

# Enzyklopädie der TZM Molybdänstäbe

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  
Seltenerdmetallindustrie

## Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

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

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

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



### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

**High Melting Point:** Suitable for extreme high-temperature environments.

**Excellent High-Temperature Strength:** Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

**Good Thermal Stability and Creep Resistance:** Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

**Superior Corrosion and Oxidation Resistance:** Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

**Excellent Machinability:** Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

**High-Temperature Furnace Components:** Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

**Aerospace Industry:** Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

**Nuclear Industry:** Used in reactor support structures and control rod guide systems.

**Electronics Industry:** Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

**Mold Manufacturing:** Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: [www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

## Verzeichnis

### 1. Einführung in den TZM Molybdänstab

- 1.1 Definition und Bedeutung des TZM Molybdänstabes
- 1.2 Historische Entwicklung und technologische Entwicklung des TZM Molybdänstabes
- 1.3 Die Rolle des TZM-Molybdänstabs in der modernen Industrie und wissenschaftlichen Forschung

### 2. Grundprinzip des TZM Molybdänstabes

- 2.1 Chemische Zusammensetzung und Legierungseigenschaften von TZM Molybdänstab
- 2.2 Physikalische und mechanische Eigenschaften des TZM-Molybdänstabs
- 2.3 Vergleich von TZM Molybdänstab mit reinem Molybdän und anderen Superlegierungen
- 2.4 Arbeitsmechanismus des TZM-Molybdänstabs in Hochtemperaturumgebungen

### 3. Leistung des TZM-Molybdänstabs

- 3.1 Physikalische und chemische Eigenschaften
  - 3.1.1 Schmelzpunkt und thermische Stabilität
  - 3.1.2 Dichte und Wärmeleitfähigkeit
  - 3.1.3 Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit
  - 3.1.4 Mechanische Festigkeit und Zähigkeit
- 3.2 Thermische und mechanische Eigenschaften
  - 3.2.1 Wärmeausdehnung und Hochtemperaturverformung
  - 3.2.2 Temperaturwechselbeständigkeit
  - 3.2.3 Kriechverhalten und Langzeitstabilität
  - 3.2.4 Ermüdungsverhalten und Recyclingfähigkeit
- 3.3 Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehung
  - 3.3.1 Kornstruktur und -orientierung
  - 3.3.2 Die Rolle von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff
  - 3.3.3 Oberflächenmorphologie und Hochtemperatureigenschaften
- 3.4 Lebensdauer und Zuverlässigkeit
  - 3.4.1 Faktoren, die die Lebensdauer beeinflussen
  - 3.4.2 Fehlermöglichkeitsanalyse (z. B. Bruch, Korrosion)
  - 3.4.3 Methoden der Zuverlässigkeitsprüfung
- 3.5 CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab Sicherheitsdatenblatt

### 4. Zubereitungsprozess und Technologie

- 4.1 Auswahl und Zubereitung von Rohstoffen
  - 4.1.1 Reinigung von Molybdänpulvern und Qualitätsanforderungen
  - 4.1.2 Auswahl von Titan-, Zirkonium- und Kohlenstoffadditiven
  - 4.1.3 Optimierung des Legierungsverhältnisses
  - 4.1.4 Rohstoffprüfung und Qualitätskontrolle
- 4.2 Metallurgische Prozesse
  - 4.2.1 Mischen und Pressen von Pulver

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

- 4.2.1.1 Mechanisches Legieren
- 4.2.1.2 Isostatisches Pressen
- 4.2.2 Sinterprozess
  - 4.2.2.1 Vakuum-Sintern
  - 4.2.2.2 Atmosphärensintern und Temperaturregelung
- 4.2.3 Schmieden und Walzen
  - 4.2.3.1 Warm- und Kaltschmieden
  - 4.2.3.2 Walzausrüstung und Parameter
- 4.2.4 Extrudieren und Ziehen
  - 4.2.4.1 Hochtemperatur-Extrusion
  - 4.2.4.2 Ziehsteine und Schmierung
- 4.3 Bearbeitung und Endbearbeitung
  - 4.3.1 Drehen und Fräsen
    - 4.3.1.1 CNC-Bearbeitung
    - 4.3.1.2 Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächenrauheit
  - 4.3.2 Schleifen und Polieren
    - 4.3.2.1 Mechanisches Polieren
    - 4.3.2.2 Chemisches Polieren und Elektropolieren
  - 4.3.3 Wärmebehandlung und Glühen
    - 4.3.3.1 Glühen und Kornkontrolle
    - 4.3.3.2 Techniken zum Stressabbau
  - 4.3.4 Oberflächenbehandlung
    - 4.3.4.1 Antioxidations-Beschichtungstechnologie
    - 4.3.4.2 Oberflächenaufkohlen und Nitrieren
- 4.4 Ausrüstung und Automatisierung
  - 4.4.1 Wichtige Produktionsanlagen
    - 4.4.1.1 Vakuum-Sinteröfen
    - 4.4.1.2 Schmiede- und Walzanlagen
    - 4.4.1.3 CNC-Bearbeitungszentren
  - 4.4.2 Automatisierung und Intelligenz von Produktionslinien
  - 4.4.3 Reinraum- und Umgebungskontrollen

## 5. Qualitätskontrolle und -prüfung

- 5.1 Technologien zur Online-Erkennung
  - 5.1.1 Prüfung der maßlichen und geometrischen Genauigkeit
  - 5.1.2 Oberflächenfehler- und Rissprüfung
- 5.2 Leistungsprüfung
  - 5.2.1 Hochtemperaturfestigkeit und -härte
  - 5.2.2 Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit
  - 5.2.3 Wärmeausdehnung und Leitfähigkeit
- 5.3 Fehleranalyse und -verbesserung
  - 5.3.1 Riss- und Bruchanalyse
  - 5.3.2 Ermüdung und Kriechen bei hohen Temperaturen

### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### 5.3.3 Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung

## 6. Anwendungen von TZM Molybdänstab

### 6.1 Komponenten für Hochtemperaturöfen

#### 6.1.1 Heizelemente

#### 6.1.2 Anwendungen von Vakuum-Sinteröfen

#### 6.1.3 Anwendungen von Wärmebehandlungsöfen

### 6.2 Luft- und Raumfahrtindustrie

#### 6.2.1 Anwendungen von Raketendüsen

#### 6.2.2 Hochtemperatur-Strukturteile

#### 6.2.3 Thermischer Schutz von Raumfahrzeugen

### 6.3 Nuklearindustrie

#### 6.3.1 Komponenten von Kernreaktoren

#### 6.3.2 Kernfusionsanlagen

#### 6.3.3 Umgang mit radioaktivem Material

### 6.4 Elektronik- und Halbleiterindustrie

#### 6.4.1 Ionenimplantationsgeräte

#### 6.4.2 Dünnschichtabscheidung

#### 6.4.3 Herstellung elektronischer Geräte

### 6.5 Sonstige Industrie- und Forschungsbereiche

#### 6.5.1 Hochtemperatur-Versuchsgeräte

#### 6.5.2 Hochtemperatur-Formen und -Werkzeuge

#### 6.5.3 Anwendungen in der additiven Fertigung

## 7. Technische Herausforderungen und zukünftige Entwicklung

### 7.1 Technische Herausforderungen

#### 7.1.1 Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen

#### 7.1.2 Komplexe Geometrie und Scale-up-Fertigung

#### 7.1.3 Kostenkontrolle

### 7.2 Neue Werkstoffe und Technologien

#### 7.2.1 Modifiziertes Legierungsdesign

#### 7.2.2 Nanostrukturen und Komposite

#### 7.2.3 Konkurrierende Hochtemperaturwerkstoffe

### 7.3 Intelligente und umweltfreundliche Fertigung

#### 7.3.1 Intelligente Produktionsüberwachung

#### 7.3.2 Energiesparende und umweltfreundliche Techniken

#### 7.3.3 Effizientes Abfallrecycling

### 7.4 Zukünftige Trends

#### 7.4.1 Performance-Optimierung

#### 7.4.2 Branchenübergreifende Anwendungen

#### 7.4.3 Anwendungen in extremen Umgebungen

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

## 8. TZM Molybdänstab Standards und Spezifikationen

### 8.1 Nationale Normen (GB)

- 8.1.1 GB/T-Normen für Molybdän und Legierungen
- 8.1.2 Prüf- und Bewertungsnormen für Superlegierungen
- 8.1.3 Standards für die Prozess- und Anlagenausführung

### 8.2 Internationale Normen (ISO)

- 8.2.1 ISO 6892 - Zugprüfung von Metallen
- 8.2.2 ISO 14001 - Umweltmanagement
- 8.2.3 ISO 3452 - Zerstörungsfreie Prüfung

### 8.3 Amerikanische Normen (USA)

- 8.3.1 ASTM B387 - Stäbe aus Molybdänlegierungen
- 8.3.2 ASTM E384 - Prüfung der Mikrohärtigkeit
- 8.3.3 ASME - Normen für Hochtemperaturgeräte

### 8.4 Weitere internationale und Industrienormen

- 8.4.1 JIS G 0571 - Molybdän-Prüfung
- 8.4.2 DIN EN 10228 - Zerstörungsfreie Prüfung
- 8.4.3 GOST 17431 - Molybdän-Legierungen

### 8.5 Implementierung und Zertifizierung von Standards

- 8.5.1 Anwendung von Normen in Produktion und Prüfung
- 8.5.2 Zertifizierung des Qualitätsmanagementsystems (z. B. ISO 9001)
- 8.5.3 Exportkonformität und internationale Zertifizierungen

## Anhang

- A. Glossar der Begriffe
- B. Verweise

### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

## 1. Einleitung

### 1.1 Definition und Bedeutung des TZM-Molybdänstabs

TZM Molybdänstab ist ein Hochleistungslegierungswerkstoff aus Molybdän (Molybdän) als Matrix und unter Zugabe von Titan (Ti), Zirkonium (Zr) und Kohlenstoff (C) und anderen Elementen, und sein Name leitet sich von der Abkürzung "Titan-Zirkonium-Molybdän" ab. Der TZM-Molybdänstab nimmt aufgrund seiner hervorragenden Hochtemperaturfestigkeit, seiner hervorragenden Kriechfestigkeit und seiner guten Korrosionsbeständigkeit eine unersetzliche und wichtige Position in der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie, dem Hochtemperaturofenbau, der Halbleiterindustrie und anderen High-Tech-Bereichen ein. Im Vergleich zu reinem Molybdän verbessert die TZM-Legierung die mechanischen Eigenschaften durch die Dotierung von Spurenelementen erheblich, insbesondere die Stabilität und Haltbarkeit in Hochtemperaturumgebungen, was sie zu einer idealen Materialwahl unter extremen Arbeitsbedingungen macht.

Die chemische Zusammensetzung von TZM-Molybdänstäben besteht typischerweise aus etwa 0,5 % Titan, 0,08 % Zirkonium und 0,01-0,04 % Kohlenstoff, der Rest ist Molybdän. Dieses spezielle Legierungsverhältnis ermöglicht es TZM-Molybdänstäben, bei hohen Temperaturen (etwa 1400 °C, viel höher als die 1000 °C von reinem Molybdän) eine höhere Rekristallisationstemperatur zu haben, wodurch sie die strukturelle Integrität in extremen Umgebungen aufrechterhalten können. Darüber hinaus sind die Oxidationsbeständigkeit und die Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben auch vielen herkömmlichen Superlegierungen überlegen, was sie hervorragend für Szenarien macht, die hohe thermische Belastungen und mechanische Festigkeit erfordern.

In industriellen Anwendungen werden TZM-Molybdänstäbe häufig bei der Herstellung von Heizelementen für Hochtemperaturöfen, Formmaterialien, Luft- und Raumfahrtkomponenten wie Raketendüsen und Turbinenschaufeln, Strukturkomponenten für Kernreaktoren und Komponenten für Halbleiteranlagen verwendet. Seine Bedeutung liegt nicht nur in seinen physikalischen Eigenschaften, sondern auch in seiner Fähigkeit, die wachsende Nachfrage nach Hochleistungswerkstoffen in der modernen Industrie zu befriedigen. In der Luft- und Raumfahrt sind beispielsweise TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts (ca. 2623 °C) und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten das Material der Wahl für die Herstellung von Komponenten für Hochtemperaturantriebe. In der Nuklearindustrie werden TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihrer Toleranz gegenüber Neutronenstrahlung und ihres geringen thermischen Neutronenabsorptionsquerschnitts bei der Herstellung von Schlüsselkomponenten in Kernreaktoren eingesetzt.

Darüber hinaus spielen TZM-Molybdänstäbe auch im Bereich der wissenschaftlichen Forschung eine wichtige Rolle. Beispielsweise werden TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihrer stabilen Eigenschaften in der Hochtemperatur-Materialprüfung, in der Plasmaphysik und in der Entwicklung fortschrittlicher Fertigungstechnologien als Kernkomponenten von Versuchsgäräten eingesetzt. Die Studie zeigt, dass der Produktionsprozess und die Qualitätskontrolltechnologie von TZM-Molybdänstäben in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert wurden, was ihre breite Anwendung

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

auf dem Weltmarkt gefördert hat. Von der Luft- und Raumfahrt bis zur Energiewirtschaft sind TZM-Molybdänstäbe aus der modernen High-Tech-Industrie nicht mehr wegzudenken, und ihre Bedeutung nimmt mit dem technologischen Fortschritt und der Erweiterung der Anwendungsfelder weiter zu.

## 1.2 Historische Entwicklung und technologische Entwicklung des TZM-Molybdänstabs

Die Entwicklung von TZM-Molybdänstäben geht auf die Mitte des 20. Jahrhunderts zurück, als die Nachfrage nach Hochtemperaturmaterialien mit der rasanten Entwicklung der Luft- und Raumfahrt- und Nuklearindustrie dramatisch anstieg. Obwohl reines Molybdän einen hohen Schmelzpunkt und eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit aufweist, schränken das Fehlen einer hohen Temperaturfestigkeit, das Kriechen sowie die Rekristallisation und Versprödung den Einsatz in extremen Umgebungen ein. Um diese Mängel zu überwinden, begannen Materialwissenschaftler, Legierungen zu erforschen, um die Eigenschaften von Molybdän zu verbessern.

In den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts übernahmen wissenschaftliche Forschungseinrichtungen und die Industrie in den Vereinigten Staaten die Führung bei der Entwicklung von TZM-Legierungen. Durch die Zugabe von Spuren von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff in die Molybdänmatrix verbessern TZM-Legierungen ihre Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit erheblich. Die Zugabe von Titan und Zirkonium verbessert die Kristallstruktur von Molybdän durch Lösungsverstärkung und Verstärkungsmechanismen der zweiten Phase, während die Zugabe von Kohlenstoff die Festigkeit und Verschleißfestigkeit der Legierung durch die Bildung von Karbidpartikeln weiter verbessert. Ende der 1950er Jahre begannen TZM-Legierungen in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt zu werden, zum Beispiel bei der Herstellung von Raketentriebwerksdüsen und Hochtemperatur-Strukturbauteilen.

In den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde mit dem Fortschritt der Pulvermetallurgietechnologie der Produktionsprozess von TZM-Molybdänstäben erheblich verbessert. Das pulvermetallurgische Verfahren macht die Mikrostruktur der TZM-Legierung gleichmäßiger und die Leistung stabiler, indem es die Partikelgröße und das Mischungsverhältnis des Rohpulvers genau steuert. In dieser Zeit wurden TZM-Molybdänstäbe in großem Umfang im Hochtemperaturofenbau und in der Nuklearindustrie eingesetzt. Zum Beispiel begannen beispielsweise Steuerstäbe und Strukturteile in Kernreaktoren, TZM-Legierungen zu verwenden, um hohen Temperaturen und Umgebungen mit hoher Strahlung standzukommen.

Von den 70er bis 80er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde mit dem Aufkommen der Halbleiterindustrie das Anwendungsgebiet des TZM-Molybdänstabs weiter ausgebaut. Aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten werden TZM-Molybdänstäbe bei der Herstellung von Hochtemperaturvorrichtungen und Sputtertargets in Halbleiterbauelementen eingesetzt. Im gleichen Zeitraum trieb die Nachfrage in der Luft- und Raumfahrt die weitere Optimierung von TZM-Molybdänstäben voran, z. B. durch die Verbesserung des Wärmebehandlungsprozesses und der Oberflächenbehandlungstechnik, um deren Oxidationsbeständigkeit zu erhöhen.

### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Im 21. Jahrhundert ist die Produktions- und Anwendungstechnik von TZM Molybdänstab in eine neue Phase eingetreten. Studien haben gezeigt, dass der Herstellungsprozess moderner TZM-Molybdänstäbe einen hohen Grad an Automatisierung und Präzision erreicht hat. So wurden beispielsweise durch die fortschrittliche Plasmasinterertechnologie und das Vakuum-Wärmebehandlungsverfahren die Korngröße und die Leistungskonsistenz von TZM-Molybdänstäben erheblich verbessert. Darüber hinaus wurde durch die Einführung der Nanotechnologie die Mikrostruktur von TZM-Legierungen weiter optimiert und damit ihre Haltbarkeit in extremen Umgebungen verbessert.

In den letzten Jahren wurde mit der Entwicklung der additiven Fertigungstechnologie (3D-Druck) das Anwendungspotenzial von TZM-Molybdänstäben weiter erforscht. Die Forscher begannen, die direkte Herstellung komplexer TZM-Legierungsteile durch Technologien wie das laserselektive Schmelzen (SLM) zu erforschen, die nicht nur die Produktionskosten senkten, sondern auch die Anwendungsmöglichkeiten von TZM-Molybdänstäben in der Luft- und Raumfahrt und in der Medizintechnik erweiterten. So können beispielsweise 3D-gedruckte TZM-Legierungsteile zur Herstellung von Raketendüsen oder Hochtemperaturformen mit komplexen Geometrien verwendet werden.

### **1.3 Die Rolle des TZM-Molybdänstabs in der modernen Industrie und wissenschaftlichen Forschung**

In der modernen Industrie und wissenschaftlichen Forschung spielen TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihrer einzigartigen Kombination von Eigenschaften mehrere Rollen. Zunächst einmal werden TZM-Molybdänstäbe im Bereich der Luft- und Raumfahrt häufig bei der Herstellung von Raketentriebwerksdüsen, Turbinenschaufeln und Hochtemperatur-Strukturteilen verwendet. Zum Beispiel haben Unternehmen wie SpaceX TZM-Legierungen in ihren Raketentriebwerkskonstruktionen eingesetzt, um mit den hohen Temperaturen und dem hohen Druck in der Brennkammer und den Düsen fertig zu werden. Die technischen Daten von Chinatungsten Online zeigen, dass die hervorragende Leistung von TZM-Molybdänstäben in diesen Anwendungen auf ihren hohen Schmelzpunkt und ihren niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückzuführen ist, wodurch die strukturelle Stabilität unter extremen Wärmebelastungen aufrechterhalten werden kann.

In der Nuklearindustrie werden TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihrer hervorragenden Strahlungsbeständigkeit und hohen Temperaturstabilität bei der Herstellung von Strukturbauteilen und Steuerstäben von Kernreaktoren eingesetzt. Die hohen Temperaturen und die intensive Strahlungsumgebung in einem Kernreaktor stellen extrem hohe Anforderungen an das Material, und der geringe thermische Neutronenabsorptionsquerschnitt und die hohe Festigkeit der TZM-Molybdänstäbe machen sie zu einer idealen Wahl. Darüber hinaus werden TZM-Molybdänstäbe bei der Herstellung von plasmafacing materials (PFM) für Kernfusionsreaktoren eingesetzt, um extremer Hitze und Teilchenbeschuss standzuhalten.

Im Bereich des Hochtemperaturofenbaus werden TZM-Molybdänstäbe häufig als Heizelemente, Träger und Tiegelmateriale eingesetzt. Aufgrund der hohen Rekristallisationstemperatur und der

#### **Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung**

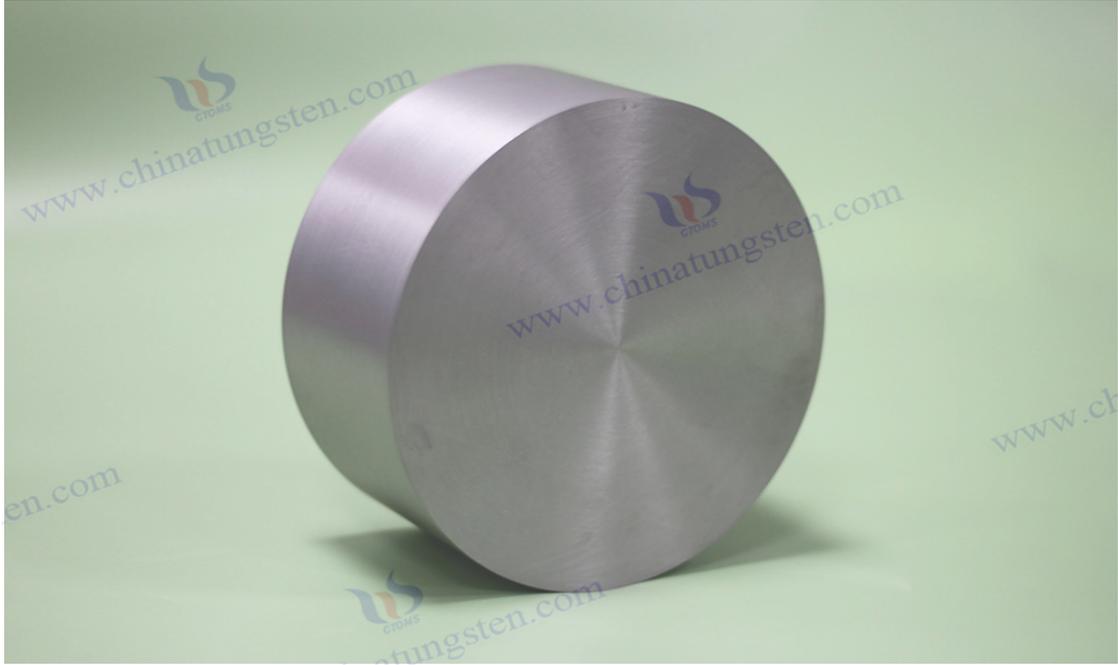
hervorragenden Kriechfestigkeit sind TZM-Molybdänstäbe in der Lage, in Hochtemperaturumgebungen über 1600 °C lange Zeit stabil zu arbeiten. In Vakuumöfen und Atmosphärenschofen werden beispielsweise TZM-Molybdänstäbe bei der Herstellung von Heizelementen und Thermoelement-Schutzhüllen verwendet, um die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit von Geräten bei hohen Temperaturen zu gewährleisten.

In der Halbleiterindustrie werden TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten als Sputtertargets und Hochtemperaturvorrichtungen eingesetzt. So werden beispielsweise im PVD-Verfahren (Physical Vapor Deposition) TZM-Molybdänstäbe als Targets für die Abscheidung von Hochleistungs-Dünnschichten verwendet. Darüber hinaus werden TZM-Molybdänstäbe auch bei der Herstellung von Schlüsselkomponenten in Ionenimplantationsgeräten eingesetzt, um den Anforderungen an hohe Präzision und Stabilität in der Halbleiterfertigung gerecht zu werden.

Im Bereich der wissenschaftlichen Forschung werden TZM-Molybdänstäbe häufig in der Hochtemperatur-Materialprüfung, in der Plasmaphysikforschung und in der Entwicklung fortschrittlicher Fertigungstechnologien eingesetzt. So werden beispielsweise in der Hochtemperatur-Materialprüfung TZM-Molybdänstäbe als Probenhalter und Heizelemente eingesetzt, um Materialeigenschaften unter extremen Betriebsbedingungen zu simulieren. In der plasmaphysikalischen Forschung werden TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihrer hervorragenden Plasmaerosionsbeständigkeit als Strukturmaterialien für Versuchsaufbauten eingesetzt. Darüber hinaus zeigen TZM-Molybdänstäbe auch ein großes Potenzial im Bereich der additiven Fertigung, und Forscher erforschen den Einsatz der 3D-Drucktechnologie zur Herstellung von TZM-Legierungsteilen mit komplexen Formen, um den speziellen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt und der Medizin gerecht zu werden.

Der offizielle WeChat-Account von Chinatungsten Online "Chinatungsten Online" berichtete, dass die weltweite Marktnachfrage nach TZM-Molybdänstäben in den letzten Jahren weiter gestiegen ist, insbesondere im asiatisch-pazifischen Raum. Mit der rasanten Entwicklung Chinas, Indiens und anderer Länder auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt und der Nuklearindustrie ist die Anwendungsperspektive von TZM-Molybdänstäben breiter. Es wird erwartet, dass TZM-Molybdänstäbe in Zukunft mit der Weiterentwicklung neuer Materialtechnologien eine wichtige Rolle in mehr Bereichen spielen werden, z. B. in Geräten für erneuerbare Energien (z. B. Hochtemperatur-Solarkollektoren) und biomedizinischen Bereichen (z. B. Hochtemperatur-Sterilisationsgeräten).

**Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung**



CTIA GROUP LTD TBM Molybdänstab

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

**High Melting Point:** Suitable for extreme high-temperature environments.

**Excellent High-Temperature Strength:** Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

**Good Thermal Stability and Creep Resistance:** Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

**Superior Corrosion and Oxidation Resistance:** Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

**Excellent Machinability:** Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

**High-Temperature Furnace Components:** Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

**Aerospace Industry:** Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

**Nuclear Industry:** Used in reactor support structures and control rod guide systems.

**Electronics Industry:** Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

**Mold Manufacturing:** Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: [www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

## 2. Grundprinzip des TZM Molybdänstabs

### 2.1 Chemische Zusammensetzung und Legierungseigenschaften des TZM-Molybdänstabs

Die chemische Zusammensetzung von TZM-Molybdänstäben umfasst typischerweise etwa 99,38 bis 99,5 % Molybdän, 0,4 bis 0,55 % Titan, 0,06 bis 0,12 % Zirkonium und 0,01 bis 0,04 % Kohlenstoff. Dieses präzise Legierungsverhältnis verbessert die Eigenschaften von Molybdän durch Mechanismen wie Lösungsverfestigung, Ausscheidungsverfestigung und zweite Phasenverfestigung erheblich, was zu einer hervorragenden Stabilität in Umgebungen mit hohen Temperaturen, hohen Spannungen und korrosiven Umgebungen führt.

#### Details und Rolle der chemischen Zusammensetzung

Molybdän ist ein Matrixmaterial mit einem hohen Schmelzpunkt (2623 °C), einer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit (ca. 139 W/m·K) und einem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (ca.  $5,3 \times 10^{-6}/K$ ), das sich ideal für Hochtemperaturanwendungen eignet. Reines Molybdän hat jedoch eine geringe Festigkeit bei hohen Temperaturen und neigt zu Kriech- und Rekristallisationsversprödung, was seine Anwendung in extremen Umgebungen einschränkt. TZM-Legierungen überwinden diese Mängel durch Zugabe von Spurenelementen:

**Titan (Ti):** Die Zugabe von Titan verbessert die Kristallstruktur von Molybdän durch einen Lösungsverstärkungsmechanismus. Die feste Lösung von Titanatomen im Molybdängitter verursacht einen Gitterverzug und behindert die Versetzungsbewegung, wodurch die Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit des Materials verbessert werden. Darüber hinaus reagiert Titan mit Kohlenstoff unter Bildung von Titankarbid (TiC)-Partikeln, die durch Ausscheidungsverstärkung weiter verbessert werden, um die Härte und Verschleißfestigkeit der Legierung weiter zu verbessern.

**Zirkonium (Zr):** Zirkonium wirkt ähnlich wie Titan und erhöht die Festigkeit von Molybdän durch Lösungsverstärkung. Zirkoniumatome reagieren auch mit Kohlenstoff zu Zirkoniumkarbid (ZrC)-Partikeln, die gleichmäßig in der Molybdänmatrix verteilt sind, wodurch die Kriechfestigkeit und Hochtemperaturstabilität des Materials verbessert wird. Die Zugabe von Zirkonium verbessert auch die Oxidationsbeständigkeit der TZM-Legierung, wodurch sie in Hochtemperatur-Oxidationsumgebungen haltbarer wird.

**Kohlenstoff (C):** Die Zugabe von Kohlenstoff ist der Schlüssel zur Verbesserung der Leistung von TZM-Legierungen. Die durch die Reaktion von Kohlenstoff mit Titan und Zirkonium gebildeten Hartmetallpartikel (wie TiC und ZrC) verbessern die Festigkeit und Härte der Legierung durch den Mechanismus der Ausscheidungsverstärkung erheblich. Bei hohen Temperaturen können diese Partikel das Kornwachstum wirksam verhindern und die feine Kornstruktur des Materials erhalten, wodurch die Rekristallisationstemperatur und die Kriechbeständigkeit verbessert werden.

#### Die Beziehung zwischen Mikrostruktur und Leistung

Die Mikrostruktur des TZM-Molybdänstabs hat einen wichtigen Einfluss auf seine Eigenschaften. TZM-Legierungen, die durch das pulvermetallurgische Verfahren hergestellt werden, haben feine

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Korngrößen (typischerweise zwischen 3,0 und 5,0 Mikrometer), was dazu beiträgt, die Festigkeit und Zähigkeit des Materials zu verbessern. Die Pulvermetallurgie sorgt für die gleichmäßige Verteilung von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff in der Molybdänmatrix, indem sie die Partikelgröße und das Mischungsverhältnis des Rohpulvers präzise steuert. Wärmebehandlungsverfahren wie Glühen und Altern optimieren die Mikrostruktur von TZM-Molybdänstäben zusätzlich. So können durch das Hochtemperaturlühen Eigenspannungen während der Verarbeitung beseitigt werden, während die Alterung die Ausscheidung von Hartmetallpartikeln fördert und dadurch die mechanischen Eigenschaften des Materials verbessert.

