integrität des Materials beeinträchtigen.

#### 2. Thermisches Kriechen und Leistungsminderung durch Ermüdung

- Durch lang anhaltende Hochtemperaturbelastung verursachte Kriechverformungen führen zu einer dauerhaften plastischen Verformung des Materials und beeinträchtigen die Dimensionsstabilität.
- Durch thermische Ermüdung entstehen und breiten sich Mikrorisse aus, was die Lebensdauer verkürzt.

#### 3. Oxidation und Korrosion bei hohen Temperaturen

- Die Bildung und Wachstumsrate einer Hochtemperaturoxidschicht beeinflusst die Korrosionsbeständigkeit von Materialien.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Korrosionsprodukte können zu Oberflächenschädigungen und zum Verlust mechanischer Eigenschaften führen.

## 2. Einfluss der Strahlungsumgebung auf Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 1. Strahlenschadensmechanismus

- Durch die Bestrahlung mit Neutronen und Gammastrahlen kommt es zur Ansammlung von Gitterdefekten wie Leerstellen, Zwischengitteratomen und Versetzungsschleifen, wodurch strahlungsinduzierte mikrostrukturelle Veränderungen entstehen.
- Die Diffusion strahlungsbedingter Punktdefekte und Cluster kann zur Versprödung und Verhärtung des Materials führen.

### 2. Bestrahlungsbedingte Änderungen der Phasenstabilität

- Eine hohe Strahlungs-dosis kann eine Phasentrennung oder Ausfällung hervorrufen und so die Mikrostruktur der Legierung verändern.
- Phasenänderungen führen zu einer Verschlechterung der mechanischen Materialeigenschaften und beeinträchtigen die strukturelle Sicherheit.

### 3. Strahlenkorrosion und Wasserstoff-/Heliumgaseffekte

- Die durch die Bestrahlung entstehenden Wasserstoff- und Heliumgase sammeln sich im Material und bilden Blasen, was zu Volumenausdehnungen und Mikrorissen führt.
- Durch Strahlenkorrosion werden die Schäden an der Materialoberfläche und an der Grenzfläche verstärkt.

## 3. Leistungsentwicklung in Umgebungen mit hoher Belastung und Ermüdung

### 1. Spannungsrisskorrosion

- Unter der kombinierten Einwirkung von Spannungen und korrosiven Medien neigt die Legierung zur Spannungsrisskorrosion, was die Betriebszuverlässigkeit verringert.
- Mikrostrukturelle Defekte bieten Wege zur Rissbildung.

### 2. Zyklische Ermüdung und Änderungen der Bruchzähigkeit

- Mehrfache zyklische Belastungen verursachen Ermüdungsschäden und die Risswachstumsrate hängt eng mit der Umgebung zusammen.
- Durch das Wachstum von Ermüdungsrissen verringert sich die Sicherheitsmarge des Materials.

## 4. Strategien zur Leistungsverbesserung in extremen Umgebungen

### 1. Optimierung der Materialzusammensetzung

- Verbessern Sie die thermische Stabilität und Strahlungsbeständigkeit der Legierung durch Mikrolegierung und Nanostrukturdesign.
- Kontrollieren Sie den Verunreinigungsgehalt und reduzieren Sie strahlungsbedingte Defekte.

### 2. Fortschrittlicher Wärmebehandlungsprozess

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Verwenden Sie geeignete Alterungs- und Glühprozesse, um die Struktur zu stabilisieren und eine Kornvergrößerung zu verhindern.
- Optimieren Sie die Wärmebehandlungsparameter, um die Kriechfestigkeit und das Ermüdungsverhalten zu verbessern.

### 3. Oberflächenmodifizierungstechnologie

- Zur Verbesserung der Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit werden Oberflächenbeschichtungen, Ionenimplantationen und andere Methoden eingesetzt.
- Bilden Sie eine Schutzschicht, um die Ausbreitung von Strahlenschäden zu verhindern.

