

# タングステン合金ロッド百科事典

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

## CTIA GROUP LTD

タングステン、モリブデン、希土類元素産業におけるインテリジェント製造の世界的リーダー

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD は、インダストリアル・インターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造の推進に尽力しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、1997 年に [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)（中国初の一流タングステン製品ウェブサイトを）を起点に設立され、タングステン、モリブデン、希土類元素産業に特化した中国の先駆的な e コマース企業です。CTIA GROUP は、タングステンおよびモリブデン分野での約 30 年にわたる豊富な経験を活かし、親会社の優れた設計・製造能力、優れたサービス、世界的なビジネス評判を継承し、タングステン化学薬品、タングステン金属、超硬合金、高密度合金、モリブデン、モリブデン合金の分野で包括的なアプリケーションソリューションプロバイダーになりました。

CHINATUNGSTEN ONLINE は、過去 30 年間で 200 以上の多言語対応タングステン・モリブデン専門ウェブサイトを開設し、20 以上の言語に対応しています。タングステン、モリブデン、希土類元素に関するニュース、価格、市場分析など、100 万ページを超える情報を掲載しています。2013 年以来、WeChat 公式アカウント「CHINATUNGSTEN ONLINE」は 4 万件以上の情報を発信し、10 万人近くのリフォロワーを抱え、世界中の数十万人の業界関係者に毎日無料情報を提供しています。ウェブサイト群と公式アカウントへの累計アクセス数は数十億回に達し、タングステン、モリブデン、希土類元素業界における世界的に権威のある情報ハブとして認知され、24 時間 365 日、多言語ニュース、製品性能、市場価格、市場動向などのサービスを提供しています。

CTIA GROUP は CHINATUNGSTEN ONLINE の技術と経験を基盤とし、顧客の個別ニーズへの対応に注力しています。AI 技術を活用し、顧客と共同で、特定の化学組成と物理的特性（粒径、密度、硬度、強度、寸法、公差など）を持つタングステン・モリブデン製品を設計・製造し、型開き、試作、仕上げ、梱包、物流まで、全工程を統合したサービスを提供しています。過去 30 年間、CHINATUNGSTEN ONLINE は、世界中の 13 万社以上の顧客に、50 万種類以上のタングステン・モリブデン製品の研究開発、設計、製造サービスを提供し、カスタマイズ可能で柔軟性が高く、インテリジェントな製造の基盤を築いてきました。CTIA GROUP はこの基盤を基に、インダストリアルインターネット時代におけるタングステン・モリブデン材料のインテリジェント製造と統合イノベーションをさらに深化させています。

ハンス博士と CTIA GROUP のチームは、30 年以上にわたる業界経験に基づき、タングステン、モリブデン、希土類に関する知識、技術、タングステン価格、市場動向分析を執筆・公開し、タングステン業界と自由に共有しています。ハンス博士は、1990 年代からタングステンおよびモリブデン製品の電子商取引および国際貿易、超硬合金および高密度合金の設計・製造において 30 年以上の経験を持ち、国内外でタングステンおよびモリブデン製品の専門家として知られています。CTIA GROUP のチームは、業界に専門的で高品質な情報を提供するという原則を堅持し、生産の実践と市場の顧客ニーズに基づいた技術研究論文、記事、業界レポートを継続的に執筆しており、業界で広く評価されています。これらの成果は、CTIA GROUP の技術革新、製品のプロモーション、業界交流に強力なサポートを提供し、同社が世界的なタングステンおよびモリブデン製品の製造と情報サービスのリーダーとなることを推進しています。



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 目次

### 序文

執筆の背景と実践的意義

タングステン合金棒の戦略的位置と中核価値

この本の使い方

対象読者と参照目的

### 第1章 タングステン合金棒の基本概念と分類

1.1 タングステン合金棒の定義と基本形状

1.2 高比重タングステン合金（W-Ni-Fe / W-Ni-Cu）系の概要

1.3 タングステン合金棒の一般的なサイズ、形状、表面状態

1.4 タングステン合金棒の分類（組成 / 用途 / 加工方法による）

1.5 タングステン合金棒とタングステン銅棒、タングステン棒、その他の材料との比較

### 第2章 タングステン合金棒の物理的および機械的特性

2.1 密度、比重および寸法精度管理

2.2 引張強度、降伏強度および伸び

2.3 硬度および耐衝撃性

2.4 熱伝導率、熱膨張係数および高温性能

2.5 電気的特性、磁気応答および耐放射線性

2.6 耐食性および化学的安定性分析

### 第3章 タングステン合金棒の製造および成形技術

3.1 原材料の準備と粉末特性

3.2 粉末冶金プレスプロセス（成形、静水圧プレス）

3.3 焼結技術と雰囲気制御

3.4 熱処理と緻密化プロセスの最適化

3.5 機械加工と表面処理技術（研削、研磨、旋削）

3.6 新しい準備技術：押し出し、圧延、積層造形

### 第4章 タングステン合金棒の性能試験と品質評価

4.1 外観および幾何寸法検査

4.2 密度および微細構造分析方法

4.3 機械的特性試験規格（ASTM、GB、ISO）

4.4 金属組織分析および微細構造特性評価

4.5 化学組成分析（ICP、XRF、ONH）

4.6 表面粗さと欠陥検出（目視検査、CT）

4.7 非破壊検査技術（超音波、X線、磁性粉末）

### 第5章 タングステン合金棒の代表的な応用分野

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 5.1 航空宇宙用カウンターウェイトおよび慣性部品
- 5.2 軍事機器用タングステン合金ロッド（徹甲弾コア、ミサイル尾部）
- 5.3 原子力用途（放射線遮蔽ロッド、中性子吸収構造）
- 5.4 医療機器用高密度構造ロッド（放射線治療装置）
- 5.5 高精度機器のダイナミックバランスロッドおよび回転慣性部品
- 5.6 電子通信産業における支持および放熱構造

## 第6章 特殊タングステン合金棒の研究開発と改良

- 6.1 ナノ粒子強化タングステン合金棒
- 6.2 マイクロアロイ化タングステン合金棒の設計と性能向上
- 6.3 高強度・高靱性タングステン合金棒の組成制御
- 6.4 耐熱性タングステン合金棒の熱処理研究
- 6.5 タングステン合金棒の表面コーティングと耐摩耗性の向上
- 6.6 機能性タングステン合金棒：導電性、熱伝導性、耐磁性

## 第7章 タングステン合金棒のコンプライアンスシステム

- 7.1 中国国家規格 / 業界規格（GB/T、YS/T）
- 7.2 米国規格システム（ASTM、MIL）
- 7.3 EU および ISO 国際規格
- 7.4 環境保護および材料安全認証（RoHS、REACH、MSDS）
- 7.5 航空、軍事、医療産業における品質システム要件

## 第8章 タングステン合金棒の包装、保管および輸送

- 8.1 包装方法と保護対策（真空包装、乾燥剤）
- 8.2 保管条件と注意事項（温度・湿度管理、腐食防止）
- 8.3 国際輸送規制と危険物申告ガイドライン
- 8.4 タングステン合金棒の税関監督と輸出許可要件

## 第9章 タングステン合金棒の市場構造と発展動向

- 9.1 世界のタングステン資源と合金棒産業チェーンの概要
- 9.2 タングステン合金棒の市場規模と成長傾向の分析
- 9.3 主要メーカーと競争環境（中国、ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国）
- 9.4 原材料価格変動とコスト構造の分析
- 9.5 産業政策と輸出状況の解釈
- 9.6 将来のハイエンド製造業におけるタングステン合金棒需要の予測

## 第10章 タングステン合金棒の研究ホットスポットと最先端技術

- 10.1 高密度タングステン合金棒の緻密化プロセスの研究
- 10.2 インテリジェント製造と自動化生産ライン
- 10.3 タングステン合金棒と積層造形の統合

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.4 高性能合金代替品の比較と開発経路

10.5 極限使用条件下でのタングステン合金の性能進化

付録

付録 1：タングステン合金棒の一般的な技術パラメータの概要

付録 2：タングステン合金のグレードと化学組成の比較表

付録 3：タングステン合金棒の規格文書と参考索引

付録 4：タングステン合金用語集と英語略語

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

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

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 序文

新素材技術の発展とハイエンド製造業の急速な発展に伴い、高性能機能性合金材料は、航空宇宙、精密製造、国防装備、エネルギーシステム、医療機器などの進歩を支える重要な基盤となっています。タングステンは、周期表で最も融点の高い金属の一つであり、高密度、高硬度、高融点、優れた耐放射線性を備えており、極限環境下でも独自の優位性を発揮します。多くのタングステン系材料の中でも、タングステン重合合金棒は、その独特な物理的特性、成形安定性、幅広い適応性により、戦略的機能性材料システムの重要な構成要素として徐々に位置づけられています。

タングステン合金棒は、通常、タングステン(W)を主成分とし、ニッケル(Ni)、鉄(Fe)、銅(Cu)などの金属を添加して高密度タングステン合金(高密度タングステン合金)を形成し、粉末冶金法で製造されます。その密度は $17.0\sim 18.8\text{g/cm}^3$ に達し、鋼、銅、アルミニウムなどの一般的な金属よりもはるかに高くなっています。高強度、良好な加工性、優れた使用安定性を備えたエンジニアリング材料です。コンパクトな構造、エネルギー制御精度、設備の長寿命化への需要が高まるにつれて、タングステン合金棒の設計と応用は、高密度、高均一性、高純度の方向へと絶えず発展しています。

タングステン合金棒製品は、航空機のバランス調整、航空宇宙姿勢調整、艦船慣性モジュールなどの伝統的なカウンターウェイト用途だけでなく、防弾、放射線防護、原子力部品、運動エネルギー兵器、医療機器放射線治療モジュール、X線遮蔽装置、ジャイロスコープ慣性ローター、電気真空装置の陽極構造、電子パッケージの熱制御部品などの戦略技術分野にも広く使用されています。特に、精密誘導兵器、超高速徹甲弾、高エネルギー物理実

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

験、深宇宙探査プロジェクトにおいて、タングステン合金棒は構造安定性と慣性応答精度により、かけがえのない高性能部品材料となっています。

現在、世界のタングステン資源は極めて集中しており、中国、ロシア、カザフスタン、ポルトガルなどの国が主要な鉱物資源を保有しています。中でも、中国はタングステン鉱石の実証埋蔵量、精鉱生産量、深部処理能力において世界トップクラスを誇ります。これは、中国におけるタングステン合金棒製品の設計、開発、プロセス革新に確固たる原料保証基盤を提供しています。同時に、中高級装備製造業の急速な高度化に伴い、国産タングステン合金棒は徐々に輸入品に取って代わり、航空宇宙、医療核工学、電子対抗手段などの重点分野で技術革新を達成し、大量供給能力を形成しています。

しかし、タングステン合金棒技術システムは成熟度が高まっているにもかかわらず、焼結密度と組織の均一性をさらに向上させる方法、複雑な構造要件に適した特殊形状棒製造技術を開発する方法、高強度と機械加工性の材料比率をバランスさせる方法、製造エネルギー消費を削減し、リサイクル率を向上させる方法など、いくつかの課題に直面しています。上記の問題を解決するために、近年、液相焼結緻密化、マイクロアロイ要素最適化、熱間等方圧プレス（HIP）技術、マルチスケールシミュレーション設計、3Dプリントタングステン合金構造部品など、一連の新しいプロセスパスと先進的な製造方法が登場し、タングステン合金棒のハイエンド、機能的、インテリジェントな開発に新たな活力を注ぎ込んでいます。

本書『タングステン合金棒事典』は、こうした背景のもとに編纂されました。本書は、タングステン合金棒の材料基盤、製造プロセス、性能評価、規格体系、応用展開、そして将来動向を体系的に整理し、タングステン合金材料の研究開発、製品設計、プロセス最適化、産業応用に携わるエンジニア、研究者、大学教員・学生、そして戦略調達担当者に、詳細かつ実践的な専門的参考資料を提供することを目指しています。

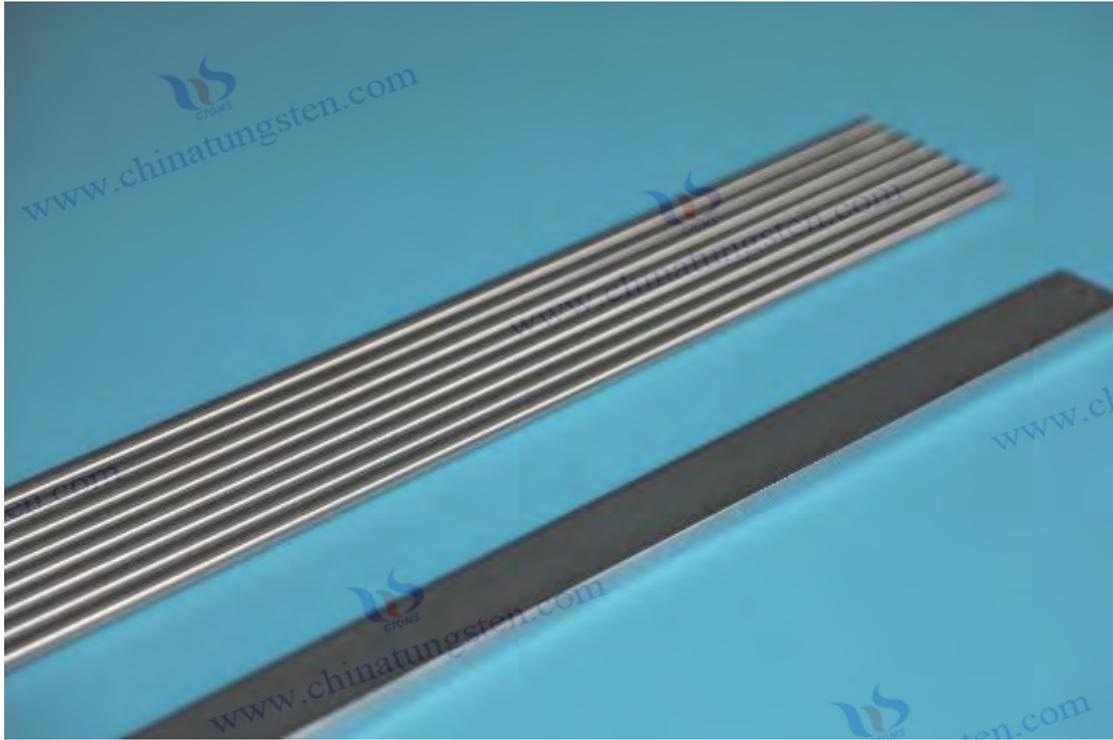
本書の執筆過程では、国内外の研究文献、企業の応用事例、国家および業界標準を幅広く参照し、CTIA GROUP LTD とそのパートナーの長年にわたるタングステン合金分野における実践経験を組み合わせ、内容の権威性、構成の体系性、言語の普及性、文章と画像の豊富さを目指しました。体裁上、本書は 10 の章と複数の付録に分かれており、タングステン合金棒の基本概念、物理的および機械的特性、粉末冶金および成形技術、試験および品質管理方法、典型的な応用分野、国際標準システム、包装および輸送規格、市場パターン分析および最先端技術の動向を網羅しています。また、用語索引と参考マップを添付し、読者がエンジニアリングで参照および応用できるようにしています。

本書が材料技術の参考書としてだけでなく、タングステン合金棒の工学応用と科学研究開発の架け橋となることを願っています。大学の研究者、タングステン製品会社のエンジニア、あるいは工業デザインの意思決定者など、どなたでも本書から理論的なインスピレーション、事例の参照、そして実践的なガイダンスを得ることができるでしょう。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

本書は内容が多岐にわたり、情報量も膨大であるため、不備や記載漏れが避けられません。  
読者の皆様には、ご指摘・ご訂正を賜りますようお願い申し上げます。

CTIAグループ株式会社  
2025年7月



## 第1章 タングステン合金棒の基本概念と分類

### 1.1 タングステン合金棒の定義と基本形状

タングステン合金棒とは、通常、タングステン（W）を主成分とし、ニッケル（Ni）、鉄（Fe）、銅（Cu）などの結合金属を一定の割合で含んだ粉末冶金法で作られた金属材料の長いストリップを指します。このタイプの棒は、密度が非常に高く（通常  $17.0\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ ）、機械的性質が優れており（引張強度は  $700\sim 1200\text{ MPa}$  に達する）、耐熱性と耐腐食性が良好で、航空宇宙、軍事機器、原子力工学、医療機器、電子電気などのハイエンド分野で広く使用されています。

タングステン合金棒の優れた点は、高い強度を維持しながら、優れた加工性と寸法安定性を備えていることです。鉛、鋼、チタン、銅などの従来の構造材料と比較して、タングステン合金棒は比重が高く耐久性も高く、慣性カウンターウェイト、防護シールド、精密アクセサリなどの分野においてかけがえのない技術的価値を発揮します。

基本的な形状から見ると、タングステン合金棒には主に以下の種類があります。

- **丸棒**：最も一般的な形状で、回転慣性部品、ジャイロローター、電極、バランスウェイトなど、様々な用途に適しています。直径は  $1\text{ mm}$  から  $100\text{ mm}$ 、長さは通常  $50\text{ mm}$  から  $1500\text{ mm}$  です。必要に応じて切断または旋削加工が可能です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **角棒/長方形棒**:断面形状に特定の要件がある部品の加工に使用され、電子パッケージングブラケット、高温電気接触器などによく使用されます。
- **プロファイルロッド**: 押し出し加工、旋削加工、または電気加工によって得られる、溝、穴、段差などの複雑な断面形状を持つロッド。特殊な接合構造や多機能複合構造部品に適しています。
- **ピン型ロッド**:主に超精密機器、医療機器、電気真空部品の小型カウンターウェイト、位置決め部品、または導電部品として使用され、通常、直径は 5 mm 未満です。
- **ロングロッド/大寸法ロッド**: 高強度、高均一性、高密度を重視し、超音速徹甲コア、慣性試験モジュールなどの荷重支持構造や高エネルギー衝撃部品に使用されます。

さらに、パーソナライズされた製造と機能統合の発展に伴い、一部のタングステン合金棒はセラミック、ポリマー、または機能性コーティングと構造的に複合化され、耐熱性、耐腐食性、電磁シールドなどの複数の複合機能を備えるようになりました。

製品供給の観点から、タングステン合金棒は通常、研磨棒（表面研磨済み）、旋盤棒（仕上げ済み）、黒棒（未加工）の 3 種類で提供されます。表面品質と寸法公差は用途分野によって異なります。一部の精密製品では、Ra 値 $<0.4\mu\text{m}$ 、寸法精度 $\pm 0.01\text{mm}$ が要求され、医療用画像、マイクロ波通信、慣性計などのハイエンド機器に広く使用されています。

材料工学の発展と加工技術の進化に伴い、タングステン合金棒の製品形態も絶えず充実しています。従来の等断面ソリッド棒から、傾斜機能構造棒、多相共焼成構造棒、さらには 3D プリント多孔質棒に至るまで、タングステン合金棒は、過酷な使用環境、インテリジェント構造制御、多機能統合といった新たな応用シナリオに徐々に適応し、先進的な製造システムに、より柔軟で効率的な材料ソリューションを提供しています。