### **Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit**

TZM-Molybdänstäbe weisen eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit in einer Vielzahl von chemischen Umgebungen auf, insbesondere in nicht oxidierenden Hochtemperaturatmosphären wie Vakuum oder Inertgasen. Seine Korrosionsbeständigkeit beruht auf der chemischen Stabilität der Molybdänmatrix und der schützenden Wirkung von Karbidpartikeln. In einer oxidierenden Hochtemperaturumgebung kann sich auf der Oberfläche des TZM-Molybdänstabes eine dichte Oxidschutzschicht (z. B.  $\text{MoO}_2$ ) bilden, die weitere Oxidationsreaktionen verlangsamt. Im Gegensatz dazu neigt reines Molybdän bei hohen Temperaturen zur Bildung von flüchtigem Molybdäntrioxid ( $\text{MoO}_3$ ), was zu einem schnellen Materialverlust führt. Laut den technischen Daten von Chinatungsten Online können TZM-Molybdänstäbe in einer oxidierenden Umgebung unter  $1000^\circ\text{C}$  stabil arbeiten, und bei höheren Temperaturen sind Antioxidationsbeschichtungen (wie z.B. Silizidbeschichtungen) erforderlich, um die Lebensdauer zu verlängern.

### **Der Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Eigenschaften der Legierung**

Die Herstellung von TZM-Molybdänstäben erfolgt in der Regel in einem pulvermetallurgischen Prozess, der Schritte wie Mischen von Ausgangsmaterialien, Pressen, Sintern und Wärmebehandlung umfasst. Nach Angaben von Chinatungsten Online hat der moderne Produktionsprozess die Leistungskonsistenz von TZM-Molybdänstäben durch fortschrittliche Plasmasinter-Technologie und Vakuum-Wärmebehandlungsprozess erheblich verbessert. Die Plasma-Sinter-Technologie ermöglicht beispielsweise ein Sintern mit hoher Dichte bei niedrigeren Temperaturen, wodurch das Kornwachstum reduziert und somit die feine Kornstruktur des Materials erhalten bleibt. Darüber hinaus verbessern Oberflächenbehandlungstechniken, wie z. B. chemische Gasphasenabscheidungsbeschichtungen, die Oxidations- und Verschleißbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben weiter, so dass sie für eine breitere Palette industrieller Szenarien geeignet sind.

### **Abstimmung von Anwendungsszenarien auf chemische Zusammensetzungen**

Die chemische Zusammensetzung von TZM-Molybdänstäben macht sie weit verbreitet in der Luft- und Raumfahrt, in der Nuklearindustrie, in der Halbleiterherstellung und in anderen Bereichen. In der Luft- und Raumfahrt beispielsweise sind TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihrer Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit ideale Werkstoffe für Raketendüsen und Turbinenschaufeln. In der Nuklearindustrie eignen sich TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihres geringen thermischen Neutronenabsorptionsquerschnitts und ihrer Strahlungsbeständigkeit für den Einsatz bei der Herstellung von Strukturbauteilen von Kernreaktoren. In der Halbleiterindustrie

#### **Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung**

machen der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient und die hohe Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben sie zum Material der Wahl für Sputtertargets und Hochtemperaturvorrichtungen.

## 2.2 Physikalische und mechanische Eigenschaften des TZM-Molybdänstabs

Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des TZM-Molybdänstabs sind die Grundlage für seine breite Anwendung in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse seiner Haupteigenschaften, die sich auf Hochtemperaturfestigkeit, Kriechfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient, Härte, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit beziehen.

### Hohe Temperaturintensität

Die Zugfestigkeit und Streckgrenze von TZM-Molybdänstäben bei hohen Temperaturen sind deutlich höher als die von reinem Molybdän. Bei 1200 °C kann die Zugfestigkeit von TZM-Molybdänstäben beispielsweise 400-500 MPa erreichen, während reines Molybdän nur 200-300 MPa beträgt. Diese hervorragende Hochtemperaturfestigkeit ist auf die Verstärkung von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff zurückzuführen. Titan und Zirkonium verbessern die Gitterfestigkeit der Molybdänmatrix durch Lösungsverfestigung, während die Ausscheidung von Hartmetallpartikeln wie TiC und ZrC die Bewegung von Versetzungen weiter behindert und dadurch die Verformungsbeständigkeit des Materials verbessert. Die Erhöhung der Festigkeit bei hohen Temperaturen verschafft den Molybdänstäben von TZM einen deutlichen Vorteil in der Luft- und Raumfahrt (z. B. Raketendüsen) und im Hochtemperaturofenbau.

### Kriechfestigkeit

Kriechen ist eine der Hauptversagensarten von Hochtemperaturwerkstoffen unter Langzeitbelastung. Die Kriechfestigkeit von TZM-Molybdänstäben ist viel besser als die von reinem Molybdän. Unter den Beanspruchungsbedingungen von 1400 °C und 20 MPa beträgt die Kriechgeschwindigkeit des TZM-Molybdänstabs nur 1/10 der von reinem Molybdän. Diese ausgezeichnete Kriechbeständigkeit ist auf die Verankerungswirkung von Hartmetallpartikeln zurückzuführen, die ein Verrutschen der Korngrenze und ein Versetzungsklettern wirksam verhindern. Darüber hinaus erhöht die Feinkornstruktur der TZM-Molybdänstäbe ihre Kriechfestigkeit zusätzlich, so dass sie sich hervorragend für Szenarien eignen, die einen langzeitstabilen Betrieb erfordern, wie z. B. in Hochtemperaturöfen und Kernreaktoren.

### Hohe Rekristallisationstemperatur

Die Rekristallisationstemperatur von TZM-Molybdänstäben beträgt etwa 1400 °C, was viel höher ist als die 1000 °C von reinem Molybdän. Das bedeutet, dass der TZM-Molybdänstab in der Lage ist, seine feine Kornstruktur bei hohen Temperaturen beizubehalten und so Kornwachstum und Leistungseinbußen zu vermeiden. Die Erhöhung der Rekristallisationstemperatur ist auf die synergistische Wirkung von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff zurückzuführen. Die Lösungsverfestigung von Titan und Zirkonium verbessert die Stabilität des Kristallgitters, während die Ausfällung von Karbidpartikeln die Migration von Korngrenzen verhindert. Diese Leistung ermöglicht es den Molybdänstäben von TZM, in Hochtemperaturumgebungen über 1600 °C lange Zeit stabil zu arbeiten, wodurch sie für Hochtemperaturöfen und Komponenten in der Luft- und

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Raumfahrt geeignet sind.

### **Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient**

TZM Molybdänstab hat eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit (ca. 139 W/m·K) und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (ca.  $5,3 \times 10^{-6}/K$ ). Die hohe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine schnelle Wärmeableitung und vermeidet Leistungseinbußen durch lokale Überhitzung, wodurch es sich besonders für den Einsatz in Hochtemperaturvorrichtungen und Sputtertargets in Halbleiterbauelementen eignet. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität des Materials bei hohen Temperaturen und reduziert Risse und Verformungen, die durch thermische Belastung verursacht werden. Diese Kombination von Eigenschaften verschafft TZM-Molybdänstäben einen Vorteil in Anwendungen, die hohe thermische Lasten und Maßhaltigkeit erfordern, wie z. B. in Vakuumöfen und Versuchsaufbauten der Plasmaphysik.

### **Härte und Abriebfestigkeit**

Die Härte von TZM-Molybdänstäben (Vickers-Härte ca. 250-300 HV) ist dank der verstärkenden Wirkung von Hartmetallpartikeln höher als die von reinem Molybdän (ca. 200 HV). Die gleichmäßige Verteilung von Titancarbid- und Zirkoniumcarbid-Partikeln verbessert die Oberflächenhärte und Verschleißfestigkeit des Materials und macht es für den Einsatz bei der Herstellung von Formen, Schneidwerkzeugen und verschleißfesten Teilen geeignet. Im Hochtemperatur-Formenbau sind TZM-Molybdänstäbe beispielsweise in der Lage, hohen Belastungen und Verschleiß standzuhalten und so die Lebensdauer der Form zu verlängern.

### **Korrosionsbeständigkeit**

TZM-Molybdänstäbe weisen eine gute Korrosionsbeständigkeit in einer Vielzahl von chemischen Umgebungen auf, insbesondere in nicht oxidierenden Hochtemperaturatmosphären wie Vakuum, Argon oder Stickstoff. Seine Korrosionsbeständigkeit beruht auf der chemischen Stabilität der Molybdänmatrix und der schützenden Wirkung von Karbidpartikeln. In der Hochtemperatur-Oxidationsumgebung kann der TZM-Molybdänstab eine dichte  $MoO_2$ -Schicht bilden, um die Oxidationsreaktion zu verlangsamen. Studien haben gezeigt, dass TZM-Molybdänstäbe in einer oxidierenden Umgebung unter 1000 °C stabil arbeiten können, und bei höheren Temperaturen sind Antioxidationsbeschichtungen erforderlich, um die Haltbarkeit weiter zu verbessern.

### **Weitere physikalische Eigenschaften**

**Dichte:** Die Dichte von TZM-Molybdänstäben beträgt etwa 10,2 g/cm<sup>3</sup> und ist damit niedriger als die einer Wolframlegierung (etwa 19,3 g/cm<sup>3</sup>), was ihnen einen Vorteil bei gewichtsempfindlichen Anwendungen wie der Luft- und Raumfahrt verschafft.

**Leitfähigkeit:** TZM-Molybdänstäbe haben eine gute Leitfähigkeit (ca. 18% IACS) und eignen sich für die Herstellung von Hochtemperaturelektroden und leitfähigen Teilen.

**Strahlungsbeständigkeit:** In der Nuklearindustrie können TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihres geringen thermischen Neutronenabsorptionsquerschnitts und ihrer hohen Festigkeit hochenergetischer Neutronen- und Gammastrahlung standhalten.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### 2.3 Vergleich mit reinem Molybdän und anderen Superlegierungen

Im Vergleich zu reinem Molybdän und anderen Superlegierungen (wie Wolframlegierungen, Nickelbasislegierungen, keramischen Werkstoffen) haben TZM-Molybdänstäbe einzigartige Leistungsvorteile. Im Folgenden finden Sie einen detaillierten Vergleich ihrer Eigenschaften, der Aspekte wie Hochtemperaturfestigkeit, Kriechfestigkeit, Oxidationsbeständigkeit, Verarbeitbarkeit und Anwendungsszenarien abdeckt.

#### Vergleich mit reinem Molybdän

Reines Molybdän (Wolfram) hat einen hohen Schmelzpunkt (2623 °C), eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten, aber seine hohe Temperaturfestigkeit ist gering und es ist anfällig für Kriech- und Rekristallisationsversprödung. TZM-Molybdänstäbe verbessern die Leistung bei hohen Temperaturen durch Zugabe von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff erheblich:

**Hohe Temperaturfestigkeit:** Bei 1200 °C beträgt die Zugfestigkeit von TZM-Molybdänstab 400-500 MPa, während reines Molybdän nur 200-300 MPa beträgt. Die Lösungsverstärkungs- und Ausfällungsverstärkungsmechanismen von TZM machen es widerstandsfähiger gegen Verformung bei hohen Temperaturen.

**Kriechfestigkeit:** Die Kriechgeschwindigkeit des TZM-Molybdänstabs beträgt etwa 1/10 der von reinem Molybdän, das für eine langfristige Hochtemperaturbelastung geeignet ist.

**Rekristallisationstemperatur:** Die Rekristallisationstemperatur von TZM (1400 °C) ist viel höher als die von reinem Molybdän (1000 °C), wodurch es bei höheren Temperaturen strukturstabil ist.

**Oxidationsbeständigkeit:** TZM-Molybdänstäbe können unter 800 °C eine dichte Oxidschutzschicht bilden, während reines Molybdän anfällig für flüchtiges MoO<sub>3</sub> ist, was zu einem schnellen Verlust führt.

**Verarbeitbarkeit:** Die Verarbeitbarkeit von TZM-Molybdänstäben ist etwas geringer als die von reinem Molybdän, aber komplexe Formen können durch Optimierung des Wärmebehandlungsprozesses verarbeitet werden.

#### Vergleich mit Wolframlegierung

Wolframlegierungen haben einen höheren Schmelzpunkt (3422 °C) und eine höhere Dichte (19,3 g/cm<sup>3</sup>), sind aber schwer zu verarbeiten und kostspielig. Zu den komparativen Vorteilen von TZM-Molybdänstäben gehören:

**Dichte:** Die Dichte von TZM-Molybdänstäben (10,2 g/cm<sup>3</sup>) ist viel geringer als die von Wolframlegierungen, wodurch sie für gewichtsempfindliche Anwendungen wie die Luft- und Raumfahrt geeignet sind.

**Verarbeitbarkeit:** Die Duktilität und Bearbeitbarkeit von TZM-Molybdänstäben ist besser als die von Wolframlegierungen, was die Herstellung von Teilen mit komplexen Formen erleichtert.

**Oxidationsbeständigkeit:** TZM-Molybdänstab ist in Hochtemperatur-Oxidationsumgebungen, insbesondere unter 1000 °C, haltbarer als Wolframlegierungen.

**Kosten:** TZM-Molybdänstab ist kostengünstiger in der Herstellung als Wolframlegierungen, was ihn in vielen Anwendungen wirtschaftlicher macht.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

**High Melting Point:** Suitable for extreme high-temperature environments.

**Excellent High-Temperature Strength:** Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

**Good Thermal Stability and Creep Resistance:** Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

**Superior Corrosion and Oxidation Resistance:** Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

**Excellent Machinability:** Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

**High-Temperature Furnace Components:** Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

**Aerospace Industry:** Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

**Nuclear Industry:** Used in reactor support structures and control rod guide systems.

**Electronics Industry:** Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

**Mold Manufacturing:** Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: [www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### Vergleich mit Nickelbasislegierungen

Nickelbasislegierungen (z. B. Inconel 718) haben eine gute Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, aber ihr Schmelzpunkt (ca. 1350 °C) ist viel niedriger als der von TZM-Molybdänstäben, und oberhalb von 1600 °C tritt eine starke Erweichung auf. Zu den komparativen Vorteilen von TZM-Molybdänstäben gehören:

Hohe Temperaturstabilität: TZM-Molybdänstäbe können die strukturelle Stabilität über 1600 °C aufrechterhalten, während Nickelbasislegierungen bei dieser Temperatur versagt haben.

Wärmeausdehnungskoeffizient: Der Wärmeausdehnungskoeffizient von TZM ( $5,3 \times 10^{-6}/K$ ) ist niedriger als der von Nickelbasislegierungen (ca.  $13 \times 10^{-6}/K$ ) und eignet sich daher besser für Anwendungen, die Dimensionsstabilität erfordern.

Strahlungsbeständigkeit: Der geringe thermische Neutronenabsorptionsquerschnitt der TZM-Molybdänstäbe macht sie den Nickelbasislegierungen in der Nuklearindustrie überlegen.

### Vergleich mit keramischen Werkstoffen

Keramische Werkstoffe wie Zirkonoxid sind extrem hitzebeständig, aber spröde und lassen sich nur schwer in komplexe Formen bringen. Zu den komparativen Vorteilen von TZM-Molybdänstäben gehören:

Zähigkeit: TZM-Molybdänstab hat sowohl die Zähigkeit von Metall als auch die Stabilität bei hohen Temperaturen, was für Szenarien geeignet ist, die eine hohe Festigkeit und Zähigkeit erfordern.

Verarbeitbarkeit: TZM-Molybdänstäbe können geschmiedet, gewalzt und bearbeitet werden, um komplexe Komponenten herzustellen, während keramische Materialien oft einen teuren Sinterprozess erfordern.

Wärmeleitfähigkeit: Die Wärmeleitfähigkeit von TZM ( $139 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) ist viel höher als die von keramischen Materialien (ca.  $2\text{-}30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und eignet sich daher für Anwendungen, die eine schnelle Wärmeableitung erfordern.

### Umfassender Anwendungsvergleich

TZM-Molybdänstäbe werden häufig in der Luft- und Raumfahrt, in der Nuklearindustrie, in der Halbleiterherstellung und im Hochtemperaturofenbau eingesetzt. Im Vergleich zu reinem Molybdän ist seine Leistung bei hohen Temperaturen besser; Im Vergleich zu Wolframlegierungen ist es leicht und kostengünstig. Im Vergleich zu Nickelbasislegierungen weist es eine stärkere Hochtemperaturstabilität und Strahlungsbeständigkeit auf. Im Vergleich zu keramischen Werkstoffen weist es eine bessere Zähigkeit und Verarbeitbarkeit auf. Diese Kombination von Eigenschaften macht TZM-Molybdänstäbe ideal für Hochtemperaturanwendungen in einer Vielzahl von Bereichen.

### 2.4 Arbeitsmechanismus in Hochtemperaturumgebungen

Der Arbeitsmechanismus des TZM-Molybdänstabs in Hochtemperaturumgebungen ist der Kern seiner hervorragenden Leistung, die viele Aspekte wie Lösungsverstärkung, Ausfällungsverstärkung, Antioxidationsmechanismus, Wärmeleitfähigkeits- und Wärmeausdehnungsmechanismus sowie Strahlungswiderstandsmechanismus umfasst. Im

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse dieser Mechanismen.

### **Stärkung der Lösung**

Die feste Lösung von Titan- und Zirkoniumatomen in Molybdänkristallen behindert die Bewegung von Versetzungen durch Gitterverzerrung und verbessert dadurch die Hochtemperaturfestigkeit des Materials. Dieser Mechanismus ist besonders effektiv bei hohen Temperaturen, wo die Bewegung von Versetzungen die Hauptursache für das Kriechen bei hohen Temperaturen ist. Der Atomradius von Titan und Zirkonium unterscheidet sich geringfügig von dem von Molybdän, was zu einer leichten Verformung des Kristallgitters führt, was den Widerstand gegen Versetzungsbewegungen erhöht und dadurch die Zugfestigkeit und Kriechfestigkeit des TZM-Molybdänstabes erhöht.

### **Verbesserung der Niederschlagsmenge**

Die durch die Reaktion von Kohlenstoff mit Titan und Zirkonium gebildeten Hartmetallpartikel (z. B. TiC und ZrC) sind gleichmäßig in der Molybdänmatrix verteilt, und diese Partikel verbessern die Festigkeit und Kriechfestigkeit des Materials, indem sie Versetzungen und Korngrenzen festnageln. Bei hohen Temperaturen können Hartmetallpartikel das Kornwachstum wirksam verhindern, die feine Kornstruktur des Materials erhalten und so seine Rekristallisationstemperatur erhöhen. Studien haben gezeigt, dass die Hartmetallpartikelgröße von TZM-Molybdänstäben typischerweise zwischen 0,1 und 1 Mikrometern liegt und ihre gleichmäßige Verteilung für die Leistung entscheidend ist.

### **Antioxidativer Mechanismus**

In einer oxidierenden Umgebung mit hohen Temperaturen bildet sich eine dichte Schutzschicht aus MoO<sub>2</sub> auf der Oberfläche des TZM-Molybdänstabs, um weitere Oxidationsreaktionen zu verlangsamen. Im Gegensatz dazu neigt reines Molybdän zur Bildung von flüchtigem MoO<sub>3</sub>, was zu einem schnellen Materialverlust führt. Die Oxidationsbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben beruht auf der Zugabe von Titan und Zirkonium, die die Bildung einer dichten Oxidschicht begünstigen. Unterhalb von 1000 °C können TZM-Molybdänstäbe in einer oxidierenden Umgebung stabil arbeiten, während bei höheren Temperaturen Antioxidationsbeschichtungen wie Molybdänsilizid- oder Aluminiumoxidbeschichtungen erforderlich sind, um ihre Lebensdauer zu verlängern.

### **Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungsmechanismen**

Die hohe Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben (139 W/m·K) ermöglicht eine schnelle Wärmeableitung und vermeidet Leistungseinbußen durch lokale Überhitzung. Diese Leistung ist besonders wichtig bei der Herstellung von Halbleiteranlagen und Hochtemperaturöfen. Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient von TZM ( $5,3 \times 10^{-6}/K$ ) gewährleistet die Dimensionsstabilität des Materials bei hohen Temperaturen und reduziert Risse und Verformungen, die durch thermische Belastung verursacht werden. In Vakuumöfen werden beispielsweise TZM-Molybdänstäbe als Heizelemente verwendet, um schnellen Heiz- und Abkühlzyklen standzuhalten und gleichzeitig strukturell intakt zu bleiben.

#### **Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung**

### Mechanismus der Strahlenhärtung

In der Nuklearindustrie sind TZM-Molybdänstäbe aufgrund ihres geringen thermischen Neutronenabsorptionsquerschnitts und ihrer hohen Festigkeit resistent gegen hochenergetische Neutronen- und Gammastrahlung. Diese Eigenschaft macht es zu einem idealen Material für Kernreaktoren und Fusionsanlagen. Im plasmafacing Material (PFM) eines Kernfusionsreaktors sind beispielsweise TZM-Molybdänstäbe in der Lage, dem Beschuss hochenergetischer Teilchen standzuhalten und gleichzeitig die strukturelle Stabilität zu erhalten. Darüber hinaus ist die Strahlungsbeständigkeit von TZM auch auf seine feine Kornstruktur und die stärkende Wirkung von Karbidpartikeln zurückzuführen, die strahleninduzierte Kristalldefekte reduzieren.

### Umfassende Leistung in Umgebungen mit hohen Temperaturen

Die umfassende Leistung des TZM-Molybdänstabs in Hochtemperaturumgebungen profitiert von der synergistischen Wirkung seiner vielfältigen Verstärkungsmechanismen. Die Lösungsverstärkung und die Ausfällungsverfestigung verbessern die Hochtemperaturfestigkeit und Kriechbeständigkeit, der antioxidative Mechanismus verlängert die Lebensdauer des Materials in der oxidierenden Umgebung, die hohe Wärmeleitfähigkeit und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleisten die thermische Stabilität, und die Strahlungsbeständigkeit macht es zu einzigartigen Vorteilen in der Nuklearindustrie. Zusammen ermöglichen diese Mechanismen den TZM-Molybdänstäben, in extremen Umgebungen über 1600 °C stabil zu arbeiten und die hohen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie und der Halbleiterherstellung zu erfüllen.

## 3.5 CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab Sicherheitsdatenblatt

### Abschnitt 1: Identifizierung chemischer Produkte

Chemischer Name: TZM Molybdänstab

Englischer Name: TZM Molybdänstab

CAS-Nummern: Molybdän (7439-98-7), Titan (7440-32-6), Zirkonium (7440-67-7), Kohlenstoff (7440-44-0)

### 2. Abschnitt: Zusammensetzung/Angaben zu den Inhaltsstoffen

Chemische Zusammensetzung:

Molybdän (Mo)  $\geq 99,38$  %

Titan (Ti) 0,4–0,55 %

Zirkonium (Zr) 0,06–0,12 %

Kohlenstoff (C) 0,01–0,04 %

### Abschnitt 3: Identifizierung von Gefahren

Gesundheitsgefahren: Dieses Produkt reizt Augen und Haut nicht.

Brand- und Explosionsgefahren: Nicht brennbar und nicht reizend.

### Abschnitt 4: Erste-Hilfe-Maßnahmen

Hautkontakt: Kontaminierte Kleidung ausziehen und gründlich mit fließendem Wasser abspülen.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Augenkontakt: Augenlider anheben und mit fließendem Wasser oder Kochsalzlösung abspülen. Suchen Sie einen Arzt auf.

Einatmen: Bringen Sie den Betroffenen an die frische Luft. Wenn das Atmen schwierig ist, verabreichen Sie Sauerstoff. Suchen Sie einen Arzt auf.

Verschlucken: Trinken Sie viel warmes Wasser und lösen Sie Erbrechen aus. Suchen Sie einen Arzt auf.

#### 5. Abschnitt: Maßnahmen zur Brandbekämpfung

Gefährliche Verbrennungsprodukte: Unbekannte Zersetzungsprodukte.

Löschmethode: Feuerwehrleute sollten Gasmasken und vollständige Schutanzüge tragen und Brände gegen den Wind löschen.

Löschmittel: Trockener Sand, Pulver.

#### Abschnitt 6: Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

Notfallmaßnahmen:

Isolieren Sie den kontaminierten Bereich und beschränken Sie den Zugang.

Eliminieren Sie Zündquellen.

Einsatzkräfte sollten Staubmasken (Vollgesicht) und Schutanzüge tragen.

Vermeiden Sie das Aufwirbeln von Staub; Fegen Sie das Material vorsichtig und legen Sie es in Säcke, um es an einen sicheren Ort zu bringen.

Bei großen Verschüttungen mit Plastikfolie oder Planen abdecken.

Sammeln Sie zur Verwertung oder Entsorgung in einer Abfallbehandlungsanlage.

#### Abschnitt 7: Handhabung und Lagerung

Handhabung:

Die Bediener müssen speziell geschult sein und die Betriebsabläufe strikt befolgen.

Zu den empfohlenen PSA gehören selbstansaugende Filterstaubmasken, chemische Schutzbrillen, permeationsbeständige Arbeitskleidung und Gummihandschuhe.

Von Feuer und Wärmequellen fernhalten. Am Arbeitsplatz ist das Rauchen strengstens verboten.

Verwenden Sie explosionsgeschützte Lüftungssysteme und -geräte.

Vermeiden Sie Staubeentwicklung und den Kontakt mit Oxidationsmitteln und Halogenen.

Vorsichtig behandeln, um Schäden an Verpackungen und Behältern zu vermeiden.

Stellen Sie geeignete Feuerlösch- und Katastrophenschutz-ausrüstung bereit.

Leere Behälter können gefährliche Rückstände enthalten.

Lagerung:

In einem kühlen, belüfteten Lager lagern, fern von Feuer und Wärmequellen.

Getrennt von Oxidationsmitteln und Halogenen lagern; Vermeiden Sie gemischte Lagerung.

Stellen Sie geeignete Feuerlösch-ausrüstung und Materialien zur Rückhaltung von Lecks bereit.

#### Abschnitt 8: Expositionsbegrenzung/Persönlicher Schutz

##### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

China MAC (mg/m<sup>3</sup>): 6

Ehemalige UdSSR MAC (mg/m<sup>3</sup>): 6

TLVTN (ACGIH): 1 mg/m<sup>3</sup>

TLVWN (ACGIH): 3 mg/m<sup>3</sup>

Überwachungsmethode: Thiocyanat-Kalium-Titan-Kolorimetrie

Technische Steuerung: Staubbefreie Produktion und allgemeine Belüftung.

Atenschutz: Wenn die Staubbelastung die Grenzwerte überschreitet, verwenden Sie selbstansaugende Staubmasken vom Filtertyp. Verwenden Sie für Notfälle und Evakuierungen ein luftbetriebenes Atemschutzgerät.

Augenschutz: Tragen Sie eine chemische Schutzbrille.

Körperschutz: Verschleiß Sie atmungsaktive, atmungsaktive Arbeitsschutzkleidung.

Handschutz: Tragen Sie Gummihandschuhe.

### Abschnitt 9: Physikalische und chemische Eigenschaften

Hauptbestandteil: Reine Substanz

Aussehen: Massiv, metallisch glänzend weiß (maschinell bearbeitet); schwarze Oberfläche (Rohmaterial)

Schmelzpunkt (°C): 2620

Siedepunkt (°C): 5560

Relative Dichte (Wasser = 1): 9,4–10,2 (20°C)

Dampfdichte (Luft = 1): Keine Daten

Gesättigter Dampfdruck (kPa): Keine Daten

Verbrennungswärme (kJ/mol): Keine Daten

Kritische Temperatur (°C): Keine Daten

Kritischer Druck (MPa): Keine Daten

Logarithmisches Verteilungskoeffizient (n-Oktanol/Wasser): Keine Daten

Flammpunkt (°C): Keine Daten

Selbstentzündungstemperatur (°C): Keine Daten

Explosionsgrenze – Oben (% V/V): Keine Daten

Explosionsgrenze – Untere (% V/V): Keine Daten

Löslichkeit: Löslich in Salpetersäure und Flusssäure

Hauptverwendungen: Wird bei der Herstellung von Formen, Molybdändrähten, elektronischen Bauteilen usw. verwendet.

### Sektion 10: Stabilität und Reaktivität

Unverträgliche Materialien: Starke Säuren und Basen.

### Abschnitt 11: Toxikologische Informationen

Akute Toxizität: Keine Daten verfügbar

LC50: Keine Daten verfügbar

### Sektion 12: Ökologische Informationen

Ökologische Daten: Nicht verfügbar

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### Abschnitt 13: Überlegungen zur Entsorgung

Entsorgungsmethode: Beziehen Sie sich vor der Entsorgung auf die nationalen und lokalen Vorschriften. Recyceln, wenn möglich.

### Abschnitt 14: Verkehrsinformationen

Gefahrgutcode: Nicht verfügbar

Verpackungskategorie: Z01

Vorsichtsmaßnahmen beim Transport:

Die Verpackung muss vor dem Transport intakt und ordnungsgemäß gesichert sein.

Stellen Sie sicher, dass während des Transports keine Leckagen, Zusammenbrüche, Stürze oder Beschädigungen auftreten.

Nicht mit Oxidationsmitteln, Halogenen oder essbaren Chemikalien mischen.

Schützen Sie sich während des Transports vor Sonnenlicht, Regen und hohen Temperaturen.

Reinigen Sie die Fahrzeuge nach dem Transport gründlich.

### Abschnitt 15: Regulatorische Informationen

Relevante Vorschriften:

Vorschriften über das Sicherheitsmanagement für gefährliche Chemikalien (Staatsrat, 17. Februar 1987)

Einzelheiten zur Umsetzung der Vorschriften über das Sicherheitsmanagement für gefährliche Chemikalien (Hua Lao Fa [1992] Nr. 677)

Vorschriften über die sichere Verwendung von Chemikalien am Arbeitsplatz ([1996] Lao Bu Fa Nr. 423)

Hygienische Standards für Wolfram in der Luft am Arbeitsplatz (GB 16229-1996), die die maximal zulässige Konzentration und die Nachweismethoden festlegen.