## 5. Zukünftige Forschungsrichtungen

- Enthüllen Sie detailliert den Einflussmechanismus der multiphysikalischen Feldkopplung auf die Leistung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen unter extremen Bedingungen.
- Entwickeln Sie Hochdurchsatzexperimente und mehrskalige Simulationstechnologien, um eine genaue Vorhersage der Serviceleistung zu erreichen.
- Fördern Sie intelligente Überwachungstechnologien, um eine Echtzeitbewertung und Frühwarnung des Betriebszustands von Legierungen in extremen Umgebungen zu erreichen.

Die Studie zur Entwicklung der Betriebsleistung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen in extremen Umgebungen wird eine solide theoretische Grundlage und technische Unterstützung für die Designoptimierung und Sicherheitsgewährleistung von Materialien in verwandten Bereichen bieten.

## 10.5 Leistungsstarke alternative Werkstoffe und nachhaltige Entwicklungsstrategien für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Dank der kontinuierlichen Weiterentwicklung der globalen Materialwissenschaft und Fertigungstechnologie spielen Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen als hochdichte und hochfeste Werkstoffe eine Schlüsselrolle in der Kernenergie, der Luft- und Raumfahrt, dem Militär und der Elektronik. Ressourcenknappheit, Umweltbelastungen und die Entwicklung neuer Werkstofftechnologien zwingen die Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsindustrie jedoch dazu, sich der Konkurrenz durch alternative Materialien und Herausforderungen im Bereich der nachhaltigen Entwicklung zu stellen. Dieser Abschnitt befasst sich mit dem aktuellen Stand und den Trends bei leistungsstarken alternativen Materialien sowie mit nachhaltigen Entwicklungsstrategien für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

## 1. Aktueller Entwicklungsstand von Hochleistungs-Alternativmaterialien

### 1. Legierungsmaterialien mit hoher Dichte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Bei den hochdichten Legierungen dominieren Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, doch in den letzten Jahren wurden aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften auch neue Materialien wie Wolfram-Molybdän-Kobalt-Legierungen, Wolfram-Kupfer-Legierungen und Hochentropielegierungen umfassend untersucht.
- Aufgrund der komplexen Wirkung mehrkomponentiger Elemente weisen Legierungen mit hoher Entropie hervorragende mechanische Eigenschaften und eine hohe Umweltbeständigkeit auf, was sie zu potenziellen alternativen Materialien macht.

## 2. Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe

- Verbundwerkstoffe auf Basis von Hartkeramiken wie Wolframcarbid und Titanitrid weisen eine extrem hohe Härte und Verschleißfestigkeit auf und eignen sich für Anwendungen in extremen Umgebungen.
- Durch die Entwicklung mehrskaliger Strukturen erreichen Verbundwerkstoffe ein Gleichgewicht zwischen Festigkeit, Zähigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit.

## 3. Leichte und hochfeste Metalllegierung

- Leichtbauwerkstoffe wie Titan- und Magnesiumlegierungen finden aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt sowie im Automobilbereich.
- Obwohl die Dichte relativ gering ist, kann es durch Strukturoptimierung und Verbunddesign den Ersatzbedarf einiger herkömmlicher Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen decken.

## 2. Herausforderungen für die nachhaltige Entwicklung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

### 1. Ressourcenknappheit und Versorgungsrisiken

- Seltene Metallressourcen wie Wolfram und Molybdän sind ungleich verteilt und werden erheblich vom internationalen Handel und der internationalen Politik beeinflusst.
- Schwankende Rohstoffpreise und instabile Lieferketten setzen die Produktionskosten von Legierungen und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt unter Druck.

### 2. Umweltauswirkungen und behördliche Beschränkungen

- Der Herstellungsprozess von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen verbraucht viel Energie und einige Prozesse erzeugen gefährliche Abfälle.
- Strengere Umweltvorschriften treiben die Forschung und Entwicklung umweltfreundlicher Fertigungs- und sauberer Produktionstechnologien voran.

### 3. Technologische Innovation und industrieller Modernisierungsdruck

- Angesichts der Konkurrenz durch alternative Materialien und neue Technologien sind kontinuierliche Innovationen bei der Zusammensetzung, den Verfahren und der Leistung von Legierungen erforderlich.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Stärken Sie die tiefe Integration von Materialdesign und intelligenter Fertigung, um eine effiziente, verbrauchsarme und kundenspezifische Produktion zu erreichen.