## 1.2 重タングステン合金 (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu) システムの紹介

W) をベースに、一定の割合の結合金属（ニッケル Ni、鉄 Fe、銅 Cu など）を加えて形成される擬似合金または金属複合システムの一つです。その典型的な特性は、高密度、高強度、良好な機械加工性能、室温での熱安定性、低い熱膨張係数、優れた耐食性です。タングステンヘビーアロイは、高性能カウンターウェイト部品、放射線防護部品、軍用徹甲部品、慣性部品などの技術集約型分野で広く使用されています。現在のハイエンド機器製造において、かけがえのない重要な構造材料の一つです。

すべての高密度タングステン合金システムの中で、最も代表的かつ産業的に最も成熟している 2 つは次のとおりです。

- **タングステン-ニッケル-鉄合金系 (W-Ni-Fe)**
- **タングステン-ニッケル-銅合金系 (W-Ni-Cu)**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

これら2つのシステムの基本構造は「2相構造」であり、つまり、体積分率90%以上のタングステン粒子が主相であり、ニッケルと鉄または銅からなる連続結合相（マトリックス）によってしっかりと結合されており、高密度で均一性の高い合金構造を形成しています。

#### W-Ni-Fe タングステン合金：高強度工業用主力タイプ

W-Ni-Fe 系は、最も生産量が多く、最も広範囲に使用されているタングステン合金です。その典型的な組成は以下のとおりです。

- タングステン（W）：90～97 重量%
- ニッケル（Ni）：3～7 重量%
- 鉄（Fe）：1～3 重量%
- 密度範囲：17.0～18.5 g/cm<sup>3</sup>

この合金は、引張強度（通常900～1200MPa）が極めて高く、破断延性（伸びは10～30%に達する）にも優れており、鉄含有量により磁気特性も調整可能です。慣性部品、耐震カウンターウェイト、動的荷重に耐える構造部品など、優れた機械的特性が求められる用途に適しています。

#### アドバンテージ：

- 高い強度と優れた耐摩耗性
- 熱処理可能
- 軍事構造部品および航空宇宙慣性装置に適用可能

#### 欠点：

- Fe が含まれているため磁性があり、一部の電子機器の重量には適していません。
- 耐食性は Ni-Cu 系よりわずかに低い

#### W-Ni-Cu タングステン合金：低磁性と高導電性

W-Ni-Cu 合金は、鉄を銅に置換することで非磁性または低磁性の結合相を形成します。その典型的な組成は以下のとおりです。

- タングステン（W）：90～95 重量%
- ニッケル（Ni）：2～5 重量%
- 銅（Cu）：2～4 重量%
- 密度範囲：17.0～18.0 g/cm<sup>3</sup>

このタイプのタングステン合金は、引張強度がわずかに低い（約700～900MPa）ですが、導電性と耐腐食性が優れており、透磁率は1に近くなります。これは典型的な非磁性構造材料であり、電子機器、真空、医療診断機器、および電磁干渉制御に対する要件が極めて高いその他の機器に広く使用されています。

#### アドバンテージ：

- 非磁性または弱磁性で、精密機器に適しています
- 熱伝導率と電気伝導率は W-Ni-Fe 系よりも優れている
- 海水腐食に強い耐性があり、海洋および医療分野に適しています

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 欠点:

- 引張強度と靱性がやや低く、高動的荷重構造には適していません。
- コストが若干高く、製造が若干難しい

#### その他の開発中のタングステン合金系

、機能化とハイエンドの方向で開発されてきました。

- **W-Ni-Co 系:** 鉄含有磁性の問題を代替し、耐熱性を向上させるために使用される
- **W-Cu システム:** マイクロエレクトロニクス冷却モジュールなどの高熱流束デバイスに適しています
- **W ポリマー構造複合ロッド:** 重量と加工性の矛盾を解決するために開発されたタングステンポリマー複合構造
- **ナノタングステン合金システム:** ナノタングステン粉末または金属間化合物粒子（TiC など）を導入し、LaB<sub>6</sub> により材料の密度と強度靱性を向上させる

#### 組織構造の特徴とパフォーマンス管理のポイント

高密度タングステン合金は、「タングステン粒子+バインダー相」の複合二相構造であり、タングステン粒子の体積分率は 85% を超え、主な荷重支持の役割を果たします。一方、Ni-Fe または Ni-Cu バインダー相は、全体の延性と加工性を決定します。その組織均一性、タングステン粒子の粒度分布、そしてバインダー相の連続性が、ロッドの最終的な機械的特性と耐用年数を決定します。

- **タングステン粒子分布:** 粒子径は通常 10 ~ 50 $\mu$ m です。粒子径が小さいほど、界面の接合性が向上し、機械的特性が向上します。
- **焼結密度:** 気孔率を 0.5% 未満に制御すると、強度と熱伝導性が向上します。
- **バインダー比率:** 低すぎると脆くなり、加工が困難になります。高すぎると密度が低下し、強度が不十分になります。通常は 3 ~ 10 wt% に制御されます。
- **組成の均一性:** 元素の分離や凝集を防ぎ、製品の一貫性を向上させます。
- **微細構造制御:** 液相焼結と熱処理により、結晶粒の微細化と均一な構造を実現し、耐疲労性を向上させます。

#### 結論

タングステン合金棒、W-Ni-Fe 系および W-Ni-Cu 系は、高強度構造と低磁性エレクトロニクスという二つのコア応用システムをサポートしています。組成制御、組織制御、性能適応における柔軟性により、タングステン合金棒は航空宇宙、国防、精密電子、医療用原子力工学などの分野において、かけがえのない存在となっています。技術の進歩に伴い、マイクロアロイ化、ナノ強化、機能性複合化を通じて、ハイエンド製造分野におけるタングステン合金棒の性能限界と応用範囲は今後さらに拡大していくでしょう。

#### 1.3 タングステン合金棒の一般的なサイズ、形状および表面状態

高性能構造材料であるタングステン合金棒は、様々な業界や使用環境において、様々なサイズ、形状、表面状態を備えています。その形状と表面特性は、組立精度や耐用年数に関係するだけでなく、加工効率、構造安定性、そしてサービス信頼性にも直接影響を及ぼし

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。そのため、タングステン合金棒の標準化された形状とカスタマイズされた形状を深く理解することが、製品設計とエンジニアリング材料の選択の基礎となります。

## 1. 寸法

タングステン合金棒は、用途に応じて通常、標準化されたものとカスタマイズされたものの2つのカテゴリーに分けられます。一般的な仕様には、直径（または辺の長さ）、長さ、真円度、真直度、寸法公差などがあります。

- **直径範囲:** 1 mm ~ 200 mm、最も一般的に使用される仕様は 3 mm ~ 100 mm です。
- **長さ範囲:** 10 mm ~ 2000 mm。従来加工されたバーは主に 50 mm ~ 1000 mm で制御されます。
- **長さ許容差:** 通常 $\pm 0.5$ mm ですが、精密加工は $\pm 0.1$ mm まで可能です。
- **真直度誤差:** 工業グレード製品は 0.5 mm/m 以内に制御され、精密グレード製品は 0.1 mm/m に達します。
- **同軸度および垂直度の制御:** 動的部品に使用されるタングステン合金ロッドには、通常  $\pm 0.02$  mm の範囲内で制御される、より高い幾何学的一貫性が求められます。

特定の分野（弾道兵器、高速ジャイロスコープ、精密光学システムなど）で使用される棒鋼の場合、熱膨張制御と供給寸法の一貫性も考慮する必要があります。品質管理は通常、CAD モデリングと3次元検出システムと組み合わせて行われます。

## 2. 形状分類

タングステン合金棒の形状と構造設計は、様々な機械部品、熱制御ユニット、電気接続部、慣性要素などの統合要件を満たす必要があります。主な形状は以下のようまとめられます。

1. **ソリッドラウンドロッド:** 最も一般的な構造で、ほとんどの産業用カウンターウェイト、電極、慣性コンポーネントに適しています。
2. **中空ロッド:** 軽量化や液体冷却の機能があり、医療や航空宇宙分野でよく使用されます。
3. **角型/長方形ロッド:** フレーム構造、電気接点ベースなどに適しています。
4. **プロファイルロッド:** スロット、穴、凹部、面取りなどの特殊な設計により、カスタマイズされた組み立て部品や複雑な統合構造に主に使用されます。
5. **マイクロロッド:** 直径は 2 mm 未満で、主にマイクロ波コンポーネント、核医学、精密ジャイロスコープ、MEMS システムに使用されます。
6. **段付き/テーパ付きロッド:** 高い慣性または動力伝達の機会に適しており、機能的および構造的統合のニーズを満たします。

## 3. 表面状態

タングステン合金棒は、疲労耐性、マッチング精度、耐腐食効果、そして材料寿命に直接影響を及ぼします。一般的な表面状態には以下のようなものがあります。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **焼結直後は、**  
黒色酸化膜の層がある未処理の表面であり、その後の機械加工や露出面のない構造部品に適しています。
2. **旋削棒**  
は粗加工されており、粗さは一般に Ra1.6~3.2 $\mu$ m で、中精度のアクセサリーに適しています。
3. **アース棒は精密に円筒状に研磨されており**  
、優れた表面品質と寸法の一貫性を備えており、Ra 1.0 $\mu$ m 未満で、医療機器や電子機器に広く使用されています。
4. **研磨ロッド**  
はさらに鏡面仕上げされ、Ra 値は 0.2~0.4 $\mu$ m です。外観要件の高い機器、低摩擦機器、光学関連機器などに多く使用されます。
5. **コーティングロッドは、電気メッキ、化学メッキ、または PVD を使用して、Ni、Cr、TiN コーティングなどの機能的な表面を形成し、耐腐食性、電気接触、または耐摩耗性を向上させます。**
6. **特殊な表面処理（電解研磨/プラズマ仕上げ）**  
は、表面密度を向上させ、微細な亀裂を除去するため、高クリーン環境、高放射線環境、または医療/原子力技術機器に適しています。

#### 4. 精度レベル

加工精度と試験要件に応じて、タングステン合金棒は次の 3 つのグレードに分類されます。

- **工業グレード（標準グレード）**：一般的な保護、構造サポート、カウンターウェイト部品に適しています。寸法公差は $\pm 0.5$  mm です。
- **精密グレード**:可動部品、ガイド部品、慣性システムに適用可能。公差は  $\pm 0.1$  mm、Ra < 1.6  $\mu$ m に管理されています。
- **超精密グレード**:医療、航空宇宙、ジャイロスコープ システムに使用され、寸法公差は最大  $\pm 0.01$  mm、Ra < 0.4  $\mu$ m で、NDT テストおよび金属組織学的認定基準が必要です。

特殊形状構造物や複合機能部品に対する市場需要の高まりに伴い、タングステン合金棒は、サイズ、構造、表面処理の面で、ハイエンド化、カスタマイズ化、インテリジェント化の傾向を強めています。今後、レーザー加工、マイクロミリング、超精密研削、プラズマパッケージングといった最先端の製造技術を活用することで、タングステン合金棒は、複雑な構造、高周波振動、極限温度場、精密カウンターウェイトといったコアアプリケーションにおいて、そのエンジニアリングポテンシャルをさらに拡大していくでしょう。

#### 1.4 タングステン合金棒の分類（組成・用途・加工方法による）

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金棒は、航空宇宙、原子力、医療、軍事産業、ハイエンド製造など、多くの主要分野で広く使用されています。様々な種類があり、用途も異なります。製品システムをより効率的に構築し、材料選定とプロセスの最適化を導くためには、通常、タングステン合金棒を様々な寸法に基づいて体系的に分類する必要があります。最も一般的な分類方法は、組成、用途、加工方法の3つです。

## 1. 成分による分類

タングステン合金棒は、主にタングステン（W）と結合金属（Ni、Fe、Cu、Coなど）で構成されています。合金系の違いにより、以下のように分類されます。

### 1. W-Ni-Fe 合金棒

- 含有量: W 90～97%、Ni 2～7%、Fe 1～3%
- 特徴: 磁性合金、高強度、優れた延性
- 用途: 慣性部品、軍用カウンターウェイト、高強度構造部品

### 2. W-Ni-Cu 合金棒

- 含有量: W 90～95%、Ni 2～5%、Cu 2～4%
- 特徴: 非磁性または低磁性、優れた熱伝導性、強い耐腐食性
- 用途: 医療機器、核医学、電子戦部品

### 3. W-Cu 合金ロッド

- 含有量: W 70～90%、Cu 10～30%
- 特徴: 優れた電気伝導性と熱伝導性、高出力デバイスに適しています
- 用途: 電極、ラジエーター、真空接点など。

### 4. TiC など)

- 特徴: 特別な高温性能または強化された耐放射線性
- 用途: 航空宇宙用熱制御部品、核物質、レーザー対抗システム

### 5. ドープ改質合金

- 土 (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub>)、炭化物 (TiC、ZrC) など
- 機能: 微細構造を改善し、高温強度または耐腐食性を向上させる

## 2. 目的による分類

タングステン合金棒の具体的な使用シナリオに応じて、次のカテゴリに分類できます。

### 1. 構造用タングステンロッド

- 機能: 耐荷重、高温構造支持、ローター部品
- 主な用途: 衛星慣性構造、ジャイロスコープ、エンジン中心軸

### 2. 保護用タングステンロッド

- 機能: X線、ガンマ線、中性子線の遮蔽
- 用途: 医療用CT、原子炉、同位体輸送容器

### 3. ミリタリーキネティックタングステンロッド

- 機能: 高密度衝撃、装甲貫通、運動エネルギーによる殺傷
- 用途: APFSDS コア、高性能爆薬コア材料、尾翼カウンターウェイト

### 4. 電子機器用タングステン棒

- 機能: 電気伝導性、熱伝導性、熱拡散性、マイクロ波吸収性
- 用途: チップパッケージング、冷却構造、電極電気接点

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. 医療機器用タングステン棒
  - 機能: 放射線治療針、腫瘍強度変調部品、マイクロカウンターウェイト
  - 要件: 非磁性、超クリーン、高密度
6. 科学研究用タングステン棒
  - 用途: 粒子加速器、中性子源ターゲット、真空陽極、実験機器

### 3. 加工方法による分類

タングステン合金棒は製造工程によって異なります。一般的な加工方法は以下の通りです。

1. 粉末冶金プレスロッド（CIP/成形）
  - プロセス: 冷間等方圧プレス、一軸プレス、その後の高温焼結
  - 特徴: 高密度組織、バッチ成形
2. 熱間静水圧プレスロッド（HIP ロッド）
  - プロセス: カプセル化後、全体を高温高压下で緻密化する
  - 利点: 超高密度、極めて低い多孔性、高い信頼性要件に適しています
3. 押し出し棒
  - プロセス: タングステン合金は熱間押し出しにより長いストリップに成形される予定である。
  - 用途: マイクロ波通信、熱制御部品
4. 旋削ロッド/研削ロッド
  - プロセス: 機械加工により高精度の完成ロッドが得られる
  - 特徴:  $Ra < 1 \mu m$ 、寸法公差 $\pm 0.01 mm$
5. 射出成形ロッド（MIMプロセス）
  - 特徴: 小型で複雑な構造の鉄筋に適しています
  - 用途: 医療用タングステン部品、マイクロ慣性システム
6. 焼結ブランクロッド（黒皮ロッド）
  - 状態: 未加工または予備カットのみ、その後のカスタマイズされた加工に適しています
7. 3D プリントタングステンロッド（添加剤 製造業）
  - 状況: まだ研究段階ですが、複雑な構造と柔軟な要件を持つ小ロット製品に適しています。

### 要約する

機能性構造材料であるタングステン合金棒の分類は、製品の標準化とシリアル化の基礎となるだけでなく、性能設計、プロセスの選択、市場展開においても重要な指針となります。組成によって材料体系を明確にし、用途によって機能を正確に位置づけ、プロセスによって品質と効率の最適なバランスを実現することができます。今後、ハイエンド製造業がインテリジェント化とカスタマイズ化へと発展するにつれて、タングステン合金棒の多次元分類システムはより洗練され、デジタル化とモジュール化が進み、材料研究開発と産業応用に、より科学的かつ体系的なサポートを提供するでしょう。

### 、タングステン棒と他の材料の比較

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金棒、タングステン銅棒、純タングステン棒は、産業界で広く使用されているタングステン系材料です。それぞれの物理的特性と用途分野が異なるため、製造業や電子産業において重要な役割を果たしています。これらの違いを理解することで、設計や材料選定において合理的な選択を行うことができます。

### 1.5.1 組成と基本特性の比較

素材の種類	主な成分	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	硬度	熱伝導率	導電率	機械的強度	主な特徴
タングステン合金 ロッド	タングステン+ ニッケル、鉄、 銅などの合金 元素	17.0~18.5	よ り 高 い	中 く ら い	低~中	素晴 ら しい	高密度、高強度、機械特性は純 タングステン棒よりも優れて います
タングス テン銅棒	タングステン + 銅	14.0~16.0	中 く ら い	非 常 に 高 い	より高い	より良 い	タングステンの高密度と銅の 優れた電気伝導性と熱伝導性 を組み合わせることで、優れ た熱管理性能を実現します。
純タング ステン棒	タングステン	19.3	非 常 に 高 い	低 い	低い	脆い	最高の密度、耐熱性、高硬度だ が、比較的脆い

### 1.5.2 密度と重量

- **タングステン棒**はタングステン含有量が最も高く、密度も最も大きい(19.3 g/cm<sup>3</sup>)  
ため、カウンターウェイトや放射線遮蔽など、重量と密度の要件が極めて高い用  
途に適しています。
- **タングステン合金棒**は、密度がわずかに低いですが、それでも高密度材料であり、  
その強度は純粋なタングステンよりも優れているため、高強度および高密度部品  
の製造に適しています。
- **タングステン銅棒**は銅がドーピングされているため、タングステンやタングステン合  
金よりも密度が低くなりますが、銅は優れた熱伝導性を備えているため、熱管理  
が必要な状況でより人気があります。

### 1.5.3 熱伝導率と電気伝導率

- **タングステン銅棒**は銅含有量が高く、タングステン合金棒や純タングステン棒に  
比べて熱伝導性と電気伝導性が大幅に優れています。そのため、電子機器の放熱  
器、電極、真空電子機器などに広く使用されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- タングステン合金棒の電気伝導率は平均的で、タングステン銅より低いですが、純タングステンより優れているため、機械構造や高温部品に適しています。
- 純タングステン棒は熱伝導性と電気伝導性が比較的low、高温耐性と高密度が求められる環境でよく使用されます。

#### 1.5.4 機械的特性と加工性

- タングステン合金棒は、合金元素の添加により靱性と機械的強度が大幅に向上しています。加工性能は純タングステンよりも優れており、複雑な部品の加工に適しています。
- タングステン銅棒は、タングステンの強度と銅の延性を兼ね備えており、靱性と耐熱疲労性に優れていますが、銅の含有量により高温性能が制限されます。
- 純タングステン棒は硬度が高く脆く、加工が難しく、割れやすいという欠点があります。主に高温環境や構造部品に使用されます。