### § 16 Informationen zum Lieferanten

Lieferant: CTIA GROUP LTD

Telefon: 0592-5129696 / 5129595

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung



CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab

### 3. Leistung des TZM-Molybdänstabs

#### 3.1 Physikalische und chemische Eigenschaften des TZM-Molybdänstabs

Als Hochleistungslegierungswerkstoff auf Basis von Molybdän weist der TZM-Molybdänstab durch die Zugabe von Titan (Ti), Zirkonium (Zr) und Kohlenstoff (C) hervorragende physikalische und chemische Eigenschaften auf. Diese Eigenschaften machen es vielversprechend für eine Vielzahl von Anwendungen in Umgebungen mit hohen Temperaturen, hoher Beanspruchung und korrosiver Belastung. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse der physikalischen und chemischen Eigenschaften von TZM-Molybdänstäben unter vier Aspekten: Schmelzpunkt und thermische Stabilität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit, Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit sowie mechanische Festigkeit und Zähigkeit.

##### 3.1.1 Schmelzpunkt und thermische Stabilität des TZM-Molybdänstabs

Der Schmelzpunkt des TZM-Molybdänstabs liegt bei 2623 °C (ca. 2896 K) von reinem Molybdän und ist eine der in der Industrie häufig verwendeten Superlegierungen. Seinen hohen Schmelzpunkt verdankt er der BCC-Kristallstruktur (body-centered cubic) der Molybdänmatrix, die eine hohe Stabilität bei hohen Temperaturen aufweist und extremen thermischen Belastungen standhält. Im Vergleich zu reinem Molybdän erhöht der TZM-Molybdänstab die Rekristallisationstemperatur durch Zugabe von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff erheblich, von etwa 1000 °C für reines Molybdän auf mehr als 1400 °C. Diese hohe Rekristallisationstemperatur bedeutet, dass TZM-Molybdänstäbe in der Lage sind, bei hohen Temperaturen eine feine Kornstruktur aufrechtzuerhalten und so Leistungseinbußen aufgrund von Kornwachstum zu vermeiden.

Die thermische Stabilität ist ein wesentlicher Vorteil von TZM-Molybdänstäben in Hochtemperaturanwendungen. In der Luft- und Raumfahrt, wie z. B. Düsen von

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Raketentriebwerken und Brennkammerkomponenten, müssen TZM-Molybdänstäbe sofortigen Wärmebelastungen in Umgebungen über 2000 °C standhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass TZM-Molybdänstäbe auch bei 1800 °C noch eine hohe Festigkeit und strukturelle Integrität aufweisen können, während reines Molybdän unter gleichen Bedingungen eine erhebliche Erweichung und Kriechen erfahren hat. Die Ergebnisse zeigen, dass die thermische Stabilität von TZM-Molybdänstäben auf die Lösungsverfestigung von Titan und Zirkonium und die Ausscheidungsverfestigung von Hartmetallpartikeln wie TiC und ZrC zurückzuführen ist, die zusammen die Beständigkeit des Materials gegen Hochtemperaturverformungen verbessern.

Darüber hinaus hängt die thermische Stabilität von TZM-Molybdänstäben eng mit ihrem Herstellungsprozess zusammen. Die im pulvermetallurgischen Verfahren hergestellten TZM-Molybdänstäbe weisen ein gleichmäßiges Gefüge auf, das das Gleiten der Korngrenzen und das Versetzungsklettern bei hohen Temperaturen effektiv reduzieren kann. Wärmebehandlungsprozesse wie Glühen und Altern optimieren die thermische Stabilität des Materials zusätzlich. So können durch das Hochtemperaturlühen Eigenspannungen während der Verarbeitung beseitigt werden, während die Alterung die Ausscheidung von Hartmetallpartikeln fördert und die Stabilität des Materials bei hohen Temperaturen erhöht.

### 3.1.2 Dichte und Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben

Die Dichte von TZM-Molybdänstäben beträgt etwa 10,2 g/cm<sup>3</sup> und ist damit niedriger als die von Wolframlegierungen (19,3 g/cm<sup>3</sup>), aber höher als die von Nickelbasislegierungen (etwa 8,5 g/cm<sup>3</sup>). Diese mittlere Dichte verschafft ihm erhebliche Vorteile in gewichtsempfindlichen Anwendungen wie der Luft- und Raumfahrt und Satellitenkomponenten. Im Vergleich zu Wolframlegierungen reduziert die geringere Dichte des TZM-Molybdänstabs das Strukturgewicht bei gleichzeitiger Beibehaltung einer hohen Festigkeit und hohen Temperaturstabilität.

Die Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben beträgt 139 W/m·K und ist damit deutlich höher als die von keramischen Werkstoffen (ca. 2-30 W/m·K) und Nickelbasislegierungen (ca. 10-20 W/m·K). Die hohe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine schnelle Wärmeableitung und vermeidet Leistungseinbußen durch lokale Überhitzung. Im Bau von Halbleiteranlagen werden beispielsweise TZM-Molybdänstäbe als Sputtertargets und Hochtemperaturvorrichtungen eingesetzt, die aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit für eine gleichmäßige Wärmeverteilung sorgen und durch thermische Belastung verursachte Risse reduzieren. Darüber hinaus kann bei der Herstellung von Hochtemperaturöfen TZM-Molybdänstab als Heizelement verwendet werden, um Wärme schnell zu übertragen und die Gleichmäßigkeit der Temperatur im Ofen zu verbessern.

Die Wärmeleitfähigkeit steht in engem Zusammenhang mit der Mikrostruktur von TZM-Molybdänstäben. Das pulvermetallurgische Verfahren stellt die Kontinuität des Wärmeleitfähigkeitspfads sicher, indem es die Korngröße und die Verteilung der Hartmetallpartikel steuert. Studien haben gezeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben bei hohen Temperaturen (z.B. 1200°C) nur um etwa 10-15% abnimmt, was viel besser ist als die 20-25% Abnahmerate von reinem Molybdän. Diese stabile Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine hervorragende Leistung in Umgebungen mit hohen Temperaturzyklen.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### 3.1.3 Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben

TZM-Molybdänstäbe weisen eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit in nicht oxidierenden Hochtemperaturatmosphären wie Vakuum, Argon oder Stickstoff auf. Seine chemische Stabilität beruht auf der Inertheit der Molybdänmatrix und der Verstärkung von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff. In einer oxidierenden Umgebung mit hohen Temperaturen sind TZM-Molybdänstäbe in der Lage, eine dichte Schicht aus MoO<sub>2</sub>-Oxid-Schutzschicht zu bilden, um weitere Oxidationsreaktionen zu verlangsamen. Im Gegensatz dazu neigt reines Molybdän bei hohen Temperaturen zu flüchtigen Eigenschaften von Wolframoxid, was zu einer schnellen Materialverschlechterung führt. Studien haben gezeigt, dass TZM-Molybdänstäbe in einer oxidierenden Umgebung unter 1000 °C stabil arbeiten können, und bei höheren Temperaturen sind Antioxidationsbeschichtungen (wie Molybdänsilizid- oder Aluminiumoxidbeschichtungen) erforderlich, um ihre Lebensdauer zu verlängern.

In korrosiven Umgebungen weisen TZM-Molybdänstäbe eine gute Beständigkeit gegen Säuren, Laugen und Salzlösungen auf. In Umgebungen mit verdünnter Schwefelsäure und Salzsäure weisen TZM-Molybdänstäbe beispielsweise eine viel geringere Korrosionsrate auf als Edelstahl und Nickelbasislegierungen. Diese Korrosionsbeständigkeit macht es in der chemischen und nuklearen Industrie weit verbreitet. In der Kühlmittelumgebung eines Kernreaktors sind die Molybdänstäbe von TZM beispielsweise in der Lage, hohen Temperaturen und chemischer Korrosion standzuhalten und gleichzeitig die strukturelle Integrität zu erhalten.

Auch die Verbesserung der Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit steht in engem Zusammenhang mit der Oberflächenbehandlungstechnik. Beispielsweise kann die Abscheidung einer Antioxidationsbeschichtung auf der Oberfläche eines TZM-Molybdänstabs durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) oder physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) Prozesse dessen Haltbarkeit in oxidierenden Umgebungen mit hohen Temperaturen erheblich verbessern. Darüber hinaus können Oberflächenpolier- und Plasmaspritztechnologien Oberflächenfehler reduzieren und die Korrosionsbeständigkeit verbessern.

### 3.1.4 Mechanische Festigkeit und Zähigkeit des TZM-Molybdänstabs

Die mechanische Festigkeit des TZM-Molybdänstabs übertrifft die von reinem Molybdän bei hohen Temperaturen bei weitem. Bei 1200 °C beträgt die Zugfestigkeit von TZM-Molybdänstäben beispielsweise 400-500 MPa, während reines Molybdän nur 200-300 MPa beträgt. Diese hohe Festigkeit ist auf die Lösungsverfestigung von Titan und Zirkonium und die Ausscheidungsverfestigung von Hartmetallpartikeln zurückzuführen. Titancarbid (TiC) und Zirkoniumcarbid (ZrC) Partikel sind gleichmäßig in der Molybdänmatrix verteilt, was die Härte und Festigkeit des Materials verbessert, indem Versetzungen und Korngrenzen fixiert werden. Die Vickers-Härte von TZM-Molybdänstäben beträgt etwa 250-300 HV und ist damit höher als die 200 HV von reinem Molybdän, wodurch sie für den Einsatz bei der Herstellung von verschleißfesten Formen und Schneidwerkzeugen geeignet sind.

In Bezug auf die Zähigkeit weisen TZM-Molybdänstäbe eine gute Bruchfestigkeit bei Raumtemperatur und hohen Temperaturen auf. Im Vergleich zu keramischen Werkstoffen haben

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

TZM-Molybdänstäbe die Duktilität und Zähigkeit von Metall und können bestimmten Stößen und Verformungen standhalten, ohne dass es zu Sprödbrüchen kommt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) von TZM-Molybdänstäben bei Raumtemperatur etwa  $15\text{-}20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  beträgt, was höher ist als die von reinem Molybdän ( $10\text{-}12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ). Diese hervorragende Zähigkeit ermöglicht es ihm, komplexen Belastungsumgebungen in der Luft- und Raumfahrt- und Nuklearindustrie standzuhalten.

Die Verbesserung der mechanischen Festigkeit und Zähigkeit hängt auch mit dem Produktionsprozess zusammen. Durch die Regelung der Sintertemperatur und des Sinterdrucks im pulvermetallurgischen Prozess können die Korngröße und die Hartmetallverteilung des TZM-Molybdänstabes optimiert und so Festigkeit und Zähigkeit in Einklang gebracht werden. Zum Beispiel kann eine niedrigere Sintertemperatur (ca.  $1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) feinere Körner erhalten und die Zähigkeit verbessern; Die höhere Sintertemperatur (ca.  $2000^{\circ}\text{C}$ ) erhöht die Festigkeit.

### 3.2 Thermische und mechanische Eigenschaften des TZM-Molybdänstabs

Die thermischen und mechanischen Eigenschaften des TZM-Molybdänstabs sind die Grundlage für seine breite Anwendung in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter vier Aspekten: Wärmeausdehnungskoeffizient und Hochtemperaturverformung, Temperaturwechselbeständigkeit, Kriechverhalten und Langzeitstabilität, Ermüdungsverhalten und Recyclingfähigkeit.

#### 3.2.1 Wärmeausdehnungskoeffizient und Hochtemperaturverformung des TZM-Molybdänstabs

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von TZM-Molybdänstäben beträgt etwa  $5,3\times 10^{-6}/\text{K}$ , was viel niedriger ist als der von Nickelbasislegierungen (ca.  $13\times 10^{-6}/\text{K}$ ) und Edelstahl (ca.  $16\times 10^{-6}/\text{K}$ ). Der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient gewährleistet die Dimensionsstabilität der TZM-Molybdänstäbe bei hohen Temperaturen und reduziert Risse und Verformungen, die durch thermische Belastung verursacht werden. In Vakuumöfen werden beispielsweise TZM-Molybdänstäbe als Heizelemente verwendet, um die geometrische Stabilität bei schnellen Heiz- und Abkühlzyklen aufrechtzuerhalten.

Die Hochtemperaturverformung ist ein zentrales Thema bei der Konstruktion von Hochtemperaturwerkstoffen. Der TZM-Molybdänstab wird durch die Feststoffverfestigung von Titan und Zirkonium und die Ausscheidungsverfestigung von Hartmetallpartikeln verstärkt, wodurch die Verformungsrate bei hohen Temperaturen erheblich reduziert wird. Unter den Belastungsbedingungen von  $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $20 \text{ MPa}$  beträgt die Verformungsrate des TZM-Molybdänstabs nur  $1/5$  der von reinem Molybdän. Studien haben gezeigt, dass Hartmetallpartikel in der Lage sind, Korngrenzen bei hohen Temperaturen zu fixieren, wodurch ein Verrutschen der Korngrenzen verhindert und dadurch die Verformung verringert wird. Studien haben gezeigt, dass die Verformungsrate von TZM-Molybdänstäben unter  $1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  innerhalb von  $0,1 \%$  gesteuert werden kann, was für Hochtemperaturformen und Luft- und Raumfahrtteile geeignet ist.

Die Stabilität des Wärmeausdehnungskoeffizienten hängt auch mit der Mikrostruktur des TZM-Molybdänstabs zusammen. Die feine Korngröße ( $10\text{-}50 \text{ Mikrometer}$ ) und die gleichmäßige

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Hartmetallverteilung reduzieren die Migration der Korngrenzen bei hohen Temperaturen und gewährleisten so die Dimensionsstabilität. Darüber hinaus können Oberflächenbehandlungstechniken wie Polieren und Beschichten die thermischen Spannungskonzentrationen weiter reduzieren und die Verformungsbeständigkeit verbessern.

### 3.2.2 Temperaturwechselbeständigkeit des TZM-Molybdänstabs

Die Temperaturwechselbeständigkeit ist ein wichtiger Indikator für die Stabilität von Hochtemperaturmaterialien in einer sich schnell verändernden Umgebung. TZM-Molybdänstäbe weisen aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit (139 W/m·K), ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $5,3 \times 10^{-6}/K$ ) und ihrer hohen mechanischen Festigkeit eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit auf. Bei der Temperaturschockprüfung sind TZM-Molybdänstäbe in der Lage, in einem schnellen Zyklus von 1000 °C bis Raumtemperatur Hunderten von Zyklen ohne offensichtliche Risse standzuhalten, während reines Molybdän in der Regel nach 50 Zyklen unter den gleichen Bedingungen Mikrorisse aufweist.

Die Verbesserung der Temperaturwechselbeständigkeit ist auf die Mikrostruktur und die Legierungseigenschaften der TZM-Molybdänstäbe zurückzuführen. Die Ausscheidungsverfestigung von Hartmetallpartikeln verbessert die Festigkeit und Zähigkeit des Materials und reduziert die durch thermische Belastung verursachte Rissausbreitung. Darüber hinaus ermöglicht die hohe Wärmeleitfähigkeit dem TZM-Molybdänstab eine schnelle Wärmeabfuhr, wodurch die durch Temperaturgradienten verursachten inneren Spannungen reduziert werden. In der Luft- und Raumfahrt werden TZM-Molybdänstäbe als Materialien für Raketendüsen verwendet, die in der Lage sind, schnellen Temperaturänderungen in der Brennkammer standzuhalten und gleichzeitig die strukturelle Integrität zu erhalten.

Gemäß den veröffentlichten technischen Daten kann die Temperaturwechselbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben durch Optimierung des Produktionsprozesses weiter verbessert werden. Durch die Steuerung der Abkühlgeschwindigkeit während des Sinterprozesses können beispielsweise mikroskopisch kleine Defekte reduziert und die Beständigkeit des Materials gegen Temperaturschocks verbessert werden. Darüber hinaus können Oberflächenbeschichtungen, wie z. B. Zirkonoxidbeschichtungen, die Temperaturwechselbeständigkeit weiter verbessern und die Lebensdauer des Materials verlängern.

### 3.2.3 Kriechverhalten und Langzeitstabilität von TZM-Molybdänstab

Kriechen ist eine der Hauptversagensarten von Hochtemperaturwerkstoffen unter Langzeitbelastung. Die Kriechfestigkeit von TZM-Molybdänstäben ist viel besser als die von reinem Molybdän. Unter den Beanspruchungsbedingungen von 1400 °C und 20 MPa beträgt die Kriechgeschwindigkeit des TZM-Molybdänstabs nur 1/10 der von reinem Molybdän. Diese ausgezeichnete Kriechbeständigkeit ist auf die Lösungsverfestigung von Titan und Zirkonium und die Verankerung von Hartmetallpartikeln zurückzuführen. Hartmetallpartikel können das Gleiten der Korngrenze und das Klettern der Versetzung wirksam verhindern und so den Kriechprozess verlangsamen.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Die Langzeitstabilität ist ein wesentlicher Vorteil von TZM-Molybdänstäben in Hochtemperaturanwendungen. In Kernreaktoren sind TZM-Molybdänstäbe Strukturbauteile, die mehrere Jahre lang in einer Umgebung mit hohen Temperaturen und hoher Strahlung betrieben werden müssen, um eine stabile Leistung aufrechtzuerhalten. Studien haben gezeigt, dass TZM-Molybdänstäbe eine stabile Leistung von bis zu 5000 Stunden unter 1600 °C aufrechterhalten können, während reines Molybdän unter den gleichen Bedingungen in der Regel innerhalb von 1000 Stunden ein erhebliches Kriechen erfährt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Langzeitstabilität von TZM-Molybdänstäben eng mit ihrer feinkörnigen Struktur und gleichmäßigen Hartmetallverteilung zusammenhängt.

Der Einfluss des Produktionsprozesses auf die Kriecheigenschaften kann nicht ignoriert werden. Durch die Optimierung der Sintertemperatur und des Sinterdrucks im pulvermetallurgischen Prozess können die Korngröße und die Hartmetallverteilung gesteuert werden, was zu einer verbesserten Kriechfestigkeit führt. So führt beispielsweise eine niedrigere Sintertemperatur (ca. 1800 °C) zu feineren Körnern und einer verbesserten Kriechfestigkeit. Darüber hinaus können Wärmebehandlungsprozesse, wie z. B. die Alterung, die Ausscheidung von Hartmetallpartikeln fördern, wodurch die Langzeitstabilität weiter verbessert wird.

### 3.2.4 Ermüdungsverhalten und Recyclingfähigkeit von TZM-Molybdänstab

Das Ermüdungsverhalten von TZM-Molybdänstäben bei zyklischer Belastung bei hohen Temperaturen ist besser als die von reinem Molybdän. Unter den zyklischen Belastungsbedingungen von 1200 °C und  $\pm 200$  MPa kann die Ermüdungslebensdauer des TZM-Molybdänstabs 10  $\mu$  Zyklen erreichen, während die von reinem Molybdän nur 10  $\mu$  Zyklen beträgt. Dieses hervorragende Ermüdungsverhalten ist auf seine hohe Festigkeit und Zähigkeit sowie die Hemmung der Rissausbreitung durch Hartmetallpartikel zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wachstumsrate der Ermüdungsriss von TZM-Molybdänstäben etwa 1/3 der von reinem Molybdän beträgt, was eine stärkere Ermüdungsbeständigkeit zeigt.

Die Fähigkeit zum Recycling ist eine wichtige Eigenschaft von TZM-Molybdänstäben in einer Umgebung mit hohen Temperaturzyklen. In Hochtemperaturöfen werden beispielsweise TZM-Molybdänstäbe als Heizelemente verwendet, um eine stabile Leistung bei wiederholten Heiz- und Kühlzyklen aufrechtzuerhalten. Tests haben gezeigt, dass TZM-Molybdänstäbe in der Lage sind, Tausenden von Zyklen in Zyklen von 1000 °C bis Raumtemperatur ohne nennenswerte Leistungseinbußen standzuhalten. Diese Zirkularität macht es zu einem weit verbreiteten Einsatz in Hochtemperaturöfen und bei der Herstellung von Halbleiteranlagen.

Die Verbesserung des Ermüdungsverhaltens und der Recyclingfähigkeit hängt auch mit der Oberflächenqualität und der Mikrostruktur zusammen. Das Polieren von Oberflächen kann Oberflächenfehler reduzieren und die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Ermüdungsrissen verringern. Wärmebehandlungsprozesse, wie z. B. Glühen, können Bearbeitungsspannungen beseitigen und die Lebensdauer der Ermüdung erhöhen. Darüber hinaus kann die Hinzufügung einer Antioxidationsbeschichtung die Oxidationsverluste während des Hochtemperaturzyklus reduzieren und die Lebensdauer verlängern.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

**High Melting Point:** Suitable for extreme high-temperature environments.

**Excellent High-Temperature Strength:** Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

**Good Thermal Stability and Creep Resistance:** Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

**Superior Corrosion and Oxidation Resistance:** Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

**Excellent Machinability:** Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

**High-Temperature Furnace Components:** Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

**Aerospace Industry:** Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

**Nuclear Industry:** Used in reactor support structures and control rod guide systems.

**Electronics Industry:** Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

**Mold Manufacturing:** Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: [www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### 3.3 Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und Eigenschaften von TZM-Molybdänstäben

Die Eigenschaften von TZM-Molybdänstäben hängen eng mit ihrer Mikrostruktur zusammen, einschließlich der Kornstruktur und -orientierung, der Rolle von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff sowie der Oberflächenmorphologie und der Hochtemperatureigenschaften. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse dieser drei Aspekte.

#### 3.3.1 Kornstruktur und Orientierung von TZM-Molybdänstäben

Die Kornstruktur von TZM-Molybdänstäben wird in der Regel durch ein pulvermetallurgisches Verfahren mit einer Korngröße zwischen 10-50 Mikrometern kontrolliert. Die feine Korngröße erhöht die Festigkeit und Zähigkeit des Materials und reduziert das Schlupfen der Korngrenzen und das Kriechen bei hohen Temperaturen. Studien haben gezeigt, dass TZM-Molybdänstäbe eine kleinere Korngröße als reines Molybdän (ca. 50-100 Mikrometer) haben, dank der Zugabe von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff, die das Kornwachstum hemmen, indem sie Karbidpartikel bilden.

Auch die Kornorientierung hat einen wichtigen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von TZM-Molybdänstäben. Während des Walz- oder Schmiedeprozesses bilden die Körner des TZM-Molybdänstabes eine bestimmte Orientierung entlang der Verarbeitungsrichtung und weisen eine Anisotropie auf. Die Zugfestigkeit entlang der Walzrichtung ist in der Regel ca. 10-15% höher als in vertikaler Richtung. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Steuerung der Walztemperatur und -verformung die Kornorientierung optimiert und die mechanischen Eigenschaften des Materials verbessert werden können. Zum Beispiel kann durch das Warmwalzen (ca. 1400 °C) eine gleichmäßigere Kornorientierung erreicht und die Festigkeit bei hohen Temperaturen erhöht werden.

Die Optimierung des Korngefüges hängt auch mit dem Wärmebehandlungsprozess zusammen. Durch Glühen kann die Verarbeitungsspannung verringert und die Korngröße angepasst werden. Die Alterungsbehandlung fördert die Ausfällung von Hartmetallpartikeln und erhöht die Korngrenzfestigkeit. Zusammen stellen diese Verfahren die Leistungsstabilität von TZM-Molybdänstäben bei hohen Temperaturen sicher.

#### 3.3.2 Die Rolle von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff

Titan, Zirkonium und Kohlenstoff sind die Schlüsselemente zur Verbesserung der Leistung von TZM-Molybdänstäben, und ihre Rolle spiegelt sich hauptsächlich in den folgenden Aspekten wider:

**Titan (Ti):** Titan verbessert die Gitterfestigkeit der Molybdänmatrix durch Lösungsverstärkung. Die feste Lösung von Titanatomen im Molybdängitter verursacht einen Gitterverzug und behindert die Bewegung von Versetzungen, wodurch die Hochtemperaturfestigkeit und Kriechbeständigkeit verbessert werden. Darüber hinaus reagiert Titan mit Kohlenstoff unter Bildung von Titankarbid (TiC)-Partikeln, die die Härte und Verschleißfestigkeit des Materials durch Ausscheidungsverfestigung erhöhen.

**Zirkonium (Zr):** Zirkonium wirkt ähnlich wie Titan und verbessert die Festigkeit und Stabilität des Materials durch Lösungsverstärkung und Ausfällungsverfestigung. Zirkonium reagiert mit Kohlenstoff zu Zirkoniumkarbid (ZrC)-Partikeln, die in der Lage sind, Korngrenzen bei hohen Temperaturen zu fixieren, das Kornwachstum zu verhindern und die Rekristallisationstemperaturen

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

zu erhöhen. Zirkonium erhöht auch die Oxidationsbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben.

Kohlenstoff (C): Die Zugabe von Kohlenstoff ist der Kern der Leistungssteigerung von TZM-Legierungen. Die durch die Reaktion von Kohlenstoff mit Titan und Zirkonium erzeugten Hartmetallpartikel werden gleichmäßig in der Molybdänmatrix verteilt, und die Festigkeit, Kriechfestigkeit und Rekristallisationstemperatur des Materials werden durch Pinning-Versetzungen und Korngrenzen verbessert. Studien haben gezeigt, dass die Größe und Verteilung der Karbidpartikel einen optimalen Zustand erreicht, wenn der Kohlenstoffgehalt 0,01-0,04 % beträgt.

Durch den synergistischen Effekt von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff sind TZM-Molybdänstäbe laut öffentlich zugänglichen Informationen weitaus effizienter als reines Molybdän. Bei 1400 °C ist beispielsweise die Zugfestigkeit von TZM-Molybdänstäben etwa 2-mal höher als die von reinem Molybdän, und die Kriechgeschwindigkeit wird um etwa 90 % reduziert.

### 3.3.3 Oberflächenmorphologie und Hochtemperatureigenschaften von TZM-Molybdänstäben

Die Oberflächenmorphologie des TZM-Molybdänstabes hat einen wichtigen Einfluss auf seine Leistung bei hohen Temperaturen. Oberflächendefekte (z. B. Mikrorisse, Porosität) können zu Spannungskonzentrationspunkten werden, die bei hohen Temperaturen zur Ausbreitung von Rissen führen. Die Oberflächentopographie kann durch Oberflächenpolitur, Plasmaspritzen oder Beschichtungstechniken erheblich verbessert werden, um die Leistung bei hohen Temperaturen zu verbessern.

In der Hochtemperatur-Oxidationsumgebung ändert sich die Oberflächenmorphologie des TZM-Molybdänstabs und bildet eine dichte MoO<sub>2</sub>-Schutzschicht. Die Bildung dieser Schutzschicht hängt eng mit der Oberflächenqualität zusammen. Studien haben gezeigt, dass TZM-Molybdänstäbe mit hoher Oberflächengüte eine gleichmäßigere Oxidschicht bilden können, wodurch die Oxidationsbeständigkeit verbessert wird. Darüber hinaus können Antioxidationsbeschichtungen, wie z. B. Molybdänsilizidbeschichtungen, die Oberflächentopographie weiter verbessern und die Lebensdauer von Materialien in oxidierenden Umgebungen mit hohen Temperaturen verlängern.

Die Oberflächentopographie beeinflusst auch die Temperaturwechselbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben. Die glatte Oberfläche reduziert die Konzentration thermischer Spannungen und verbessert die Temperaturwechselbeständigkeit. In der Luft- und Raumfahrt muss die Oberfläche von TZM-Molybdänstäben häufig präzise bearbeitet werden, um den Anforderungen von Hochtemperaturumgebungen gerecht zu werden.

### 3.4 Lebensdauer und Zuverlässigkeit des TZM-Molybdänstabs

Die Langlebigkeit und Zuverlässigkeit des TZM-Molybdänstabs sind die Schlüsselindikatoren für seinen Einsatz in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten: Lebensdauereinflussfaktoren, Fehlermöglichkeitsanalyse und Zuverlässigkeitstest.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### 3.4.1 Faktoren, die die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben beeinflussen

Die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, darunter Betriebstemperatur, Belastungsniveau, Umgebungsatmosphäre, Produktionsprozess und Oberflächenbehandlung usw.:

**Betriebstemperatur:** Die Temperatur ist der Hauptfaktor, der die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben beeinflusst. Unter 1600 ° C kann der TZM-Molybdänstab die Langzeitstabilität aufrechterhalten. Oberhalb von 1800 °C steigen die Oxidations- und Kriechraten jedoch deutlich an, wodurch sich die Lebensdauer verkürzt.

**Spannungsniveau:** Hohe Spannungen können Kriechen und Ermüdungsversagen beschleunigen. Bei einer Belastung von 1400 °C und 50 MPa beträgt die Lebensdauer eines TZM-Molybdänstabs beispielsweise etwa 1/3 der Lebensdauer von reinem Molybdän.

**Umgebungsatmosphäre:** Im Vakuum oder Inertgas kann die Lebensdauer des TZM-Molybdänstabs Tausende von Stunden erreichen. In einer oxidierenden Umgebung ist eine Antioxidationsbeschichtung erforderlich, um die Lebensdauer zu verlängern.

**Produktionsprozess:** Die Sintertemperatur, der Druck und der Wärmebehandlungsprozess im pulvermetallurgischen Prozess wirken sich direkt auf die Korngröße und die Hartmetallverteilung aus, was sich wiederum auf die Lebensdauer auswirkt. Die Optimierung des Prozesses kann die Lebensdauer um 20-30% erhöhen.

**Oberflächenbehandlung:** Anti-Oxidationsbeschichtung und Oberflächenpolitur können die Oxidation und Rissinitiierung reduzieren und die Lebensdauer verlängern. So kann beispielsweise eine Silizid-Molybdän-Beschichtung die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben in einer oxidierenden Umgebung bei 1200°C um den Faktor 2-3 verlängern.