### 3. Nachhaltige Entwicklungsstrategie für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

#### 1. Effiziente Ressourcennutzung und Kreislaufwirtschaft

- Fördern Sie die Recycling- und Wiederverwendungstechnologie für Abfälle aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, um die Recyclingrate der Materialien zu verbessern.
- Entwickeln Sie Hochleistungslegierungen mit niedrigem Wolframgehalt, um eine optimale Verteilung der Materialressourcen zu erreichen.

#### 2. Umweltfreundliche Fertigung, Energieeinsparung und Emissionsreduzierung

- Optimieren Sie Produktionsprozesse, reduzieren Sie Energieverbrauch und Abfallemissionen und erreichen Sie eine grüne und umweltfreundliche Fertigung.
- Führen Sie saubere Energie und fortschrittliche Umweltüberwachungstechnologien ein, um die intelligente Umgestaltung von Fabriken zu fördern.

#### 3. Materialinnovation und multifunktionale Integration

- Erforschen und entwickeln Sie leistungsstarke mikrolegierte und mehrkomponentige Verbundwerkstoffe, um die Anwendungsbereiche zu erweitern.
- In Kombination mit Funktionsbeschichtungen, intelligenter Sensorik und anderen Technologien können die Materialien intelligent und multifunktional gemacht werden.

#### 4. Politische Unterstützung und industrielle Zusammenarbeit

- Reagieren Sie aktiv auf nationale Strategien und fördern Sie die unabhängige Innovation wichtiger Materialien und die Verbesserung der Industriekette.
- Schaffen Sie eine integrierte Plattform für Produktion, Bildung, Forschung und Anwendung, um die Zusammenarbeit innerhalb der Branche und den internationalen Austausch zu stärken.

## IV. Zukunftsausblick

- Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen werden ihre wichtige Position in der High-End-Fertigung weiterhin behaupten und gleichzeitig neue Materialtechnologien und Fertigungsmodelle aktiv nutzen.
- Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung wird sich durch den gesamten Lebenszyklus von Legierungsmaterialien ziehen und die grüne Transformation und innovative Modernisierung der Branche fördern.
- In Zukunft werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und alternative Materialien ein komplementäres Entwicklungsmuster bilden und eine Win-Win-Situation hinsichtlich Materialeistung und Umweltvorteilen schaffen.

Die nachhaltige Entwicklung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen verbessert nicht nur die Leistungsfähigkeit des Materials selbst, sondern ist auch der Schlüssel zur Förderung einer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gesunden und umweltfreundlichen Entwicklung der entsprechenden Industriekette. Durch technologische Innovation und Ressourcenoptimierung werden Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen auch weiterhin eine solide Unterstützung für die fortschrittliche Fertigung und strategisch wichtige aufstrebende Industrien bieten.



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Anhang

### Anhang 1: Zusammenfassung der typischen Leistungsparameter von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Dieser Anhang fasst die wichtigsten physikalischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen als Referenz für Design, Fertigung und Qualitätskontrolle zusammen. Die Daten stammen aus nationalen und internationalen Standarddokumenten sowie typischen industriellen Anwendungen.

Parameterkategorie	Leistungsindikatoren	Zahlenbereich	Einheit	Bemerkung
Physikalische Eigenschaften	Dichte	16,5 – 18,5	g/cm <sup>3</sup>	Beeinflusst durch Zusammensetzung und Dichte
	Anteil	16,5 – 18,5	—	Fast gleich der Dichte
	Wärmeausdehnungskoeffizient	4,5 – 6,0 × 10 <sup>-6</sup>	1/K	20°C~500°C Bereich
	Wärmeleitfähigkeit	70 – 120	W/(m·K)	Entsprechend den Unterschieden in Zusammensetzung und Mikrostruktur
Mechanische Eigenschaften	Zugfestigkeit	500 – 900	MPa	Typische pulvermetallurgische Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung
	Streckgrenze	350 – 700	MPa	
	Bruchzähigkeit	15 – 30	MPa·m <sup>0,5</sup>	Variiert je nach Testmethode und Probenstatus
	Härte (Rockwellhärte)	80 – 95	HRC	Hängt von der Wärmebehandlung und der Mikrostruktur ab
	Verlängerung	5 – 15	%	Normalerweise niedrig, was die Zähigkeit des Materials widerspiegelt
chemische Zusammensetzung	Wolfram (W)-Gehalt	85 – 95	Gew.-%	Hauptbestandteile der Legierung
	Molybdän (Mo)-Gehalt	2 – 10	Gew.-%	Wichtige Elemente der Leistungskontrolle
	Nickel (Ni)-Gehalt	3 – 8	Gew.-%	Hauptbestandteile der Bindephase