#### 1.5.5 典型的な応用分野

材料	アプリケーション例
タングステン合金ロッド	重量カウンターウェイト、高強度構造部品、徹甲弾コア、航空宇宙部品
タングステン銅棒	電極、ラジエーター、真空管部品、マイクロ波装置
純タングステン棒	高温炉部品、フィラメント、放射線遮蔽材、原子力産業資材

#### 要約する

タングステン合金棒、タングステン銅棒、純タングステン棒はそれぞれ独自の利点を持っています。タングステン合金棒は、その高い密度と機械的強度により、機械構造分野で広く使用されています。タングステン銅棒は、優れた熱伝導性と電気伝導性により、電子産業において不可欠な材料となっています。純タングステン棒は、その極めて高い密度と耐高温性により、特殊な高温・放射線環境に適しています。材料の適切な選択には、密度、強度、熱伝導性、使用環境などの要素を総合的に考慮する必要があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

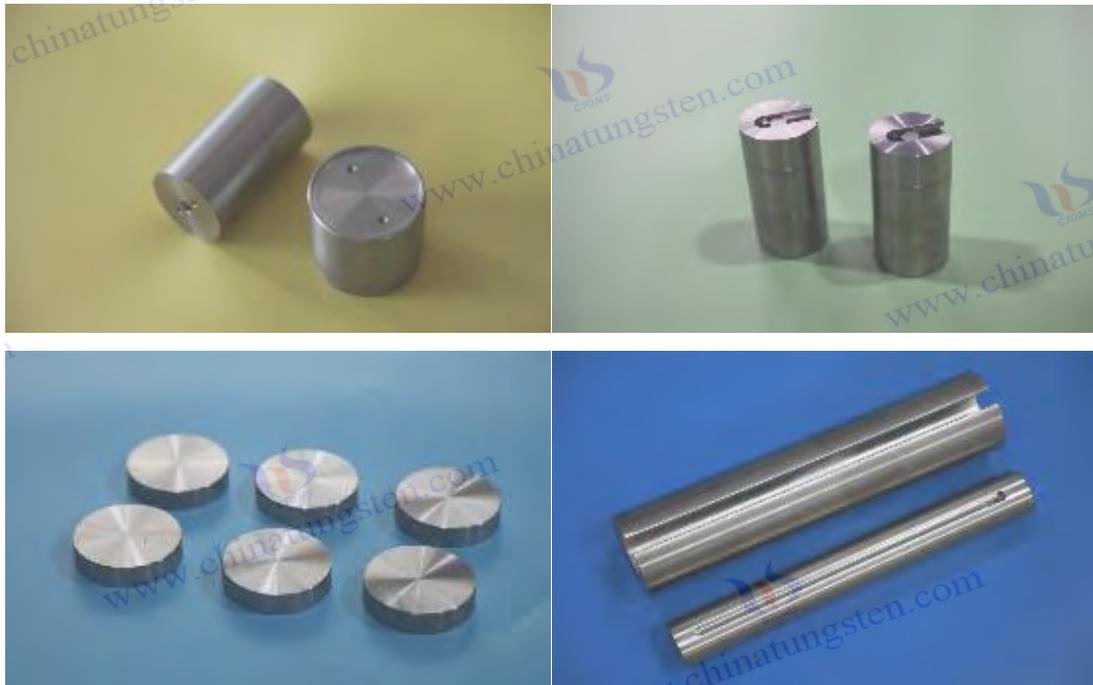
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 第2章 タングステン合金棒の物理的・機械的性質

### 2.1 密度、比重および寸法精度管理

高密度材料であるタングステン合金棒の密度とサイズの制御は、その性能とその後の用途における品質要件に直接関係します。正確な密度とサイズの制御は、タングステン合金棒製品の安定性と一貫性を確保するための鍵となります。

#### 2.1.1 密度と比重

- **密度**は、単位体積あたりの物質の質量であり、タングステン合金棒材料の品質を測る上で重要な指標です。タングステン合金棒の密度は通常  $17.0\sim 18.5\text{ g/cm}^3$  の範囲で、具体的な値はタングステン含有量と合金元素の割合によって異なります。
- **比重**とは、物質の密度と水の密度の比です。水の密度は  $1\text{ g/cm}^3$  なので、タングステン合金棒の比重は基本的にその密度と等しくなります。

密度を正確に制御することで、材料が正確な重量配分要件、機械的強度、電磁シールド効果などの期待される物理的特性を実現できるようになります。

密度偏差が大きすぎると、製品性能に変動が生じ、深刻な場合には部品の組み立てや適合、最終製品の安全性に影響を及ぼします。

#### 2.1.2 密度制御の重要な要素

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **原材料成分比率:** タングステン含有量が高いほど、密度は高くなります。タングステンと合金元素（ニッケル、鉄、銅など）の適切な比率が密度制御の基本となります。
- **焼結プロセスのパラメータ:** 温度、時間、雰囲気制御は密度に大きな影響を与えます。焼結温度が低すぎると、気孔率の増加と密度の低下につながりやすく、焼結温度が高すぎると過燃焼を引き起こし、材料性能が低下する可能性があります。
- **粉末の粒子サイズと均一性:** 細かい粉末と均一な混合により、密度が向上し、多孔性が低減し、材料の密度が高まります。
- **冷間加工と熱処理:** 適切な鍛造、押し出し、熱処理のプロセスにより、材料の内部多孔性がさらに排除され、密度が向上します。

### 2.1.3 寸法精度管理

タングステン合金棒とは、長さ、直径、外形寸法が設計値とどの程度ずれているかを指します。高精度の寸法管理により、加工、組立、使用におけるタングステン合金棒の安定性と信頼性が確保されます。

- **寸法公差**は通常、顧客の要求と規格に基づいて決定されます。一般的に、直径公差は $\pm 0.01$  mm から $\pm 0.05$  mm の範囲で制御できます。
- **表面粗さ**も寸法精度の一部です。良好な表面状態は加工の難易度を低減し、部品の性能を向上させます。
- 高度な加工設備と測定機器（三座標測定機、レーザー直径ゲージなど）を使用して、高い寸法精度と一貫性を確保します。

### 2.1.4 寸法精度管理のための技術的手段

- **CNC 加工設備:** 高精度 CNC 旋盤、グラインダーを使用して加工し、安定した寸法精度を確保します。
- **オンライン検出およびフィードバック制御:** 生産プロセス中に自動測定システムを使用して、寸法の偏差をリアルタイムで監視し、調整を行います。
- **熱処理プロセスの最適化:** 熱処理中の変形を制御し、寸法制御の損失を回避します。
- **厳格なプロセス仕様:** 切断、研削、研磨などのプロセスを含み、処理の各ステップが寸法要件を満たすことを保証します。

#### まとめ

タングステン合金棒の高性能を保証する基礎は、その密度精度です。密度精度は、材料の機械的特性と応用効果に直接影響します。寸法精度の厳格な管理は、製品の加工性能と最終組立の信頼性を保証します。原材料比率、プロセスパラメータ、そして高度な加工・試験技術を最適化することで、タングステン合金棒の物理的・機械的特性が設計要件を満たすことを効果的に保証します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.2 引張強度、降伏強度および伸び

タングステン合金棒は、実用用途における荷重耐性の重要な指標であり、中でも引張強度、降伏強度、伸びは、材料の強度と塑性を評価するための重要なパラメータです。これらの性能パラメータを理解し、管理することで、製造および使用中のタングステン合金棒の安全性と信頼性を確保することができます。

### 2.2.1 引張強度

引張強度とは、引張試験において材料が耐えられる最大応力を指し、材料の破壊抵抗能力を反映しています。タングステン合金棒の引張強度は通常高く、典型的には 600～1200MPa の範囲ですが、具体的な値は合金組成、製造工程、熱処理状況によって影響を受けます。

- 一般的に、タングステン含有量が多いと材料の引張強度が増加しますが、タングステン比率が高すぎると靱性が低下する可能性があります。
- 合理的な合金設計と熱処理プロセスにより、高い強度を確保しながら材料の可塑性と靱性を向上させることができます。
- 引張強度に優れたタングステン合金棒は、大きな引張荷重を受ける機械部品や構造部品に適しています。

### 2.2.2 降伏強度

降伏強度とは、材料が応力を受けた際に永久塑性変形を起こし始める応力値であり、材料の弾塑性限界を反映しています。タングステン合金棒の降伏強度は通常、引張強度よりもわずかに低く、一般的に 400～900 MPa の範囲です。

- 降伏強度は、実際の用途における材料の安全マージンに影響します。
- タングステン合金ロッドの場合、降伏強度が高いほど、使用中に永久変形することなく、より大きな作業応力に耐えることができます。
- 焼結温度とその後の熱機械処理を最適化することで、降伏強度を効果的に向上させることができます。

### 2.2.3 伸長

伸びとは、材料が破断するまでに塑性変形する能力のことで、通常はパーセンテージで表され、材料の靱性と可塑性を測定するための重要な指標です。タングステン合金棒の伸びは一般的に低く、通常は 1% から 10% の範囲です。

- 伸びが低いということは、材料が脆くて破損しやすいことを示し、伸びが高いということは、材料の塑性変形能力が優れていることを示します。
- タングステン合金にニッケルや鉄などの合金元素を加えると、伸びが向上し、脆性割れが発生しにくくなります。
- 伸びの増加は、複雑な作業条件下でのタングステン合金棒の成形と安全な使用に役立ちます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.2.4 機械的性能に影響を与える要因

- **組成比:** タングステンの含有量が多いほど強度は高くなりますが、伸びは低下する場合があります。ニッケルや鉄などの合金元素を添加すると靱性が向上します。
- **焼結プロセス:** 焼結温度、時間、雰囲気は材料の微細構造と密度に直接影響し、強度と可塑性に影響します。
- **熱処理と機械加工:** 焼鈍、時効、機械加工（鍛造、押し出し）などの適切な熱処理により、材料の内部構造を調整し、機械的特性を向上させることができます。
- **粒度:** 細かく均一な粒構造は、強度と靱性の向上に貢献します。

### まとめ

タングステン合金棒の引張強度、降伏強度、伸びは、その総合的な機械的特性を測る重要な指標です。組成設計とプロセス制御を最適化することで、タングステン合金棒は高い強度を確保しながら適切な可塑性を得ることができ、様々な産業用途の材料性能要件を満たすことができます。これらの性能パラメータを習得し、制御することは、タングステン合金棒の品質保証と用途開発にとって不可欠です。

## 2.3 硬度と耐衝撃性

タングステン合金棒の硬度と耐衝撃性は、耐摩耗性と耐損傷性を評価する上で重要な指標であり、複雑な使用条件下での材料の安定性と耐用年数を確保する上で重要な役割を果たします。硬度と耐衝撃性を適切に管理することは、タングステン合金棒のバランスの取れた性能を実現するための重要な手段です。

### 2.3.1 硬度

硬度は、材料が局所的な塑性変形や摩耗に抵抗する能力を反映し、通常はブリネル硬度 (HB)、ロックウェル硬度 (HRC)、ピッカース硬度 (HV) などの方法を使用して測定されます。

- タングステン合金棒の硬度は一般的に **200~400 HB** の範囲にあり、具体的な値はタングステン含有量や合金元素の種類と割合によって異なります。
- 通常、タングステン含有量が多いと硬度も高くなりますが、ニッケルや鉄などの合金元素を添加すると、硬度と靱性のバランスを調整できます。
- 硬度の高いタングステン合金は、耐摩耗性部品や傷つきにくい部品の製造に適しています。
- 熱処理（時効処理など）により硬度をさらに高めることも可能。

### 2.3.2 衝撃靱性

耐衝撃性は、突然の外力に対して材料が破壊することなく抵抗する能力であり、通常はシャルピー衝撃試験またはアイゾット衝撃試験によって評価されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- タングステン合金棒は一般に中程度から良好な耐衝撃性を持ち、典型的な衝撃吸収エネルギーは **5 ~ 20 J/cm<sup>2</sup>**の範囲です。
- 耐衝撃性は、材料の粒子構造、合金元素、熱処理プロセスによって大きく影響されます。
- 合金にニッケルや鉄などの元素を加えると、材料の靱性と耐衝撃性が大幅に向上し、脆性破壊のリスクが軽減されます。
- 最適化された熱機械加工（鍛造、押し出しなど）も耐衝撃性の向上に役立ちます。

### 2.3.3 硬度と耐衝撃性のバランス

タングステン合金ロッドでは通常、硬度と耐衝撃性の最適なバランスを見つける必要があります。

- 硬度が高すぎると耐摩耗性は向上しますが、材料が脆くなり、耐衝撃性が低下する可能性があります。
- 適切な硬度と優れた靱性を組み合わせることで、材料は耐摩耗性があり、高強度の使用環境下でも壊れにくいことが保証されます。
- タングステン合金棒においては、合金組成の設計、焼結パラメータの制御、熱処理および冷間加工手順の最適化などが、性能バランスを実現するための鍵となります。

#### まとめ

硬度と耐衝撃性は、タングステン合金棒の物理的・機械的特性における重要な側面です。

適切な材料配合とプロセス制御により、高い硬度と優れた耐衝撃性を兼ね備えたタングステン合金棒を得ることができ、様々な産業分野における材料の耐摩耗性と耐損傷性に対する要求を満たすことができます。適切な性能バランスは、タングステン合金棒のアプリケーション信頼性と耐用年数を向上させます。

## 2.4 熱伝導率、熱膨張係数および高温性能

タングステン合金棒は、多くの産業分野で広く使用されており、特に高温・熱負荷環境において顕著です。その熱伝導率、熱膨張係数、そして高温性能は、材料の安定性と耐用年数に直接影響を及ぼします。これらの熱物性を理解し、最適化することが、高性能タングステン合金製品を設計する鍵となります。

### 2.4.1 熱伝導率

熱伝導率とは、物質が熱を伝達する能力のことです。タングステン合金の熱伝導率は、純タングステンと他の合金材料の中間で、通常は **70~120 W/(m·K)**の範囲です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- タングステン自体は優れた熱伝導率（約  $170 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ）を持っていますが、ニッケルや鉄などの合金元素を加えると全体の熱伝導率は低下します。
- タングステン合金は、電子ラジエーター、高温工具、熱交換装置など、急速な熱放散を必要とする多くの用途に適合します。
- 材料の密度と粒構造は熱伝導率に大きな影響を与えるため、密度を向上させて熱伝導率を最適化するには、焼結および熱処理プロセスを制御する必要があります。

#### 2.4.2 熱膨張係数（CTE）

熱膨張係数は、温度変化に応じて物質がどの程度膨張するかを示します。タングステン合金の熱膨張係数は比較的低く、約  $4.5 \times 10^{-6} \sim 6.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  です。

- タングステン合金は熱膨張係数が低いため、高温環境下でも寸法変化が小さく、熱応力も低いため、精密機器や高温構造部品などに適しています。
- 合金元素を加えると熱膨張係数はわずかに増加しますが、それでも多くの一般的に使用される金属材料（銅やアルミニウムなど）よりもはるかに低くなります。
- 熱膨張係数の安定性は、溶接、組み立て、使用中の熱疲労亀裂を防ぐために非常に重要です。

#### 2.4.3 高温性能

タングステン合金棒は、高い融点、優れた高温強度、耐熱疲労性など、優れた高温特性を備えています。

- タングステンの融点は  $3422^\circ\text{C}$  と高く、タングステン合金の融点はそれよりわずかに低いものの、 $1500^\circ\text{C}$  を超える環境でも良好な機械的特性を維持できます。
- 高温での耐酸化性は純タングステンより若干劣るため、酸化による損傷を防ぐために表面をコーティングするか、保護雰囲気を使用する必要があります。
- タングステン合金は航空宇宙産業、軍事産業、高温炉の製造に広く使用されています。
- 熱疲労性能は、加熱と冷却の繰り返しサイクルにおける材料の寿命を決定します。材料の組成と微細構造を最適化することで、熱疲労耐性を向上させることができます。

#### まとめ

タングステン合金棒は優れた熱伝導性と低く安定した熱膨張係数を有しており、高温環境下でも優れた性能を発揮します。また、高温強度と熱疲労特性に優れているため、過酷な作業条件下での使用においても信頼性の高い保証を提供します。合理的な材料設計とプロセスの最適化により、タングステン合金棒の熱物性をさらに向上させ、よりハイエンドな分野のニーズを満たすことができます。

#### 2.5 電気的特性、磁気応答および耐放射線性

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金棒は、電子機器、磁気シールド、原子力産業といった特定の特殊分野で重要な用途を有しています。その電気的特性、磁気応答性、耐放射線性は、材料の適用性を評価する上で重要な指標です。これらの特性を習得することで、材料設計を最適化し、その応用範囲を拡大することができます。

### 2.5.1 電気的特性

タングステン合金の硬度は合金組成によって大きく左右され、通常は純粋なタングステンよりは低くなりますが、他の重金属合金よりは高くなります。

- 純粋なタングステンの電気伝導率は約  $18 \times 10^6 \text{ S/m}$  と比較的高いのですが、タングステン合金の電気伝導率はニッケルや鉄などの合金元素の存在により、一般的に  $5 \sim 12 \times 10^6 \text{ S/m}$  まで低下します。
- タングステン合金の抵抗率は純タングステンよりも高く、抵抗素子や電極材料など、一定の抵抗だけでなく高い強度も求められる用途に適しています。
- 組成比と熱処理プロセスを最適化することで、電気特性を向上させ、強度と導電性のバランスを実現できます。

### 2.5.2 磁気応答

タングステン自体は常磁性材料です。タングステン合金の磁気特性は、主に合金元素の種類と含有量によって決まります。

- 鉄族元素（鉄やニッケルなど）を添加すると、合金の磁気応答が強化され、特定の強磁性または常磁性を示す場合があります。
- タングステン合金は、磁気シールド材料および磁場環境における安定性に影響を与えます。
- 一部の用途では、磁場干渉を避けるために、磁気応答の低いタングステン合金が好まれます。

### 2.5.3 耐放射線性

タングステンおよびタングステン合金は、原子番号と密度が高く、優れた耐放射線性を備えているため、原子力産業や放射線防護の分野で広く使用されています。

- タングステン合金は中性子やガンマ線などの電磁放射線に対する遮蔽効果が優れており、原子炉保護材料や放射性機器保護カバーなどによく使用されます。
- 通常、合金元素の添加によって耐放射線性が大幅に低下することはありませんが、放射線の浸透を防ぐために合金の均一性と密度に注意を払う必要があります。
- タングステン合金は、照射環境において優れた構造安定性と放射線損傷耐性を示し、長期使用に適しています。

### まとめ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金棒は、エレクトロニクス、磁気シールド、原子力産業分野への応用の基礎を築いています。合金組成とプロセスパラメータを調整することで、性能を最適化・カスタマイズし、様々な産業環境のニーズに対応し、材料の総合的な利用価値を高めることができます。

## 2.6 耐食性と化学安定性の分析

タングステン合金棒は、様々な産業環境において化学媒体や湿潤空気にさらされます。その耐食性と化学的安定性は、材料の長期にわたる信頼性の高い使用を保証する上で重要な特性です。タングステン合金の耐食性に関する詳細な分析は、材料選定と保護対策の設計に役立ちます。