### 3.4.2 Fehlermöglichkeitsanalyse von TZM-Molybdänstäben (z.B. Bruch, Korrosion)

Zu den Versagensarten von TZM-Molybdänstäben gehören hauptsächlich Bruch, Korrosion und Kriechversagen:

**Bruch:** Ein Bruch wird in der Regel durch Ermüdung oder thermische Belastung verursacht. Bei Hochtemperaturzyklen können Oberflächendefekte die Ausbreitung von Rissen auslösen, die zu spröden oder duktilen Brüchen führen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bruchzähigkeit von TZM-Molybdänstäben ( $15-20 \text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) höher ist als die von reinem Molybdän, aber die Oberflächenqualität muss noch optimiert werden, um das Bruchrisiko zu reduzieren.

**Korrosion:** In einer oxidierenden Umgebung mit hohen Temperaturen können TZM-Molybdänstäbe aufgrund der Abplatzung der Oxidschicht versagen. Die Bildung von flüchtigem  $\text{MoO}_3$  beschleunigt den Materialverlust. Die Antioxidationsbeschichtung kann die Korrosion effektiv verlangsamen.

**Kriechversagen:** Langfristige Hochtemperaturbelastung kann zu einem Kriechversagen führen, das sich durch eine langsame Verformung des Materials und einen Festigkeitsverlust äußert. Durch die Verstiftung der Hartmetallpartikel wird die Kriechgeschwindigkeit deutlich reduziert, aber die hohe Spannung kann dennoch zum Versagen führen.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Die Fehlermöglichkeitsanalyse zeigt, dass die Optimierung der Oberflächengüte und der Beschichtungstechnologie der Schlüssel zur Verbesserung der Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben ist. So können beispielsweise Aluminiumoxidbeschichtungen, die durch CVD abgeschieden werden, die oxidative Korrosion erheblich reduzieren.

### 3.4.3 Zuverlässigkeitstest für Molybdänstäbe TZ

Die Zuverlässigkeitsprüfung von TZM-Molybdänstäben umfasst in der Regel einen Hochtemperaturfestigkeitstest, einen Kriechtest, einen Thermoschocktest und einen Ermüdungstest:

**Hochtemperatur-Festigkeitstest:** Die Zugfestigkeit und die Streckgrenze werden bei 1200-1600 ° C mit einer Zugprüfmaschine getestet, um sicherzustellen, dass das Material den Konstruktionsanforderungen entspricht.

**Kriechtest:** Testen Sie die Kriechgeschwindigkeit bei 1400 ° C und 20-50 MPa Spannung, um die Langzeitstabilität zu bewerten. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Kriechdauer von TZM-Molybdänstäben die von reinem Molybdän weit übertrifft.

**Thermoschocktest:** Die Temperaturwechselbeständigkeit wird durch schnelle Heiz- und Abkühlzyklen (1000 ° C bis Raumtemperatur) getestet. TZM-Molybdänstäbe können in der Regel Hunderte von Zyklen überstehen, ohne zu reißen.

**Ermüdungstest:** Testen Sie die Ermüdungslebensdauer unter zyklischer Belastung von 1200 ° C und  $\pm 200$  MPa, um die zyklische Fähigkeit zu bewerten.

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitstests zeigen, dass der TZM-Molybdänstab eine ausgezeichnete Zuverlässigkeit in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung aufweist und für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie und der Halbleiterherstellung geeignet ist. Durch strenge Qualitätskontrollen und Tests kann die Zuverlässigkeit von TZM-Molybdänstäben mehr als 99,9 % erreichen.



CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

## 4. Herstellungsprozess und Technologie des TZM-Molybdänstabs

### 4.1 Auswahl und Aufbereitung von Rohstoffen für TZM-Molybdänstäbe

Als Hochleistungslegierungswerkstoff hängt die Leistungsfähigkeit des TZM-Molybdänstabs stark von der Qualität und dem Verhältnis der Rohstoffe ab. Die Auswahl und Aufbereitung der Rohstoffe ist die Grundlage für die Herstellung von TZM-Molybdänstäben, was sich direkt auf die Mikrostruktur und die Eigenschaften des Endprodukts auswirkt. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter vier Aspekten: Reinigung von Molybdänpulver, Auswahl von Titan-Zirkonium-Kohlenstoff-Additiven, Optimierung des Legierungsverhältnisses, Rohstoffprüfung und Qualitätskontrolle.

#### 4.1.1 Reinigungs- und Qualitätsanforderungen an Molybdänpulver

Molybdänpulver ist der Hauptrohstoff für TZM-Molybdänstäbe, und seine Reinheit und Qualität sind entscheidend für die Legierungseigenschaften. Molybdänpulver wird in der Regel durch Reduktion von Ammoniumparawolframat hergestellt. Der Reinigungsprozess besteht im Wesentlichen aus folgenden Schritten:

**Erzreinigung:** Molybdänpulver wird in der Regel aus Molybdänkonzentraten wie Molybdän gewonnen. Molybdänit wird flotiert und geröstet, um Verunreinigungen wie Schwefel und Silizium zu entfernen und hochreines Molybdäntrioxid zu erhalten.

**Chemische Reduktion:** Molybdäntrioxid wird unter Wasserstoffatmosphäre stufenweise zu Molybdänpulver reduziert. Der Reduktionsprozess wird unterteilt in die Niedertemperaturreduktion (400-600 °C, MoO<sub>2</sub>) und die Hochtemperaturreduktion (800-1000 °C, Molybdänmetallpulver). Die Studie zeigt, dass das moderne Reduktionsverfahren einen mehrstufigen Reduktionsofen anwendet, um sicherzustellen, dass die Reinheit des Molybdänpulvers mehr als 99,95 % erreicht.

**Kontrolle der Partikelgröße:** Die Partikelgröße von Molybdänpulver wird in der Regel auf 1-5 Mikrometer kontrolliert, eine zu große Partikelgröße führt zu einem ungleichmäßigen Sintern und eine zu kleine Partikelgröße erhöht die Produktionskosten. Die feine und gleichmäßige Partikelgröße trägt dazu bei, die Dichte und die mechanischen Eigenschaften von TZM-Molybdänstäben zu verbessern.

Zu den Qualitätsanforderungen für Molybdänpulver gehören eine hohe Reinheit ( $\geq 99,95\%$ ), ein niedriger Sauerstoffgehalt ( $\leq 0,005\%$ ), ein geringer Gehalt an Verunreinigungen (z. B. Eisen, Silizium, Aluminium usw.  $\leq 0,01\%$ ) und eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung. Diese Anforderungen gewährleisten die Stabilität und Korrosionsbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben bei hohen Temperaturen.

#### 4.1.2 Auswahl von Titan-, Zirkonium- und Kohlenstoffadditiven

Zu den Legierungselementen der TZM-Molybdänstäbe gehören Titan (Ti, 0,4-0,55 %), Zirkonium (Zr, 0,06-0,12 %) und Kohlenstoff (C, 0,01-0,04 %), und die Auswahl dieser Additive ist entscheidend für die Legierungseigenschaften:

**Titan (Ti):** Titan wird in der Regel in Form von hochreinen Titanpulvern ( $\geq$  einer Reinheit von

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

99,9 %) oder Titanverbindungen (z. B.  $TiH_2$ ) zugesetzt. Die Partikelgröße von Titanpulver wird auf 1-10 Mikrometer geregelt, um eine gleichmäßige Vermischung mit Molybdänpulver zu gewährleisten. Die Zugabe von Titan verbessert die Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit der Legierung durch Lösungsverfestigung und Ausscheidungsverfestigung (Erzeugung von TiC-Partikeln).

Zirkonium (Zr): Zirkonium wird in Form von hochreinem Zirkonumpulver (Reinheit  $\geq 99,9\%$ ) oder Zirkoniumverbindung (z. B.  $ZrH_2$ ) zugesetzt, typischerweise mit einer Partikelgröße von 1-5 Mikrometern. Zirkonium erhöht die Oxidationsbeständigkeit und die Rekristallisationstemperatur der Legierung durch Lösungsverfestigung und die Bildung von ZrC-Partikeln.

Kohlenstoff (C): Kohlenstoff wird normalerweise in Form von Graphitpulver oder Ruß zugesetzt, die Reinheit muss mehr als 99,99 % erreichen und die Partikelgröße wird auf 0,5 bis 2 Mikrometer kontrolliert. Kohlenstoff reagiert mit Titan und Zirkonium zu Karbidpartikeln (TiC und ZrC), die durch Ausfällung verstärkt werden, um die Härte und Kriechfestigkeit der Legierung zu verbessern.

Studien haben gezeigt, dass Additive auf der Grundlage ihrer chemischen Aktivität, der Partikelgrößenverteilung und der Verträglichkeit mit Molybdänpulver ausgewählt werden. So zersetzen sich beispielsweise Hydride von Titan und Zirkonium während des Sinterprozesses unter Freisetzung von Wasserstoff, der dazu beiträgt, den Sauerstoffgehalt zu reduzieren und die Reinheit der Legierung zu verbessern.

#### 4.1.3 Optimierung des Legierungsverhältnisses

Das Legierungsverhältnis von TZM-Molybdänstäben (Mo: 99,38-99,5 %, Ti: 0,4-0,55 %, Zr: 0,06-0,12 %, C: 0,01-0,04 %) muss durch Experimente und Simulationen optimiert werden, um Festigkeit, Zähigkeit und Oxidationsbeständigkeit in Einklang zu bringen. Zu den wichtigsten Punkten der Ratio-Optimierung gehören:

Verhältnis von Titan und Zirkonium: Das Verhältnis von Titan und Zirkonium beträgt typischerweise 5:1 bis 8:1, um den synergistischen Effekt der Lösungsverstärkung zu gewährleisten. Ein zu hoher Titangehalt kann zu einer erhöhten Sprödigkeit führen, ein zu hoher Zirkoniumgehalt kann die Kosten erhöhen.

Kontrolle des Kohlenstoffgehalts: Der Kohlenstoffgehalt muss genau auf 0,01 bis 0,04 % eingestellt werden, ein zu niedriger Wert führt zu unzureichenden Karbidpartikeln und verringert den Verstärkungseffekt. Ein zu hoher Wert kann zur Bildung von zu viel Hartmetall und zu einer verminderten Zähigkeit führen.

Homogenität: Die gleichmäßige Verteilung von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff im Molybdänpulver wird durch mechanisches Mischen oder Kugelmahlen gewährleistet, um eine lokale Entmischung zu vermeiden, die die Leistung beeinträchtigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das optimale Verhältnis die Zugfestigkeit des TZM-Molybdänstabs um 10-15% erhöhen und die Kriechgeschwindigkeit um 20-30% reduzieren kann.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

**High Melting Point:** Suitable for extreme high-temperature environments.

**Excellent High-Temperature Strength:** Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

**Good Thermal Stability and Creep Resistance:** Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

**Superior Corrosion and Oxidation Resistance:** Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

**Excellent Machinability:** Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

**High-Temperature Furnace Components:** Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

**Aerospace Industry:** Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

**Nuclear Industry:** Used in reactor support structures and control rod guide systems.

**Electronics Industry:** Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

**Mold Manufacturing:** Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: [www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

#### 4.1.4 Prüfung und Qualitätskontrolle von Rohstoffen

Die Qualitätskontrolle der Rohstoffe ist ein wichtiger Bestandteil, um die gleichbleibende Leistung der TZM-Molybdänstäbe zu gewährleisten. Zu den Untersuchungsergebnissen gehören:

**Analyse der chemischen Zusammensetzung:** Die Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) oder Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFA) wurde verwendet, um den Gehalt an Molybdän, Titan, Zirkonium und Kohlenstoff zu ermitteln und sicherzustellen, dass die Anforderungen an das Verhältnis eingehalten wurden.

**Partikelgrößenanalyse:** Die Partikelgrößenverteilung des Pulvers wird mit dem Laser-Partikelgrößenanalysator gemessen, um die Gleichmäßigkeit der Partikelgröße zu gewährleisten.

**Erkennung von Verunreinigungen:** Die Glimmentladungs-Massenspektrometrie (GDMS) wird verwendet, um den Gehalt an Verunreinigungen wie Sauerstoff, Stickstoff und Eisen zu detektieren und sicherzustellen, dass er unter dem Standardgrenzwert liegt.

**Mikrostrukturanalyse:** Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Röntgenbeugung (XRD) werden eingesetzt, um die Topographie und Kristallstruktur von Pulvern zu analysieren, um eine Fehler- und Entmischungsfreiheit zu gewährleisten.

Untersuchungen zeigen, dass der weltweit führende Hersteller von TZM-Molybdänstäben ein Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9001 verwendet, um die Qualität der Rohstoffe durch mehrstufige Tests sicherzustellen. Die Qualitätskontrolle umfasst auch Lieferantenaudits, Chargenverfolgung und Überwachung des Produktionsprozesses, um die Konsistenz und Rückverfolgbarkeit der Rohstoffe zu gewährleisten.

#### 4.2 TZM Molybdänstab metallurgischer Prozess

Der metallurgische Prozess der TZM-Molybdänstäbe umfasst Schritte wie Pulvermischen und -pressen, Sintern, Schmieden und Walzen sowie Extrudieren und Ziehen. Diese Prozesse bestimmen direkt die Mikrostruktur und die Eigenschaften von TZM-Molybdänstäben. Im Folgenden finden Sie eine Analyse der Details und technischen Punkte der einzelnen Teilprozesse.

##### 4.2.1 Mischen und Pressen von Pulver

###### 4.2.1.1 Mechanische Legierungstechnik

Das mechanische Legieren ist ein wichtiger Schritt bei der Herstellung von TZM-Molybdänstäben, bei denen Molybdänpulver, Titanpulver, Zirkoniumpulver und Tonerpulver durch Hochenergie-Kugelmahlen gleichmäßig gemischt werden. Zu den Hauptparametern des mechanischen Legierens gehören:

**Kugelmühlenausrüstung:** Planetenkugelmühle oder vibrierende Kugelmühle, das Mahlmedium sind in der Regel Wolframkarbidpulverkugeln.

**Pelletverhältnis:** typischerweise 10:1 bis 20:1, um ein effizientes Mischen und Mahlen zu gewährleisten.

**Mahlzeit:** 6-12 Stunden, zu lange kann zu Unreinheiten führen, zu kurz vermischt sich nicht gleichmäßig.

**Atmosphärenkontrolle:** wird unter dem Schutz von Argon oder Stickstoff durchgeführt, um

##### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Oxidation zu vermeiden.

Durch die mechanische Legierung wird nicht nur eine gleichmäßige Durchmischung der Pulver erreicht, sondern auch die Festlösungswirkung von Titan, Zirkonium und Molybdän durch hochenergetische kollisionsinduzierte Gefügeänderungen verstärkt. Studien haben gezeigt, dass durch mechanisches Legieren die Mischgleichmäßigkeit von Pulvern auf mehr als 99 % erhöht werden kann, wodurch die Qualität des anschließenden Sinterns erheblich verbessert wird.

#### 4.2.1.2 Isostatischer Pressvorgang

Das isostatische Pressformen (CIP) ist ein Schlüsselverfahren zum Pressen von gemischten Pulvern zu Rohlingen. Die isostatische Druckformung sorgt für eine gleichmäßige Dichte des Rohlings, indem ein gleichmäßiger Druck auf ein flüssiges Medium wie Wasser oder Öl ausgeübt wird. Zu den wichtigsten Parametern gehören:

Druck: 150-300 MPa, zu hoch kann zu Rissen im Knüppel führen, zu niedrig führt zu unzureichender Dichte.

Formmaterial: hochfeste Gummi- oder Polyurethanform, Druckbeständigkeit und gute Flexibilität.

Knüppeldichte: 60-70% der theoretischen Dichte, die die Grundlage für das anschließende Sintern bildet.

Der Vorteil des isostatischen Pressens besteht darin, dass Rohlinge mit komplexen Formen vorbereitet werden können, wodurch der Aufwand für die Nachbearbeitung reduziert wird. Studien haben gezeigt, dass die Kombination aus kaltisostatischem Pressen (CIP) und heißisostatischem Pressen (HIP) die Dichte des Knüppels weiter auf mehr als 90 % der theoretischen Dichte erhöhen kann.

#### 4.2.2 Sinterprozess

##### 4.2.2.1 Vakuum-Sintertechnik

Das Vakuumsintern ist das Kernverfahren bei der Aufbereitung von TZM-Molybdänstäben, bei dem der Rohling durch Hochtemperaturesintern zu einer hochdichten Legierung verfestigt. Zu den wichtigsten Parametern gehören:

Temperatur: 1800-2000 °C, niedriger als der Schmelzpunkt von Molybdän (2623 °C), Flüssigphasensintern vermeiden.

Vakuum:  $10^{-3}$ - $10^{-5}$  Pa zur Reduzierung der Sauerstoff- und Stickstoffbelastung.

Haltezeit: 2-4 Stunden, um eine gleichmäßige Ausfällung der Hartmetallpartikel zu gewährleisten.

Durch das Vakuumsintern können die Poren im Rohling effektiv entfernt und die Dichte auf mehr als 98 % der theoretischen Dichte erhöht werden. Der weltweit führende Vakuum-Sinterofen verwendet Heizelemente aus Wolframdraht, um eine gleichmäßige Temperatur zu gewährleisten.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

#### 4.2.2.2 Atmosphärensintern und Temperaturregelung

In einigen Fällen werden TZM-Molybdänstäbe in einer Atmosphäre (z. B. Wasserstoff- oder Argonatmosphäre) gesintert, um Kosten zu senken. Zu den Hauptparametern des Atmosphärensinterns gehören:

Atmosphäre: Hochreiner Wasserstoff (Reinheit  $\geq 99,999\%$ ) oder Argon, Oxidation vermeiden.

Temperaturregelung: Mehrstufige Heizkurven (z. B. 1000 °C Vorsintern, 1800 °C Hauptsintern) werden verwendet, um Risse durch schnellen Temperaturanstieg zu vermeiden.

Abkühlgeschwindigkeit: geregelt bei 5-10°C/min, um Risse durch thermische Belastung zu vermeiden.

Der Vorteil des Atmosphärensinterns besteht darin, dass die Kosten niedriger sind, aber die Reinheit der Atmosphäre streng kontrolliert werden muss, um eine Kontamination durch Verunreinigungen zu vermeiden. Studien haben gezeigt, dass die Dichte von atmosphärengesinterten TZM-Molybdänstäben 95-97 % der theoretischen Dichte erreichen kann.

#### 4.2.3 Schmieden und Walzen

##### 4.2.3.1 Warmschmieden und Kaltschmieden

Das Schmieden ist ein wichtiger Schritt bei der Aufbereitung von TZM-Molybdänstäben, um die Dichte und die mechanischen Eigenschaften des Rohlings zu verbessern. Die Prozesse des Warmschmiedens und des Kaltschmiedens sind wie folgt:

Warmschmieden: Wird bei 1200-1600 °C durchgeführt, wobei die Duktilität von Molybdän genutzt wird, um die Kornstruktur zu verbessern. Der Warmschmiededruck beträgt in der Regel 50-100 MPa, und die Verformung wird bei 30-50% kontrolliert.

Kaltschmieden: Wird bei Raumtemperatur durchgeführt, um die Oberflächenqualität zu veredeln und zu verbessern. Das Kaltschmieden erfordert höhere Drücke (100-200 MPa), kann aber die Festigkeit deutlich erhöhen.

Durch das Warmschmieden werden Mikroporen im Sinterrohling eliminiert und die Dichte auf mehr als 99 % der theoretischen Dichte erhöht. Durch das Kaltschmieden wird die Kornorientierung weiter optimiert und die Anisotropiefestigkeit erhöht.

##### 4.2.3.2 Walzausrüstung und Prozessparameter

Das Walzen ist ein Schlüsselverfahren für die Verarbeitung von geschmiedeten Rohlingen zu Stangen. Die Walzausrüstung umfasst Vier-Hoch-Walzwerke und Mehrstockwalzwerke, und zu den Hauptparametern gehören:

Walztemperatur: 1000-1400°C, um die Duktilität des Materials zu gewährleisten.

Verformung: Die Verformung einer einzelnen Walze wird auf 10-20% kontrolliert, um Risse zu vermeiden.

Walzgeschwindigkeit: 0,5-2 m/s, wodurch Effizienz und Qualität in Einklang gebracht werden.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Durch den Walzprozess können die Oberflächengüte und Maßhaltigkeit von TZM-Molybdänstäben deutlich verbessert werden. Die Studie zeigt, dass moderne Walzanlagen ein Servosteuerungssystem verwenden, um eine präzise Steuerung der Walzparameter zu gewährleisten.

#### 4.2.4 Extrudieren und Ziehen

##### 4.2.4.1 Hochtemperatur-Extrusionstechnik

Hochtemperaturrextrusion ist der Prozess der Verarbeitung von gewalzten Rohlingen zu länglichen Stangen, normalerweise bei 1200-1600 °C. Zu den wichtigsten Parametern gehören:

Extrusionsverhältnis: 5:1 bis 10:1, um eine gleichmäßige Verformung zu gewährleisten.

Formmaterial: Wolframkarbid oder Hochtemperaturlegierung, verschleißfest und hochtemperaturbeständig.

Schmiermittel: Graphit oder Molybdändisulfid zur Verringerung der Reibung und des Werkzeugverschleißes.

Die Hochtemperaturrextrusion kann die Dichte und die mechanischen Eigenschaften von TZM-Molybdänstab, der für die Herstellung von hochpräzisen Stangen geeignet ist, erheblich verbessern.

##### 4.2.4.2 Ziehsteine und Schmiermittel

Beim Ziehen werden TZM-Molybdänstäbe veredelt, um hochpräzise und glatte Oberflächen zu erhalten. Zu den wichtigsten Parametern gehören:

Formmaterial: Wolframkarbid- oder Diamantform, hohe Härte, Verschleißfestigkeit.

Ziehgeschwindigkeit: 0,1-0,5 m/s, um Kratzer auf der Oberfläche zu vermeiden.

Schmierstoffe: Trockenschmierung (z. B. Graphitpulver) oder Nassschmierung (z. B. Schmierstoffe auf Ölbasis).

Der Ziehprozess kann die Oberflächenrauheit von TZM-Molybdänstäben verbessern und die Ermüdungsbeständigkeit verbessern.

#### 4.3 TZM Molybdänstab Verarbeitung und Veredelung

Zu den Bearbeitungs- und Veredelungsprozessen von TZM-Molybdänstäben gehören das Drehen und Fräsen, das Schleifen und Polieren, das Wärmebehandeln und Glühen sowie die Oberflächenbehandlung. Diese Verfahren stellen die Maßhaltigkeit, Oberflächengüte und Leistungsstabilität von TZM-Molybdänstäben sicher.

##### 4.3.1 Drehen und Fräsen

###### 4.3.1.1 CNC-Bearbeitungstechnik

Die numerisch gesteuerte Bearbeitung (CNC) ist die primäre Methode zur Endbearbeitung von TZM-Molybdänstäben für die Herstellung von komplex geformten Bauteilen. Zu den wichtigsten Parametern gehören:

Werkzeugmaterial: Wolframkarbid oder polykristalliner Diamant (PKD), hohe Härte und

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Verschleißfestigkeit.

Schnittgeschwindigkeit: 50-100 m/min, Überhitzung vermeiden.

Vorschub: 0,05-0,2 mm/U, wodurch Effizienz und Oberflächenqualität in Einklang gebracht werden.

Die CNC-Bearbeitung ermöglicht eine Maßgenauigkeit von TZM-Molybdänstäben von  $\pm 0,05$  mm, was den Anforderungen von Luft- und Raumfahrt- und Halbleiteranlagen entspricht. Studien haben gezeigt, dass moderne CNC-Bearbeitungszentren in der Lage sind, komplexe Geometrien mittels Fünf-Achs-Gestängetechnik zu bearbeiten.

#### 4.3.1.2 Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächenrauheit

Die Bearbeitungsgenauigkeit und die Oberflächenrauheit des TZM-Molybdänstabs haben einen wichtigen Einfluss auf seine Leistung. Durch die Erhöhung der Oberflächenrauheit ( $R_a$ ) werden die Spannungskonzentrationen und die Rissinitiierung reduziert. Die Kontrolle der Bearbeitungsgenauigkeit beruht auf hochpräzisen Werkzeugmaschinen und einer strikten Optimierung der Prozessparameter. So kann beispielsweise durch den Einsatz von Span- und Kühlmittel mit niedriger Geschwindigkeit die Wärmeeinflusszone reduziert und die Oberflächenqualität verbessert werden.

#### 4.3.2 Schleifen und Polieren

##### 4.3.2.1 Mechanische Poliertechnik

Durch mechanisches Polieren werden kleinste Defekte auf der Oberfläche von TZM-Molybdänstäben durch eine Schleifscheibe oder ein Poliertuch entfernt, um das Oberflächenfinish zu verbessern. Zu den wichtigsten Parametern gehören:

Schleifmittel: Diamant oder Aluminiumoxid, Partikelgröße 0,5-5 Mikrometer.

Poliergeschwindigkeit: 1000-3000 U/min, Kontrolle der Reibungswärme.

Poliermedium: Polierschlämme auf Wasser- oder Ölbasis.

Durch mechanisches Polieren wird die Oberflächenrauheit verbessert und die Ermüdungsbeständigkeit deutlich verbessert.

##### 4.3.2.2 Chemisches Polieren und Elektropolieren

Chemisches Polieren und Elektropolieren werden eingesetzt, um die Oberflächenqualität von TZM-Molybdänstäben weiter zu verbessern:

Chemisches Polieren: Korrosion von Oberflächenmikrodefekten mit sauren Lösungen (z. B. einem Gemisch aus Salpetersäure und Schwefelsäure) mit einer Oberflächenrauheit von bis zu 0,02 Mikrometern.

Elektropolieren: Entfernen von Oberflächenmaterial durch anodisches Auflösen in einem Elektrolyten, geeignet für hochpräzise Teile. Die Elektropolierspannung beträgt typischerweise 10-20 V und die Stromdichte 0,5-2 A/cm<sup>2</sup>.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Durch chemisches Polieren und Elektropolieren können die Korrosionsbeständigkeit und Oberflächengüte von TZM-Molybdänstäben deutlich verbessert werden.

### 4.3.3 Wärmebehandlung und Glühen

#### 4.3.3.1 Glüh Temperatur und Kornkontrolle

Das Glühen ist ein Schlüsselverfahren zur Entlastung der Verarbeitung und zur Optimierung der Kornstruktur. Das Glühen von TZM-Molybdänstäben erfolgt in der Regel im Vakuum oder in inerte Atmosphäre bei einer Temperatur von 1000-1400°C. Zu den wichtigsten Parametern gehören:

Glüh Temperatur: 1200 °C zur Linderung des größten Teils der Spannung, 1400 °C zur Einstellung der Korngröße.

Haltezeit: 1-2 Stunden, um die Homogenisierung des Getreides zu gewährleisten.

Abkühlgeschwindigkeit: 5-10°C/min, um thermische Belastung zu vermeiden.

Durch das Glühen kann die Korngröße von TZM-Molybdänstäben auf 10-30 Mikrometer gesteuert werden, wodurch die Zähigkeit und Kriechfestigkeit verbessert werden.

#### 4.3.3.2 Techniken zum Stressabbau

Zu den Spannungsabbautechniken gehören das Tieftemperaturglühen (800-1000 °C) und der Vibrationsspannungsabbau. Das Tieftemperaturglühen eignet sich für zerspannte Bauteile, während das Schwingungsspannungsglühen Eigenspannungen durch mechanische Schwingungen abbaut. Diese Technologien können die Ermüdungslebensdauer und die Dimensionsstabilität von TZM-Molybdänstäben verbessern.

### 4.3.4 Oberflächenbehandlung

#### 4.3.4.1 Technologie der antioxidativen Beschichtung

Die Antioxidationsbeschichtung ist eine Schlüsseltechnologie, um die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben in oxidierenden Umgebungen mit hohen Temperaturen zu verlängern. Zu den häufig verwendeten Beschichtungen gehören:

Molybdänsilizid (MoSi<sub>2</sub>)-Beschichtung: Die Abscheidung durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) oder Plasmaspritzabscheidung schützt das Material bei 1500°C.

Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-Beschichtung: Beständig gegen Oxidation und Korrosion bei hohen Temperaturen durch physikalische Gasphasenabscheidung (PVD).

Die Antioxidationsbeschichtung kann die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben in einer oxidierenden Umgebung bei 1200 °C um das 2-3-fache verlängern.

#### 4.3.4.2 Oberflächenaufkohlen und Nitrieren

Das Aufkohlen und Nitrieren von Oberflächen verbessert die Oberflächenhärte und Verschleißfestigkeit, indem Kohlenstoff- oder Stickstoffatome in die Oberfläche von TZM-Molybdänstäben eingebracht werden:

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

**Aufkohlen:** Wird in einer Kohlenstoffatmosphäre von 1000-1200 °C durchgeführt, um eine Hartmetallschicht mit einer Härte von bis zu 500 HV zu erzeugen.

**Nitrieren:** Wird in einer Stickstoffatmosphäre von 800-1000 °C durchgeführt, um eine Nitridschicht zu erzeugen und die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern.

Durch die Aufkohlungs- und Nitrierverfahren können die Verschleißfestigkeit und Ermüdungsbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben deutlich verbessert werden.

#### **4.4 TZM Molybdänstabproduktionsanlagen und Automatisierung**

Die Produktionsanlagen und die Automatisierungstechnik von TZM Molybdänstab sind entscheidend für die Produktionseffizienz und Produktqualität. Folgendes wird unter drei Aspekten analysiert: Schlüsselproduktionsausrüstung, Automatisierung und Intelligenz der Produktionslinie, Reinraum und Umweltkontrolle.

##### **4.4.1 Wichtige Produktionsanlagen**

###### **4.4.1.1 Vakuum-Sinteröfen**

Der Vakuum-Sinterofen ist die Kernausrüstung bei der Herstellung von TZM-Molybdänstäben, die zum Sintern von Pulverrohlingen zu hochdichten Legierungen verwendet werden. Zu den wichtigsten Funktionen gehören:

**Heizelement:** \_Wolframheizung, hohe Temperaturbeständigkeit und gleichmäßige Wärmeleitung.

**Vakuum:**  $10^{-3}$ - $10^{-5}$  Pa zur Reduzierung der oxidativen Verschmutzung.

**Temperaturregelung:** Die Genauigkeit  $\pm 5$  °C, um die Gleichmäßigkeit des Sinterns zu gewährleisten.

Der weltweit führende Vakuum-Sinterofen verfügt über ein SPS-Steuerungssystem, mit dem eine mehrstufige Erwärmung und eine präzise Temperaturregelung erreicht werden können.