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Eisengehalt (Fe)	1 – 5	Gew.-%	Zusammensetzung der Bindephase
	Verunreinigungen (wie C, S, O, N)	≤ 0,05	Gew.-%	Erhebliche Auswirkungen auf die Leistung, erfordert strenge Kontrolle
<b>Elektrische Eigenschaften</b>	Spezifischer Widerstand	6 – 10	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	Beeinflusst durch Legierungszusammensetzung und Temperatur
<b>Magnetische Eigenschaften</b>	Magnetische Peripherie	1,0 – 1,5	—	Die meisten sind schwach magnetische oder paramagnetische Materialien

**Anwendung:**

- Bei den oben genannten Parametern handelt es sich lediglich um typische Werte. Die tatsächliche Leistung wird stark vom Zusammensetzungsverhältnis, dem Herstellungsprozess und den Wärmebehandlungsbedingungen beeinflusst.
- Bei bestimmten Anwendungen empfiehlt es sich, detaillierte Testdaten und Standardspezifikationen für Design und Materialauswahl zu kombinieren.
- Die Materialeistung wird kontinuierlich optimiert und wir müssen die neuesten Forschungsergebnisse und Branchentrends im Auge behalten.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Anhang 2: Vergleichstabelle der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungssorten und chemischen Zusammensetzungen

Dieser Anhang fasst gängige Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und ihre typischen chemischen Zusammensetzungen zusammen und dient als Referenz für die Materialauswahl und Qualitätskontrolle. Die Daten basieren auf nationalen und internationalen Standards sowie gängigen Industriespezifikationen.

Legierungsqualität	Wolfram (W)-Gehalt (Gew.-%)	Molybdän (Mo)-Gehalt (Gew.-%)	Nickelgehalt (Ni) (Gew.-%)	Eisengehalt (Fe) (Gew.-%)	Gehalt anderer Elemente (Gew.-%)	Bemerkung
WNiFe-85/7/3	85	7	7	3	≤0,05 (Verunreinigungen)	Gemeinsame hochdichte Legierung, gute Gesamtleistung
WNiFe-90/7/3	90	7	7	3	≤0,05 (Verunreinigungen)	Hoher Wolframgehalt, geeignet für Anwendungen mit hohem spezifischen Gewicht
WMoNiFe-85/5/7/3	85	5	7	3	≤0,05 (Verunreinigungen)	Molybdänhaltige Modifikation zur Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit
WMoNiFe-90/3/5/2	90	3	5	2	≤0,05 (Verunreinigungen)	Moderater Molybdängehalt, ausgewogene Leistung
WNiFe-75/15/10	75	—	15	10	≤0,05 (Verunreinigungen)	Niedriger Wolframgehalt, verbesserte Plastizität und Verarbeitungsleistung
WNiFe-80/10/10	80	—	10	10	≤0,05 (Verunreinigungen)	Ausgewogene mechanische Eigenschaften und Zähigkeit