### 2.6.1 耐食性

タングステン合金は優れた耐食性を持ち、主に以下のような特徴があります。

- **媒体に対して強い耐性があり**、特に中性または弱酸環境で優れた性能を発揮し、化学装置および機器部品に適しています。
- **タングステンの表面に安定した酸化膜が形成され**、腐食性媒体を効果的に隔離し、材料のさらなる腐食を遅らせることができます。
- 強酸化酸（硝酸、過塩素酸など）では、タングステン合金の耐腐食性が損なわれる可能性があるため、保護対策を講じる必要があります。
- 合金元素（ニッケルや鉄など）の含有量と分布は、タングステン合金の全体的な耐食性に影響を与えます。均一な合金構造は、腐食の均一性と耐食性の向上に役立ちます。

### 2.6.2 化学的安定性

タングステン合金は、様々な環境下でも化学的性質が変化しにくいという特性を持っています。主な特徴は以下のとおりです。

- **融点が高く、熱的に安定しているため**、高温や過酷な環境でも安定しており、分解したり変形したりしにくいです。
- 水やアルカリ溶液など、ほとんどの一般的な化学媒体に対して優れた安定性を示します。
- 空気中および室温では、タングステン合金の表面の酸化膜がさらなる酸化を防ぎ、材料の耐久性を高めます。
- 強酸や強アルカリなどの極端な環境で使用する場合は、安定性を向上させるために材料保護層や特殊なプロセスが必要になります。

### 2.6.3 耐食性と化学的安定性に影響を与える要因

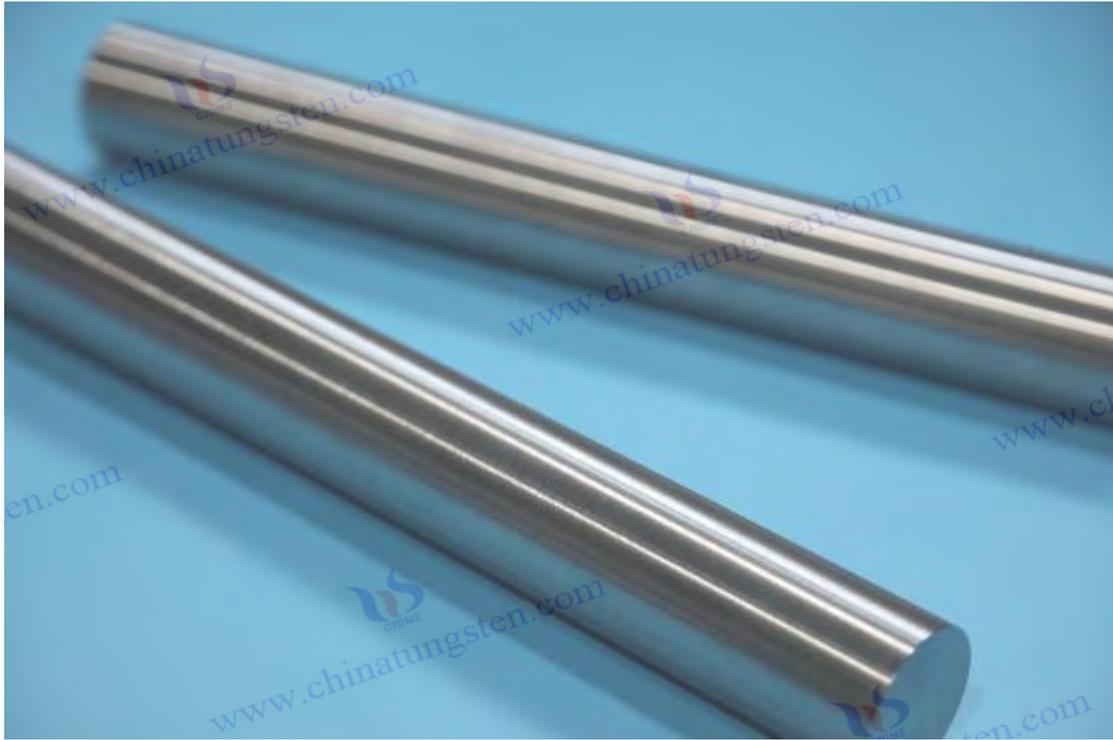
- **合金の組成と微細構造**:合金元素の種類と分布は、酸化膜の形成と安定性、ひいては腐食挙動に影響します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **表面处理:** 研磨、スプレー、コーティング処理により、材料の耐食性を効果的に向上させることができます。
- **環境条件:** 温度、媒体の濃度、pH 値などは、腐食速度と材料の寿命に直接影響します。
- **製造プロセス:** 高密度で均一な微細構造により、腐食ポイントが低減し、耐用年数が延長されます。

#### まとめ

タングステン合金棒は優れた耐食性と化学的安定性を備え、様々な過酷な環境での使用に適しています。合金組成の合理的な設計、製造プロセスの最適化、表面保護対策の採用により、タングステン合金棒の耐食性と耐用年数をさらに向上させ、様々な産業分野のニーズを満たすことができます。



### 第3章 タングステン合金棒の製造および成形技術

#### 3.1 原料の調製と粉末特性

タングステン合金棒の品質は、使用する原料の純度、粒度分布、形態、混合均一性に大きく依存します。高品質な原料調製と粉末特性管理は、タングステン合金棒の優れた物理的・機械的特性と安定性を実現するための基礎となります。本セクションでは、タングステン合金棒の製造における原料の選定、前処理、粉末調製、そしてそれらの特性が後続工程および製品性能に与える影響について詳しく説明します。

##### 3.1.1 タングステン粉末の供給源と種類

タングステン合金棒の製造における中核原料です。一般的に使用されるタングステン粉末には以下のものがあります。

- **化学的に還元されたタングステン粉末:** タングステン酸を水素中で還元することによって得られ、高純度で粒子形態が良好であり、高性能タングステン合金の製造に適しています。
- **炭素熱還元タングステン粉末:** 炭素熱還元法で製造され、コストは低いですが、不純物含有量が比較的高く、粒度分布が広い。
- **スプレー乾燥タングステン粉末:** 均一な粒子と規則的な粒子形態を持つ高品質のタングステン粉末を製造するために使用され、その後のプレスおよび焼結に便利です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **球状タングステン粉末:** プラズマ球状化技術などの技術で製造され、流動性と嵩密度に優れ、粉末冶金高性能タングステン合金に適しています。

タングステン粉末を選択する際には、特定のプロセス要件とパフォーマンス基準を満たすために、純度、粒子サイズ、形態、価格などの要素を総合的に考慮する必要があります。

### 3.1.2 合金元素粉末の選択

タングステン合金には通常、ニッケル、鉄、銅などの合金元素が添加され、粉末状のタングステン粉末と混合されます。合金粉末の粒子径と形態は、混合均一性と最終的な材料特性に大きな影響を与えます。

- **ニッケル粉末:** 均一な粒子サイズの球状ニッケル粉末が一般的に使用され、混合の均一性と焼結密度の向上に役立ちます。
- **鉄粉:** 不純物が材料特性に影響を与えないように、高純度で酸素含有量の少ない鉄粉を使用します。
- **銅粉:** 球状またはフレーク状の銅粉が一般的に使用されます。タングステン銅合金の製造においては、優れた熱伝導性が特に重要です。

合金元素粉末は均一な粒子分布を維持し、凝集を避けて、微視的スケールでの合金組成の均一性を確保する必要があります。

### 3.1.3 粉末前処理プロセス

粉末前処理は、粒子の性能と混合効果を向上させるために不可欠です。一般的な前処理方法には以下のものがあります。

- **乾燥処理:** 粉末表面に吸着した水分を除去し、焼結工程中に気孔が形成されるのを防ぎます。
- **選別とグレーディング:** 異なる粒子サイズの粉末をふるいにかけて分離し、均一な粒子サイズ分布を持つ混合粉末を得て、圧縮密度を向上させます。
- **表面活性化:** 粉末を機械的または化学的に活性化して、粒子間の結合力を向上させ、焼結密度を高めます。
- **混合と均質化:** ボールミル、ミキサーなどの機器を使用して、長時間均一に混合し、合金元素の均一な分布を確保し、性能の不均一を回避します。

### 3.1.4 粉体の粒度分布と形態

粒度分布は、タングステン合金棒の密度、機械的特性、加工性能に重要な影響を及ぼします。

- **微粉末**は焼結密度と機械的性質の向上に効果的ですが、粉末が細かすぎると凝集しやすくなり、流動性や加工性能に影響を与えます。
- **粗粉**は流動性が良好ですが、焼結時に気孔率が大きく、密度が低くなります。
- **理想的な粒度分布**は通常、広いスペクトルの分布、つまり、細かい粉末が粗い粉末の間の隙間を埋めて高密度を実現します。

外観:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **球状粉末**は流動性と嵩密度に優れ、圧縮および焼結プロセスに適しています。
- **不規則な粉末**は粉末間に空隙を形成しやすいですが、機械的な固定強度を向上させるのに役立つ場合があります。

### 3.1.5 粉末の混合と配合制御

タングステン合金の品質は、タングステンと合金元素の正確な比率と均一な混合に大きく依存します。W-Ni-Fe系などの典型的なタングステン合金では、タングステン含有量は通常90%を超え、合金元素の割合は比較的低くなります。

- 原材料の正確さを保つために高精度の計量機器を使用しています。
- 徹底的な混合には、効率的な均質化混合装置（ボールミル、ドラムミキサーなど）を使用してください。粉末の凝集や形態変化を防ぐため、時間と速度を最適化する必要があります。
- 混合工程中に、粉末の流動性と圧縮性能を向上させるために、適切な量の潤滑剤（ポリビニルアルコール、パラフィンなど）を添加することができます。

### 3.1.6 粉体の流動性と嵩密度

- **流動性**は粉末成形の均一性と成形効率に影響を及ぼします。流動性の低い粉末は成形密度の不均一性を引き起こしやすく、その後の焼結品質にも影響を与えます。
- **嵩密度**は、プレス時の粉末充填量とプレス密度を決定し、材料の密度と機械的特性を向上させる重要な要素です。
- 流動性と嵩密度は通常、粉末の形態、粒度分布、および前処理プロセスによって調整および制御されます。

### 3.1.7 粉体の化学的純度と不純物の管理

- 酸素、炭素、窒素、硫黄などの不純物元素は、タングステン合金の機械的特性と耐食性に大きな影響を与えます。
- 高純度の原材料とクリーンな生産環境を使用して、粉末の化学的純度を厳密に管理します。
- 酸化と不純物の吸着を減らすために、真空または保護雰囲気処理を使用します。

#### まとめ

原料の準備と粉末特性の最適化は、高性能タングステン合金棒の製造の基盤です。高純度、適切な粒径、良好な形態のタングステン粉末および合金元素粉末を合理的に選択し、科学的な前処理および混合プロセスを組み合わせることで、タングステン合金の密度と機械的特性を効果的に向上させ、その後の成形、焼結、熱処理プロセスのための強固な基盤を築くことができます。高品質の粉末システムは、タングステン合金棒の安定した性能と優れた品質を保証する鍵です。

## 3.2 粉末冶金プレスプロセス（成形、等方圧プレス）

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金棒の製造は粉末冶金プレス技術です。均一に混合されたタングステン合金粉末を一定の圧力下で成形することで、予備的な形状と密度を有する成形体が得られ、その後の焼結および熱処理の基礎となります。成形プロセスの選択とパラメータ制御は、成形体の密度、均一性、そしてその後の性能に直接影響を及ぼし、タングステン合金棒製造プロセスの重要な部分を占めています。

### 3.2.1 粉末プレスの基本原理

粉末冶金プレスとは、機械的圧力を用いて粉末粒子同士を接触・連結させ、気孔率を低減することで、一定の機械的強度を有するグリーンピレットを形成するプロセスです。このプロセスは主に、粉末粒子の再配列、塑性変形、および圧縮によって実現されます。

- **再配置段階:** 圧縮により粉末粒子が移動・再配置され、粉末間の隙間が減少します。
- **塑性変形段階:** 粒子は圧縮され、塑性変形して、さらに空隙を埋めます。
- **圧縮段階:** 最大密度に達し、固体を形成します。

粉末の形態、粒度分布、流動性は、プレス効果に大きな影響を与えます。

### 3.2.2 一軸プレス

圧縮成形は、タングステン合金棒の製造において最も一般的に用いられるプレス成形法です。粉末を一軸圧力で金型に押し込み、所望のブランクを成形します。

**プロセス特性:**

- この装置は構造が簡単で操作が簡単で、大量生産に適しています。
- 成形圧力は高く、通常 **200~600MPa** に達し、粉末密度が効果的に高まります。
- 金型設計は柔軟性があり、さまざまな断面形状とサイズの要件を満たすことができます。
- 力が一方向性で、密度分布が不均一であり、成形体の中心の密度が表面の密度よりも低いため、その後の焼結中に変形が生じる可能性があります。

**主なプロセスパラメータ:**

- **プレス圧力:** 圧力が高いほど密度は高くなりますが、圧力が高すぎると金型の摩耗や粉末の破損を引き起こす可能性があります。
- **プレス速度:** 適切な速度を制御することで、粉末粒子の破損を減らし、密度の均一性を向上させることができます。
- **保持時間:** 適切な保持時間により粉末粒子が完全に接触し、成形体の強度が向上します。
- **金型温度:** 金型を適切に加熱すると、粉末の可塑性が向上し、ひび割れや変形が減少します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**応用:**

圧縮成形は、大型で断面が単純なタングステン合金棒の製造に適しています。また、二次加工用のピレットの予備成形にも使用できます。

**3.2.3 等方圧加圧**

等方圧成形とは、油圧または空気圧媒体中で粉末体に均一な多方向圧力を加えることで、高密度かつ均一な密度分布を実現する成形方法です。

**プロセス特性:**

- 圧力が均等に伝達され、密度が均等に分散されるため、成形プロセス中の密度勾配の問題が効果的に回避されます。
- 圧力方向が多様で、ブランクのサイズや形状も柔軟であり、複雑な形状や高精度のタングステン合金部品に適しています。
- 設備投資額が高く、工程が比較的複雑で、生産効率は成形に比べて低いです。
- ) の 2 つのカテゴリに分けられます。

**主なプロセスパラメータ:**

- **圧力範囲:** 冷間等方圧プレスは通常 100~400MPa ですが、熱間等方圧プレスでは 100MPa を超える高温高圧環境に達することができます。
- **媒体の選択:** 圧力伝達媒体としては、液体（水、油など）またはガス（窒素など）がよく使用されます。
- **保持時間:** 粉末が完全に圧縮され変形していることを確認します。
- **温度制御:** 高温と組み合わせた熱間静水圧プレスにより粉末の焼結が促進され、密度と性能が向上します。

**応用:**

等方圧プレスは高性能タングステン合金棒、特に航空宇宙軍事産業や高級医療機器用の合金棒など、均一な密度と安定した機械的特性が求められる主要部品の製造に適しています。

**3.2.4 成形と静水圧プレスの長所と短所の比較**

プロジェクト	圧縮成形	等方圧加圧
設備投資	より低い	より高い
プレス速度	高速、大量生産に適しています	生産効率が遅く、比較的低い
密度の均一性	密度勾配は明らかであり、中央の密度は低い	均一な密度と欠陥の少なさ
複雑さを形成する	シンプルな断面に適しています	複雑な形状に適しています
完成品の機械的特性	安定しているが、その後のプロセス制御に依存	高密度、高性能

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

料金	低い	高い
----	----	----

### 3.2.5 主要技術とプロセス最適化

- 金型設計の最適化:** 多段プレスまたはプログレッシブプレス技術を使用して、密度勾配を減らし、グリーンボディの均一性を向上させます。
- 粉末前処理:** 粉末の流動性と潤滑性を向上させて、プレス中に粉末粒子の凝集や金型の傷を防ぎます。
- プレス工程パラメータの調整:** 粉末の破損や残留応力を防ぐために、圧力、速度、保持時間を適切に制御します。
- 等静圧プレス設備のアップグレード:** 高圧・高温一体型設備を採用し、等静圧プレス（HIP）を実現し、グリーン体の密度と機械的特性をさらに向上させます。
- プロセスの組み合わせ:** 圧縮成形と静水圧プレスを組み合わせて、生産効率と製品性能を向上させます。

### 3.2.6 グリーン抑制と環境保護要件

現代のタングステン合金生産では環境保護と安全性が重視されており、粉末冶金プレスプロセスも関連する環境保護基準に準拠する必要があります。

- 環境汚染と作業者の健康リスクを回避するための粉塵回収および処理。
- プロセス廃棄物の汚染を削減するために、無害または低毒性の潤滑剤を使用します。
- 生産プロセスにおけるエネルギー消費を管理し、エネルギー利用効率を向上させます。

#### まとめ

粉末冶金プレス工程は、タングステン合金棒の成形における重要な工程です。圧縮成形と静水圧プレスはそれぞれ独自の利点を持ち、異なる製品要件に対応します。プレス工程パラメータを適切に選択し最適化することで、ブランクの密度と均一性を確保するだけでなく、その後の焼結および熱処理のための強固な基盤を構築できます。技術の進歩に伴い、静水圧プレスと圧縮成形の融合、そして新たなグリーンプロセスの開発は、タングステン合金棒の製造技術を高効率、高品質、そして環境保護へと前進させることでしょう。

### 3.3 焼結技術と雰囲気制御

焼結はタングステン合金棒の製造において極めて重要なプロセスです。高温加熱により粉末粒子を拡散・結合させることで、粉末の緻密化と機械的特性の向上を実現します。適切な焼結技術と雰囲気制御は、材料の密度、構造、性能だけでなく、完成品の寸法安定性と品質の一貫性にも影響を与えます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3.1 焼結の基本原則とプロセス

焼結とは、粉末体を粉末材料の固体拡散温度域（通常は材料の融点の 70%～90%）まで加熱し、粒子間の拡散と結合を促進して緻密化を達成するプロセスです。主なメカニズムは以下のとおりです。

- **固体拡散:** タングステンおよび合金元素の原子が粒子界面で拡散し、粒界結合を形成します。
- **粒子表面エネルギーの低減:** 界面拡散によるシステムエネルギーの低減、細孔の閉鎖と緻密化の促進。
- **結晶粒成長:** 適切な結晶粒成長は機械的性質の改善に有益ですが、過度の成長は性能の低下につながります。

焼結プロセスは通常、予熱、保温、冷却の 3 段階に分かれており、温度曲線と保温時間を正確に制御する必要があります。

### 3.3.2 一般的な焼結技術

#### 3.3.2.1 雰囲気保護焼結

焼結は、タンングステン合金の酸化を防ぎ、合金元素の拡散と均一性を促進するために、保護雰囲気（水素、アルゴン、混合ガスなど）内で行われます。

- 水素雰囲気は表面酸化物を効果的に削減し、焼結密度を向上させます。
- アルゴン不活性雰囲気は、還元ガスが特定の合金元素に及ぼす悪影響を回避するのに適しています。
- 大気の高純度要件は高く、不純物ガス（酸素、窒素、水蒸気）の含有量は ppm レベル未満です。