###### **4.4.1.2 Schmiede- und Walzanlagen**

Die Schmiede- und Walzausrüstung umfasst eine hydraulische Schmiedemaschine und ein Four-High-Walzwerk, und die Hauptmerkmale sind:

**Schmiedemaschine:** Druck 500-2000 Tonnen, geeignet für Warmschmieden und Kaltschmieden.

**Walzwerk:** Servosteuerung, Walzgeschwindigkeit 0,5-2 m/s, Genauigkeit  $\pm 0,05$  mm.

Diese Maschinen sind in der Lage, TZM-Molybdänstäbe mit hoher Dichte und Präzision zu bearbeiten.

###### **4.4.1.3 CNC-Bearbeitungszentren**

Das CNC-Bearbeitungszentrum wird für die Endbearbeitung von TZM-Molybdänstäben verwendet und ist mit einem fünfsachsigen Gestängesystem und Hartmetallwerkzeugen ausgestattet, mit denen die Bearbeitung komplexer Formen realisiert werden kann. Die Bearbeitungsgenauigkeit kann

##### **Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung**

$\pm 0,01$  mm und die Oberflächenrauheit  $Ra < 1,6$  Mikrometer erreichen.

#### 4.4.2 Automatisierung und Intelligenz von Produktionslinien

Die Automatisierung und Intelligenz der TZM-Produktionslinie für Molybdänstäbe verbessert die Produktionseffizienz und Qualitätskonsistenz erheblich. Zu den Schlüsseltechnologien gehören:

Automatische Steuerung: SPS- und SCADA-Systeme werden verwendet, um die Sinter-, Schmiede- und Verarbeitungsparameter in Echtzeit zu überwachen.

Intelligent Inspection: Echtzeitüberwachung von Rohlingen und Fertigprodukten auf Fehler durch Inline-Röntgeninspektion und Ultraschallprüfung.

Datenanalyse: Nutzen Sie Big Data und künstliche Intelligenz, um Prozessparameter zu optimieren und die Produktkonsistenz zu verbessern.

Studien haben gezeigt, dass intelligente Produktionslinien die Produktionseffizienz um 30 % steigern und die Fehlerquote auf unter 1 % senken können.

#### 4.4.3 Reinraum- und Umweltkontrolle in der Produktion

Die Herstellung von TZM-Molybdänstäben ist umweltschädlich und muss in einem Reinraum durchgeführt werden, um Staub- und Verunreinigungen zu vermeiden. Zu den wichtigsten Maßnahmen gehören:

Sauberkeit: Reinraum der ISO-Klasse 7, Partikelkonzentration  $< 10.000$  Partikel/m<sup>3</sup>.

Klimakontrolle: Temperatur 20-25°C, Luftfeuchtigkeit 40-60%, Feuchtigkeitsaufnahme des Pulvers vermeiden.

Schutz der Atmosphäre: Das Mischen und Sintern von Pulver erfolgt unter dem Schutz von Argon oder Wasserstoff mit einem Sauerstoffgehalt von  $< 10$  ppm.

Reinraum- und Umweltkontrollen gewährleisten eine hohe Reinheit und Leistungsstabilität von TZM-Molybdänstäben, wodurch sie sich besonders für Halbleiter- und Luft- und Raumfahrtanwendungen eignen.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung



CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab

## 5. Qualitätskontrolle und Prüfung von TZM Molybdänstab

Da es sich um einen Hochleistungslegierungswerkstoff handelt, ist die Qualitätskontrolle und Inspektion von TZM-Molybdänstäben der Schlüssel, um einen stabilen Betrieb in Umgebungen mit hohen Temperaturen, hoher Beanspruchung und korrosiver Belastung zu gewährleisten. Die Qualitätskontrolle erstreckt sich über den gesamten Produktionsprozess von der Rohstoffauswahl bis zur Inspektion des fertigen Produkts und umfasst mehrere Aspekte wie Online-Prüftechnik, Leistungsprüfung und Fehleranalyse. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse der Qualitätskontroll- und Prüftechnik von TZM-Molybdänstäben in drei Unterkapiteln: Online-Prüftechnik, Leistungsprüfung sowie Fehleranalyse und -verbesserung.

### 5.1 TZM Molybdänstäbchen-Online-Detektionstechnologie

Die Inline-Inspektionstechnologie ist ein wichtiger Bestandteil des Produktionsprozesses von TZM-Molybdänstäben, die zur Überwachung der Produktqualität in Echtzeit und zur Sicherstellung der Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität und Integrität der inneren Struktur eingesetzt wird. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter zwei Aspekten: Prüfung der Maß- und Geogenauigkeit sowie Prüfung von Oberflächenfehlern und Rissen.

#### 5.1.1 Prüfung der Maßhaltigkeit und geometrischen Genauigkeit

Die Größe und geometrische Genauigkeit des TZM-Molybdänstabs wirkt sich direkt auf seine Anwendungswirkung in der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie und in der Halbleiterausüstung aus. Die Prüfung der Maßhaltigkeit und geometrischen Genauigkeit umfasst hauptsächlich die folgenden Technologien:

Laser-Entfernungsmessung und Drei-Koordinaten-Messung: Mit dem Laser-

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Entfernungsmesser kann eine berührungslose hochpräzise Messung mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,01$  mm erreicht werden, die für die Erfassung von Durchmesser, Länge und Rundheit von TZM-Molybdänstäben geeignet ist. Koordinatenmessgeräte (KMG) vermessen die Geometrie von Stangen mit einem taktilen Taster und sind in der Lage, Maßabweichungen bei komplexen Formen zu erkennen. In der Luft- und Raumfahrtindustrie müssen beispielsweise TZM-Molybdänstäbe Durchmessertoleranzen von  $\pm 0,02$  mm aufweisen, und KMGs sind in der Lage, diese Anforderung zu erfüllen.

Optischer Profiler: Der optische Profiler misst das Oberflächenprofil und die Geometrie von TZM-Molybdänstäben mittels Weißlichtinterferometrie, die zur Detektion der Zylindrizität und Geradheit der Stäbe geeignet ist. Mit einer Auflösung von bis zu 0,1 Mikrometern eignet es sich für hochpräzise Anwendungen.

Online-Sichtprüfsystem: Moderne Produktionslinie verwendet CCD-Kamera- und Bildverarbeitungstechnologie, um die Größe und Geometrie des TZM-Molybdänstabs in Echtzeit zu überwachen. Das System verwendet Algorithmen des maschinellen Lernens, um Maßabweichungen zu erkennen, und die Erkennungsgeschwindigkeit kann 10 Stück pro Sekunde erreichen, was die Produktionseffizienz erheblich verbessert.

Studien haben gezeigt, dass Maß- und geometrische Genauigkeitsprüfungen häufig mit der Norm ISO 1101 kombiniert werden, um sicherzustellen, dass TZM-Molybdänstäbe die strengen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt (z. B. Raketendüsen) und der Halbleiterausüstung (z. B. Sputtertargets) erfüllen. Die Umgebungstemperatur (20-25 °C) und die Luftfeuchtigkeit (40-60 %) sollten während des Inspektionsprozesses kontrolliert werden, um Messfehler durch Wärmeausdehnung oder Feuchtigkeit zu vermeiden.

### 5.1.2 Oberflächenfehler- und Risserkennung

Oberflächenfehler (z.B. Kratzer, Risse, Porositäten) und innere Risse können die mechanischen Eigenschaften und die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben deutlich reduzieren. Bei der Oberflächenfehler- und Rissprüfung werden folgende Techniken angewendet:

Ultraschallprüfung (UT): Die Ultraschallprüfung erkennt Risse, Poren und Einschlüsse in TZM-Molybdänstäben durch hochfrequente Schallwellen. Die Prüffrequenz beträgt typischerweise 5-10 MHz, der Sondendurchmesser 5-10 mm und er ist in der Lage, Defekte über 0,1 mm zu erkennen. Die Ultraschallprüfung eignet sich zur Beurteilung der Integrität der inneren Struktur von Stäben, insbesondere in der Nuklearindustrie.

Wirbelstromprüfung (ET): Bei der Wirbelstromprüfung werden mikroskopisch kleine Risse und Leitfähigkeitsänderungen auf der Oberfläche von TZM-Molybdänstäben durch elektromagnetische Induktion erkannt. Die Detektionsempfindlichkeit kann 0,05 mm erreichen, was für die Inline-Detektion geeignet ist. Der Vorteil der Wirbelstromprüfung besteht darin, dass sie schnell (bis zu 1 m/s) ist und für die Großserienproduktion geeignet ist.

Röntgeninspektion (RT): Die Röntgeninspektion wird verwendet, um tiefe Defekte wie Porosität und Einschlüsse in TZM-Molybdänstäben zu erkennen. Moderne digitale Röntgenbildgebungssysteme liefern hochauflösende Bilder (Auflösung  $< 0,1$  mm) für die Inspektion von hochzuverlässigen Bauteilen.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Visuelle Inspektion der Oberfläche: Die hochauflösende CCD-Kamera in Kombination mit Algorithmen der künstlichen Intelligenz kann Kratzer, Vertiefungen und Oxidschichten auf der Oberfläche von TZM-Molybdänstäben mit einer Genauigkeit von bis zu 0,01 mm erkennen. Studien haben gezeigt, dass das visuelle Inspektionssystem die Fehlerquote bei der Herstellung von TZM-Molybdänstäben auf weniger als 0,5 % reduzieren kann.

Diese Inspektionstechniken werden häufig in Kombination eingesetzt, um eine umfassende Inspektion von Oberflächen- und Innenfehlern zu erreichen. So wird beispielsweise die Ultraschall- und Röntgenprüfung für innere Defekte und die Wirbelstrom- und Sichtprüfung für Oberflächenfehler eingesetzt. Die Prüfergebnisse unterliegen internationalen Normen wie ASTM E1444 (Wirbelstromprüfung) und ASTM E1742 (Röntgenprüfung).

## 5.2 TZM Leistungstest für Molybdänstäbe

Die Leistungsprüfung ist ein wichtiger Schritt bei der Bewertung der Leistung von TZM-Molybdänstäben in Umgebungen mit hohen Temperaturen, hoher Beanspruchung und korrosiver Beanspruchung. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten: Hochtemperaturfestigkeits- und Härteprüfung, Korrosionsbeständigkeits- und Oxidationsbeständigkeitsprüfung sowie Wärmeausdehnungs- und Wärmeleitfähigkeitsprüfung.

### 5.2.1 Hochtemperatur-Festigkeits- und Härteprüfung

Die Hochtemperaturfestigkeit und Härte von TZM-Molybdänstäben sind seine wichtigsten Leistungsindikatoren in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Nuklearindustrie. Zu den Prüfmethoden gehören:

**Hochtemperatur-Zugprüfung:** Wird in einem Vakuum oder einer inerten Atmosphäre von 1200-1600 °C mit einer Hochtemperatur-Zugprüfmaschine (wie der Instron 5980-Serie) durchgeführt. Die Testergebnisse zeigen, dass die Zugfestigkeit von TZM-Molybdänstab bei 1200 °C 400-500 MPa beträgt, was viel höher ist als die von reinem Molybdän bei 200-300 MPa. Der Test ist erforderlich, um der Norm ASTM E21 zu entsprechen, um die Genauigkeit der Temperaturregelung  $\pm 5$  °C zu gewährleisten.

**Hochtemperatur-Druckprüfung:** Wird verwendet, um die Druckfestigkeit von TZM-Molybdänstäben bei hohen Temperaturen zu bewerten, die normalerweise bei 1400 °C und 50 MPa durchgeführt werden. Die Testergebnisse zeigen, dass die Streckgrenze des TZM-Molybdänstabs etwa 300-400 MPa beträgt, was für Hochtemperatur-Formanwendungen geeignet ist.

**Härteprüfung:** Der Vickers-Härteprüfer (HV) oder Rockwell-Härteprüfer (HRC) wird verwendet, um die Härte von TZM-Molybdänstäben zu prüfen. Die Vickers-Härte von TZM-Molybdänstäben bei Raumtemperatur beträgt 250-300 HV und ist damit höher als die von reinem Molybdän bei 200 HV. Der Hochtemperaturhärteprüfer (1000 °C) zeigte, dass die Härte des TZM-Molybdänstabs nur um 10-15 % abnahm, was eine ausgezeichnete Hochtemperaturstabilität zeigt.

**Mikrohärteprüfung:** Die mikroskopische Härte von TZM-Molybdänstäben wird mit Hilfe der Nanoindentationstechnologie gemessen, um die verstärkende Wirkung von Hartmetallpartikeln (wie TiC und ZrC) zu bewerten. Die Testergebnisse zeigten, dass die Härte der Hartmetallpartikelfläche bis zu 500 HV betrug.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Studien haben gezeigt, dass die Hochtemperaturfestigkeits- und Härteprüfung mit der Gefügeanalyse (z. B. REM, XRD) kombiniert wird, um die verstärkende Wirkung von Titan, Zirkonium und Kohlenstoff zu bewerten.

### 5.2.2 Prüfung der Korrosionsbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit

Die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben ist der Schlüssel zu ihrer Anwendung in chemischen Hochtemperaturumgebungen. Zu den Prüfmethoden gehören:

**Antioxidans-Test:** Durchgeführt in einer Luft- oder Sauerstoffatmosphäre von 1000-1200°C, wurden die oxidative Gewichtszunahmerate und die Oxidschichtdicke des TZM-Molybdänstabs gemessen. Die Testergebnisse zeigen, dass TZM-Molybdänstäbe unterhalb von 1000 °C eine dichte MoO<sub>2</sub>-Schutzschicht bilden können und die oxidative Gewichtszunahmerate weniger als 0,1 mg/cm<sup>2</sup>·h beträgt, was viel besser ist als die von reinem Molybdän (1-2 mg/cm<sup>2</sup>·h). Antioxidationsbeschichtungen, wie z. B. Molybdänsilizid, können die Betriebstemperatur auf bis zu 1500 °C erhöhen.

**Korrosionsbeständigkeitstest:** Korrosionsratentest in verdünnter Schwefelsäure, Salzsäure und alkalischer Lösung. Die Testergebnisse zeigen, dass die Korrosionsrate von TZM-Molybdänstäben in 5%iger Schwefelsäurelösung etwa 0,01 mm/Jahr beträgt, was viel niedriger ist als die von Edelstahl mit 0,1 mm/Jahr.

**Elektrochemischer Test:** Das Korrosionspotenzial und die Korrosionsstromdichte des TZM-Molybdänstabs werden mit einem potentiodynamischen Scanverfahren gemessen, um seine Stabilität in korrosiver Umgebung zu bewerten. Die Testergebnisse zeigen, dass das Korrosionspotenzial von TZM-Molybdänstäben höher ist als das von reinem Molybdän und eine bessere Korrosionsbeständigkeit aufweist.

Studien haben gezeigt, dass die Prüfung der Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit mit realen Anwendungsumgebungen kombiniert werden muss, wie z. B. Kühlmittel in Kernreaktoren oder Atmosphären in der Halbleiterherstellung, um die Zuverlässigkeit der Testergebnisse zu gewährleisten.

### 5.2.3 Prüfung der Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit

Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit sind die wichtigsten Leistungsparameter von TZM-Molybdänstäben in Hochtemperaturanwendungen. Zu den Prüfmethoden gehören:

**Wärmeausdehnungsversuch:** Der Wärmeausdehnungskoeffizient von TZM-Molybdänstäben wird bei Raumtemperatur bis 1600°C mit einem Dilatometer (z.B. NETZSCH DIL 402) gemessen. Die Testergebnisse zeigen, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient von TZM-Molybdänstäben  $5,3 \times 10^{-6}/K$  beträgt, was niedriger ist als der von Nickelbasislegierungen von  $13 \times 10^{-6}/K$ , was eine ausgezeichnete Dimensionsstabilität aufweist.

**Prüfung der Wärmeleitfähigkeit:** Die Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben wird mit dem Laser-Flash-Verfahren (LFA) gemessen. Die Testergebnisse zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben 139 W/m·K beträgt, die bei 1200 °C nur um 10-15 % abnimmt, was für Hochtemperatur-Wärmeableitungsanwendungen geeignet ist.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Wärmeleitfähigkeitstest: Die Wärmeleitfähigkeit des TZM-Molybdänstabs wird durch Kombination von Dichte und spezifischen Wärmedaten mit dem Laserblitzverfahren berechnet und seine Wärmeleiteffizienz bewertet. Die Testergebnisse zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben bei hohen Temperaturen stabil bleibt.

Diese Tests sind erforderlich, um die Normen ASTM E228 (Wärmeausdehnung) und ASTM E1461 (Wärmeleitfähigkeit) zu erfüllen, um die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Daten zu gewährleisten. Die Atmosphäre (z. B. Argon oder Vakuum) muss während des Tests kontrolliert werden, um zu vermeiden, dass Oxidation die Messergebnisse beeinträchtigt.

### 5.3 Fehleranalyse und Verbesserung von TZM-Molybdänstäben

Die Fehleranalyse ist ein wichtiges Mittel, um die Qualität und Zuverlässigkeit von TZM-Molybdänstäben zu verbessern, und es werden gezielte Verbesserungsmaßnahmen vorgeschlagen, indem die Fehlermodi wie Riss, Bruch, Ermüdung bei hohen Temperaturen und Kriechen analysiert werden. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten: Riss- und Bruchanalyse, Ermüdungs- und Kriechanalyse bei hohen Temperaturen sowie Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung.

#### 5.3.1 Riss- und Bruchanalyse

Risse und Brüche sind die Hauptversagensarten von TZM-Molybdänstäben in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung. Zu den Analysemethoden gehören:

Frakturanalyse: Beobachten Sie die Frakturmorphologie des TZM-Molybdänstabs mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM), um die Bruchart (duktiler Bruch oder Sprödbbruch) zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bruchzähigkeit von TZM-Molybdänstäben  $15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  beträgt, was höher ist als die von reinem Molybdän  $10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , aber zyklische Hochtemperaturspannungen können Mikrorisse verursachen.

Rissausbreitungsanalyse: Die Elektronenrückstreubeugung (EBSD) wird zur Analyse von Rissausbreitungspfaden verwendet, um die Rolle von Korngrenzen und Karbidpartikeln zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass Hartmetallpartikel die Rissausbreitung effektiv verhindern und die Bruchfestigkeit verbessern können.

Spannungskonzentrationsanalyse: Die Spannungsverteilung von TZM-Molybdänstäben bei hohen Temperaturen wird durch Finite-Elemente-Analyse (FEA) simuliert, um den Ort der Rissinitiierung zu identifizieren. Oberflächenfehler (z. B. Kratzer, Porosität) sind wichtige Spannungskonzentrationen.

Studien haben gezeigt, dass Risse und Brüche häufig mit Oberflächenqualität und mikrostrukturellen Defekten verbunden sind. So können beispielsweise Oberflächenkratzer während der Bearbeitung Ermüdungsrisse auslösen, und Poren beim Sintern können Sprödbüche verursachen.

#### 5.3.2 Ermüdungs- und Kriechanalyse bei hohen Temperaturen

Ermüdung und Kriechen bei hohen Temperaturen sind die Hauptfehlerarten von TZM-

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Molybdänstäben in Umgebungen mit langfristiger Hochtemperaturbelastung. Zu den Analysemethoden gehören:

**Ermüdungstest bei hohen Temperaturen:** Der Ermüdungstest wurde unter zyklischer Belastung von 1200 °C und  $\pm 200$  MPa durchgeführt, um die Ermüdungslebensdauer des TZM-Molybdänstabs zu bewerten. Die Testergebnisse zeigen, dass die Ermüdungslebensdauer von TZM-Molybdänstäben  $10^5$  Zyklen beträgt, was viel höher ist als die von reinem Molybdän  $10^4$  Zyklen. Ermüdungsrisse entstehen in der Regel durch Oberflächenfehler oder Korngrenzen, und Hartmetallpartikel sind in der Lage, die Rissausbreitung zu verlangsamen.

**Zeitstandversuch:** Der Zeitstandversuch wurde bei 1400 °C und 20 MPa durchgeführt, um die Kriechgeschwindigkeit und Lebensdauer des TZM-Molybdänstabs zu messen. Die Testergebnisse zeigen, dass die Kriechrate von TZM-Molybdänstäben etwa 1/10 der von reinem Molybdän beträgt und die Lebensdauer 5000 Stunden erreichen kann. Das Kriechversagen wird hauptsächlich durch Korngrenzenschlupf und Versetzungsklettern verursacht, und der Pinning-Effekt von Hartmetallpartikeln reduziert die Kriechgeschwindigkeit erheblich.

**Gefügeanalyse:** Mit Hilfe der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) wurden die Versetzungen und Korngrenzänderungen von TZM-Molybdänstäben während Hochtemperaturermüdungs- und Kriechprozessen beobachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lösungsverfestigung von Titan und Zirkonium und die Ausscheidungsverfestigung von Hartmetallpartikeln die Ermüdungsbeständigkeit und Kriechfestigkeit effektiv verbessern kann.

Studien haben gezeigt, dass die Ermüdungs- und Kriechanalyse bei hohen Temperaturen mit realen Anwendungsumgebungen kombiniert werden muss, z. B. mit Hochtemperaturzyklen in der Luft- und Raumfahrt oder dem langfristigen Betrieb von Kernreaktoren, um die Ausfallmechanismen genau zu bewerten.

### 5.3.3 Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung

Basierend auf den Ergebnissen der Fehleranalyse umfassen die Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung von TZM Molybdänstäben im Wesentlichen folgende Aspekte:

**Optimierte Oberflächenqualität:** Mechanisches, chemisches und Elektropolieren reduziert die Oberflächenrauheit auf weniger als 1,6 Mikrometer und reduziert die Rissentstehungspunkte. Antioxidationsbeschichtungen (z. B. Molybdänsilizid, Aluminiumoxid) können die Korrosionsbeständigkeit weiter verbessern.

**Verbesserte Mikrostruktur:** Feinere Körner (3,0 ~ 5,0 Mikrometer) werden durch Optimierung des pulvermetallurgischen Prozesses (z. B. Reduzierung der Sintertemperatur auf 1800 °C und Steuerung der Abkühlgeschwindigkeit) erhalten, um die Ermüdungs- und Kriechbeständigkeit zu verbessern.

**Verbesserte Kontrolle des Produktionsprozesses:** Führen Sie Online-Inspektionstechnologien (z. B. Ultraschall, Röntgen) und intelligente Produktionslinien ein, um Fehler und Leistungsparameter in Echtzeit zu überwachen und so die Produktkonsistenz zu gewährleisten.

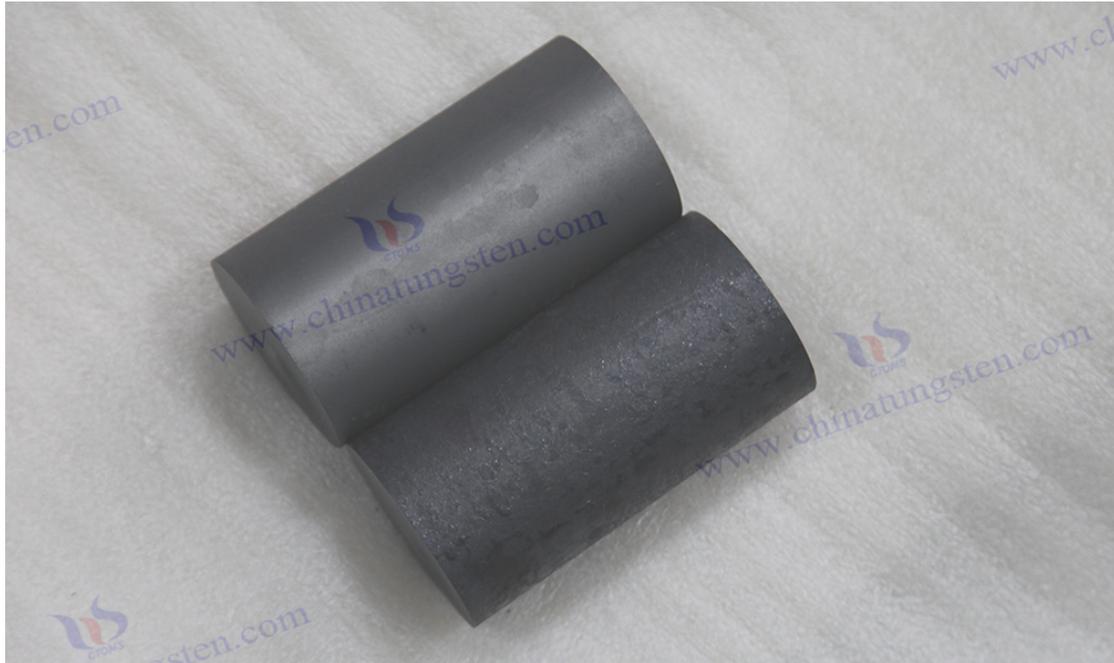
**Entwicklung neuer Beschichtungen:** Forschung an neuen Antioxidations- und Korrosionsschutzbeschichtungen (z. B. Nanokomposit-Beschichtungen) zur Verbesserung der

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben in Umgebungen über 1500 °C.

Qualitätsmanagementsystem: Implementierung von Qualitätsmanagementsystemen nach ISO 9001 und AS9100 (Luft- und Raumfahrt), um die Qualitätskontrolle von den Rohstoffen bis zum fertigen Produkt sicherzustellen.

Die Studie zeigt, dass durch die oben genannten Verbesserungsmaßnahmen die Defektrate von TZM-Molybdänstäben auf weniger als 0,5 % reduziert und die Lebensdauer um 20-30 % erhöht werden kann, was den hohen Zuverlässigkeitsanforderungen der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie und der Halbleiterausrüstung gerecht wird.



CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab

## 6. Verwendung von TZM Molybdänstab

Als Hochleistungslegierungswerkstoff ist der TZM-Molybdänstab aufgrund seiner hervorragenden Hochtemperaturfestigkeit, Kriechfestigkeit, seines niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und seiner hohen Wärmeleitfähigkeit in vielen High-Tech-Bereichen weit verbreitet. Die Zugabe von Titan (Ti), Zirkonium (Zr) und Kohlenstoff (C) zu TZM-Molybdänstäben (Molybdän) verbessert die Eigenschaften von Molybdän erheblich und macht sie ideal für Hochtemperaturöfen, Luft- und Raumfahrt, Nuklearindustrie, Elektronik- und Halbleiterindustrie und andere industrielle und wissenschaftliche Bereiche. Im Folgenden wird die Verwendung von TZM-Molybdänstäben unter fünf Aspekten ausführlich erläutert.

### 6.1 Anwendungen in Hochtemperaturöfen

TZM-Molybdänstäbe spielen aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts (ca. 2623 °C), ihrer hervorragenden Kriech- und Oxidationsbeständigkeit eine Schlüsselrolle bei der Herstellung von Hochtemperaturöfen und können in Hochtemperaturumgebungen über 1600 °C lange Zeit stabil arbeiten. Im Folgenden wird die Anwendung unter drei Aspekten analysiert: Heizelement,

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Vakuum-Sinteröfen und Wärmebehandlungsöfen.

### 6.1.1 als Heizstab

TZM-Molybdänstab wird aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit (139 W/m·K) und seiner hervorragenden Beständigkeit gegen Hochtemperaturverformung häufig als Heizelement in Hochtemperaturöfen verwendet. Im Vergleich zu reinem Molybdän weisen TZM-Molybdänstäbe eine Rekristallisationstemperatur von bis zu 1400 °C auf, wodurch bei hohen Temperaturen eine feine Kornstruktur erhalten bleibt und Leistungseinbußen durch Kornwachstum vermieden werden. In Widerstandsöfen werden TZM-Molybdänstäbe als Heizelemente verwendet, um schnellen Heiz- und Abkühlzyklen standzuhalten und die Langzeitstabilität zu erhalten.

Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

**Vakuufofen:** Der TZM-Molybdänstab fungiert als Heizelement in einer Vakuumumgebung und ist in der Lage, Tausende von Stunden bei 1600-1800 °C zu laufen, geeignet für das Sintern von Metallen und Keramiken. In Sinteröfen aus Titanlegierungen und Zirkonoxid sorgen TZM-Molybdänstäbe beispielsweise für Temperaturgleichmäßigkeit und Stabilität.

**Atmosphärenschofen:** In der Argon- oder Stickstoffschutzatmosphäre ermöglicht die Oxidationsbeständigkeit des TZM-Molybdänstabs, dass er Oxidationsbelastungen bei hohen Temperaturen standhält und die Lebensdauer verlängert. Laut Chinatungsten Online ist die Lebensdauer des Heizelements des TZM-Molybdänstabs etwa 50% länger als die von reinem Molybdän.

**Hochtemperatur-Glühofen:** TZM-Molybdänstab wird verwendet, um das Heizelement des Glühofens herzustellen, das ein stabiles thermisches Feld über 1400 °C bereitstellen kann, das für die Wärmebehandlung von Hochleistungslegierungen geeignet ist.

Die Oberfläche von TZM-Molybdänstäben ist in der Regel mit einer Antioxidationsbeschichtung (z. B. Molybdänsilizid, MoSi<sub>2</sub>) beschichtet, um die Haltbarkeit in oxidierenden Atmosphären weiter zu verbessern. Die weltweit führenden Ofenhersteller verwenden in großem Umfang TZM-Molybdänstäbe in ihren Hochtemperaturofenkonstruktionen, um industrielle und wissenschaftliche Anforderungen zu erfüllen.