### Hinweise:

- **Markenbezeichnungsregeln** : Normalerweise als Prozentsatz der Hauptkomponenten (Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen) angegeben. Die spezifische Reihenfolge und das Inhaltsverhältnis variieren je nach Hersteller und Standard leicht.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Verunreinigungselemente** : Der Gehalt an Verunreinigungen wie Kohlenstoff (C), Schwefel (S), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) wird auf extrem niedrigem Niveau kontrolliert , um eine stabile Legierungsleistung zu gewährleisten.
- **Leistungsanpassung** : Verschiedene Güten eignen sich für unterschiedliche Anwendungsanforderungen, wie z. B. Abschirmungen mit hoher Dichte, Hochtemperaturstrukturen oder Komponenten mit hoher Zähigkeit .
- **Angepasste Formel** : Bei einigen High-End-Anwendungen wird der Spurenelementgehalt je nach Bedarf angepasst und ein Mikrolegierungsdesign durchgeführt.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### Anhang 3: Standarddokumente und Referenzindex für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Dieser Anhang fasst die wichtigsten Normen, Spezifikationen und Referenzen im Bereich der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen zusammen und umfasst maßgebliche nationale und internationale Normen, technische Berichte, Patendokumente und wissenschaftliche Arbeiten als Referenz für Forschung und Anwendung.

#### 1. Internationale Standards und Normen

- **ASTM B777-15**  
*Standard Specification for Tungsten Heavy Alloy Bars, Forgings, and Shapes,*  
ein Standard der American Society for Testing and Materials für Wolfram-Schwerlegierungsstäbe, deckt die relevanten technischen Anforderungen für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen ab.
- **MIL-DTL-15326F**  
*für schwere Wolframlegierungen*  
ist ein US-amerikanischer Militärmaterialstandard für Wolframlegierungen, die für Hochleistungsanwendungen im Militär und in der Luft- und Raumfahrt geeignet sind.
- **ISO 16135:2014**  
*Schwermetalllegierungen – Wolframschwerlegierungen – Technische Lieferbedingungen.*  
Lieferbedingungen und Qualitätsanforderungen der Internationalen Organisation für Normung für Wolframschwerlegierungen.

#### 2. Chinas nationale und industrielle Standards

- **GB/T 18053-2018**  
*Wolframlegierungsstäbe mit hoher Dichte ist*  
der nationale Standard für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und verwandte Stäbe aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte und umfasst Zusammensetzung, Eigenschaften und Prüfmethode.
- **YS/T 287-2010**  
*Technische Bedingungen für Wolframlegierungsmaterialien*  
ist ein Standard der Militärindustrie, der die technischen Spezifikationen und Inspektionsstandards für Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungsmaterialien festlegt.

#### 3. Wichtige Technologieberichte und Forschungsarbeiten

- Wang Qiang und Li Ming, „Studie zur Herstellungstechnologie und zu den Eigenschaften von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen“, Materials Review, Bd. 34, Nr. 7, 2020.  
Die Herstellungsmethode der Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung und ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften wurden untersucht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Zhang Y., Li H., „Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von W-Mo-Ni-Fe-Schwerlegierungen“, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 782: 224–233.
- Chen Jie et al., „Leistungsoptimierung nanostrukturierter W-Mo-Ni-Fe-Legierungen“, *Acta Metallurgica Sinica*, Bd. 57, Nr. 4, 2021.  
Diese Studie untersucht den Mechanismus, durch den Nanostrukturen die Leistung von Legierungen verbessern.

#### 4. Patentliteratur

- CN108234567A: Herstellungsverfahren und Anwendung einer Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung, Erfinder: Li Hua, 2018. Dieses Dokument stellt eine pulvermetallurgische Herstellungstechnologie für eine Hochleistungslegierung aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen vor.
- US9876543B2: Hochdichte Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung und Herstellungsverfahren, Erfinder: John Smith, 2017.  
Eine neue hochdichte Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung und ihr Herstellungsverfahren.

#### V. Industriestandards und technische Richtlinien

- Technisches Handbuch zu Wolframlegierungsmaterialien, CTIA GROUP, veröffentlicht 2019.  
Dies ist eine Zusammenstellung systematischer technischer Daten zu Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen und verwandten Wolframlegierungsmaterialien.
- Prozessspezifikationen für die Pulvermetallurgie von Schwermetalllegierungen, China Powder Metallurgy Association, 2021.  
Enthält Branchenrichtlinien für die Vorbereitung und Verarbeitung von Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungspulvern.