#### 3.3.2.2 真空焼結

高真空環境は酸化を抑制し、材料の高純度と機械的特性を向上させます。真空焼結は、高級タンングステン合金製品の製造に適しています。

- 真空度は通常  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  Pa に達します。
- 焼結中に不純物ガスが混入するのを効果的に防止し、気孔や不純物の混入を減らします。
- 設備投資および運用コストが高額です。

#### 3.3.2.3 熱間等静圧加圧 (HIP)

高温焼結と高圧静水圧プレス技術を組み合わせることで、タンングステン合金粉末の超高密度化を実現できます。

- 高温と等方性高圧を同時に適用して、粉末の独立気泡焼結と気孔除去を促進します。
- 材料の密度と機械的特性が大幅に向上し、主要部品の製造に適しています。
- 設備が複雑で高価であり、高付加価値製品に適しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3.3 焼結プロセスパラメータ制御

- **焼結温度:** 通常 1450°C～1600°Cで制御されます。温度が低すぎると密度が不足し、高すぎると結晶粒の粗大化や成分偏析が生じる可能性があります。
- **断熱時間:** 材料の組成とブランクのサイズによって異なりますが、十分な拡散と緻密化を確保するために通常は 1 ～ 4 時間かかります。
- **加熱速度:** ブランクの過度の熱応力を防ぎ、ひび割れを回避するために、加熱速度を適切に制御します。
- **冷却速度:** 熱応力と構造変形を減らすために適度に遅い冷却。

### 3.3.4 焼結雰囲気の影響と制御技術

焼結雰囲気はタングステン合金棒の微細構造と特性に決定的な役割を果たします。

- **還元雰囲気(水素):** 粉末表面の酸化物層を除去し、粒子間の結合を促進します。
- **不活性雰囲気(アルゴン):** 高温での還元雰囲気によりタングステン合金の腐食を防ぎ、組成に敏感な合金に適しています。
- **雰囲気純度制御:** 高純度ガスを使用し、ガス精製装置を装備して酸素含有量を極めて低くし、酸化や窒化を防止します。
- **空気の流れと圧力:** 空気の流れと圧力を適切に調整して、均一な雰囲気と熱伝導効果を確保します。

### 3.3.5 焼結品質の監視と試験

- 熱分析（示差熱分析（DTA）や熱重量分析（TGA）など）は、焼結プロセスの温度と反応特性を監視するために使用されます。
- 焼結効果は、微細構造分析、多孔性測定、機械的特性試験によって評価されました。
- 大気の組成をリアルタイムで監視し、不純物ガスの侵入を防ぎます。
- 完成品のサイズと変形をテストし、製品が設計要件を満たしていることを確認します。

### まとめ

焼結技術と雰囲気制御は、タングステン合金棒の製造における核心であり、材料の密度、微細構造、機械的特性に直接影響を与えます。適切な焼結方法（雰囲気保護、真空、または熱間静水圧プレス）を選択し、精密なプロセスパラメータ制御と雰囲気浄化技術を組み合わせることで、タングステン合金棒の総合的な性能と安定性を大幅に向上させることができます。将来的には、設備技術と材料科学の発展に伴い、焼結プロセスはより効率のかつインテリジェントになり、タングステン合金棒の高品質な製造を確固たるものにするのが期待されます。

## 3.4 熱処理および緻密化プロセスの最適化

タングステン合金棒は、材料の密度向上、微細構造の最適化、そして機械的特性の向上に重要な役割を果たします。熱処理プロセスの合理的な設計と最適化は、焼結時の残留応力

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を効果的に除去するだけでなく、結晶粒の微細化と合金元素の均一な分布を促進し、タングステン合金の総合的な性能を大幅に向上させます。

### 3.4.1 熱処理の目的と機能

- **応力緩和:** 焼結および冷却中に発生する熱応力は熱処理によって解放され、成形体の割れや変形を防止します。
- **高密度化の促進:** 高温熱処理により拡散プロセスが促進され、微細孔が埋められ、材料の密度が高まります。
- **粒度制御:** 粒度を制御し、構造を改良し、靱性と強度を向上させます。
- **元素の均質化:** 合金元素の拡散を促進し、組成の偏析を回避します。
- **特性の改善:** 硬度、降伏強度、延性の向上など。

### 3.4.2 主な熱処理プロセスの種類

#### 3.4.2.1 溶体化処理

- 高温で溶解温度（通常 1200～1400°C）まで加熱すると、合金元素がマトリックスに完全に溶解します。
- 一定時間保温した後、急冷して均一な固溶体構造を固定します。
- 材料の均一性と機械的特性を効果的に向上させます。

#### 3.4.2.2 適時性処理

- 合金を中低温（500～800°C）に保つことで合金元素と強化相の析出が促進されます。
- 適切な延性を維持しながら、材料の硬度と強度を向上させます。
- 熟成温度と時間を適切に選択することが、パフォーマンスを最適化する鍵となります。

#### 3.4.2.3 アニーリング

- 低温焼鈍処理は、内部応力を除去し、材料の靱性を向上させるために使用されます。
- 温度は一般的に 600～900°C に制御され、材料の厚さに応じて絶縁時間を調整します。
- 後続の処理パフォーマンスの向上に適しています。

### 3.4.3 熱処理プロセスパラメータの最適化

- **温度制御:** 加熱温度を正確に制御し、過度の焼き付きや温度不足を防止します。
- **加熱速度:** 熱衝撃を避け、ひび割れのリスクを減らすためにゆっくりと加熱します。
- **保持時間:** 熱処理の効果が十分であることを確認し、長時間保持による粒成長を回避します。
- **冷却方法:** 材料の構造と性能に影響を与える性能要件に応じて、急速冷却または緩速冷却を選択します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 3.4.4 緻密化プロセスの補助技術

- **熱間等方圧加圧（HIP）熱処理:** 高温高压下で焼結と緻密化が同時に完了し、材料の密度が大幅に向上します。
- **HIP + 熱処理の組み合わせ:** HIP による緻密化とそれに続くターゲットを絞った熱処理によりパフォーマンスを最大化します。
- **パルス熱処理技術:** 急速パルス加熱により拡散を促進し、熱処理時間を短縮し、生産効率を向上させます。

#### 3.4.5 微細構造と性能の関係

- 熱処理により粒界拡散が促進され、多孔性が低減し、結合強度が向上します。
- 粒子の微細化により、材料の靱性と耐衝撃性が向上します。
- 合金元素が均等に分散されるため、全体的な機械的特性と耐腐食性が向上します。

#### 3.4.6 品質管理と試験方法

- 顕微鏡を使用して、熱処理前後の微細構造の変化を分析しました。
- 密度測定と多孔度分析により緻密化効果を評価した。
- 機械的特性試験は、熱処理が強度、硬度、延性に与える影響を検証します。
- 応力試験（X線残留応力分析など）により応力緩和効果を確認します。

#### まとめ

熱処理と緻密化プロセスは、タングステン合金棒の製造において重要な技術的要素です。熱処理プロセスのパラメータを科学的に設計し、高度な緻密化技術を組み合わせることで、材料の内部構造の均一性と機械的特性を効果的に向上させ、タングステン合金棒の性能に対するハイエンドアプリケーションの厳しい要求を満たすことができます。今後、新しい熱処理設備とインテリジェント制御技術の開発により、タングステン合金棒の熱処理プロセスは、より高精度、高効率、そして環境に優しい方向へと発展していくでしょう。

### 3.5 機械加工および表面処理技術（研削、研磨、旋削）

タングステン合金棒は通常、設計寸法と表面品質の要件を満たすために機械加工と表面処理が必要です。タングステン合金材料は高硬度で脆いため、加工が困難です。製品の精度と性能を確保するには、機械加工と表面処理プロセスの適切な選択と最適化が非常に重要です。

#### 3.5.1 タングステン合金棒の加工特性

- **高い硬度と靱性:** タングステン合金は硬度が HV300 以上で靱性に優れていますが、同時に材料が脆く、加工中に割れやすいという欠点があります。
- **性が強い:** タングステン合金を加工する場合、工具は急速に摩耗するため、硬度が高く耐摩耗性に優れた工具が必要です。
- **優れた熱伝導性:** 加工熱を急速に放散させますが、硬度が高いため、切削力が大きくなります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **加工上の難しさ:** 切断工程中に微小な亀裂、焼け、表面粗さが発生する可能性があります。加工パラメータを厳密に制御する必要があります。

### 3.5.2 研削

研削はタングステン合金棒の加工において最も一般的に使用される仕上げ方法であり、主に寸法精度と表面粗さを向上させるために使用されます。

- **研削工具:** ダイヤモンド研削ホイールまたは CBN 研削ホイールが使用されます。これらは、高い硬度と耐摩耗性を備えているため、タングステン合金の加工に適しています。
- **研削プロセスパラメータ:**
  - 砥石回転数: 材料の硬度と砥石材質によって決まりますが、通常は 20,000 ~ 40,000rpm です。
  - 送り速度: 過熱や火傷を防ぐため、ゆっくりと均一に送ります。
  - 冷却と潤滑: 過度の処理温度による材料の損傷を防ぐために、水性または油性の冷却剤を使用します。
- **研削方法:**
  - タングステン合金棒の直径加工には外面円筒研削が使用されます。
  - 内面穴研削は穴のサイズを調整するために使用されます。
- **注記:**
  - 過剰加工によるひび割れを回避するために、研削代を制御します。
  - 研削効率と表面品質を維持するために、定期的に研削ホイールをドレスしてください。

### 3.5.3 研磨

研磨は主にタングステン合金棒の表面仕上げを改善し、表面欠陥を減らし、耐食性と美観を向上させるために使用されます。

- **研磨材:** ダイヤモンド研磨ペーストまたはアルミナ研磨剤を使用し、研磨要件に応じてさまざまな粒子サイズを選択します。
- **研磨方法:**
  - 手動研磨は、小ロットや特殊部品に適しています。
  - 機械研磨装置は大規模生産に適しており、効率と一貫性が向上します。
- **研磨工程:**
  1. 粗研磨: 表面の大きな傷や凹凸を取り除きます。
  2. 微細研磨: 表面をさらに細かくし、滑らかさを向上させます。
  3. 超微細研磨: 鏡面効果が得られ、表面粗さ Ra は 0.01 $\mu$ m 以下に達します。
- **研磨メモ:**
  - 不純物による傷を防ぐために、研磨面を清潔に保ってください。
  - 材料の過度な摩耗を避けるために研磨時間と圧力を制御します。

### 3.5.4 旋削

旋削加工はタングステン合金棒の成形や寸法加工に重要な工程であり、シャフトやシリンダーなどの形状の加工に適しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ツールの選択:
  - 鋭い切れ味と耐摩耗性を確保するには、超硬工具またはダイヤモンド工具を使用します。
  - 切削力と振動を低減するには、タングステン合金の特性に応じて工具の形状パラメータを最適化する必要があります。
- 処理パラメータ:
  - 切断速度は一般的に低く、20~60 m/分に制御されます。
  - 送り速度と切削深さは、ワークの硬度と工具寿命に応じて調整されます。
  - 熱による損傷を防ぐために適切な冷却を行う必要があります。
- 旋削方法:
  - 粗旋削は余分な材料を素早く除去するために使用されます。
  - 仕上げ旋削は、設計された寸法と表面品質を実現するために使用されます。
- 旋回困難:
  - 中に欠けが生じる。
  - 加工時のひび割れや材料の剥がれを防止します。

### 3.5.5 表面処理技術の補助的役割

- 熱処理後の機械加工: 熱処理によって寸法変化が起こる場合が多く、機械加工により寸法精度を修正・向上させることができます。
- 表面強化処理: ショットピーニング、レーザー表面処理などの技術により表面硬度と耐摩耗性を向上させます。
- 防錆コーティング: タングステン合金棒の表面に保護層を施し、耐腐食性を高めます。

### 3.5.6 機械加工および表面処理の品質管理

- 寸法検出: 3 座標測定機 (CMM)、レーザー直径ゲージなどの機器を使用して寸法精度を確保します。
- 表面粗さの検出: 粗さ計を使用して測定し、設計指標が満たされていることを確認します。
- 微細構造検査: 加工後の表面構造の変化を分析し、熱影響部の発生の有無を検出します。
- 性能試験: 加工技術が材料特性に与える影響を検証するための機械的特性および疲労寿命試験。

#### まとめ

機械加工および表面処理技術は、タングステン合金棒の製造において重要な部分を占めています。タングステン合金は高硬度で脆いため、適切な研削、研磨、旋削工程を選択し、最適化された加工パラメータと高度な設備を組み合わせることで、製品の寸法精度と表面品質を確保し、ハイエンド用途のニーズを満たすことができます。同時に、表面強化処理や防錆処理と組み合わせることで、タングステン合金棒の性能と寿命をさらに向上させることができます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.6 新しい製造技術：押し出し、圧延、積層造形

材料科学と製造技術の継続的な進歩により、伝統的な粉末冶金プロセスはタングステン合金棒の製造において主要な地位を占めていますが、密度と組織の均一性が限られている、成形の複雑さが低いなどの制限もあります。航空宇宙、軍事、医療などの分野における高性能タングステン合金棒の複雑な形状、高密度、優れた機械的特性のニーズを満たすために、近年、押し出し、圧延、積層造形などの新しい製造技術が徐々に導入され、急速に開発され、タングステン合金棒の製造方法が大幅に豊かになりました。

#### 3.6.1 押出技術

押し出しは、タングステン合金ピレットを高温または室温でダイ開口部を通して圧力をかけ、材料をダイ開口部に沿って塑性流動させて、所望の断面形状とサイズを得る連続成形プロセスです。

##### 押出プロセスの特性

- **大きな塑性変形:** 大きな塑性加工変形により、結晶粒が微細化され、材料の機械的性質が向上します。
- **密度の向上:** 押し出しプロセスにより、内部の気孔が閉じられ、組織の密度が高まります。
- **柔軟な形状:** 複雑な構造要件に合わせてさまざまな断面形状を加工できます。
- **高い生産効率:** 長尺棒の連続バッチ生産に適しています。

##### 押し出し法

- **直接押出:** ピレットと押出方向が同一で、設備構造が簡単で、大型材料に適しています。
- **間接押し出し:** ダイが移動し、ピレットは静止したままなので、摩擦と押し出し圧力が低減されます。
- **熱間押出:** 高温で押し出すことで材料の可塑性を向上させ、加工力を低減します。
- **冷間押出:** 室温での押出により、完成品の表面品質と機械的特性を向上させます。

##### 押し出しプロセスパラメータ

- 押し出し温度、速度、金型設計は完成品の品質に大きな影響を与えます。
- 押し出し比（断面積比）が大きいほど変形が完全となり、材料密度と性能が向上します。
- 潤滑剤は摩擦を減らし、表面品質を向上させるために使用されます。

##### 押出技術の応用

- 高密度のタングステン合金棒、特に大型で複雑な断面を持つタングステン合金棒の製造。
- 複数の押し出し工程を経て粒子がさらに微細化され、靱性と耐摩耗性が向上します。

#### 3.6.2 圧延技術

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

圧延とは、ローラーを使用してタングステン合金棒に圧力を加え、材料の塑性変形を引き起こし、断面サイズを縮小し、組織構造を改善する加工方法です。

#### 圧延工程の特性

- **強力な連続性:** バーやストリップの大量生産に適しています。
- **結晶粒微細化:** 塑性変形により結晶粒界の形成が促進され、材料の靱性が向上します。
- **高い寸法精度:** 複数の圧延パスによりサイズを正確に制御できます。
- **表面品質が良好:** 圧延後の表面は比較的滑らかで、その後の加工に便利です。

#### ローリング法

- **熱間圧延:** 高温で行われるため、材料の可塑性が高く、変形しやすい。
- **冷間圧延:** 室温で処理することにより表面硬度と強度を高め、機械的性質を改善します。
- **逆圧延:** 構造の均一性を向上させるために交互方向に圧延します。
- **マルチロール圧延:** 複雑な断面の成形に適しています。

#### 圧延工程パラメータ

- 圧延温度と速度は材料の構造と特性に直接影響します。
- 変形とギャップを制御するために、多パス圧延方式の設計は科学的である必要があります。
- ローラー材質と潤滑技術により、表面品質と機器寿命が保証されます。

#### 圧延技術の応用

- 細いタングステン合金の棒、ストリップ、シートを準備します。
- 寸法精度と表面品質に対する要求が高いタングステン合金製品に使用されます。

### 3.6.3 積層造形技術（3Dプリンティング）

付加製造技術、特に金属粉末レーザー溶融（選択的レーザー溶融、SLM）や電子ビーム溶融（EBM）などの3D印刷技術は、タングステン合金棒の個別カスタマイズと複雑な構造の製造に新たな道を開きます。

#### 積層造形の特徴

- **複雑な構造の製造:** 内部の空洞やグリッド構造など、従来のプロセスでは形成が難しい複雑な幾何学的形状を製造できます。
- **高い材料利用率:** 粉末を直接成形することで材料の無駄を削減します。
- **設計の自由度が高い:** 需要に応じて設計を迅速に調整できるため、製品開発サイクルが短縮されます。
- **機能統合:** 多機能複合構造の製造を実現できます。

#### 積層造形プロセスの課題

- タングステン合金は融点が高く、熱伝導率も高いため、溶融池の温度を制御することが困難です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- レーザーや電子ビームによる粉末の急速な溶融と冷却は、熱応力や亀裂を引き起こしやすくなります。
- 粉末の流動性と分布の均一性は成形品質に大きな影響を与えます。
- 設備コストが高く、プロセスパラメータが複雑であり、タングステン合金には特別な開発が必要です。

#### 技術の進歩

- 新しい高エネルギービーム源とスキャン戦略により、熱応力が軽減され、成形品質が向上します。
- 粉末の前処理と雰囲気制御の最適化により欠陥を削減できます。
- 後処理プロセス（熱間静水圧プレスなど）を 3D プリントと組み合わせて、材料特性を改善します。

#### 積層造形の応用展望

- 小ロットおよび非常に複雑なタングステン合金部品のカスタマイズ生産。
- 迅速なプロトタイピングと機能テストのサンプル。
- 航空宇宙産業、原子力産業などでは、複雑な構造や高性能なタングステン合金部品が求められています。

#### まとめ

タングステン合金棒の製造に多様な技術ルートを提供します。押し出しと圧延技術は、塑性変形によって結晶粒を微細化し、密度を高めるため、大量生産とサイズ制御に適しています。一方、積層造形は、構造設計の自由度と材料節約の利点により、複雑なタングステン合金部品の製造における将来のトレンドとなっています。これらの新技術を従来の粉末冶金プロセスと組み合わせ、協調的に応用することで、タングステン合金棒製造の高性能、多機能、インテリジェント化を促進することができます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