### 6.1.2 Anwendungen in Vakuum-Sinteröfen

Der Vakuum-Sinterofen ist eine wichtige Anlage für die Herstellung von Hochleistungswerkstoffen (wie Keramik, Metalllegierungen), und TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit als Stützen, Tiegel und Heizelemente für Sinteröfen verwendet. Zu den wichtigsten Anwendungen gehören:

**Stützen und Tiegel:** TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Stützrahmen und Tiegeln für Sinteröfen verwendet, die der Schwerkraft und thermischen Belastung des Materials bei hohen Temperaturen standhalten. In Aluminiumoxid-Keramik-Sinteröfen beispielsweise behalten TZM-Molybdän-Stabstützen die geometrische Stabilität bei und vermeiden Verformungen.

**Hochtemperaturvorrichtung:** TZM-Molybdänstab wird zu einer Vorrichtung verarbeitet, die

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

zum Fixieren des gesinterten Materials und zur Sicherstellung der Maßgenauigkeit während des Sinterprozesses verwendet wird. Sein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient ( $5,3 \times 10^{-6}/K$ ) gewährleistet die Stabilität der Leuchte bei hohen Temperaturen.

Thermoelement-Schutzhülsen: TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von Thermoelement-Schutzhülsen verwendet, die in der Lage sind, Thermoelemente vor Korrosion und mechanischer Beschädigung in einer Vakuumumgebung über 1800 °C zu schützen.

### 6.1.3 Anwendungen in Wärmebehandlungsöfen

Wärmebehandlungsöfen werden zum Glühen, Abschrecken und Anlassen von Metallen und Legierungen verwendet, und TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer hervorragenden Kriechbeständigkeit und hohen Wärmeleitfähigkeit häufig in Strukturteilen und Heizelementen von Wärmebehandlungsöfen verwendet. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

Heizelement: TZM-Molybdänstab wird als Heizelement im Wärmebehandlungsöfen verwendet, das in der Lage ist, ein stabiles Wärmefeld bei 1400-1600 °C bereitzustellen, das für die Wärmebehandlung von hochfestem Stahl und Titanlegierungen geeignet ist.

Ofeneinbauten: TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von Ofenstützrahmen, -wannen und -trennwänden verwendet, die dem Gewicht und der thermischen Belastung des Materials bei hohen Temperaturen standhalten. In Wärmebehandlungsöfen für Komponenten der Luft- und Raumfahrt sorgen die Molybdän-Stabstützen des TZM beispielsweise für ihre Langzeitstabilität.

Atmosphärenkontrolle: In Wärmebehandlungsöfen mit Wasserstoff- oder Argonatmosphäre ermöglicht die Korrosionsbeständigkeit der TZM-Molybdänstäbe, dass sie chemischen Angriffen standhalten und die Lebensdauer des Ofens verlängern.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung von TZM-Molybdänstab in einem Wärmebehandlungsöfen die Temperaturgleichmäßigkeit im Ofen innerhalb von  $\pm 5$  °C steuern und die Wärmebehandlungsqualität erheblich verbessern kann. Globale Hersteller von Wärmebehandlungsöfen bevorzugen TZM-Molybdänstäbe in ihren High-End-Anlagen, um die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt- und Automobilindustrie zu erfüllen.

## 6.2 Bereich Luft- und Raumfahrt

Aufgrund seines hohen Schmelzpunkts, seiner hervorragenden Hochtemperaturfestigkeit und seines niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten spielt der TZM-Molybdänstab eine unersetzliche Rolle in der Luft- und Raumfahrt und wird häufig in Raketendüsen, Hochtemperatur-Strukturteilen und thermischen Schutzsystemen für Raumfahrzeuge verwendet. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse dieser drei Aspekte.

### 6.2.1 Anwendungen in Raketendüsen

Raketendüsen sind eine der anspruchsvollsten Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie und halten hohen Temperaturen von mehr als 2000 °C und starken Temperaturschocks stand. Der TZM-Molybdänstab ist aufgrund seines hohen Schmelzpunkts (2623 °C) und seiner hervorragenden Temperaturwechselbeständigkeit zum Material der Wahl für Raketendüsen geworden. Zu den

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

spezifischen Anwendungen gehören:

**Düsenhals:** TZM-Molybdänstab wird verwendet, um den Hals einer Raketendüse herzustellen, die in der Lage ist, hohen Temperaturen und hohem Druck Gasströmen in der Brennkammer standzuhalten. So verwenden beispielsweise die Raptor-Triebwerksdüsen von SpaceX eine TZM-Legierung, um die extreme Wärmebelastung durch die Verbrennung von flüssigem Sauerstoff und Methan zu bewältigen.

**Düsenverlängerung:** Für die Düsenverlängerung wird TZM-Molybdänstab verwendet, der die geometrische Stabilität aufrechterhalten und die durch thermische Belastung verursachte Verformung reduzieren kann. Sein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient ( $5,3 \times 10^{-6}/K$ ) sorgt dafür, dass die Düse bei schnellen Temperaturwechseln nicht reißt.

**Anti-Oxidations-Beschichtung:** Um die Haltbarkeit in oxidierenden Verbrennungsumgebungen zu verbessern, werden TZM-Molybdän-Stabdüsen in der Regel mit einer Molybdänsilizid- oder Zirkonoxidbeschichtung beschichtet, um ihre Lebensdauer zu verlängern.

### 6.2.2 Anwendung in Hochtemperatur-Strukturbauteilen

TZM-Molybdänstäbe werden häufig in Hochtemperatur-Strukturteilen der Luft- und Raumfahrt wie Turbinenschaufeln, Brennkammerwänden und Komponenten des Antriebssystems verwendet. Seine ausgezeichnete Hochtemperaturfestigkeit (Zugfestigkeit 400-500 MPa bei 1200 °C) und seine Kriechfestigkeit ermöglichen es ihm, komplexen Belastungsumgebungen standzuhalten. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

**Turbinenschaufeln:** TZM-Molybdänstäbe werden verwendet, um die Stützstruktur von Turbinenschaufeln für Flugzeugtriebwerke herzustellen, die die Festigkeit und Stabilität über 1400 °C aufrechterhalten können.

**Brennkammerwand:** TZM-Molybdänstab wird verwendet, um eine Brennkammerwand herzustellen, die der Scheuerung und dem Temperaturschock von Hochtemperatur-Verbrennungsgasen standhält. In der Brennkammer des Space Shuttles X-33 der NASA werden beispielsweise Komponenten aus TZM-Legierungen verwendet.

**Verbinder:** TZM-Molybdänstäbe werden zu Hochtemperaturschrauben und -verbindern verarbeitet, die für die Hochtemperaturmontage von Luft- und Raumfahrtanlagen geeignet sind.

### 6.2.3 Anwendung im thermischen Schutz von Raumfahrzeugen

Raumfahrzeuge sind beim Wiedereintritt Temperaturen von Tausenden von Grad Celsius ausgesetzt, und TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit in Wärmeschutzsystemen (TPS) eingesetzt. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

**Wärmeschutzplatte:** Der TZM-Molybdänstab wird zu einer dünnen Platte verarbeitet, die für die Wärmeschutzschicht an der Außenseite des Raumfahrzeugs verwendet wird, die schnell Wärme ableiten und die innere Struktur schützen kann.

**Hitzeschild:** TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Hitzeschilden für Raumfahrzeuge verwendet, um eine hohe Temperaturleitung an empfindliche Komponenten zu

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

verhindern. So bestehen beispielsweise einige der Hitzeschilde der Internationalen Raumstation aus einer TZM-Legierung.

**Anti-Ablations-Beschichtung:** Die Oberfläche von TZM-Molybdänstäben ist in der Regel mit einem anti-ablativen Material (z. B. Carbon/Carbon-Verbundwerkstoffen) beschichtet, um die Haltbarkeit in extremen thermischen Umgebungen zu verbessern.

### 6.3 Nuklearindustrie

TZM-Molybdänstäbe haben aufgrund ihres geringen thermischen Neutronenabsorptionsquerschnitts, ihrer Hochtemperaturfestigkeit und Strahlungsbeständigkeit wichtige Anwendungen in der Nuklearindustrie und decken Kernreaktoren, Kernfusionsanlagen und den Umgang mit radioaktivem Material ab. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse dieser drei Aspekte.

#### 6.3.1 Anwendungen in Kernreaktoren

TZM-Molybdänstäbe werden in Kernreaktoren zur Herstellung von Steuerstäben, Strukturteilen und Brennstoffummantelungen verwendet und sind in der Lage, hohen Temperaturen und Umgebungen mit hoher Strahlung standzuhalten. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

**Steuerstäbe:** TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung der Stützstruktur von Steuerstäben verwendet, die in der Lage sind, bei hohen Temperaturen (800-1200 °C) und Neutronenbestrahlung Stabilität aufrechtzuerhalten. Durch seinen geringen thermischen Neutronenabsorptionsquerschnitt (ca. 2,6 Scheunen) ist es Edelstahl überlegen.

**Strukturteile:** TZM-Molybdänstäbe werden im Stützrahmen und in den Rohrleitungen im Inneren des Reaktors verwendet und sind in der Lage, der Korrosion und mechanischen Beanspruchung durch Hochtemperatur-Kühlmittel standzuhalten. So werden beispielsweise in schnellen Reaktoren wie dem China Experimental Fast Reactor Strukturteile aus TZM-Legierungen verwendet.

**Brennstoffummantelung:** TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Kernbrennstoffummantelungen verwendet, die in der Lage sind, die Dichtigkeit bei hohen Temperaturen und hoher Strahlung aufrechtzuerhalten und das Austreten von radioaktiven Materialien zu verhindern.

#### 6.3.2 Anwendungen in Kernfusionsanlagen

Kernfusionsanlagen wie Tokamaks und Trägheitsfusionsanlagen stellen hohe Anforderungen an die Materialien, und TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer Beständigkeit gegen Plasmaangriff und ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit häufig verwendet. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

**Plasma-facing material (PFM):** TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Deflektoren und ersten Wänden von Tokamak-Bauelementen verwendet, die in der Lage sind, hochenergetischem Plasmabeschuss und unmittelbaren Wärmebelastungen über 2000 °C standzuhalten. So verwendet beispielsweise der Internationale Experimentelle Thermonukleare Fusionsreaktor (ITER) eine TZM-Legierung als Deflektormaterial.

**Material für Kühlkörper:** Die hohe Wärmeleitfähigkeit des TZM-Molybdänstabs macht ihn zu

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

einem Kühlkörpermaterial, das Wärme schnell ableiten und die empfindlichen Teile von Fusionsgeräten schützen kann.

Strukturelle Unterstützung: TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung der Stützstruktur von Fusionsanlagen verwendet, die in der Lage sind, die Stabilität bei hohen Temperaturen und starken Magnetfeldern aufrechtzuerhalten.

### 6.3.3 Anwendungen im Umgang mit radioaktiven Stoffen

TZM-Molybdänstäbe werden bei der Verarbeitung von radioaktiven Materialien zur Herstellung von Behältern, Abschirmmaterialien und Operationswerkzeugen verwendet und sind beständig gegen hohe Strahlung und chemische Korrosion. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

Behälter für radioaktive Abfälle: TZM-Molybdänstäbe werden zu Behältern für die Lagerung hochradioaktiver Abfälle verarbeitet, die langfristiger Strahlung und Korrosion standhalten.

Abschirmmaterialien: TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von Strahlenschutzmaterialien verwendet, die aufgrund ihrer hohen Dichte ( $10,2 \text{ g/cm}^3$ ) und ihres geringen thermischen Neutronenabsorptionsquerschnitts herkömmlichen Bleiabschirmmaterialien überlegen sind.

Betriebswerkzeuge: TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Hochtemperatur-Betriebswerkzeugen wie Manipulatoren und Vorrichtungen verwendet, die in Umgebungen mit hoher Strahlung sicher arbeiten können.

## 6.4 Elektronik- und Halbleiterindustrie

TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit, ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihrer Korrosionsbeständigkeit häufig in der Elektronik- und Halbleiterindustrie eingesetzt, einschließlich Ionenimplantationsgeräten, Dünnschichtabscheidung und Herstellung elektronischer Geräte. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse dieser drei Aspekte.

### 6.4.1 Anwendungen in Ionenimplantationsgeräten

Ionenimplantationsgeräte werden in der Herstellung von Halbleiterchips eingesetzt, und TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Beständigkeit gegen Plasmaangriffe als Schlüsselkomponenten verwendet. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

Komponenten der Ionenquelle: Zur Herstellung der Elektroden und Strahlführungskomponenten der Ionenquelle werden TZM-Molybdänstäbe verwendet, die dem Beschuss durch hochenergetische Ionenstrahlen standhalten. Seine hohe Wärmeleitfähigkeit ( $139 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) sorgt für eine schnelle Wärmeableitung und vermeidet eine lokale Überhitzung.

Vorrichtungen und Ziele: TZM-Molybdänstäbe werden zu Vorrichtungen für die Befestigung von Siliziumwafern verarbeitet, die in der Lage sind, die Dimensionsstabilität in Hochtemperatur- und Hochvakuumumgebungen aufrechtzuerhalten. Das Ionenimplantationsgerät von TSMC verwendet beispielsweise eine TZM-Molybdänstabhalterung.

Abschirmkomponenten: TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von Abschirmplatten in Ionenimplantationsgeräten verwendet, die gegen Strahlung und Korrosion durch

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

hochenergetische Teilchen beständig sind.

#### 6.4.2 Anwendungen in der Dünnschichtabscheidung

Die Dünnschichtabscheidung (z. B. physikalische Gasphasenabscheidung, PVD) ist ein Schlüsselprozess in der Herstellung von Halbleitern und elektronischen Bauelementen, und TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit als Sputtertargets und -vorrichtungen verwendet. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

**Sputtertargets:** TZM-Molybdänstäbe werden zu Sputtertargets für die Abscheidung von Hochleistungsdünnschichten wie metallleitenden und isolierenden Schichten verarbeitet. Sein homogenes Gefüge sorgt für die Homogenität des gesputterten Films.

**Vorrichtungen und Stützen:** TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Vorrichtungen und Stützen in PVD-Anlagen verwendet, die bei hohen Temperaturen und hohem Vakuum stabil bleiben können. Bei der Herstellung von OLED-Bildschirmen werden beispielsweise TZM-Molybdänstabhalterungen verwendet, um Substrate zu halten.

**Heizelement:** TZM-Molybdänstab wird zur Herstellung von Heizelementen für PVD-Geräte verwendet, die ein stabiles Wärmefeld bei 800-1200 °C bereitstellen können.

#### 6.4.3 Anwendungen bei der Herstellung von elektronischen Geräten

TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von elektronischen Geräten zur Herstellung von Hochtemperaturvorrichtungen, Elektroden und Steckverbindern verwendet. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

**Hochtemperatur-Vorrichtungen:** TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Vorrichtungen in der Waferverarbeitung verwendet und sind in der Lage, die Stabilität in Hochtemperatur-Glüh- und Diffusionsprozessen aufrechtzuerhalten. So werden beispielsweise in den Chipfertigungsanlagen von Intel TZM-Molybdänstabhalterungen verwendet.

**Elektroden:** TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von Molybdänelektroden in elektronischen Geräten verwendet, wie z. B. Elektroden in Vakuumröhren und Mikrowellengeräten, die hohen Temperaturen und hohen Strömen standhalten können.

**Steckverbinder:** TZM-Molybdänstäbe werden zu Hochtemperatursteckverbindern für die Montage von elektronischen Geräten verarbeitet, die in der Lage sind, thermischen Zyklen und mechanischer Beanspruchung standzuhalten.

### 6.5 Sonstige industrielle und wissenschaftliche Forschungsbereiche

TZM-Molybdänstäbe werden auch häufig in anderen industriellen und wissenschaftlichen Bereichen eingesetzt, z. B. in Hochtemperatur-Versuchsgeräten, Hochtemperaturformen und -werkzeugen sowie in der additiven Fertigung. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse dieser drei Aspekte.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

**High Melting Point:** Suitable for extreme high-temperature environments.

**Excellent High-Temperature Strength:** Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

**Good Thermal Stability and Creep Resistance:** Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

**Superior Corrosion and Oxidation Resistance:** Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

**Excellent Machinability:** Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

**High-Temperature Furnace Components:** Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

**Aerospace Industry:** Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

**Nuclear Industry:** Used in reactor support structures and control rod guide systems.

**Electronics Industry:** Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

**Mold Manufacturing:** Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: [www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### 6.5.1 Anwendung in Hochtemperatur-Versuchsgeräten

TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer Hochtemperaturstabilität und Korrosionsbeständigkeit häufig in Hochtemperatur-Versuchsgeräten wie Materialprüföfen, Plasmaphysik-Versuchsgeräten und Hochtemperaturreaktoren eingesetzt. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

Materialprüföfen: TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Vorrichtungen und Heizelementen für Hochtemperatur-Zug- und Druckprüföfen verwendet, die in der Lage sind, ein stabiles thermisches Feld über 1600 °C bereitzustellen. Die ASTM E21-Standardprüfgeräte verwenden beispielsweise TZM-Molybdänstabhalterungen.

Experiment in der Plasmaphysik: Der Molybdänstab TZM wird zur Herstellung von Elektroden und Trägern für Plasma-Experimentiergeräte verwendet, die der Erosion von hochenergetischem Plasma standhalten. Für den Versuchsaufbau des Laserplasmas werden beispielsweise Elektroden aus TZM-Legierungen verwendet.

Hochtemperaturreaktor: TZM-Molybdänstab wird zur Herstellung von Heizelementen und Stützstrukturen für chemische Reaktoren verwendet, die bei hohen Temperaturen und korrosiven Atmosphären stabil arbeiten können.

### 6.5.2 Anwendungen in Hochtemperaturwerkzeugen und -werkzeugen

TZM-Molybdänstäbe werden aufgrund ihrer hohen Härte (250-300 HV) und Verschleißschutzeigenschaften bei der Herstellung von Hochtemperaturformen und -werkzeugen eingesetzt. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

Druckgussformen: TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Druckgussformen für Aluminiumlegierungen und Magnesiumlegierungen verwendet, die hohen Belastungen und Verschleiß bei 800-1000 °C standhalten.

Warmschmiedewerkzeuge: TZM-Molybdänstäbe werden zur Herstellung von Warschmiedewerkzeugen für Luft- und Raumfahrtkomponenten verwendet, die in der Lage sind, Festigkeit und Dimensionsstabilität über 1200 °C aufrechtzuerhalten.

Schneidwerkzeuge: TZM-Molybdänstäbe werden zu Hochtemperatur-Schneidwerkzeugen verarbeitet, die für die Bearbeitung von Wolframlegierungen und Hochtemperaturlegierungen geeignet sind.

### 6.5.3 Anwendungen in der additiven Fertigung

Die additive Fertigung (3D-Druck) ist ein aufstrebendes Anwendungsgebiet für TZM-Molybdänstäbe, mit denen TZM-Legierungsteile mit komplexen Formen durch Laserelektives Schmelzen (SLM) oder Elektronenstrahlschmelzen (EBM) hergestellt werden können. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

Komponenten für die Luft- und Raumfahrt: TZM-Molybdänstabpulver wird im 3D-Druck von Raketendüsen und Turbinenschaufeln verwendet, um komplexe Geometrien zu ermöglichen und die Verarbeitungskosten zu senken. Zum Beispiel sind die 3D-gedruckten TZM-Legierungsdüsen der NASA 30 % leichter.

Medizinische Geräte: TZM-Molybdänstäbe werden für den 3D-Druck von autoklavierten

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Geräteteilen verwendet, die in der Lage sind, die Stabilität bei hohen Temperaturen und korrosiven Umgebungen aufrechtzuerhalten.

Wissenschaftliches Forschungsmodell: TZM-Molybdänstabpulver wird beim 3D-Druck von Hochtemperatur-Versuchsmodellen verwendet, um den Anforderungen von Materialtests und physikalischen Experimenten gerecht zu werden.



CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab

## 7. Technische Herausforderungen und zukünftige Entwicklung des TZM Molybdänstabs

Als Hochleistungs-Superlegierung wird der TZM-Molybdänstab aufgrund seiner hervorragenden Hochtemperaturfestigkeit, Kriechbeständigkeit und seines niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten häufig in der Luft- und Raumfahrt, der Nuklearindustrie, der Halbleiterherstellung und anderen Bereichen eingesetzt. Mit der immer rauerer Anwendungsumgebung und der rasanten Entwicklung der Industrietechnologie stehen die Herstellung und Anwendung von TZM-Molybdänstäben jedoch vor vielen technischen Herausforderungen, darunter die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, die Herstellung komplexer Formen und die Kontrolle der Produktionskosten. Gleichzeitig bieten neue Materialien, intelligente Fertigung und grüne Produktionstechnologien neue Möglichkeiten für die zukünftige Entwicklung von TZM-Molybdänstäben. In diesem Kapitel wird die aktuelle Situation und Zukunft von TZM-Molybdänstäben unter vier Aspekten umfassend erörtert: technische Herausforderungen, neue Materialien und Technologien, intelligente und umweltfreundliche Fertigung sowie zukünftige Entwicklungstrends.

### 7.1 Technische Herausforderungen

Die Herstellung und Anwendung von TZM-Molybdänstäben steht vor vielen technischen Herausforderungen, darunter die Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, die Schwierigkeit der Herstellung komplexer Formen und großer Größen sowie die

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Kontrolle der Produktionskosten. Diese Herausforderungen wirken sich direkt auf die Leistung und Wirtschaftlichkeit von TZM-Molybdänstäben in High-End-Anwendungen aus. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten.

### 7.1.1 Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen

Die Oxidationsbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben in Hochtemperaturumgebungen ( $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ist der Hauptengpass bei seiner Anwendung. Obwohl TZM-Molybdänstäbe die Oxidationsbeständigkeit durch Zugabe von Titan (Ti), Zirkonium (Zr) und Kohlenstoff (C) verbessern, sind sie in oxidierenden Atmosphären immer noch nicht so leistungsfähig wie Keramiken oder einige Nickelbasislegierungen. Zu den spezifischen Herausforderungen gehören:

**Oxidverflüchtigung:** In der oxidierenden Umgebung über  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  bildet sich auf der Oberfläche des TZM-Molybdänstabs flüchtiges Molybdäntrioxid ( $\text{MoO}_3$ ), was zu einem schnellen Materialverlust führt. Die Ergebnisse zeigen, dass die oxidative Gewichtszunahmerate von TZM-Molybdänstäbchen in Luft bei  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  etwa  $0,5\text{-}1\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}$  beträgt, was viel höher ist als die von keramischen Materialien ( $0,01\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}$ ).

**Stabilität der Schutzschicht:** TZM-Molybdänstäbe können die Oxidationsbeständigkeit durch Molybdänsilizid- ( $\text{MoSi}_2$ ) oder Aluminiumoxid- ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) Beschichtungen verbessern, aber diese Beschichtungen neigen dazu, sich über  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  oder bei langfristigen thermischen Zyklen abzulösen oder zu reißen. So können  $\text{MoSi}_2$ -Beschichtungen nach 100 thermischen Zyklen bei  $1600^{\circ}\text{C}$  eine Schälrate von 20-30% erreichen.

**Komplexe Anpassungsfähigkeit an die Umwelt:** In der Luft- und Raumfahrt (z. B. Raketendüsen) und Kernfusionsanlagen müssen TZM-Molybdänstäbe hohen Temperaturen, Oxidation und Plasmaangriff gleichzeitig standhalten, und eine einzige Antioxidationsbeschichtung ist schwierig, mehrere Umwelтанforderungen zu erfüllen.

Zu den Verbesserungen gehören:

**Entwicklung neuer Beschichtungen:** Forschung an mehrschichtigen Verbundschichten (wie  $\text{MoSi}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ ) zur Verbesserung der Haftfestigkeit und Temperaturwechselstabilität der Beschichtung und des Substrats durch Gradientenstruktur. Jüngste Studien haben gezeigt, dass Nanokomposit-Beschichtungen die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben bei  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  um bis zu 50 % verlängern können.

**Oberflächenmodifikation:** Antioxidative Elemente (wie Silizium und Aluminium) werden durch Laseroberflächenbehandlung oder Ioneninfiltrationstechnologie in die Oberfläche von TZM-Molybdänstäben eingebracht, um eine In-situ-Schutzschicht zu bilden. So kann beispielsweise durch das Laserauftragschweißen Silizidschichten die oxidative Gewichtszunahme auf  $0,1\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}$  reduziert werden.

**Legierungsoptimierung:** Optimieren Sie die Verteilung und Größe von Hartmetallpartikeln (TiC, ZrC) durch Anpassung des Gehalts an Titan, Zirkonium und Kohlenstoff und erhöhen Sie die Oxidationsbeständigkeit der Matrix. Experimente zeigten, dass eine Erhöhung des Zirkoniumgehalts auf 0,15 % die Oxidationsrate deutlich senken konnte.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

### 7.1.2 Komplexe Formen und Großserienfertigung

Die komplexen Formen und großen Abmessungen der TZM-Molybdänstäbe stoßen vor technische Schwierigkeiten, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Nuklearindustrie, wo komplexe Geometrien (z. B. gekrümmte Düsen) oder großtechnische Komponenten (z. B. Stützbalken von Kernreaktoren) hergestellt werden müssen. Zu den spezifischen Herausforderungen gehören:

Grenzen der Pulvermetallurgie: TZM-Molybdänstäbe werden in der Regel durch ein pulvermetallurgisches Verfahren hergestellt, aber dieses Verfahren ist schwierig, eine endkonturnahe Form komplexer Formen zu erreichen. Obwohl mit dem isostatischen Pressen (CIP) komplexe Rohlinge hergestellt werden können, beträgt die Maßgenauigkeit nur  $\pm 0,5$  mm, was schwierig ist, die von der Luft- und Raumfahrt geforderte  $\pm$  von 0,01 mm zu erreichen.

Schwierigkeit bei der Bearbeitung: Die hohe Härte (250-300 HV) und die geringe Zähigkeit von TZM-Molybdänstäben machen sie anfällig für Risse beim Drehen, Fräsen und Bohren. So kann beispielsweise die Bearbeitung komplexer Formen, wie z. B. Innengewinde oder Mikrobohrungen, zu einem schnellen Werkzeugverschleiß und einer Steigerung der Bearbeitungskosten um 30-50 % führen.

Gleichmäßigkeit in großem Maßstab: Bei der Herstellung von großformatigen TZM-Molybdänstäben (Durchmesser > 100 mm und Länge >1 m) muss die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur und der Eigenschaften gewährleistet werden. Temperaturgradienten und ungleichmäßiges Schrumpfen während des Sinterprozesses können zu innerer Porosität oder Rissen führen, mit einer Ausschussrate von bis zu 10-15%.

Zu den Verbesserungen gehören:

Additive Fertigung (3D-Druck): Direktdruck von TZM-Molybdänstabteilen mit komplexen Formen mittels Laserelektives Schmelzen (SLM) oder Elektronenstrahlschmelzen (EBM) Technologie. Die SLM-Technologie erhöht die Maßgenauigkeit auf  $\pm 0,05$  mm und reduziert die Ausschussraten auf unter 5 %. Die neueste NASA-Studie zeigt, dass von SLM vorbereitete TZM-Düsen 30 % leichter und 20 % leistungsfähiger sind.

Präzisionsschmieden und -walzen: Optimieren Sie die Kornorientierung und -dichte von großformatigen TZM-Molybdänstäben mit mehrachsigen Schmiede- und Präzisionswalzgeräten. So erhöht das Four-High-Mill der deutschen SMS group die Dichte von großformatigen Stangen auf 99,5 % der theoretischen Dichte.

Heißisostatisches Pressen (HIP): Die Heißisostatische Presstechnologie wird nach dem Sintern verwendet, um Mikroporen in großformatigen Rohlingen zu beseitigen und die Gleichmäßigkeit zu verbessern. Das HIP-Verfahren (2000°C, 200 MPa) reduziert die Ausschussrate auf weniger als 2%.

### 7.1.3 Kontrolle der Produktionskosten

Die hohen Produktionskosten von TZM-Molybdänstäben schränken seine breite Anwendung in einigen Bereichen ein. Zu den Kostenquellen gehören Rohstoffe, Prozesskomplexität und Qualitätskontrolle. Zu den spezifischen Herausforderungen gehören:

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

**Rohstoffkosten:** Der Preis für hochreines Molybdänpulver (Reinheit  $\geq 99,95\%$ ) sowie Titan- und Zirkoniumadditive ist höher und macht 40-50 % der Gesamtkosten aus. Der Chinatungsten Online-Bericht 2023 zeigt beispielsweise, dass der Preis für hochreines Molybdänpulver bei etwa 50-70 US-Dollar/kg liegt.

**Prozesskomplexität:** Die Pulvermetallurgie, das Vakuumsintern und die Hochtemperaturbearbeitung von TZM-Molybdänstäben erfordern teure Anlagen (z. B. Vakuumsinteröfen, Präzisionswalzwerke) mit einer einzigen Anlageninvestition von bis zu Millionen von Dollar. Darüber hinaus erhöhen Werkzeugverschleiß und Ausschussraten (rund 10 %) bei der Bearbeitung die Kosten zusätzlich.

**Kosten für die Qualitätskontrolle:** Inline-Prüfungen (Ultraschall, Röntgen) und Leistungsprüfungen (Hochtemperatur-Zug- und Zeitstandprüfungen) erfordern hochpräzise Instrumente und Fachleute, die 20-30 % der Produktionskosten ausmachen.

Zu den Verbesserungen gehören:

**Rohstoffoptimierung:** Durch die Verbesserung des Reinigungsprozesses von Molybdänpulvern (z. B. Plasmareduktion) werden der Sauerstoffgehalt und die Verunreinigungen reduziert und die Menge an Additiven reduziert. So können beispielsweise mit der Plasmareduktionstechnologie von H.C. Starck die Kosten für Molybdänpulver um 15 % gesenkt werden.

**Prozessvereinfachung:** Net-Net-Shape-Technologie wie SLM oder HIP reduziert nachfolgende Verarbeitungsschritte, Ausschussraten und Prozesskosten. Studien haben gezeigt, dass eine endkonturnahe Form die Verarbeitungskosten um 20-30 % senken kann.