#### Verzehrempfehlung:

- Forscher und Ingenieure können die Normen und Literatur in diesem Anhang nutzen, um Materialien auszuwählen, Prozesse zu optimieren und Qualitätstests durchzuführen.
- Wenn Sie die neuesten internationalen und nationalen Standards im Auge behalten, bleiben Sie technologisch auf dem neuesten Stand und erfüllen die Compliance-Anforderungen.
- In Kombination mit patentierter Technologie fördern wir die Forschung und Entwicklung sowie die Industrialisierung neuer Produkte aus Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Anhang 4: Glossar der Begriffe und Definitionen englischer Abkürzungen im Zusammenhang mit Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen

Dieser Anhang enthält Fachbegriffe und häufig verwendete englische Abkürzungen im Zusammenhang mit Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierungen, um dem Leser das genaue Verständnis und die Anwendung der relevanten technischen Informationen zu erleichtern.

### 1. Glossar

der Begriff	Interpretation
<b>Wolfram-Molybdän-Nickel-Eisen-Legierung</b>	Hochdichte Legierungen aus Wolfram (W), Molybdän (Mo), Nickel (Ni) und Eisen (Fe) werden häufig in Hochleistungsindustrien eingesetzt.
<b>Pulvermetallurgie</b>	Der Prozess der Herstellung von Legierungsmaterialien durch Pressen und Sintern von Metallpulver.
<b>Sintern</b>	Der Prozess der Verbindung von Pulverpartikeln zu einem dichten Feststoff bei hoher Temperatur ist ein wichtiges Prozessglied.
<b>Mikrostruktur</b>	Die Mikrostruktur der Legierung, einschließlich Körner, Phasengrenzen und Verunreinigungsverteilung.
<b>Verdichtung</b>	Ein Prozess, der die innere Dichte des Materials erhöht, die Porosität verringert und die mechanischen Eigenschaften verbessert.
<b>Wärmebehandlung</b>	Ein Verfahren zur Steuerung der Struktur und Eigenschaften von Legierungen durch Erhitzen und Abkühlen.
<b>Additive Fertigung</b>	Fortschrittliche Fertigungstechnologien wie 3D-Druck, die durch schichtweises Auftragen von Materialien Werkstücke mit komplexen Formen herstellen.
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Die Fähigkeit eines Materials, Wärme zu leiten, gemessen in Watt pro Meter pro Kelvin (W/(m·K)).
<b>Zugfestigkeit</b>	Die maximale Spannung, bei der ein Material einem Zugbruch widersteht, normalerweise ausgedrückt in Megapascal (MPa).
<b>Magnetische Reaktion</b>	Das magnetische Verhalten eines Materials unter einem externen Magnetfeld, einschließlich Paramagnetismus und Ferromagnetismus.
<b>Korrosionsbeständigkeit</b>	Die Fähigkeit der Legierung, chemischer Korrosion und Umwelterosion zu widerstehen.
<b>Zerstörungsfreie Prüfung</b>	Nachweismethoden, die die Materialstruktur nicht zerstören, wie Ultraschallprüfung, Röntgenprüfung und Magnetpulverprüfung.