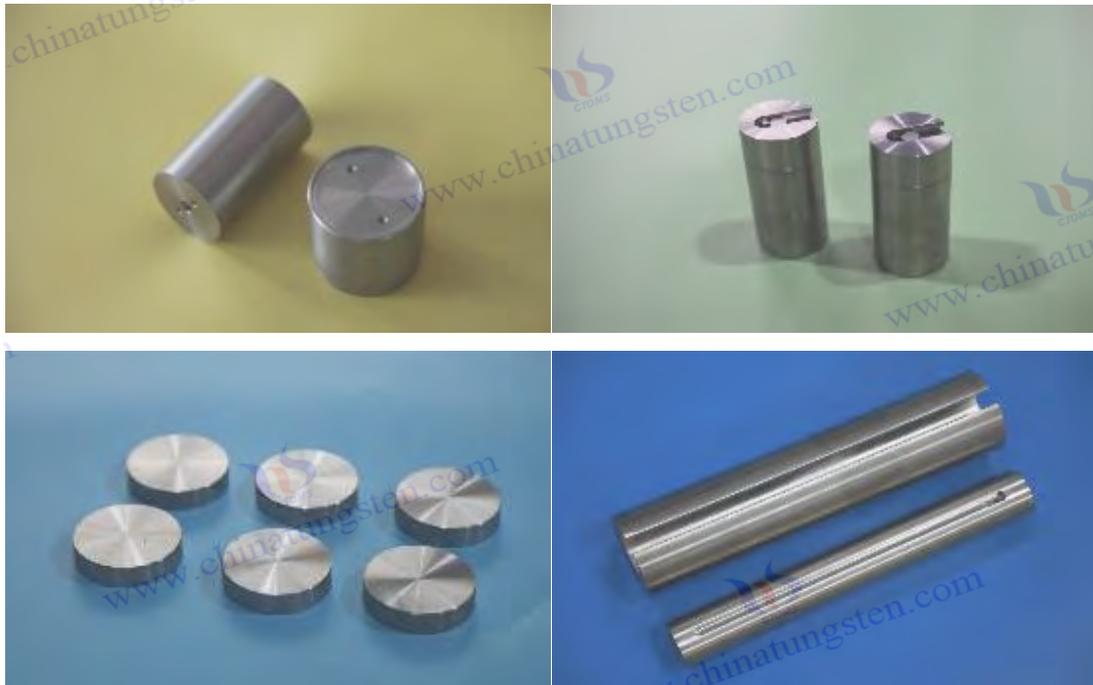
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 第4章 タングステン合金棒の性能試験と品質評価

### 4.1 外観および幾何寸法検査

高性能機能材料であるタングステン合金棒は、航空宇宙、原子力、医療、軍事といった重要分野で広く使用されています。その外観品質と幾何学的寸法精度は、その後の加工、組み立て、そして性能に直接影響を及ぼします。そのため、外観および寸法試験はタングステン合金棒の品質評価における最初のステップであり、製品が工場を出荷する前に必ず通過しなければならない重要な工程でもあります。

#### 4.1.1 外観品質に関する基本要件

タングステン合金棒の検査は、主に使用や信頼性に影響を与える表面の目に見える欠陥の有無に重点を置き、関連する国家規格（GB/T 21114、ASTM B777 など）またはユーザー定義の規格に従って評価されます。一般的な検査内容は以下のとおりです。

- **表面仕上げ:**表面には明らかな傷、穴、焼結亀裂、金属のバリ、酸化スケール、その他の欠陥があってはなりません。
- **色と一貫性:**表面は均一な金属光沢を持ち、酸化による変色、汚れ、シミなどがあってはなりません。
- **欠陥検査:**次の典型的な表面欠陥に焦点を当てます。
  - 微細な亀裂やひび割れ。
  - バリやエッジの損傷。
  - 焼結穴または緩んだ部分。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 錆、変色、油汚れ。
- 局所的なへこみ、反り、曲がり、その他の変形。
- **端面の状態:**両端は平らで、剥がれた縁、ひび割れ、明らかな材料不足がなく、端面の垂直度は標準の要件を満たしている必要があります。

#### 検出ツールと方法:

- **目視検査:**自然光または標準照明の下での目視検査または拡大鏡を使用した検査。
- **照明付き観察プラットフォーム:**強い光の背景を使用して、表面の小さなひび割れや色の違いを確認します。
- **表面クリーナー補助剤:**表面の油や汚れを取り除いた後、実際の金属表面の品質を観察します。

工場レベルの生産では、外観検査を実施するために「全数検査 + ランダム検査」の組み合わせが使用されることが多く、軍事または航空宇宙部品の場合は 100%目視検査が一般的に実施されます。

#### 4.1.2 幾何寸法の測定項目

幾何寸法試験は、タングステン合金棒が設計図面または契約書に規定された精度要件を満たしていることを確認するものです。従来の測定項目には以下が含まれます。

- **長さ:** バーの設計目的に応じて固定長さまたは任意の長さにすることができ、通常は $\pm 0.5$  mm 以上の精度で制御されます。
- **直径:** バーの真円度と公差は高く要求され、精度の適用は $\pm 0.01$  mm 以内に制御できます。
- **楕円度:**断面の 2 つの直径の差を制御します。通常は 0.05 mm を超えません。
- **垂直性/端部の平坦性:**タングステン合金棒の端面は棒の中心線に対して垂直である必要があります。
- **真直度(曲率):**ロッドの全長にわたる真直度の偏差を測定します。通常は「mm/m」で表されます(例:  $\leq 0.5$  mm/m)。
- **同心度(該当する場合):**中空棒鋼または旋削構造用鉄筋の場合は、内部および外部の同心度の偏差を確認します。

#### 試験機器:

- **ノギスとマイクロメーター:**長さや直径を素早く測定するのに使用され、予備的なサイズ確認に適しています。
- **外側マイクロメータ、内側マイクロメータ:**高精度の直径測定に使用します。
- **ダイヤルインジケータ + V フレーム:**真直度と曲率を測定するために使用されます。
- **レーザー直径ゲージ:**非接触高精度オンライン測定を実現し、自動化生産ラインに適しています。
- **座標測定機 (CMM):**複雑な幾何学的構造を正確に検査し、フルサイズの座標データを提供するために使用されます。

#### 4.1.3 寸法公差の等級と規格基準

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金棒の仕様は、製品の用途や国際規格によって異なります。一般的な標準仕様は次のとおりです。

- **中国国家規格 (GB/T 21114)** : さまざまなサイズのタングステン合金棒の直径、長さ、および許容差等級を規定します。
- **アメリカ規格 (ASTM B777)** : 高密度タングステン合金製品の寸法管理に関する詳細規定。
- **ユーザー定義の標準**: 航空宇宙産業や原子力産業の顧客は、国家標準よりも厳しい寸法や幾何公差を要求することがよくあります。

共通寸法公差基準:

ロッド径範囲	標準許容差 (mm)	精度許容差 (mm)
≤10 mm	±0.10	±0.02
10~30mm	±0.15	±0.03
30mm 以上	±0.20	±0.05

#### 4.1.4 自動テストとデータ記録

インダストリー4.0の発展に伴い、品質管理の効率を向上させるために自動テスト技術を導入する企業が増えています。

- **視覚認識システム**: ビデオと画像認識アルゴリズムを組み合わせ、オンラインでの外観欠陥認識を実現します。
- **レーザー サイズスキャナー**: 自動供給ラックと連携して、バーの長さや直径の完全自動検出を実現します。
- **品質データベースシステム**: テストデータをリアルタイムで記録し、データベースにアップロードしてバッチトレーサビリティ管理を実現します。

#### 4.1.5 テスト頻度と判断基準

テスト頻度は、生産バッチ、使用状況、顧客の要件に応じて設定されます。

- **バッチ納品**: GB/T 2828.1 規格に従った AQL 等級分けなどのサンプリング検査を採用しています。
- **軍事/原子力エネルギーの使用**: 完全な検査+ランダム検査、主要な寸法と主要な指標を1つずつテストする必要があります。
- **廃棄およびやり直しの基準**:
  - 表面に貫通亀裂、深い傷、広範囲の酸化、端面ブラストが見られる製品は不合格と判断されます。
  - 公差範囲を超え、二次加工で修正できない寸法も不適と判断されます。

まとめ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

外観検査および幾何寸法検査は、タングステン合金棒の品質管理における基本的な要素であり、製品の基本的な品質基準に関連し、後続用途における組立適合性および信頼性に影響を与えます。自動化された試験方法の導入と試験基準の改善により、現代のタングステン合金棒製造企業は、より高い品質の一貫性、より迅速な試験効率、そしてより完全なトレーサビリティ管理を目指しています。

## 4.2 密度および微細構造分析法

材料の均一性、密度、およびプロセスの成熟度を測定するための重要な指標であり、機械的特性、熱的特性、および耐用年数に直接影響を与えます。密度試験は、焼結密度と気孔分布を間接的に決定することができ、微細構造分析は、結晶構造、相分布、気孔欠陥などの重要な情報を明らかにすることができます。したがって、体系的な密度と組織評価メカニズムを確立することは、タングステン合金棒の高品質生産を確保するための鍵となります。

### 4.2.1 密度検出の意義と方法

タングステン合金棒の密度は通常、化学組成に基づいて計算されます。例えば、W-Ni-Fe系またはW-Ni-Cu系では、理論密度は17.0~18.5g/cm<sup>3</sup>に達します。実際の製品の密度、均一性、緻密性は、焼結品質、緻密化レベル、および既存の欠陥（閉気孔、介在物、剥離など）を反映します。

#### （1）アルキメデス法（排液法）

**原理:** アルキメデスの原理によれば、空気中と液体中で計量したサンプルの差から体積を計算し、質量を組み合わせることで密度を得ることができます。

**ステップ:**

- 浸漬液として脱イオン水またはエタノールを使用します。
- 乾燥重量（W1）と浸漬溶液中の重量（W2）を量ります。
- 密度を計算します： $\rho = W1 / (W1 - W2) \times \rho_{\text{liquid}}$ 。

**利点:** 操作が簡単で、ほとんどの固体サンプルに適しています。

**制限事項:** 閉じた細孔や不完全な表面を持つサンプルの場合は不正確です。

#### （2）ヘリウムピクノメータ法（ガス置換法）

**原理:** サンプル室と参照室の圧力差を測定することで、サンプルの体積と密度を計算します。

**利点:**

- 高精度（最大±0.001 g/cm<sup>3</sup>）
- 微多孔性材料を検出できます。
- 高級精密タングステン合金製品に最適です。

**代表的な装備:** AccuPyc、Micromeritics、その他の自動ガス濃度計。

#### （3）X線計算法（ボクセル密度）

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

産業用 CT や X 線スキャン装置と組み合わせ、画像再構成によりサンプルのボクセル密度を計算します。複雑な形状や触れることができない構造部品に適しています。

#### 4.2.2 微細構造分析の目的と主要指標

タングステン合金は、焼結、熱処理、そしてその後の加工過程における変化特性を反映します。顕微鏡分析によって、以下の主要な指標を評価することができます。

- 粒度と分布
- 合金元素相（W 相、Ni/Fe/Cu ベース相）の分布と相境界の明瞭さ。
- 気孔または介在物の個数および形態。
- 組織の均一性と方向性
- 第二相の析出と共晶構造の特性。

#### 4.2.3 微細構造分析技術

##### （1）光学金属組織顕微鏡（OM）

使用:

- 粒子の形態、気孔、マクロ構造を観察します。
- 相境界は標準的なエッチング溶液で視覚化できます。

サンプル準備プロセス:

- インレイ、研削、研磨;
- 化学エッチング（一般的な試薬: 塩化鉄 - 塩酸溶液）
- 観察に適した倍率を選択してください。

##### （2）走査型電子顕微鏡（SEM）

利点:

- 高解像度でナノスケールの構造を観察可能。
- エネルギー分散型分光計 (EDS) と組み合わせて元素分布を分析できます。
- 焼結穴、亀裂発生源、界面結合などの微小欠陥を検出します。

適用範囲:

- 合金界面の研究、粒界構造、微小亀裂の識別。
- 合金元素の局所偏析および拡散挙動の解析。

##### （3）透過型電子顕微鏡（TEM）

使用:

- タングステン合金中の析出相、転位、微細粒界などを研究します。
- ナノスケールの強化メカニズム、アモルファス相、界面反応層を分析します。

制限:

- サンプルの準備は複雑で、科学研究やハイエンドの材料開発に適しています。

##### （4）エネルギー分光法（EDS / WDS）

- EDS: SEM と組み合わせて使用される迅速な元素分析。
- WDS: 高精度、低含有量元素（酸素や炭素不純物など）の検出に使用されます。
- 各フェーズの構成と組織内の要素分布の均一性を分析するために使用されます。

##### （5）X 線回折（XRD）

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 目的:

- タングステン合金に含まれる結晶構造と相の種類を識別します。
- 酸化物や炭化物などの不純物の有無を検出します。
- 主相と第二相の含有率を定量的に分析できます。

#### 4.2.4 組織的欠陥と品質評価基準

一般的な微細構造欠陥には次のようなものがあります。

- 焼結穴または残留細孔。
- 元素の偏析により生じる「コアシェル」構造。
- 結合していない粒子または弱く結合した焼結界面。
- 第二相は不均一に分布しているか、または過剰に沈殿している。
- 熱処理による結晶粒の粗大化。

#### 判断基準:

- GB/T 13298（金属組織分析の一般規則）
- ASTM E1245（金属中の介在物の評価）
- 企業の内部統制基準: 通常、多孔度、粒径、介在物のグレードの許容範囲を設定します。

#### 4.2.5 密度と組織の関係の分析

密度試験と組織観察は相互に検証し、タングステン合金製品の品質を評価する重要な手段です。

- 高密度は、多くの場合、十分な焼結と低い多孔性に対応します。
- 組織の均一性が良好で粒子が細かいため、優れた機械的特性が得られます。
- 密度が低く、構造に多数の閉気孔が見られる場合、焼結温度が不十分であるか、粉末の圧縮が不良である可能性があります。
- 密度が適切であっても構造的な偏析がある場合は、原材料の不均一な分布または熱処理の不均一によって発生している可能性があります。

#### まとめ

密度と微細構造の分析は、タングステン合金棒の品質評価の中核であり、材料の内部構造特性と密度を十分に反映することができます。アルキメデス法、ガス比重法、X線法などを用いて正確な密度測定を行い、光学顕微鏡、SEM、EDS、XRDなどの手段を組み合わせることで、組織形態と組成を詳細に研究することで、製品が技術基準を満たしていることを保証するだけでなく、プロセスの最適化や新素材の研究開発に科学的根拠を提供します。高解像度の試験機器の普及と自動化された試験プラットフォームの導入により、タングステン合金棒の組織管理と品質保証は徐々に高いレベルへと進んでいます。

#### 4.3 機械的特性試験規格（ASTM、GB、ISO）

比重が高く、韌性に優れた機能性構造材料であるタングステン合金棒の機械的特性は、高

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応力、高荷重、高衝撃などの過酷な環境下における使用安全性を直接的に決定します。引張強度、降伏強度、伸び、硬度、衝撃靱性、疲労寿命などのパラメータは、その品質と工学的適用性を測定するための重要な基準です。試験結果の科学性と比較可能性を確保するために、機械的特性試験は国際的に認められた標準システム（ASTM、GB、ISO）に厳密に準拠して実施する必要があります。

#### 4.3.1 引張特性試験

タングステン合金棒の機械的特性を試験する最も基本的かつ一般的な方法。軸張力を加えることで、破断前の応力-ひずみ挙動を測定し、引張強度、降伏強度、伸びなどの主要な指標を取得します。

##### 試験基準および適用範囲:

- **ASTME8/E8M** 「金属材料の引張試験の標準方法」: 金属棒、板、小型試験片に適用可能。
- **GB/T 228.1** 「金属材料の引張試験 - パート 1: 室温での試験方法」: これは中国の一般国家規格です。
- **ISO 6892-1** 「金属材料の引張試験 - パート 1: 室温での試験方法」: 国際的に認められた規格で、基本的に **GB** と同等です。

##### 主要なパラメータの定義:

- **引張強度 (UTS)** : 材料が耐えられる最大応力 (MPa)。
- **降伏強度 (YS)** : 材料が塑性変形を起こす最小の応力。
- **伸び (EI)** : 試験片が破断する前の伸びであり、材料の靱性を測定する指標です。
- **断面収縮率 (Z)** : 破断部におけるネッキングの度合いであり、塑性を反映します。

##### サンプルの準備と条件管理:

- **サンプル形状**: 標準丸棒 ( $\Phi 6 \sim \Phi 12 \text{mm}$  など) または平棒。
- **荷重速度制御**:  $0.5 \sim 2 \text{mm/分}$  など
- **温度条件**: 通常は室温 ( $20 \pm 5^\circ \text{C}$ ) ですが、必要に応じて高温延伸も可能です。

##### 注記:

- タングステン合金の場合、クランプ部分は滑りや応力集中を防ぐように設計する必要があります。
- 剛性が高く、荷重精度が $\pm 1\%$ の電子式万能試験機を使用する必要があります。
- 伸張後、骨折のメカニズムを分析するために骨折の写真を撮る必要があります。

#### 4.3.2 硬度試験

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

硬度は、タングステン合金の局所的な塑性変形に対する抵抗力を評価する重要な指標であり、プロセス制御、製品の等級分け、品質の選別に広く使用されています。

#### 一般的なテスト方法と標準:

- **ブリネル硬度 (HB) :**
  - 中硬度および低硬度のタングステン合金に適しています。
  - 規格: ASTM E10 / GB/T 231.1;
  - 荷重範囲: 500~3000 kgf 、ボールヘッド直径 2.510 mm。
- **ロックウェル硬度 (HRC/HRB) :**
  - 完成した棒材の表面硬度試験に適しています。
  - 規格: ASTM E18 / GB/T 230.1;
  - タングステン合金は通常 60~80 HRB または最大 2040 HRC (熱処理状態によります) です。
- **ビッカース硬度 (HV) :**
  - 微小領域または小サイズのタングステン合金の微小硬度試験に使用されます。
  - 規格: ASTM E384 / GB/T 4340.1;
  - 用途: インターフェース、結晶粒微細化、マイクロアロイ構造評価。

#### その他の注意事項:

- 試験前に表面を鏡面仕上げに研磨し、くぼみが明瞭で測定可能であることを確認する必要があります。
- テストポイントは、エッジ、亀裂、毛穴から離れた場所に設置する必要があります。
- 高硬度タングステン合金の場合、硬質インデントと低荷重試験溶液の使用をお勧めします。

#### 4.3.3 衝撃靱性試験

衝撃試験は、動的荷重下における材料のエネルギー吸収能力を評価し、脆性破壊に対する耐性を反映します。これは、徹甲弾や動的荷重用途におけるタングステン合金の非常に重要な指標です。

#### 共通規格:

- **ASTM E23 / GB/T 229** : 金属シャルピー衝撃試験規格。
- **ISO 148-1** : 金属材料の衝撃試験規格。

#### サンプルの要件:

- 標準サイズ: 55 × 10 × 10 mm、V字型またはU字型の切り込み付き。
- ノッチのサイズと加工精度を厳密に管理する必要があります。
- サンプル数: 通常、バッチあたり 3 個を平均します。