**Automatisierte Produktion:** Verbessern Sie durch intelligente Produktionslinien (z. B. SPS-Steuerung und Online-Erkennungssysteme) die Produktionseffizienz und senken Sie die Arbeitskosten.

## 7.2 Neue Werkstoffe und Technologien

Die Entwicklung neuer Materialien und Technologien bietet neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von TZM-Molybdänstäben und zur Erweiterung der Anwendungsfelder. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten: modifiziertes Legierungsdesign, Nanostrukturen und Verbundwerkstoffe sowie Wettbewerb mit anderen Hochtemperaturmaterialien.

### 7.2.1 Modifizierte Legierungskonstruktion

Durch die Modifikation des Legierungsdesigns und die Optimierung der Zusammensetzung und Mikrostruktur von TZM-Molybdänstäben können deren Eigenschaften weiter verbessert werden. Zu den Methoden gehören:

**Fügen Sie neue Elemente hinzu:** Führen Sie kleine Mengen von Seltenerdelementen (wie Lanthan, Cer) oder Rhenium (Re) in die TZM-Legierung ein, um die Oxidationsbeständigkeit und die Hochtemperaturfestigkeit zu verbessern. So erhöht die Zugabe von 0,1 % Lanthan die Rekristallisationstemperatur von TZM-Molybdänstäben auf 1500 °C und die Zugfestigkeit um 10-15 %.

**Hartmetalloptimierung:** Optimieren Sie die Größe (0,5-2 Mikrometer) und die Verteilung von

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Hartmetallpartikeln (TiC, ZrC) durch präzise Steuerung des Kohlenstoffgehalts (0,02-0,05%) und des Sinterprozesses, um die Fällungsintensivierung zu verbessern. Studien haben gezeigt, dass gleichmäßig verteilte nanoskalige Karbide die Kriechraten um bis zu 20 % reduzieren können.

Lösungsverstärkung: Durch die Erhöhung des Feststoffgehalts von Titan und Zirkonium (Ti: 0,6-0,8%, Zr: 0,15-0,2%) wird der Gitterverzug der Molybdänmatrix verbessert und die Hochtemperaturfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit erhöht.

### 7.2.2 Nanostrukturen und Verbundwerkstoffe

Die Nanostruktur- und Verbundwerkstofftechnologie bietet eine neue Richtung für die Leistungsoptimierung von TZM-Molybdänstäben. Zu den Methoden gehören:

Nanokristalline Struktur: Die Korngröße des TZM-Molybdänstabs wird bei 50-100 nm durch Hochenergie-Kugelfräsen und Schnellsintertechnologie kontrolliert. Die nanokristalline Struktur verbessert die Festigkeit und Zähigkeit des Materials erheblich. So kann beispielsweise die Bruchzähigkeit von nanokristallinen TZM-Molybdänstäben  $25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  erreichen, was höher ist als die von herkömmlichem TZM ( $15\text{-}20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

Verbundwerkstoffe: TZM-Molybdänstäbe werden mit Keramiken (z. B. SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oder kohlenstoffbasierten Materialien (z. B. Graphen) zu Metallmatrix-Verbundwerkstoffen (MMCs) compoundingiert. Die Oxidationsbeständigkeit von SiC/TZM-Kompositen ist bei  $1500^\circ\text{C}$  2-mal höher, was für Deflektoren von Kernfusionsanlagen geeignet ist.

Nanobeschichtungen: Nanoskalige Antioxidationsschichten (z. B.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ ) werden durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) oder physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) auf der Oberfläche von TZM-Molybdänstäben abgeschieden. Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Nanobeschichtung ist besser mit dem Substrat verträglich und die Schälgeschwindigkeit wird auf weniger als 5 % reduziert.

### 7.2.3 Konkurrenz mit anderen Hochtemperaturwerkstoffen

TZM-Molybdänstäbe stehen in Konkurrenz zu anderen Hochtemperaturwerkstoffen wie Wolframlegierungen, Nickelbasislegierungen, Keramiken und kohlenstoffbasierten Verbundwerkstoffen. Spezifische Vergleiche umfassen:

Wolframlegierungen: Wolframlegierungen (Dichte  $19,3 \text{ g/cm}^3$ ) haben einen höheren Schmelzpunkt ( $3422^\circ\text{C}$ ) und eine höhere Festigkeit, aber eine viel höhere Dichte als TZM-Molybdänstäbe ( $10,2 \text{ g/cm}^3$ ), was sie in gewichtsempfindlichen Luft- und Raumfahrtanwendungen einschränkt. TZM-Molybdänstäbe können durch Optimierung der Oxidationsbeständigkeit einige Wolframlegierungsanwendungen unter  $1600^\circ\text{C}$  ersetzen.

Nickelbasislegierungen: Nickelbasislegierungen (z. B. Inconel 718) haben eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit und Zähigkeit bei  $1000\text{-}1200^\circ\text{C}$ , aber ihre Hochtemperaturfestigkeit ( $200\text{-}300 \text{ MPa}$ ) ist geringer als die von TZM-Molybdänstäben ( $400\text{-}500 \text{ MPa}$ ). TZM-Molybdänstäbe konkurrieren durch Nanobeschichtungstechnologie bei höheren Temperaturen.

Keramik und kohlenstoffbasierte Komposite: Keramiken (z. B. SiC,  $\text{ZrB}_2$ ) haben eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit, aber eine hohe Sprödigkeit; Carbon/Carbon-Verbundwerkstoffe sind leicht, erfordern aber einen komplexen Beschichtungsschutz in

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

oxidierenden Umgebungen. TZM-Molybdänstäbe werden mit Verbundwerkstoffen (z. B. TZM/SiC) entwickelt, um die Zähigkeit des Metalls mit der keramischen Oxidationsbeständigkeit zu kombinieren.

Zu den Verbesserungen gehören die Entwicklung von TZM-Matrix-Verbundwerkstoffen, die Optimierung der Beschichtungstechnologie und die Senkung der Produktionskosten, um die Wettbewerbsfähigkeit von TZM-Molybdänstäben auf dem Markt für Hochtemperaturmaterialien zu verbessern.

### 7.3 Intelligente und umweltfreundliche Fertigung

Intelligente und umweltfreundliche Fertigungstechnologie ist die Entwicklungsrichtung der TZM-Molybdänstabproduktion, die die Produktionseffizienz verbessern, den Energieverbrauch senken und die Umweltverschmutzung verringern kann. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten: intelligente Produktionsüberwachung, energiesparende und umweltfreundliche Produktion sowie Abfallrecycling.

#### 7.3.1 Intelligente Produktionsüberwachungstechnik

Die intelligente Produktionsüberwachungstechnologie optimiert den Produktionsprozess von TZM-Molybdänstäben durch Echtzeit-Datenerfassung und -analyse und verbessert so die Qualitätskonsistenz und Effizienz. Zu den spezifischen Technologien gehören:

**Inline-Inspektionssystem:** Mittels Ultraschall-, Röntgen- und visueller Inspektionstechnik Echtzeitüberwachung von Größe, Defekten und Mikrostruktur von TZM-Molybdänstäben. Röntgenbildgebungssysteme können beispielsweise innere Defekte von mehr als 0,1 mm erkennen und die Ausschussrate auf weniger als 0,5 % reduzieren.

**Industrial Internet of Things (IIoT):** Durch Sensoren und SPS-Systeme werden die Sintertemperatur, der Schmiededruck und die Verarbeitungsparameter in Echtzeit erfasst und zur Analyse in die Cloud übertragen. IIoT-Systeme können die Produktivität um bis zu 20 % steigern und die Ausfallrate von Anlagen um 15 % senken.

**KI-Optimierung:** Verwendet Algorithmen des maschinellen Lernens, um den Einfluss von Prozessparametern auf die Leistung vorherzusagen und so die Sintertemperatur, die Walzverformung und die Schichtdicke zu optimieren. Beispielsweise kann die KI-Optimierung die Korngröße von TZM-Molybdänstäben auf 10-20 Mikrometer steuern und so die Kriechfestigkeit verbessern.

#### 7.3.2 Energiesparende und umweltschonende Produktionstechnik

Der Produktionsprozess von TZM-Molybdänstäben (z. B. Vakuumsintern, Warmschmieden) ist energieintensiv und erfordert energiesparende und umweltfreundliche Technologien, um den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu reduzieren. Zu den konkreten Maßnahmen gehören:

**Hocheffizienter Sinterofen:** Hocheffiziente Vakuum-Sinteröfen (z.B. Wolframheizer) werden eingesetzt, um den Energieverbrauch um 15-20% zu senken, indem die Heizkurve und die Haltezeit optimiert werden. So kann beispielsweise der Sinterofen von ALD in Deutschland den

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Energieverbrauch einer einzelnen Sinterung auf weniger als 500 kWh steuern.

**Erneuerbare Energien:** Reduzieren Sie die Kohlenstoffemissionen, indem Sie die Stromquelle Ihrer Produktionsanlagen auf Solar- oder Windenergie umstellen. So haben beispielsweise einige TZM-Hersteller von Molybdänstäben in Europa eine Versorgung von 50 % mit erneuerbarer Energie erreicht.

**Abgasbehandlung:** Bei der Pulvermetallurgie und Oberflächenbehandlung werden hocheffiziente Filtersysteme (z. B. HEPA-Filter) zur Behandlung von flüchtigen Oxiden und sauren Abgasen eingesetzt, um sicherzustellen, dass die Emissionen den EU-RoHS-Normen entsprechen.

Studien haben gezeigt, dass energiesparende und umweltfreundliche Technologien die Kohlenstoffemissionen der TZM-Molybdänstabproduktion um 30 % reduzieren können, was dem globalen Trend der grünen Fertigung entspricht.

### 7.3.3 Effizientes Recycling von Abfällen

Schrotte (z.B. Schneidspäne, Sinterreste) bei der Herstellung von TZM-Molybdänstäben enthalten hochwertiges Molybdän, Titan und Zirkonium, und eine effiziente Recyclingtechnologie reduziert Kosten und Umweltbelastung. Zu den Methoden gehören:

**Chemisches Recycling:** Molybdän, Titan und Zirkonium werden durch Säureauflösungs- und elektrochemische Trenntechniken aus Abfallstoffen gewonnen. Die Wiederherstellungsrate kann 95 % erreichen und die Kosten können um 20 % gesenkt werden. So erhöht beispielsweise das chemische Rückgewinnungsverfahren von H.C. Starck die Molybdänrückgewinnung auf 98 %.

**Mechanisches Recycling:** Der Schrott wird durch Zerkleinerungs-, Sieb- und Re-Sinter-Technologie zu TZM-Molybdän-Stabzuschnitten wiederaufbereitet. Das mechanische Recycling eignet sich für großformatige Schrotte mit einer Recyclingquote von ca. 90 %.

**Geschlossenes Recyclingsystem:** Etablieren Sie ein geschlossenes Recyclingsystem der Produktionslinie, um Abfallstoffe direkt in den pulvermetallurgischen Prozess zurückzuverwenden und so die Ressourcenverschwendung zu reduzieren. Laut Chinatungsten Online kann durch das Recycling in einem geschlossenen Kreislauf die Ausschussquote auf weniger als 5 % gesenkt werden.

Die Abfallrecyclingtechnologie senkt nicht nur die Produktionskosten, sondern erfüllt auch die Anforderungen der Kreislaufwirtschaft und fördert die nachhaltige Entwicklung der TZM-Molybdänstabindustrie.

### 7.4 Zukünftige Trends

Die zukünftige Entwicklung von TZM-Molybdänstäben wird sich auf Hochleistungsdesign, domänenübergreifende Anwendungserweiterung und Anwendungen in extremen Umgebungen konzentrieren, um den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, der Kernfusion, der neuen Energie und anderer Bereiche gerecht zu werden. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

**High Melting Point:** Suitable for extreme high-temperature environments.

**Excellent High-Temperature Strength:** Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

**Good Thermal Stability and Creep Resistance:** Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

**Superior Corrosion and Oxidation Resistance:** Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

**Excellent Machinability:** Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

**High-Temperature Furnace Components:** Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

**Aerospace Industry:** Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

**Nuclear Industry:** Used in reactor support structures and control rod guide systems.

**Electronics Industry:** Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

**Mold Manufacturing:** Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: [www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

#### 7.4.1 Leistungsstarkes Design und Optimierung

Das Hochleistungsdesign steigert die Leistungsfähigkeit der TZM-Molybdänstäbe durch Material-, Prozess- und Strukturoptimierung weiter. Zu den spezifischen Trends gehören:

Multiskalen-Simulation: Molekulardynamik und Finite-Elemente-Analyse werden verwendet, um die Leistung von TZM-Molybdänstäben in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung zu simulieren und die Legierungszusammensetzung und Mikrostruktur zu optimieren. Simulationen zeigen beispielsweise, dass die Zugabe von 0,1 % Rhenium die Zugfestigkeit um 15 % erhöht.

Kundenspezifisches Design: Die Zusammensetzung, Beschichtung und Form des TZM-Molybdänstabs kann je nach Anwendungsbedarf (z. B. Raketendüse oder Schmelzdeflektor) angepasst werden. So können beispielsweise Komponenten in der Luft- und Raumfahrt mit einem hohen Titangehalt (0,8 %) für die Festigkeit ausgestattet werden, und Kernfusionsanlagen können mit einem hohen Zirkoniumgehalt (0,2 %) ausgestattet werden, um die Oxidationsbeständigkeit zu verbessern.

Functionally Graded Materials (FGMs): TZM-basierte Functional Gradient Materials werden entwickelt, um ihre Gesamteigenschaften zu verbessern, indem sie Leistungsgradienten (z. B. Oberflächenoxidationsschicht, interne Matrix mit hoher Zähigkeit) innerhalb des Materials bilden. FGM kann die Lebensdauer von TZM-Molybdänstäben bei 1600 °C um den Faktor 2 verlängern.

#### 7.4.2 Domänenübergreifende Anwendungserweiterung

Das Anwendungsgebiet von TZM-Molybdänstäben erweitert sich von der traditionellen Hochtemperaturindustrie auf die Bereiche Neue Energie, Medizin und Landesverteidigung. Zu den spezifischen Trends gehören:

Neue Energie: TZM-Molybdänstab wird zur Herstellung von Steckverbindern und Elektroden für Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) verwendet, die stabil bei 800-1000 °C betrieben werden können. So verwendet beispielsweise der SOFC von Bloom Energy Steckverbinder aus TZM-Legierungen.

Medizinische Geräte: TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von Komponenten für Hochtemperatur-Sterilisationsgeräte und Radioisotopenbehälter verwendet, die hohen Temperaturen und hoher Strahlung standhalten. So haben beispielsweise medizinische Kobalt-60-Behälter eine Lebensdauer der TZM-Komponenten von bis zu 20 Jahren.

Verteidigungsindustrie: TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von Wärmeschutzsystemen und Raketendüsen für Hyperschallfahrzeuge verwendet, die einer momentanen Wärmebelastung von über 3000 °C standhalten können.

Die Ausweitung sektorübergreifender Anwendungen wird das Wachstum des Marktes für TZM-Molybdänstäbe vorantreiben, der bis 2030 voraussichtlich um 20 % wachsen wird.

#### 7.4.3 Anwendungen in extremen Umgebungen

Die Anwendung von TZM-Molybdänstäben in extremen Umgebungen (wie z. B. ultrahohe Temperaturen, starke Strahlung und starke Korrosion) steht im Mittelpunkt der zukünftigen

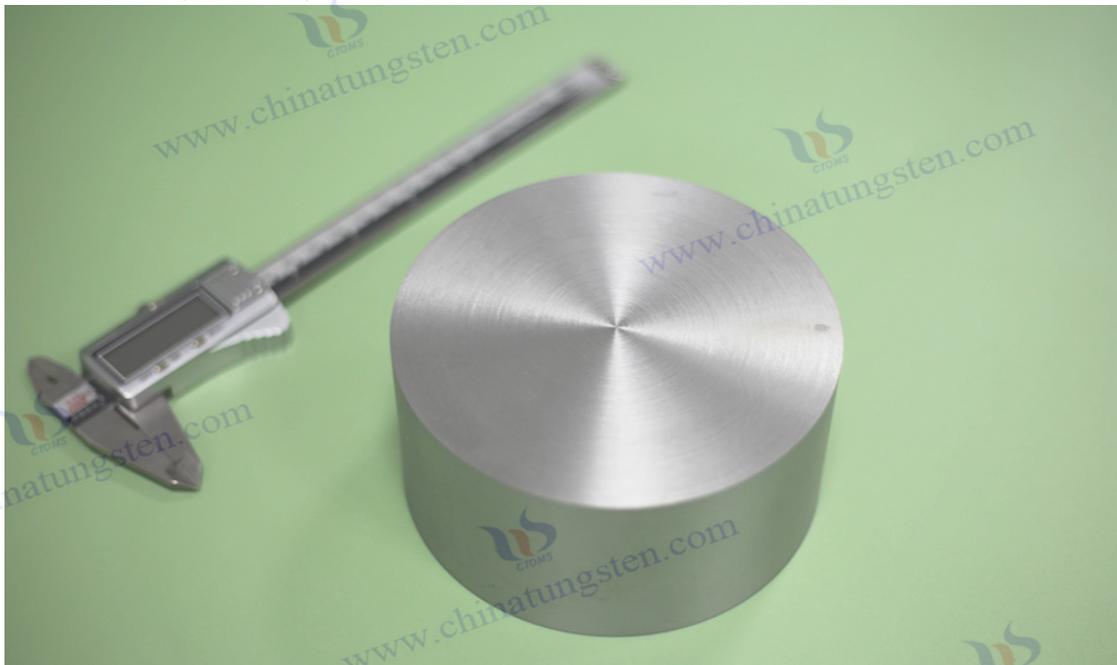
##### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Entwicklung. Zu den spezifischen Trends gehören:

**Ultrahochtemperaturumgebungen:** Durch die Entwicklung neuer Antioxidationsbeschichtungen und Verbundwerkstoffe können TZM-Molybdänstäbe in Ultrahochtemperaturumgebungen über 2000 °C eingesetzt werden, wie z. B. Raketentriebwerke und Plasmatriebwerke der nächsten Generation.

**Starke Strahlungsumgebung:** Bei der Kernfusion und Weltraumforschung müssen TZM-Molybdänstäbe hochenergetischer Neutronen- und Gammastrahlung ausgesetzt werden. Durch die Zugabe von Seltenerdelementen und die Optimierung der Mikrostruktur kann die Strahlungsbeständigkeit verbessert werden, um den Anforderungen von ITER und Mondbasen gerecht zu werden.

**Hochkorrosive Umgebungen:** In der Offshore- und Chemieindustrie müssen TZM-Molybdänstäbe beständig gegen saure Gase und Salzsprühnebel sein. Die Oberflächennitrier- und Verbundbeschichtungstechnologie reduziert die Korrosionsrate auf 0,005 mm/Jahr.



CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab

## 8. TZM Molybdänstab Standards und Spezifikationen

Als Hochleistungs-Superlegierung wird TZM-Molybdänstab häufig in der Luft- und Raumfahrt, in der Nuklearindustrie, in der Halbleiterherstellung und in anderen Bereichen eingesetzt, und seine Herstellung, Prüfung und Anwendung müssen strengen Standards und Spezifikationen entsprechen. Diese Normen betreffen die Materialzusammensetzung, die Leistungsprüfung, den Produktionsprozess, die Qualitätskontrolle und das Umweltmanagement, um die Qualitätskonsistenz, die Sicherheit und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem internationalen Markt von TZM-Molybdänstäben zu gewährleisten. In diesem Kapitel werden die Normen und Spezifikationen in Bezug auf TZM-Molybdänstab unter fünf Aspekten umfassend erörtert: nationale Normen (nationale Normen), internationale Normen (ISO), amerikanische Normen (amerikanische

### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Normen), andere internationale und Industrienormen sowie Normimplementierung und -zertifizierung.

## 8.1 Nationale Normen (GB)

Als weltweit größter Produzent von Molybdänressourcen und Hersteller von TZM-Molybdänstäben hat China eine Reihe von nationalen Standards (GB/T) formuliert, um die Produktion und Anwendung von TZM-Molybdänstäben zu regeln. Diese Normen decken Materialeigenschaften, Prüfverfahren und Geräteprozesse ab und bieten eine einheitliche Grundlage für inländische Unternehmen und den internationalen Handel. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten.

### 8.1.1 GB/T Materialnormen für Molybdän und Molybdänlegierungen

Die chinesischen nationalen Normen (GB/T) legen die chemische Zusammensetzung, die physikalischen Eigenschaften und die Verarbeitungsanforderungen von Molybdän und Molybdänlegierungen (wie z. B. TZM) detailliert fest, und zu den wichtigsten Normen gehören:

GB/T 3462-2017 Stäbe aus Molybdän und Molybdänlegierungen: Diese Norm legt die chemische Zusammensetzung von TZM-Molybdänstäben ( $\text{Mo} \geq 99,38\%$ ,  $\text{Ti}: 0,4-0,55\%$ ,  $\text{Zr}: 0,06-0,12\%$ ,  $\text{C}: 0,01-0,04\%$ ), Maßtoleranz (Durchmesser  $\pm 0,02$  mm, Länge  $\pm 1$  mm), Oberflächengüte ( $\text{Ra} \leq 3,2$   $\mu\text{m}$ ) und mechanische Eigenschaften (Zugfestigkeit  $\geq 400$  MPa, 1200 °C) fest. Die Norm verlangt, dass TZM-Molybdänstäbe durch Vakuumsintern oder Atmosphärensintern vorbereitet werden, um sicherzustellen, dass die Dichte mehr als 98 % der theoretischen Dichte erreicht.

GB/T 4194-2015 Chemische Analyseverfahren für Molybdän und Molybdänlegierungen: Diese Norm legt die Verfahren für die Analyse von Molybdän-, Titan-, Zirkonium-, Kohlenstoff- und Verunreinigungselementen in TZM-Molybdänstäben detailliert fest, einschließlich der Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) und der Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFA). So sollte beispielsweise der Sauerstoffgehalt bei  $\leq 0,005\%$  geregelt werden und Verunreinigungen wie Eisen und Silikon sollten  $0,01\% \leq$ .

GB/T 17792-2014 Allgemeine technische Bedingungen für Molybdän- und Molybdänlegierungsstäbe: Diese Norm behandelt die Anforderungen an die Mikrostruktur, die Erkennung von Oberflächenfehlern sowie die Verpackungs- und Transportanforderungen von TZM-Molybdänstäben. Die Norm legt Wert darauf, dass auf der Oberfläche der Stange keine Zunder, Kratzer oder Porosität vorhanden sein dürfen.

### 8.1.2 Prüf- und Bewertungsnormen für Superlegierungen

Die Prüf- und Bewertungsnorm für Superlegierungen wird verwendet, um die mechanischen Eigenschaften, die Oxidationsbeständigkeit und die Kriechbeständigkeit von TZM-Molybdänstäben in einer Hochtemperaturumgebung zu bewerten. Zu den wichtigsten Kriterien gehören:

GB / T 4338-2015 Hochtemperatur-Zugprüfverfahren für Metallwerkstoffe: Diese Norm legt das Zugprüfverfahren für TZM-Molybdänstäbe bei 1000-1600 °C fest, das die Verwendung von Vakuum oder inerte Atmosphäre (z. B. Argon) erfordert, um die Umgebung zu testen, und die Genauigkeit der Temperaturregelung beträgt  $\pm 5$  °C. Die Testergebnisse zeigen, dass die

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Zugfestigkeit des TZM-Molybdänstabs bei 1200°C 400-500 MPa und die Dehnung 5-10% beträgt.

GB/T 2039-2012 Prüfverfahren für Kriech- und Dauerfestigkeitsprüfungen für metallische Werkstoffe: Diese Norm wird verwendet, um das Kriechverhalten von TZM-Molybdänstäben bei 1400 °C und 20 MPa zu prüfen, was eine Kriechgeschwindigkeit von weniger als  $10^{-6}$ /s und eine Lebensdauer von  $\geq 5000$  Stunden erfordert. Für die Prüfung ist ein Hochtemperatur-Zeitstandprüfgerät erforderlich (z. B. Instron 5980-Serie).

GB/T 16878-1997 Prüfverfahren für die Hochtemperaturhärte von Metallwerkstoffen: Diese Norm legt das Prüfverfahren für die Vickers-Härte (HV) für TZM-Molybdänstäbe bei 1000 °C fest, und die Härte muss bei 200-250 HV gehalten werden. Die Testergebnisse zeigen, dass die Hochtemperaturhärte von TZM-Molybdänstäben besser ist als die von reinem Molybdän (150-200 HV).

Diese Standards gewährleisten die Zuverlässigkeit von TZM-Molybdänstäben in Hochtemperaturanwendungen wie Raketendüsen und Kernreaktorcomponenten. Laut dem technischen Bericht von Chinatungsten Online hat die Implementierung von GB/T 4338 und GB/T 2039 die Anwendungsqualität von TZM-Molybdänstäben im Bereich der Luft- und Raumfahrt erheblich verbessert.

### 8.1.3 Ausführungseinrichtungen und Verfahrensspezifikationen

Die Ausrüstungs- und Prozessspezifikationen gewährleisten die Standardisierung und Sicherheit des TZM-Molybdänstab-Produktionsprozesses. Zu den wichtigsten Kriterien gehören:

GB/T 15067-2016 Technische Bedingungen für Verarbeitungsanlagen für Molybdän und Molybdänlegierungen: Diese Norm legt die Leistungsanforderungen für Vakuum-Sinteröfen, Schmiedemaschinen und Walzanlagen fest. Zum Beispiel muss der Vakuum-Sinterofen einen Vakuumgrad von  $10^{-3}$ - $10^{-5}$  Pa und eine Temperaturgleichmäßigkeit von  $\pm 5^\circ\text{C}$  erreichen; Der Druckbereich der Schmiedemaschine beträgt 500-2000 Tonnen.

GB 50828-2012 Sicherheitsspezifikation für die Herstellung von Superlegierungen: Diese Norm verlangt, dass die TZM-Molybdänstab-Produktionswerkstatt mit explosionsgeschützten Geräten, Abgasnachbehandlungssystemen (wie z.B. HEPA-Filtern) und Reinräumen (ISO-Klasse 7, Partikelkonzentration  $< 10.000$  Partikel/ $\text{m}^3$ ) ausgestattet sein muss. Die Norm legt auch Maßnahmen zur Vermeidung von Staub und Oxidation in pulvermetallurgischen Prozessen fest.

GB/T 29490-2013 Anforderungen an Energiemanagementsysteme in Unternehmen: Diese Norm leitet TZM-Hersteller von Molybdänstäben an, den Energieverbrauch zu optimieren, z. B. durch den Einsatz von hocheffizienten Sinteröfen (Energieverbrauch  $< 500$  kWh/Zeit) und der Stromversorgung mit erneuerbarer Energie.

Diese Spezifikationen gewährleisten die Sicherheit, Effizienz und Umweltfreundlichkeit der TZM-Molybdänstabproduktion. So hat beispielsweise ein chinesischer Hersteller von TZM-Molybdänstäben durch die Implementierung von GB/T 15067 die Produktionseffizienz um 20 % gesteigert und die Ausschussrate auf unter 5 % reduziert.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

**High Melting Point:** Suitable for extreme high-temperature environments.

**Excellent High-Temperature Strength:** Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

**Good Thermal Stability and Creep Resistance:** Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

**Superior Corrosion and Oxidation Resistance:** Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

**Excellent Machinability:** Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

**High-Temperature Furnace Components:** Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

**Aerospace Industry:** Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

**Nuclear Industry:** Used in reactor support structures and control rod guide systems.

**Electronics Industry:** Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

**Mold Manufacturing:** Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: [www.molybdenum.com.cn](http://www.molybdenum.com.cn)

Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

## 8.2 Internationale Normen (ISO)

Die Norm der Internationalen Organisation für Normung (ISO) bietet eine einheitliche Spezifikation für die weltweite Produktion und Anwendung von TZM-Molybdänstäben, die Materialprüfung, Umweltmanagement und zerstörungsfreie Prüfung abdeckt. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten.

### 8.2.1 ISO 6892 Zugprüfung von metallischen Werkstoffen

Die Normenreihe ISO 6892, u.a. ISO 6892-1:2019 und ISO 6892-2:2018, legt das Zugprüfverfahren für TZM-Molybdänstäbe bei Raumtemperatur und hohen Temperaturen fest:

ISO 6892-1:2019 (Zugfestigkeit bei Raumtemperatur): Erfordert die Prüfung der Zugfestigkeit (600-700 MPa), der Streckgrenze (500-600 MPa) und der Dehnung (10-15 %) von TZM-Molybdänstäben mit einer universellen Prüfmaschine (z. B. Instron 5982). Der Test wird bei einer konstanten Dehnungsrate ( $10^{-3}/s$ ) mit einer Oberflächenrauheit von  $Ra \leq 0,4 \mu m$  durchgeführt.

ISO 6892-2:2018 (Hochtemperaturzug): Spezifiziert ein Zugprüfverfahren bei 1000-1600 °C, das die Verwendung eines Vakuums oder einer inerten Atmosphäre (z. B. Argon, Reinheit  $\geq 99,999 \%$ ) und eine Temperaturregelungsgenauigkeit von  $\pm 5 \text{ °C}$  erfordert. Die Testergebnisse zeigen, dass die Zugfestigkeit von TZM-Molybdänstäben bei 1200 °C 400-500 MPa beträgt, was besser ist als die von reinem Molybdän bei 200-300 MPa.

### 8.2.2 Umweltmanagementsystem ISO 14001

ISO 14001:2015 ist eine weltweit anerkannte Norm für Umweltmanagementsysteme, die TZM-Hersteller von Molybdänstäben dazu anleitet, ihre Umweltauswirkungen zu reduzieren. Zu den spezifischen Anforderungen gehören:

Energiemanagement: Es ist notwendig, den Energieverbrauch von Sinteröfen und Verarbeitungsanlagen zu optimieren, z. B. durch den Einsatz von hocheffizienten Heizelementen (Wolframheizungen) und erneuerbaren Energiequellen. Der Energieverbrauch der Hersteller von TZM-Molybdänstäben sollte unter 500 kWh/t geregelt werden.