### 2. Definitionen englischer Abkürzungen

Abkürzungen	Vollständiger Name	Interpretation
<b>W</b>	Wolfram	Wolfram
<b>Mo</b>	Molybdän	Molybdän
<b>Ni</b>	Nickel	Nickel
<b>Fe</b>	Eisen	Eisen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>ASTM</b>	Amerikanische Gesellschaft für Prüfung und Materialien	American Society for Testing and Materials, eine internationale Organisation, die viele Materialstandards entwickelt.
<b>MIL</b>	Militärische Spezifikation	Die US-Militärstandards decken die Spezifikationen für militärische Materialien und Ausrüstung ab.
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung	Internationale Organisation für Normung, die international einheitliche Standards entwickelt.
<b>GB/T</b>	Guobiao / Technischer Standard	Chinesische nationale Standard-/empfohlene Standardnummer.
<b>YS/T</b>	Industriestandard	Chinesische Industriestandardnummer.
<b>PVD</b>	Physikalische Gasphasenabscheidung	Physikalische Gasphasenabscheidung, eine Dünnschichtabscheidungstechnik.
<b>Rasterelektronenmikroskop (SEM)</b>	Rasterelektronenmikroskop	Rasterelektronenmikroskop, das zur Analyse der Mikrostruktur von Materialien verwendet wird.
<b>XRD</b>	Röntgenbeugung	Röntgenbeugung, eine Technik zur Analyse der Kristallstruktur von Materialien.
<b>ICP</b>	Induktiv gekoppeltes Plasma	Induktiv gekoppeltes Plasma zur Analyse der chemischen Zusammensetzung.
<b>RFA</b>	Röntgenfluoreszenz	Röntgenfluoreszenzspektroskopie zur quantitativen Elementanalyse.
<b>ONH</b>	Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff	Methoden zur Analyse des Sauerstoff-, Stickstoff- und Wasserstoffgehalts werden verwendet, um Gasverunreinigungen in Materialien zu erkennen.
<b>CT</b>	Computertomographie	Computertomographie zur Erkennung innerer Defekte.
<b>RoHS</b>	Beschränkung gefährlicher Stoffe	Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe, EU-Umweltgesetzgebung.
<b>ERREICHEN</b>	Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe	Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REC) in der EU.
<b>Sicherheitsdatenblatt</b>	Sicherheitsdatenblatt	Sicherheitsdatenblatt, das Informationen zur sicheren Verwendung von Chemikalien enthält.

**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

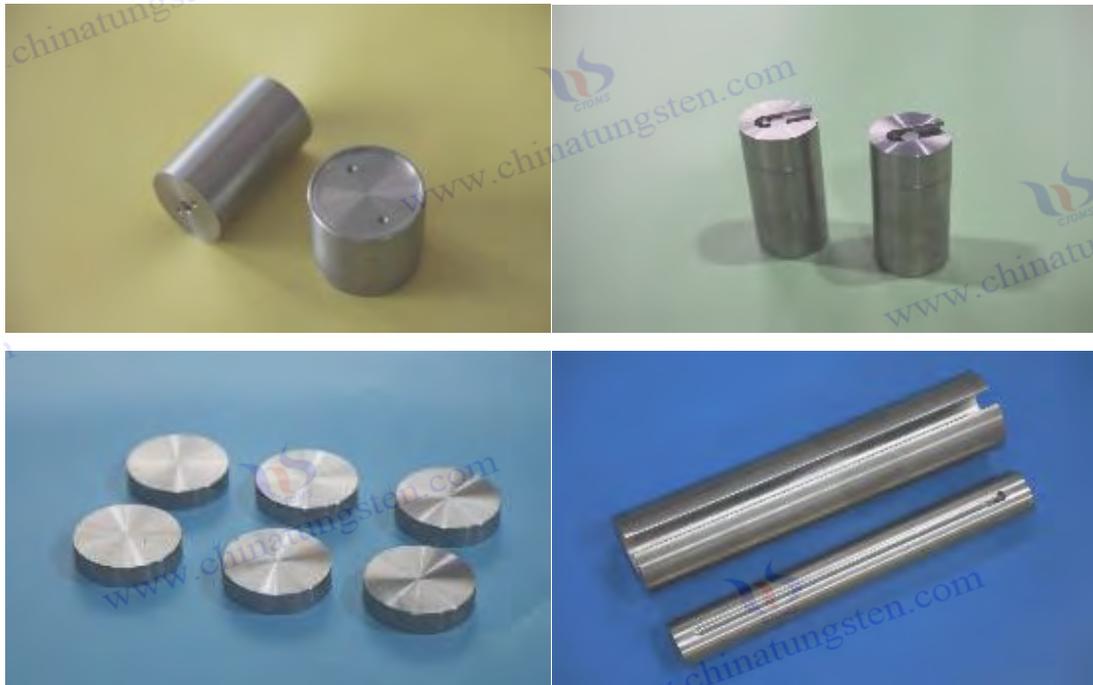
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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)