#### 特別な指示:

- タングステン合金は脆いため、衝撃吸収エネルギーが低い (<10J) ことがよくあります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ために、一般に超微粒子またはマイクロ合金設計が採用されます。
- 衝撃後、破断面を金属組織学または SEM で分析し、脆性/延性破壊モードを特定できます。

#### 4.3.4 疲労およびクリープ性能試験（オプション）

極端な使用条件（航空宇宙慣性システムや原子炉部品など）では、タングステン合金棒には優れた疲労耐性と高温クリープ安定性も求められます。

##### 関連規格:

- **ASTM E466 / GB/T 3075** : 金属疲労試験方法（高サイクル疲労）
- **ASTM E139 / GB/T 2039** : 金属クリープ試験方法（高温での一定応力）。

##### アプリケーションの説明:

- 疲労試験は、周期的な応力を受ける材料の寿命を評価するために使用されます。
- クリープ試験は、多くの場合、高温（800～1000°C）および一定荷重で設定されます。
- どちらも、原子力、深宇宙探査、極超音速兵器の材料開発でよく使用されます。

#### 4.3.5 機械的特性試験結果の判定基準

タングステン合金棒の機械的特性については、規格によって要件が異なります。例えば、

プロジェクト	一般工業用グレード	軍事/航空宇宙グレード	医療/原子力グレード
抗張力	≥700 MPa	≥900 MPa	≥1000 MPa
伸長	≥5%	≥10%	≥12%
硬度（HRB）	70～85	75～90	78～92
衝撃靱性（J）	≥6 J	≥8J	≥10 J

具体的な判断基準としては、製品の設計図、技術協定書、入札仕様書などを参考にしてください。

##### まとめ

タングステン合金棒の検査は、国際的に権威のある標準システムに従って厳密に実施され、多国籍プロジェクトにおけるデータの正確性、トレーサビリティ、普遍性を確保する必要があります。ASTM、GB、ISOなどの規格は、引張、硬度、衝撃から疲労、クリープなど、試験内容の全チェーンを網羅しており、タングステン合金棒の品質検査と材料選定を導く中核的な基礎となっています。ハイエンド応用分野の継続的な拡大に伴い、検査方法の自動化、デジタル化、精度に対する要求も高まっています。

#### 4.4 金属組織学的分析と微細構造特性評価

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

金属組織分析と微細構造特性評価は、タングステン合金棒の内部構造と性能ポテンシャルを評価するための重要な手段です。材料内部の結晶粒形態、相分布、気孔、介在物などの特性を観察・測定することで、粉末冶金工程における緻密化度、合金元素の拡散均一性、熱処理効果、組織欠陥などを把握し、さらに使用挙動と信頼性を予測することができます。これは、品質管理、プロセス最適化、新素材研究開発における重要な鍵となります。

#### 4.4.1 金属組織分析の目的と意義

金属組織分析は、材料科学における基礎研究の重要な手段であるだけでなく、タングステン合金棒の製造実務においても以下の重要な役割を果たします。

- **焼結品質と多孔度を評価する：** 細孔の分布、サイズ、形態を観察して緻密化のレベルを決定します。
- **粒子のサイズと均一性を決定します。** 粒子が小さく均一な場合、強度と靱性が高くなる傾向があります。
- **相境界構造の特定：** W 粒子と Ni-Fe/Cu マトリックス相間の界面の明瞭さは、全体的な機械的特性に影響します。
- **微細な欠陥や介在物を発見します。** 亀裂の発生源、未熔融領域、不純物の蓄積などの問題を含みます。
- **元素の分布と析出挙動を研究する：** 合金元素の拡散や第 2 相の析出などの微細構造の変化を分析します。

#### 4.4.2 サンプル調製プロセス

タングステン合金は高硬度かつ高密度であるため、金属組織学的試料作製には高度な技術が求められます。標準的な試料作製手順は以下のとおりです。

1. **切断：** 過熱と微小亀裂を防ぐために低速ダイヤモンドカッターを使用します。
2. **取り付け：** 高温または低温の取り付け材料を使用して試料を固定します。これは研削操作に便利です。
3. **粗研磨：** 120 番のサンドペーパーから始めて、滑らかさを保つために徐々に 800 ~1200 番のサンドペーパーまで研磨します。
4. **精密研磨：**
  - 3  $\mu\text{m}$  、 1  $\mu\text{m}$  、 0.25  $\mu\text{m}$  のダイヤモンド研磨液を使用します。
  - 研磨後には傷、酸化斑、ブラシ跡などがあってはなりません。
5. **化学エッチング：**
  - 一般的なエッチング液の配合（参考）：
    - フッ化水素酸+硝酸+水（危険ですので安全にご注意ください）
    - 塩化鉄+塩酸+エタノール混合物；
  - 、粒子界面と相分布を明らかにするために、数秒から数十秒以内に制御されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.4.3 微細組織観察法

##### (1) 光学顕微鏡 (OM)

- 分解能範囲: 0.5 ~ 1 $\mu$ m ;
- 主な用途:
  - 粒子の観察およびサイズ測定。
  - 多孔性分布とマクロ欠陥の識別。
  - 相境界の形態と組織分布;
- 画像解析ソフトにより粒径や多孔度を自動計測できます。

##### (2) 走査型電子顕微鏡 (SEM)

- 解像度は 10nm 以上で、タングステン合金構造解析の中核ツールとなります。
- 対象コンテンツ:
  - W 粒子と Ni-Fe/Cu マトリックス界面の高倍率観察。
  - 微細な亀裂、微細な穴、介在物、融合不足、その他の欠陥を検出します。
  - エネルギー分散分光法 (EDS) と組み合わせて元素の空間分布を分析します。
- 破壊解析: 脆性または延性破壊特性 (へき開面、ディンプル、準へき開構造など) を判断するために使用されます。

##### (3) 透過型電子顕微鏡 (TEM)

- 超高解像度 (<1 nm) ;
- 研究内容:
  - 粒界構造と転位分布
  - 界面反応層または第 2 相の沈殿。
  - 原子レベルの構造解析と結晶歪みの研究。
- 適用範囲: 主に科学研究やタングステン合金のアップグレードおよび開発に使用されます。

##### (4) エネルギー分光法 (EDS / WDS)

- EDS は、多元素の定性および半定量分析を迅速に行うのに適しています。
- WDS (波長分散分光法) は、微量元素 (O、C など) の分析に適しています。
- SEM と組み合わせて、タングステン マトリックス内の Ni、Fe、Cu などの分布と拡散の均一性を調べるために使用されます。

##### (5) X 線回折 (XRD)

- 各金属の結晶構造と相の種類を確認するために使用されます。
- 酸化タングステンや炭化物などの不純物の有無を検出できます。
- 粒度推定とテクスチャ強度分析 (方向スキャン付き) をサポートします。

#### 4.4.4 粒径と相組成の評価基準

##### 粒度評価方法:

- GB/T 6394 「金属の平均粒径の測定方法」
- ASTM E 112 :標準比較チャートまたは画像分析による穀物等級の評価。
- $\mu$ m 未満) に分類されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 不均一な組織、粗大な結晶粒、粒界介在物は不適格事項です。

#### 相分析および定量的方法:

- 像を分割した後の各相の面積比。
- 典型的な W 相/Ni-Fe ベース相のグレースケールセグメンテーションと分布測定。
- EDS を画像解析ソフトウェアと組み合わせることで、局所的な成分の定量化が可能になります。

#### 4.4.5 微細構造と性能の関係の分析

微細な特徴	パフォーマンスへの影響
小さく均一な粒子	強度と靱性を向上させ、ひび割れの原因を減らす
W 粒子の分布は均一である	耐衝撃性と均一な荷重伝達に貢献
W/Ni-Fe 界面はしっかりと結合している	全体的な可塑性と衝撃強度を向上
高い多孔性または不均一な分布	強度と密度が低下し、ひび割れの発生源になりやすい
微小な亀裂/介在物が存在する	早期破損を引き起こし、疲労寿命を短縮する可能性がある
粗粒第二相の沈殿	応力集中点となり、機械的特性が低下する可能性がある

#### まとめ

金属組織学的分析と微細組織特性評価は、タングステン合金棒の原材料管理から最終製品の性能検証に至るまで、不可欠な手段です。光学顕微鏡、SEM、TEM、XRD などの技術を組み合わせることで、タングステン合金内部の組織進化則や微細欠陥を深く理解できるだけでなく、生産最適化や新製品設計に強力な技術サポートを提供することができます。画像認識や AI 支援分析技術の発展に伴い、タングステン合金の金属組織学的分析は自動化、定量化、インテリジェント化へと進化しています。

#### 4.5 化学組成分析 (ICP、XRF、ONH)

タングステン合金棒の化学組成は、その性能上限と信頼性を直接的に決定します。W-Ni-Fe や W-Ni-Cu などの高密度タングステン合金では、主要元素の配合割合（例えばタングステン含有量は通常 85%~98%）、不純物制御（例えば C、O、N、H、P、S）、微量元素（例えば Cr、Co、Mo など）が、合金の物理的、機械的、加工性、および使用特性に大きな影響を与えます。したがって、正確かつ包括的な化学組成分析システムを構築することは、製品の品質を確保し、標準規格と顧客要件を満たすための基本的な要素となります。

##### 4.5.1 化学組成分析の重要性

タングステン合金棒には以下のものがあります:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 合金グレードが規格に適合しているかどうかを確認します（ASTM B777 規格の A、B、C など）。
- 原料と製錬プロセスの安定性を検証します。
- 傾向を回避するために有害な不純物（O、N、C、S、P など）の含有量を制御します。
- 品の異常組成を分析する。
- 材料のトレーサビリティとバッチ品質管理をサポートします。

#### 4.5.2 主流の化学分析法の概要

方法カテゴリ	分析対象	特徴
ICP-OES / ICP-MS	金属元素（主成分+微量）	高感度、複数元素の同時分析に適しています
XRF（蛍光 X 線分光法）	金属主成分	高速かつ非破壊で、工場現場やバッチ分析に適しています
ONH 分析	酸素、窒素、水素	タングステンおよびその合金に適した高温熱分解法
CS アナライザー	炭素、硫黄	アーク燃焼法、高速かつ効率的
湿式化学分析	特定の要素	精度は高いが、効率は低く、汚染のリスクが高い

具体的な基準としては以下が挙げられます。

- ASTM B777、B702;
- GB/T 21114、GB/T 38792;
- 顧客または軍事/航空宇宙規格。

#### まとめ

タングステン合金棒は、マクロ主要元素、微量不純物、微量ガス元素を網羅し、合金の安定性、純度、一貫性を評価するための中核的な手段です。ICP-OES、XRF、ONH 分析装置などの最新の検出技術は、高精度、高スループット、自動化された組成制御を実現し、品質管理効率を大幅に向上させます。将来的には、インテリジェント製造の発展に伴い、これらの技術はオンライン監視、バッチトレーサビリティ、閉ループプロセス最適化においてもより広く利用されるようになるでしょう。

#### 4.6 表面粗さと欠陥検出（目視検査、CT）

タングステン合金棒の表面品質は、材料の寿命、精度、外観品質に直接影響を与えるだけでなく、その後の用途における放熱性能、応力集中、疲労亀裂の発生などにも密接に関係しています。そのため、表面粗さ管理と欠陥検出は、完成品の品質評価において無視できない重要なポイントです。検査技術の継続的な発展に伴い、従来の手作業による目視検査は、デジタル画像、3D CT、レーザー輪郭スキャンなどのハイエンドな手段と徐々に統合され、効率的で自動化された高精度な検査プロセスを実現しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.6.1 表面粗さ試験の意義と指標の定義

表面粗さは、ワークピース表面の微細な凹凸の程度を特徴付ける重要なパラメータです。粗さは、タングステン合金棒の組み立て、摩擦、摩耗、熱伝導性、疲労特性に影響を与えるだけでなく、コーティングの密着性や耐食性にも影響を与えます。

一般的な粗さパラメータ（GB/T 3505、ISO 4287 に準拠）:

パラメータ名	意味	ユニット
ラ	算術平均粗さは最も一般的に使用される指標である	μm
R	最大高さ（5点平均）	μm
R	全高（最高峰と最低谷の差）	μm
R	RMS 粗さ（スパイクに対してより敏感）	μm

#### 4.6.2 表面粗さ試験方法および装置

##### (1) 接触式粗さ計

- **原理:** プローブを表面に沿って移動させ、輪郭の変化を記録します。
- **代表的装置:** 日本ミットヨ SJ-210、ドイツマールベルトメーター;
- **利点:** 正確な測定、バッチ標準部品に適しています。
- **制限事項:** 柔らかい表面や反射率の高い表面には適していません。接触操作が必要です。

##### (2) 非接触型レーザー共焦点または白色光干渉計

- **原理:** レーザー/白色光干渉法を使用して 3D 等高線マップを作成します。
- **利点:**
  - 非接触、非破壊検査。
  - 高精度（ナノメートルレベル）
  - 広い範囲を素早くスキャンできます。
- **代表機種:** Keyence VK-X シリーズ、Zygo ネクスビュー、センソファア。

##### (3) 3Dプロファイルスキャナ/構造化光プロジェクター

- **用途:** バーの全体的な表面プロファイルの一貫性、段差、ピットなどを検出するために使用できます。
- **\*\*現場でのバッチテストや視覚的な品質検査に適しています。**

#### 4.6.3 表面欠陥検出技術とその応用

タングステン合金棒の成形または加工中に発生する可能性のある欠陥には、次のものがあります。

- 表面のひび割れ、傷、穴。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 酸化層、黒点、炭素残留物;
- 癒着、剥離、ピンホール;
- 許容範囲外の幾何学的変形または楕円形。

(1) 目視検査

- **規格:** GB/T 8170 / ASTM B777 における表面状態の説明。
- **方法:** 肉眼+拡大鏡 (3倍~10倍)
- **典型的な判断ルール:**
  - ひび割れや剥がれは許されません。
  - 表面の色の違いやわずかな摩擦跡は許容されます (適用レベルによって異なります)。
  - 特定の領域における欠陥サイズが一定の値 (例:  $\leq 0.5$  mm) を超えない。

(2) デジタルカメラ+画像認識システム

- 組立ラインのオンライン検出に適用。
- 機械学習アルゴリズムの助けを借りて、傷、穴、色の異常を自動的に識別できます。
- 精度は 95% 以上に達し、特に大規模な外観検査に適しています。

(3) 三次元 X 線コンピュータ断層撮影 (CT)

- **原理:** X 線多角度スキャンを使用して 3 次元ボリューム画像を再構築します。
- **検出可能なコンテンツ:**
  - 内部の気孔、内包物、亀裂、緩み。
  - 表面亀裂の深さと伸長方向。
  - 桿体の中心と端の組織の均一性。
- **代表機材:** Nikon、GE phoenix、Yxlon ;
- **解像度:** 最大 1~5 $\mu$ m、高級軍事製品、原子力、航空宇宙用タングステン合金棒の分析に適しています。

4.6.4 欠陥レベルの評価と品質の決定

様々な表面欠陥を評価するには、様々な応用分野の要件に応じた判断基準を策定する必要があります。以下は参考となる分類です。

欠陥の種類	軍用/原子力用タングステン合金	工業用タングステン合金
割れ目	禁止する	禁止する
ピット	$\leq 0.3$ mm	$\leq 0.8$ mm
酸化斑点	存在できない	わずかに存在する可能性がある
表面粗さ	$Ra \leq 0.4 \mu m$	$Ra \leq 1.6 \mu m$

関連する参照標準には次のものがあります。

- **GB/T 13306** : 金属表面欠陥の用語
- **ASTM E45/E 1245** : 介在物および欠陥の検出方法。
- **YS/T 582** : タングステン合金製品の品質検査規格 (業界標準)。

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

#### 4.6.5 自動化とインテリジェントテストの動向

現代のタングステン合金棒製造会社は、以下のものを徐々に導入しています。

- **オンライン外観検査システム:** CNC加工センターと同期して動作し、100%リアルタイムの外観品質検査を実現します。
- **AI画像認識プラットフォーム:** ディープラーニングに基づいて欠陥特徴モデルをトレーニングし、認識精度を向上します。
- **フルサイズのスキャンとイメージングモデリング:** レーザーまたは白色光スキャンにより、完全なバー表面トポロジを取得します。
- **品質ビッグデータ分析:** 欠陥追跡、機器の関連付け、プロセス反復の最適化。

これらの技術により、検出効率と品質安定性が大幅に向上し、高級タングステン合金棒の製造が「欠陥ゼロ」の方向へ発展するのに役立っています。

#### まとめ

表面粗さと欠陥検出は、タングステン合金棒を「機能性材料」から「精密構造部品」へと転換させる鍵です。接触・非接触粗さ測定、CT画像、視覚認識などの技術手段を駆使することで、材料の表面品質と内部欠陥を詳細に把握することができます。将来的には、インテリジェント検出、自動品質管理、データ駆動型欠陥予測が、タングステン合金棒のハイエンド製造における中核的な機能の一つとなるでしょう。

#### 4.7 非破壊検査技術（超音波、X線、磁性粒子）

タングステン合金棒は、航空、軍事、原子力、医療といった高信頼性が求められる分野で主に使用されており、これらの分野では内部品質と構造の完全性に対する要求は極めて高いです。従来の破壊検査では、ある程度の機械的・微視的データを取得できますが、棒全体の内部欠陥を完全に評価することはできません。そのため、タングステン合金棒のひび割れ、穴、介在物、緩みなどの隠れた欠陥を特定・評価するために、**非破壊検査技術（NDT、Non-Destructive Testing）**を活用することが、製品の安全性、信頼性、およびサービスの安定性を確保するために不可欠な手段となります。

このセクションでは、タングステン合金棒に適用できる代表的な非破壊検査法である**超音波検査（UT）**、**放射線検査（RT）**、**磁性粒子検査（MT）**の3つを体系的に紹介します。

##### 4.7.1 超音波検査（UT）

原理と利点:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超音波検査では、高周波音波（1～10MHz）を用いて材料内を伝播させます。界面、気孔、亀裂などの不連続構造に遭遇すると反射信号が生成され、これをトランスデューサーが受信・分析することで欠陥の有無を判断します。

- 合金の内部欠陥、特に気孔、介在物、非緻密化領域の検出に適しています。
- 強力な浸透性と大きな検出深度、中・太径バー（Φ6～Φ100 mm）に適しています。
- 自動スキャン・検出を実現できます。

#### 検出方法:

- 縦波（直線プローブ）または横波（角度プローブ）を使用します。
- マルチチャンネルシステムにより、全表面および多角度のカバレッジを実現します。
- ハイエンド機器には、\*\*A スキャン（振幅対時間）および C スキャン（2D 画像）\* 機能が搭載されています。

#### 標準基準:

- **ASTM E114 / E 2375** :金属材料の超音波検査の規格。
- **GB/T 12604.1、GB/T 5777** : 金属鍛造品/棒鋼の超音波検査方法。