Abfallwirtschaft: Bei der Pulvermetallurgie und Oberflächenbehandlung anfallende Abfälle (z. B. Molybdänstaub, saure Abfälle) müssen sortiert und recycelt werden. So kann beispielsweise die Molybdänrückgewinnung durch chemisches Recycling auf 98 % gesteigert werden.

Emissionskontrolle: Erfordert die Installation von hocheffizienten Abgasnachbehandlungssystemen (z. B. HEPA-Filter), um sicherzustellen, dass flüchtige Oxide ( $MoO_3$ ) und Sauergasemissionen den lokalen Vorschriften (z. B. EU-RoHS-Normen) entsprechen.

Die weltweit führenden Hersteller von TZM-Molybdänstäben, wie z. B. Plansee, sind nach ISO 14001 zertifiziert, wodurch die Kohlenstoffemissionen um 30 % reduziert werden, was dem Trend zur umweltfreundlichen Fertigung entspricht.

### 8.2.3 Norm ISO 3452 für die zerstörungsfreie Prüfung

Die Normenreihe ISO 3452, u.a. ISO 3452-1:2021, legt ein Eindringprüfverfahren für TZM-Molybdänstäbe zur Detektion von Oberflächenrissen und Defekten fest. Zu den spezifischen

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Anforderungen gehören:

Eindringprüfung (PT): Erkennt Risse, Poren und Kratzer auf der Oberfläche von TZM-Molybdänstäben mithilfe von fluoreszierendem oder sichtbarem Farbstoffpermeat. Detektionsempfindlichkeit von bis zu 0,05 mm für Luft- und Raumfahrtkomponenten wie Raketendüsen.

Inspektionsprozess: einschließlich Oberflächenreinigung, Permeatauftrag, Entwickleranwendung und Fehlerbeobachtung. Der Standard verlangt eine Umgebungsbeleuchtungsstärke von 500-1000 lx und eine Temperatur von 20-25°C.

Akzeptanzkriterien: Oberflächenrisslänge  $\leq 0,1$  mm, Porendurchmesser  $\leq 0,05$  mm. TZM-Molybdänstäbe müssen für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt eine 100%ige Eindringprüfung bestehen.

### 8.3 Amerikanische Normen (US-Norm)

Amerikanische Normen (ASTM, ASME) haben einen wichtigen Einfluss auf die weltweite Anwendung von TZM-Molybdänstäben, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Nuklearindustrie. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten.

#### 8.3.1 ASTM B387 Standard für Stangen aus Molybdän und Molybdänlegierungen

ASTM B387-18 ist die Kernnorm für TZM-Molybdänstäbe und legt die Materialzusammensetzung, die Eigenschaften und die Verarbeitungsanforderungen fest:

Chemische Zusammensetzung: Mo  $\geq 99,38\%$ , Ti: 0,4-0,55%, Zr: 0,06-0,12%, C: 0,01-0,04%, Verunreinigungen (wie Fe, Si)  $\leq 0,01\%$ .

Mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit 600-700 MPa bei Raumtemperatur, Dehnung 10-15%; Zugfestigkeit bei 1200°C 400-500 MPa. Die Norm verlangt eine Prüfung nach ASTM E8 (Raumtemperaturzug) und ASTM E21 (Hochtemperaturzug).

Abmessungen und Oberfläche: Durchmessertoleranz  $\pm 0,02$  mm, Oberflächenrauheit  $Ra \leq 0,4$  Mikrometer, keine Risse, Oxidzunder oder Porosität.

Gefüge: Korngröße 10-30 Mikrometer, Dichte  $\geq 98\%$  theoretische Dichte.

#### 8.3.2 ASTM E384 Mikrohärteprüfung

ASTM E384-17 spezifiziert ein Mikrohärte-Prüfverfahren für TZM-Molybdänstäbe zur Bewertung der Materialhärte und der Gleichmäßigkeit des Gefüges:

Prüfverfahren: Es wird ein Vickers-Härteprüfer (HV) verwendet, die Belastungskraft beträgt 0,5-1 kg und die Eindringzeit beträgt 10-15 Sekunden. Die Testergebnisse zeigen, dass die Härte des TZM-Molybdänstabs 250-300 HV beträgt und die Hartmetallpartikelfläche 500 HV erreichen kann.

Hochtemperaturhärte: Getestet bei 1000 °C, wird die Härte bei 200-250 HV gehalten, was besser ist als die 150-200 HV von reinem Molybdän.

Mikrostrukturanalyse: Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurde die Mikrostruktur um den Eindruck herum beobachtet, um die Verteilung und den Intensivierungseffekt

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

von Karbidpartikeln zu bewerten.

ASTM E384 gewährleistet die Zuverlässigkeit von TZM-Molybdänstäben in Hochtemperaturformen und Luft- und Raumfahrtkomponenten. Boeing verwendet beispielsweise ASTM E384, um die Härte von TZM-Molybdänstäben zu testen und so die Leistung von Halterungen für Turbinenschaufeln sicherzustellen.

### 8.3.3 ASME-Norm für die Herstellung von Hochtemperaturgeräten

Die Norm ASME (American Society of Mechanical Engineers) regelt die Herstellung und Anwendung von TZM-Molybdänstäben in Hochtemperaturgeräten wie Kernreaktoren und Flugzeugtriebwerken. Zu den wichtigsten Kriterien gehören:

ASME BPVC Abschnitt II: Legt die Materialeigenschaften und Zertifizierungsanforderungen für TZM-Molybdänstäbe fest, wie z. B. Zugfestigkeit, Kriech Eigenschaften und Oxidationsbeständigkeit. Die Norm verlangt eine Kriechrate von weniger als  $10^{-6}$ /s für TZM-Molybdänstäbe bei 1400°C.

ASME BPVC Abschnitt VIII: Spezifiziert Herstellungsprozesse wie Schweißen, Wärmebehandlung und zerstörungsfreie Prüfung von TZM-Molybdänstäben in Hochtemperatur-Druckbehältern. Die Norm verlangt eine 100%ige Ultraschallprüfung (UT) und Röntgenprüfung (RT).

ASME Y14.5 Abmessungen und Toleranzen: Spezifiziert die geometrischen Toleranzen (z. B. Rundheit, Geradheit) von TZM-Molybdänstäben, um die Installationsgenauigkeit in Hochtemperaturgeräten zu gewährleisten.

## 8.4 Sonstige internationale und Industrienormen

Neben chinesischen und amerikanischen Normen geben auch Normen aus Japan (JIS), Deutschland (DIN) und Russland (GOST) Vorgaben für die Herstellung und Anwendung von TZM-Molybdänstäben vor. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten.

### 8.4.1 JIS G 0571 Prüfnorm für Molybdänwerkstoffe

JIS G 0571:2012 ist eine japanische Industrienorm, die Verfahren zur Prüfung der chemischen Zusammensetzung und Eigenschaften von Molybdän und Molybdänlegierungen (einschließlich TZM) festlegt:

Chemische Zusammensetzung: Mo  $\geq$  99,38%, Ti: 0,4-0,55%, Zr: 0,06-0,12%, Verunreinigungen (wie O, N)  $\leq$  0,005% TZM-Molybdänstab.

Prüfung der mechanischen Eigenschaften: einschließlich Zugfestigkeit bei Raumtemperatur (Zugfestigkeit 600-700 MPa), Hochtemperaturzugfestigkeit (1200°C, 400-500 MPa) und Härteprüfung (HV 250-300).

Oberflächenqualität: Die Oberflächenrauheit muss  $Ra \leq 3,2$  Mikrometer betragen, ohne Risse und Oxidzunder. Die Norm legt auch ein Verfahren zur Eindringprüfung von Oberflächenfehlern fest.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

JIS G 0571 wird in Japan häufig in der Halbleiter- und Hochtemperaturofenindustrie eingesetzt. Die japanische Toshiba Corporation verwendet beispielsweise JIS G 0571, um TZM-Molybdänstäbe für den Einsatz in Ionenimplantationsgeräten zu testen.

#### 8.4.2 DIN EN 10228 Zerstörungsfreie Prüfnorm

Die Normenreihe DIN EN 10228, zu der auch die DIN EN 10228-3:2016 gehört, legt zerstörungsfreie Prüfverfahren für TZM-Molybdänstäbe fest, wobei der Schwerpunkt auf der Ultraschallprüfung (UT) liegt:

Ultraschallprüfung: Verwendet eine 5-10 MHz-Sonde zur Erkennung von Rissen, Poren und Einschlüssen in TZM-Molybdänstäben. Mit einer Detektionsempfindlichkeit von bis zu 0,1 mm eignet es sich für Bauteile in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Nuklearindustrie.

Abnahmekriterien: innere Fehlergröße  $\leq 0,1$  mm, Oberflächenrisslänge  $\leq 0,05$  mm. Die Norm verlangt eine 100%ige Inspektion von Komponenten mit hoher Zuverlässigkeit (z. B. Steuerstäbe für Kernreaktoren).

Prüfmittel: Der Einsatz von hochpräzisen Ultraschalldetektoren (wie z.B. Krautkrämer, Deutschland) ist erforderlich, um die Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse zu gewährleisten.

#### 8.4.3 GOST 17431 Standard für Molybdänlegierungen

GOST 17431-72 ist eine russische Norm für Molybdänlegierungen, die für die Herstellung und Prüfung von TZM-Molybdänstäben geeignet ist:

Chemische Zusammensetzung: Mo  $\geq 99,38\%$ , Ti: 0,4-0,55%, Zr: 0,06-0,12%, C: 0,01-0,04%, Verunreinigungen  $\leq 0,01\%$ .

Mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit 600-700 MPa bei Raumtemperatur, Zugfestigkeit 400-500 MPa bei 1200°C, Kriechfestigkeit  $\geq 5000$  Stunden (1400°C, 20 MPa).

Verarbeitungsanforderungen: Es muss durch Vakuumsintern oder Atmosphärensintern mit einer Dichte von  $\geq 98$  % theoretischer Dichte und einer Oberflächenrauheit von  $Ra \leq 0,8$  Mikrometern hergestellt werden.

GOST 17431 ist in der russischen Nuklearindustrie und in der Luft- und Raumfahrt weit verbreitet, zum Beispiel verwendet das russische Unternehmen Rosatom diesen Standard zur Herstellung von TZM-Molybdänstäben für Kernreaktoren.

### 8.5 Implementierung und Zertifizierung von Standards

Die Implementierung und Zertifizierung von Standards ist ein wichtiger Bestandteil der Sicherung der Qualität und Wettbewerbsfähigkeit von TZM-Molybdänstäben auf dem internationalen Markt, einschließlich Produktionsprüfungen, Qualitätsmanagementsystem und Exportkonformität. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter drei Aspekten.

#### 8.5.1 Standardanwendungen in Produktion und Prüfung

Bei der Herstellung und Prüfung von TZM-Molybdänstäben müssen die oben genannten nationalen, internationalen und Industrienormen streng eingehalten werden. Zu den spezifischen

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Implementierungen gehören:

Rohstoffkontrolle: Gemäß GB/T 4194 und ASTM B387 wurde die Zusammensetzung von Molybdänpulver, Titanpulver und Zirkonimpulver mittels ICP-OES und RFA analysiert, um sicherzustellen, dass der Verunreinigungsgehalt  $\leq 0,01$  % betrug.

Prozesskontrolle: Sinter-, Schmiede- und Bearbeitungsprozesse nach GB/T 15067 und ASME BPVC Abschnitt VIII. Beispielsweise müssen Vakuum-Sinteröfen ein Vakuumniveau von  $10^{-3}$ - $10^{-5}$  Pa und eine Temperaturgleichmäßigkeit von  $\pm 5$  °C aufrechterhalten.

Leistungstest: Prüfung der Zugfestigkeit, der Kriech Eigenschaften und der Härte von TZM-Molybdänstäben nach ISO 6892, GB/T 4338 und ASTM E384. So wird z.B. ein Hochtemperatur-Zugversuch bei 1200°C mit einer Zugfestigkeit von  $\geq 400$  MPa durchgeführt.

Zerstörungsfreie Prüfung: 100%-Prüfung von TZM-Molybdänstäben für die Luft- und Raumfahrt sowie die Nuklearindustrie nach ISO 3452 und DIN EN 10228 mittels Eindringprüfung und Ultraschallprüfung, um sicherzustellen, dass keine Risse und Poren entstehen.

### 8.5.2 Zertifizierung des Qualitätsmanagementsystems (e.g. ISO 9001)

ISO 9001:2015 ist eine weltweit anerkannte Norm für Qualitätsmanagementsysteme, die die Qualitätskontrolle und kontinuierliche Verbesserung bei TZM-Herstellern von Molybdänstäben leitet. Zu den spezifischen Anforderungen gehören:

Prozessmanagement: Es ist erforderlich, den gesamten Prozess der Rohstoffbeschaffung, des Produktionsprozesses, der Prüfung und Verpackung von TZM-Molybdänstäben aufzuzeichnen und zurückzuverfolgen. So muss beispielsweise ein Chargenmanagement etabliert werden, das sicherstellt, dass jede Charge von TZM-Molybdänstäben bis zum Rohstoff zurückverfolgt werden kann.

Kundenzufriedenheit: Eine kontinuierliche Verbesserung der Leistung und Produktionseffizienz von TZM-Molybdänstäben ist durch Kundenfeedback und Qualitätsaudits erforderlich. So benötigen Kunden aus der Luft- und Raumfahrt TZM-Molybdänstäbe mit Maßtoleranzen von  $\leq \pm 0,01$  mm.

Kontinuierliche Verbesserung: Reduzieren Sie Ausschuss und Produktionskosten durch Datenanalyse und Prozessoptimierung. So ist Plansee beispielsweise nach ISO 9001 zertifiziert, wodurch die Produktionskosten von TZM-Molybdänstäben um 15 % gesenkt werden.

Darüber hinaus sind TZM-Hersteller von Molybdänstäben in der Luft- und Raumfahrt verpflichtet, nach AS9100 zertifiziert zu sein, um sicherzustellen, dass sie die speziellen Anforderungen der Luft- und Raumfahrtindustrie erfüllen, wie z. B. 100 % zerstörungsfreie Prüfung und Transparenz der Lieferkette.

### 8.5.3 Export und Einhaltung internationaler Standards

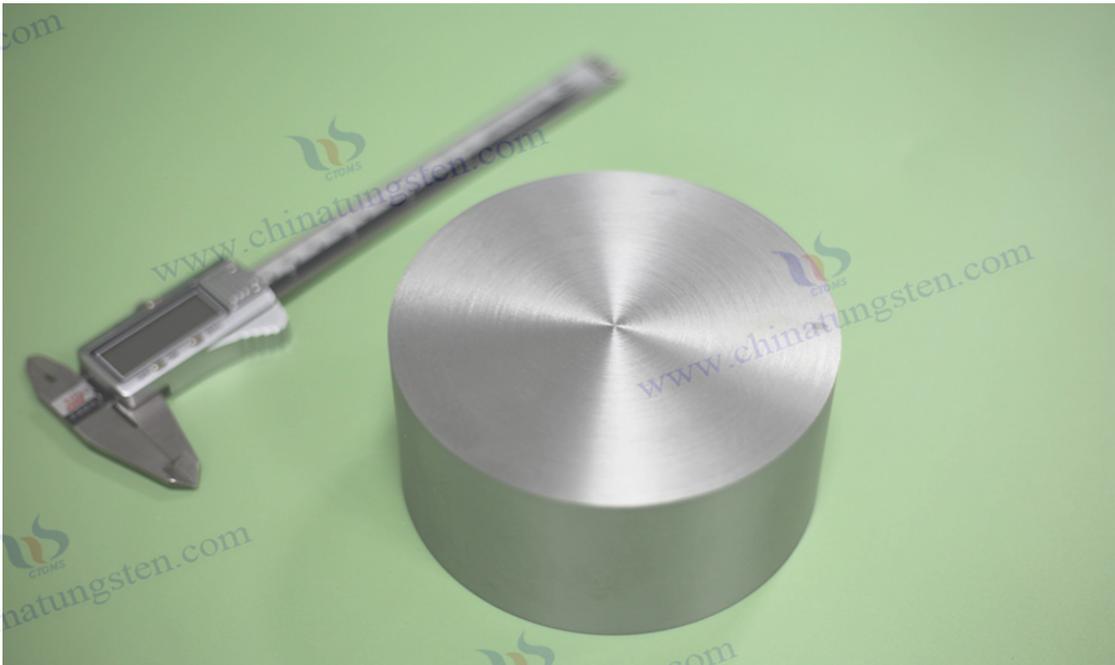
Der Export von TZM-Molybdänstäben unterliegt den Normen und Vorschriften des Zielmarktes, die die Harmonisierung und Zertifizierung multinationaler Normen beinhalten. Zu den spezifischen Anforderungen gehören:

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Harmonisierung der Normen: TZM-Molybdänstäbe müssen die Normen ASTM B387 und ASME für den Export in die Vereinigten Staaten, DIN EN 10228 und ISO 14001 für den Export nach Europa und JIS G 0571 für den Export nach Japan erfüllen.

Zertifizierungsanforderungen: Exportprodukte müssen eine Zertifizierung für den Zielmarkt erhalten, wie z. B. die CE-Zertifizierung in der Europäischen Union, die UL-Zertifizierung in den Vereinigten Staaten oder die GOST-R-Zertifizierung in Russland. Der Zertifizierungsprozess umfasst Materialprüfungen, Prozessaudits und Umweltkonformitätsprüfungen.

Compliance-Management: Es ist erforderlich, ein Compliance-Management-System einzurichten und regelmäßige Audits durch Dritte zu akzeptieren. So sind beispielsweise SGS und TÜV gemeinsame Zertifizierungsstellen für den Export von TZM-Molybdänstäben, die sicherstellen, dass die Produkte den internationalen Vorschriften (z. B. RoHS, REACH) entsprechen.



CTIA GROUP LTD TZM Molybdänstab

## Anhang

### A. Glossar

#### 1. Verwandte Begriffe

TZM Legierung

Definition: Eine Superlegierung mit Molybdän (Mo) als Matrix, die Titan (Ti, 0,4-0,55%), Zirkonium (Zr, 0,06-0,12%) und Kohlenstoff (C, 0,01-0,04%) zufügt, mit ausgezeichneter Hochtemperaturfestigkeit, Kriechbeständigkeit und niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Legierung auf Molybdänbasis

Definition: Eine Legierung mit Molybdän als Hauptbestandteil und anderen Elementen (wie Titan, Zirkonium, Rhenium), die zur Verbesserung der Eigenschaften hinzugefügt werden. TZM ist ein typischer Vertreter von Molybdänbasislegierungen.

Hochtemperatur-Legierung

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

Definition: Metallische Werkstoffe, die mechanischen Belastungen und chemischer Korrosion in einer Hochtemperaturumgebung über 600 °C lange standhalten können, einschließlich Nickelbasislegierungen, Wolframlegierungen und Legierungen auf Molybdänbasis.

#### Anti-Oxidations-Beschichtung

Definition: Eine Schutzschicht (z. B. Molybdänsilizid,  $Al_2O_3$ ), die auf die Oberfläche des TZM-Molybdänstabs aufgebracht wird, um die Oxidation bei hohen Temperaturen und den Materialverlust zu reduzieren.

#### Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE)

Definition: Die Ausdehnungsrate pro Längeneinheit des Materials unter Temperaturänderung, der Wärmeausdehnungskoeffizient des TZM-Molybdänstabs beträgt  $5,3 \times 10^{-6}/K$ .

#### Kriechfestigkeit

Definition: Die Fähigkeit eines Materials, einer langsamen Verformung bei hohen Temperaturen und unter ständiger Belastung standzuhalten. Die Kriechgeschwindigkeit von TZM-Molybdänstäben bei 1400 °C beträgt etwa 1/10 der von reinem Molybdän.

#### Bruchzähigkeit

Definition: Die Fähigkeit des Materials, der Rissausbreitung zu widerstehen, die Bruchzähigkeit von TZM-Molybdänstäben beträgt  $15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , was höher ist als die von reinem Molybdän  $10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

## 2. Terminologie der Vorbereitung und Verarbeitung

### Pulvermetallurgie

Definition: Ein Verfahren zur Aufbereitung von Metallwerkstoffen durch Mischen von Metallpulvern, Pressformen und Hochtemperaturesintern. TZM-Molybdänstab wird normalerweise aus einem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt, und die Sintertemperatur beträgt 1800-2000 °C.

### Vakuum-Sintern

Definition: Der Prozess, bei dem ein Rohling aus Metallpulver in einem Vakuum ( $10^{-3}-10^{-5} \text{ Pa}$ ) erhitzt wird, um es zu einem dichten Material zu verbinden. Durch das Vakuumsintern von TZM-Molybdänstäben kann die Dichte auf mehr als 98 % der theoretischen Dichte erhöht werden.

### Heißisostatisches Pressen

Definition: Isotrope Kompression von Materialien bei hohen Temperaturen (1800-2000°C) und hohen Drücken (100-200 MPa) zur Beseitigung von innerer Porosität und Defekten.

### Kaltisostatisches Pressen

Definition: Isotroper Druck wird durch ein flüssiges Medium bei Raumtemperatur auf ein Pulver ausgeübt, um einen Knüppel mit hoher Dichte zu bilden. Der CIP-Druck von TZM-Molybdänstäben beträgt normalerweise 200-300 MPa.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

#### Präzisionsschmieden

Definition: Plastische Verformung von TZM-Molybdänstab durch mehrachsige Hochtemperatur-Schmiedeausrüstung (1200-1400 °C) zur Verbesserung der Dichte und der mechanischen Eigenschaften.

#### Zerspanung

Definition: Formbearbeitung von TZM-Molybdänstäben durch Drehen, Fräsen, Bohren und andere Verfahren mit Toleranzen bis  $\pm 0,01$  mm.

#### Polieren der Oberfläche

Definition: Reduzierung der Oberflächenrauheit von TZM-Molybdänstäben ( $Ra \leq 0,05 \mu\text{m}$ ) durch mechanische, chemische oder elektrochemische Verfahren zur Reduzierung von Rissinitiierungspunkten.

#### Zerstörungsfreie Prüfung

Definition: Prüfung von Innen- und Oberflächenfehlern von TZM-Molybdänstäben mittels Ultraschall-, Röntgen- oder Eindringprüfverfahren mit einer Empfindlichkeit von bis zu 0,05 mm.

#### Endkonturnahe Umformung

Definition: Optimierung von Vorbereitungsprozessen (z. B. SLM oder HIP), um Teile direkt nahe an der endgültigen Form zu formen und so die Nachbearbeitung zu reduzieren.

### 3. Terminologie der Hochtemperaturanwendung

#### Hochtemperatur-Festigkeit

Definition: Die Fähigkeit eines Materials, Zug-, Druck- oder Scherverformungen bei hohen Temperaturen ( $>1000$  °C) zu widerstehen. Die Zugfestigkeit von TZM-Molybdänstäben bei 1200 °C beträgt 400-500 MPa.

#### Temperaturwechselbeständigkeit

Definition: Die Fähigkeit eines Materials, Rissen oder Brüchen bei schnellen Temperaturänderungen zu widerstehen. Der TZM-Molybdänstab hat aufgrund seines niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $5,3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) eine ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeit.

#### Wärmeleitfähigkeit

Definition: Die Fähigkeit des Materials, Wärme zu leiten, die Wärmeleitfähigkeit von TZM-Molybdänstäben beträgt 139 W/m·K, die bei 1200°C nur um 10-15% abnimmt.

#### Oxidationsbeständigkeit

Definition: Die Fähigkeit eines Materials, der Bildung und dem Verlust von Oxiden in einer oxidierenden Umgebung mit hohen Temperaturen zu widerstehen. TZM-Molybdänstäbe bildeten bei 1000 °C eine Schutzschicht aus  $\text{MoO}_2$ , und die oxidative Gewichtszunahmerate betrug  $< 0,1$  mg/cm<sup>2</sup>·h.

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

#### Plasma-Erosion

Definition: Das Phänomen des Oberflächenverlustes eines Materials unter Beschuss mit hochenergetischem Plasma. TZM-Molybdänstäbe können  $10^6$  Plasmastößen standhalten, was besser ist als reines Molybdän.

#### Thermisches Schutzsystem

Definition: Ein System, das verwendet wird, um ein Raumfahrzeug vor thermischen Schäden bei hohen Temperaturen, wie z. B. Wiedereintritt, zu schützen. TZM-Molybdänstäbe werden bei der Herstellung von Wärmeschutzschilden und Hitzeschilden verwendet.

#### Ermüdung bei hohen Temperaturen

Definition: Die Fähigkeit eines Materials, der Rissinitiierung und -ausbreitung unter zyklischer Hochtemperaturbelastung zu widerstehen. Die Ermüdungslebensdauer von TZM-Molybdänstäben bei  $1200^{\circ}\text{C}$  beträgt  $10^9$  Zyklen.

#### Stabilität bei thermischen Zyklen

Definition: Die Fähigkeit eines Materials, seine Eigenschaften und Struktur auch bei wiederholtem Erhitzen und Abkühlen beizubehalten. TZM-Molybdänstäbe können 1000 Temperaturzyklen (Raumtemperatur -  $1600^{\circ}\text{C}$ ) standhalten.

### 4. Materialwissenschaft und metallurgische Terminologie

#### Feste Lösungsverstärkung

Definition: Durch das Lösen von Titan- und Zirkoniumatomen in der Molybdänmatrix wird der Gitterverzerrung verursacht, um die Festigkeit und Härte des Materials zu verbessern.

#### Niederschlagsverstärkung

Definition: Durch die Bildung von Hartmetallpartikeln (z.B. TiC, ZrC) in der Molybdänmatrix wird die Versetzungsbewegung behindert und die Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit verbessert.

#### Körnung

Definition: Die durchschnittliche Größe der Kristalle im Material, die Korngröße von TZM-Molybdänstäben, beträgt normalerweise 10-30 Mikrometer, was sich auf die Festigkeit und Zähigkeit auswirkt.

#### Rekristallisationstemperatur

Definition: Die Temperatur, bei der sich die Körner eines Materials bei hohen Temperaturen zu neuen Körnern neu anordnen. Die Rekristallisationstemperatur von TZM-Molybdänstäben beträgt  $1400-1500^{\circ}\text{C}$  und ist damit höher als die von reinem Molybdän bei  $1100^{\circ}\text{C}$ .

#### Luxation

Definition: Ein linearer Defekt im Inneren eines Kristalls, der die plastische Verformung und Festigkeit eines Materials beeinflusst. TZM-Molybdänstäbe werden durch Hartmetallpartikel an

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

Versetzungen befestigt, um die Kriechfestigkeit zu verbessern.

#### Korngrenzen

Definition: Die Grenzfläche zwischen Körnern, die die Festigkeit, Zähigkeit und Korrosionseigenschaften eines Materials beeinflusst. Die Korngrenzen von TZM-Molybdänstäben werden mit Zirkonium verstärkt, um den Schlupf bei hohen Temperaturen zu reduzieren.

#### Rasterelektronenmikroskop

Definition: Ein Mikroskop zur Beobachtung der Oberflächentopographie und der Brucheigenschaften von TZM-Molybdänstäben mit einer Auflösung von bis zu 1 Nanometer.

#### Transmissionselektronenmikroskop

Definition: Ein Mikroskop zur Beobachtung der inneren Mikrostruktur (z.B. Versetzungen, Karbidpartikel) von TZM-Molybdänstäben mit einer Auflösung von bis zu 0,1 nm.

#### Röntgenbeugung

Definition: Röntgenanalyse der Kristallstruktur, der Phasenzusammensetzung und des Spannungszustands von TZM-Molybdänstäben.

#### Finite-Elemente-Analyse

Definition: Vorhersage der Spannungsverteilung und des Ausfallrisikos durch Computersimulation der Leistung von TZM-Molybdänstäben bei hohen Temperaturen und hoher Beanspruchung.

## B. Verweise

- [1] Chinatungsten Online, "Produktionsprozess und Technologie der TZM-Molybdänlegierung", [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)
- [2] Chinatungsten Online, Molybdänpulverreinigungs- und Legierungstechnologie, [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)
- [3] Chinatungsten Online, Offizieller WeChat-Account, "TZM Molybdän Rod Production Process Optimization", 2023
- [4] 《Pulvermetallurgie: Wissenschaft, Technologie und Anwendungen》, C. Suryanarayana
- [5] 《Fortschritte in der Verarbeitung von Refraktärmetallen》, Zeitschrift für Materialverarbeitungstechnologie
- [6] 《Vakuumsintern von TZM-Legierungen》, Internationale Zeitschrift für Refraktärmetalle und harte Materialien
- [7] Chinatungsten Online, "Automated Production Technology of TZM Molybdenum Rod", [news.chinatungsten.com](http://news.chinatungsten.com)
- [8] 《Oberflächentechnik von Refraktärmetallen》, Oberflächen- und Beschichtungstechnik
- [9] Chinatungsten Online, "TZM Molybdenum Rod Production Equipment and Quality Control", [baike.ctia.com.cn](http://baike.ctia.com.cn)
- [10] 《Materialwissenschaft und -technik: Eine Einführung》, William D. Callister Jr.
- [11] 《Fortschritte bei Refraktärmetallen und Legierungen》, Journal of Materials Science
- [12] 《Pulvermetallurgie von TZM-Legierungen》, Internationale Zeitschrift für Refraktärmetalle

#### Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung

und harte Materialien

[13] 《TZM-Legierung in Hochtemperaturanwendungen》, Materialien und Design

[14] 《Pulvermetallurgie von TZM-Legierungen》, Internationale Zeitschrift für Refraktärmetalle und harte Materialien

www.chinatungsten.com

**Erklärung zum Urheberrecht und zur gesetzlichen Haftung**