#### 技術的なポイント:

- タングステン合金は音響減衰が大きいため、高エネルギープローブ（5 MHz など）を使用する必要があります。
- 0.2～0.5mm の欠陥を識別できるように検出感度を調整する必要があります。
- カップリング層の誤差を減らすために表面を研磨する必要があります。
- 検出後、欠陥反射波の位置、深さ、振幅を記録して、そのレベルを決定する必要があります。

#### 欠陥識別図:

欠陥の種類	超音波機能
割れ目	明確な境界を持つ反射率の高い信号
気孔率	適度に反射する不規則な形状
密集地域の欠如	重層的なエコー、多重反射

### 4.7.2 放射線透過試験（RT）

#### 原理と応用:

放射線透過試験では、X線またはガンマ線を用いて材料を透過します。密度や厚さの異なる領域では、放射線の吸収能力が異なります。放射線透過像はイメージングプレート（フィルムまたはデジタル検出器）を通して記録され、内部欠陥を特定します。

- 棒内の気孔、亀裂、介在物などの密度差欠陥の検出に適用可能。
- 表面付近または深部の欠陥に対する優れた解像度。
- 承認の手段としてよく使用されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 試験装置:

- 産業用 X 線装置（管電圧 160～320kV）
- 同位体ガンマ線源（Ir-192 など）は厚肉の棒に使用されます。
- デジタルレントゲン撮影システム（DR/CR）は、高精細なリアルタイム画像を実現できます。

#### テクニカル指標:

- 検出可能な最小欠陥サイズ：約 0.1～0.3mm
- 画像の鮮明度と検出感度は、放射線エネルギー、露出時間、焦点距離によって異なります。
- 多くの場合、比較テスト ブロック (IQI) を使用してイメージング解像度を検証する必要があります。

#### 試験基準:

- ASTM E1742、E 1030 ;
- GB/T 3323、GB/T 19802 ;
- 医療用原子力エネルギー分野でも、ISO 5579 や EN 462 などのより高い基準を満たす必要があります。

#### 利点と制限:

アドバンテージ	制限
検出画像は直感的で、記録を保存できます	設備コストが高く、操作が複雑
多孔性、亀裂、介在物を識別できる	低密度差欠陥には鈍感
最終検査や故障解析に使用可能	厚くて大きな破片への浸透は限定的

### 4.7.3 磁性粒子試験 (MT)

#### 原理:

強磁性材料を磁化する際に、表面または表面付近に亀裂、介在物、未溶融物などの欠陥があると、これらの領域から漏洩磁界が発生します。磁性粉末を噴霧すると、磁性粉末が欠陥に集まり、目に見える痕跡を形成します。

- 表面/表面近傍の欠陥を迅速に検出するのに適しています。
- 主に鉄含有タングステン合金棒（W-Ni-Fe 系など）に使用され、W-Ni-Cu 系には使用されません。

#### 検出方法:

- AC 磁化は表面欠陥の検出に使用されます。
- DC 磁化ではやや深い欠陥 (1 ~ 3 mm) を検出できます。
- 湿式法（磁気懸濁液）または乾式法の磁性粉末を使用できます。
- 白黒のコントラスト液または蛍光磁性粉末を紫外線と組み合わせると、認識が向上します。

#### 適用規格:

- ASTM E 709 :磁性粒子試験技術の一般原則
- GB/T 15822、JB/T 6063 : 磁性粒子試験方法および品質評価。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機能分析:

利点	制限事項
低コストで高速検出	強磁性材料のみ（Ni-Fe 系）
欠陥の位置特定は直感的で非常に敏感である	深い欠陥や開口部のない欠陥を検出できない
現場でのバッチ操作に適しています	粉末の残留物と汚染リスクを除去する必要がある

4.7.4 欠陥等級評価と非破壊検査基準

ためには、例えば次のような関連基準に従って欠陥が限度を超えているかどうかを判断する必要があります。

欠陥の種類	最大許容サイズ（例：Φ20 mm ロッド）	それは許可されますか？
割れ目	存在を許されない	いいえ
穴	≤0.3 mm、密度が低い	はい
重ね着	許可されていません	いいえ
非金属介在物	≤0.5 mm、均一に分布	レベルに応じて

共通の評価基準:

- **ASTM B777/B 702**: タングステン合金の非破壊検査の参照規格。
- **GB/T 38561、GB/T 31928** : タングステン合金試験の特別規格。
- **顧客技術協定**: 航空、原子力などのカスタマイズされた基準はより厳格です。

まとめ

タングステン合金棒の場合、非破壊検査技術は材料を破壊することなく内部および表面の欠陥を特定できます。超音波検査はほとんどの棒の内部品質評価に適しています。X線検査は画像検査に明らかな利点があり、ハイエンド製品には必須の検査手段です。磁粉探傷検査は表面の微小亀裂を高感度に検出できます。これら3つの検査を適切に組み合わせることで、タングステン合金棒の多層的かつ包括的な品質保証を実現できます。

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

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

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

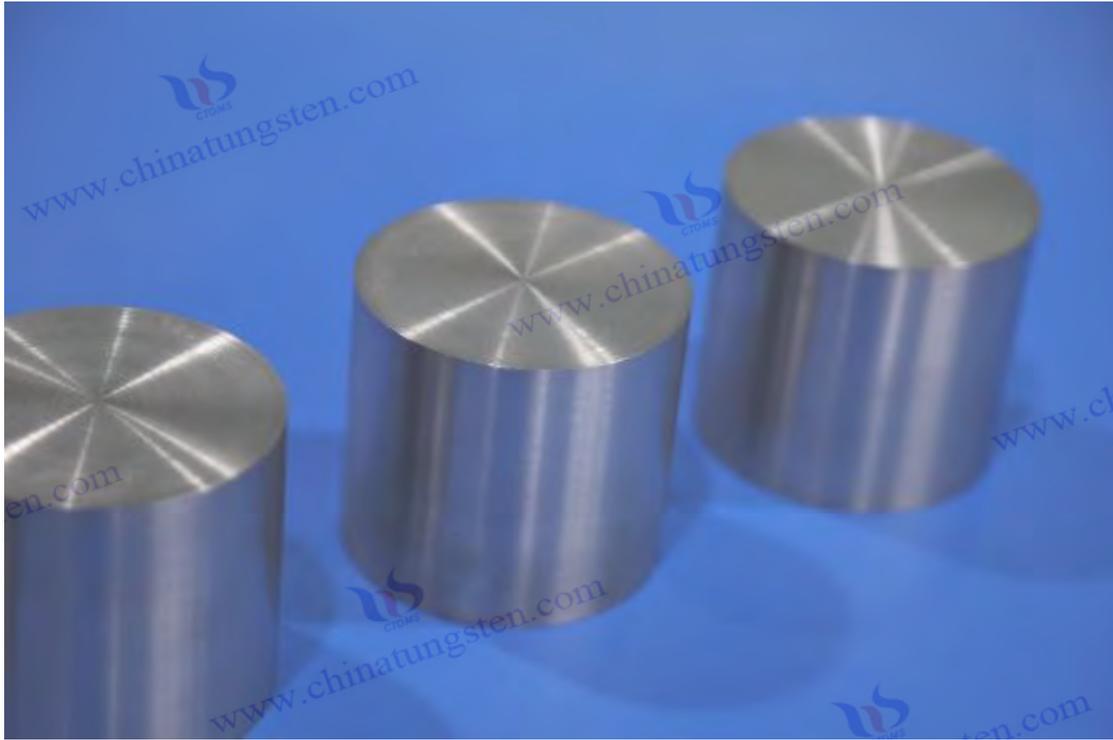
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 第5章 タングステン合金棒の代表的な応用分野

### 5.1 航空宇宙用カウンターウェイトと慣性部品

タングステン合金棒は、航空宇宙分野において不可欠な重要な位置を占めており、特にカウンターウェイトシステムや慣性部品に適しています。超高密度、良好な加工性、優れた構造安定性により、タングステン合金棒は、航空機、衛星、ミサイル、ドローンなどの航空機の質量バランス、運動エネルギー調整、姿勢制御システムに広く使用されており、現在の航空宇宙産業における高性能金属材料の重要な代表例の一つです。

#### 5.1.1 カウンターウェイトシステムの背景と要件

航空宇宙システムでは、カウンターウェイトアセンブリは次の目的でよく使用されます。

- **重心制御**: 航空機の姿勢の安定性と慣性モーメントの適切な分散を維持するために、構造またはパワーオフセット領域に精密なカウンターウェイトを構成する必要があります。
- **動的バランス調整**: 高速回転構造(ジャイロスコープ、モーターローター、フライホイールなど)では、カウンターウェイトを使用してアンバランストルクを微調整し、共振や疲労を防止します。
- **燃料消費補正**: 液体燃料の使用量が減少すると、航空機の重心が移動し、タングステン合金の動重りによってバランスが維持されます。
- **姿勢調整**: 一部の衛星/ミサイル システムでは、微調整された姿勢制御補正のためにスライド式または可動式のタングステン ウェイトを使用します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

航空機の設計では、限られたスペースのため、重量材は単位体積当たりの重量を可能な限り大きくする必要があり、同時に優れた耐振動性、構造安定性、環境適応性も備えている必要があります。タングステン合金ロッドの登場は、まさにこの厳しい基準を満たしています。

### 5.1.2 タングステン合金棒の材料上の利点

タングステン合金棒（通常は W-Ni-Fe または W-Ni-Cu 系）には、他の金属材料に比べて次のような大きな利点があります。

パフォーマンスパラメータ	タングステン合金ロッド	鉛	ステンレス鋼	チタン合金
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	17.0~18.8	11.3	約 7.8	約 4.5
強度 (MPa)	700~1000	15 ~ 30 歳	500~800	900 ~ 1100 年
温度安定性	優秀（1200℃以上で塑性低下なし）	違い	良い	素晴らしい
環境保護/毒性	無毒で環境に優しい	有毒	無毒	無毒
処理適応性	良い	簡単	中くらい	処理が難しい

したがって、タングステン合金は、航空宇宙のカウンターウェイト システムにおける鉛などの従来の材料を置き換える理想的なアップグレード オプションです。

### タングステン合金カウンターウェイトロッドの典型的な構造

航空宇宙用のカウンターウェイトは、多くの場合、次のような形をとります。

- 標準丸棒/角棒
  - ジャイロローター、慣性リング、または燃料タンクの底部の集中ウェイトに使用されます。
- ネジ棒/ボルトタングステン棒
  - 構造物への取り付けや取り外しが簡単で、衛星のカウンターウェイトや地上テストによく使用されます。
- 加工可能な特殊形状ブロック/インサート
  - 航空機の構造に応じてカスタマイズされたスロットティング、パンチング、またはステップ構造をキャビンにしっかりと埋め込むことができます。
- 取り外し可能/スライド式タングステンロッド
  - 姿勢制御システムに適用すると、ガイドレールに沿って移動することで重心を調整できます。
- タングステン合金薄板/ショートロッドインサート
  - ブレードおよびローター構造の慣性調整に使用されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 5.1.4 主要なパフォーマンス要件

航空宇宙グレードのタングステン合金棒は、以下の指標を満たす必要があります。

- 密度:  $\geq 17.5 \text{ g/cm}^3$ 、 $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 以内に制御。
- 寸法精度:  $\pm 0.01 \sim \pm 0.05 \text{ mm}$ 、微細な旋削と研削が必要です。
- 機械的性質:
  - 引張強度  $\geq 750 \text{ MPa}$ ;
  - 伸び率 $\geq 10\%$ 、衝撃靱性を確保。
- 表面粗さ:  $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ （光沢のある表面要件）
- 磁気要件:一部の慣性システムでは、**低磁性または非磁性のタングステン合金が必要**です(W-Ni-Cu は W-Ni-Fe よりも優れています)。
- 高温安定性: 熱衝撃に強く、構造変形がありません。
- 信頼性:非破壊検査(超音波/無線)により内部欠陥を検出できます。

#### 5.1.5 実践的な応用事例

##### (1) 衛星慣性ホイールと姿勢制御装置

- タングステン合金棒は**運動量ホイールコア**や**ジャイロ慣性リング**として使用されます。
- 高密度化により慣性力を高め、姿勢調整精度を向上。
- 米国やヨーロッパの多くの種類の衛星では、**W-Ni-Fe 高密度ロッド**を使用しています。

##### (2) 航空機・無人機用ダイナミックバランスウェイト

- 主翼、尾翼、プロペラブレードのバランス修正に使用します。
- 小さなタングステン棒をブレードに挿入して重量を微調整できます。
- UAV 市場が拡大しており、精密小型タングステン棒の需要が高まっています。

##### (3) ミサイル尾部区画と誘導部のカウンターウェイト

- ために、重心のバランスをとるために尾部にタングステン棒が取り付けられることがよくあります。
- スライドレール構造により適応加重を実現。
- 高密度、強力な接着、耐振動性が求められます。

##### (4) 航空機エンジンジャイロ部品

- シャフトの両端にタングステンウェイトを配置し、安定性と応答速度を向上させました。
- 高温合金シェルと組み合わせることで、動的慣性ユニットを構成します。

#### 5.1.6 他の材料との代替分析

環境規制の強化と航空機の軽量化の需要の高まりにより、タングステン合金棒が以下の従来の重量材料に徐々に取って代わりつつあります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

材料	交換理由
鉛	毒性が高く、使用が禁止または制限されている
鋼鉄	密度が低いため、基準を満たすにはより大きな容積が必要
銅合金	導電性が高いため、電磁干渉を引き起こす可能性があります
陶芸	非常に脆く、振動や衝撃荷重に耐えられない

タングステン合金は、重量精度、安全性、容積制御、リサイクル性において大きな利点があり、高級航空重量材料の主流となっています。

### まとめ

タングステン合金棒は、航空宇宙用カウンターウェイトや慣性部品において、高密度、構造安定性、耐高温性、優れた加工適応性など、総合的な優位性を有しています。現代の航空機の厳しい重心制御要件を満たすだけでなく、多様な統合設計にも対応可能です。高性能カウンターウェイト材料の第一選択肢となっています。今後、インテリジェント航空機、小型衛星、高動力プラットフォームの発展に伴い、タングステン合金棒はより多くの重要な構造において中核的な役割を果たすようになるでしょう。

## 5.2 軍事装備用タングステン合金棒（徹甲弾の芯、ミサイル尾部収納部）

タングステン合金は、高密度、高強度、高い運動エネルギー保持力、優れた貫通力により、軍事装備において極めて重要な役割を果たしています。タングステン合金棒は、主に軍事分野で運動エネルギー徹甲弾の弾芯の製造に使用されています。ミサイル尾部カウンターウェイト、深貫通爆弾の構造部品、高性能爆薬砲弾や慣性飛行システムのカウンターウェイトなどで構成されており、その性能は兵器システムの攻撃能力、飛行安定性、戦闘効率に直接影響を及ぼします。

### 5.2.1 軍事用途におけるタングステン合金材料の主な利点

軍事分野におけるタングステン合金の用途は、以下のとおりです。

パフォーマンス指標	タングステン合金 (W-Ni-Fe)	鉛	鋼鉄	ウラン合金 (DU)
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	17.0~18.8	約 11.3	約 7.8	約 19.1
引張強度 (MPa)	700~1000	非常に低い	500 ~ 800	800~900
熱安定性	優秀 (1200°C以上でも軟化せず)	違い	中くらい	素晴らしい
毒性/環境安全性	無毒で環境に優しい	有毒	安全性	強い放射能
加工性	良い	処理が簡単	良い	非常に悪い (酸化して脆い)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

そのため、タングステン合金は「無毒の劣化ウラン代替材料」として知られており、現代の高性能な通常運動エネルギー兵器の重要な材料基盤となっています。

## 5.2.2 徹甲弾におけるタングステン合金棒

### (1) 申請の背景

運動エネルギー貫通体 (KEP) は、高速の運動エネルギーを利用して装甲目標を貫通します。その中核部品である「コア」には、以下の要件を満たす必要があります。

- 運動エネルギーを増加させる極めて高い密度。
- 貫通能力を維持するための非常に高い強度と硬度。
- 飛行中に破損したり、装甲を貫通しても崩壊しない優れた靱性。
- 変形やたわみを軽減する優れた動的安定性。

タングステン合金コアは通常、W-Ni-Fe 重合金棒から作られ、精密成形、熱処理、機械加工によってテールコーンまたはニードルコア構造に作られます。

### (2) コアの種類とサイズのパラメータ

弾薬の種類	典型的なタングステン合金ロッドの直径	アスペクト比	弾性コア構造
戦車の主砲 APFSDS	Φ18~Φ30mm	15~25	タングステン合金ロングロッド+アルミニウムシエル
小口径徹甲弾	Φ5~Φ15mm	10~15	ソリッドタングステンロッドまたはタングステンコアスチールシエル
深く貫通する 弾芯	Φ20~Φ60mm	5~10	頑丈なタングステン合金製コーンヘッド

### (3) 材料の技術要件

- 密度:  $\geq 17.5 \text{ g/cm}^3$ 、好ましくは  $18.0 \sim 18.5$ ;
- 引張強度:  $\geq 950 \text{ MPa}$
- 硬度:  $\text{HRC} \geq 35$ ;
- 伸び:  $\geq 10\%$ ;
- 微細構造: 緻密かつ均一、気孔なし、粒径は  $10\mu\text{m}$  以下に制御。
- 非磁性または低磁性 (特別な誘導システム要件)
- 非破壊検査により内部亀裂や層間剥離などの欠陥がないことを確認しています。

### (4) 製造工程の概要

- 原料調製: 高純度タングステン粉末+Ni/Fe 合金粉末混合物。
- 粉末冶金プレス→高温液相焼結;
- 熱処理焼戻し→精密旋削→研磨;
- 表面コーティング (Mo/Cr) または酸化物層処理 (耐熱性、耐摩耗性)。
- 超音波検査と CT 検査。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.2.3 ミサイル尾部カウンターウェイト構造のタングステン合金棒

#### アプリケーションの説明:

- 長距離/中距離戦術ミサイルや防空ミサイルでは、推進装置と弾頭の質量中心の分布のバランスをとるために、尾部コンパートメント（テールコーンセクション）にカウンターウェイトを取り付けることがよくあります。
- 、飛行の慣性安定性を高め、誘導精度を改善し、発射体の偏向を減らす役割も果たします。
- 一部の高精度ミサイル システムでは、誘導アルゴリズムの偏差を調整するために、調整可能なタングステン ロッド カウンターウェイト モジュールを使用します。

#### 構造:

- 固体タングステン合金の円筒形/段付きロッド。
- 電磁干渉を防ぐために絶縁材またはセラミックコーティングで覆われています。
- スルーホール構造にはリードまたはスライディングシャフトが組み込まれています。

#### 要件と機能:

- 高密度密度制御精度 ( $\pm 0.03 \text{ g/cm}^3$  以内)
- 高い加工精度要求 (テールキャビン機構との精密マッチング)
- 耐腐食性、耐衝撃性、長寿命。
- 重量比と位置は、飛行シミュレーション データに応じて事前に設定できます。

### 5.2.4 その他の軍用タングステン棒の用途

- 爆発成形弾薬 (EFP) 用タングステン合金ブッシング。
- 高性能爆薬弾用タングステン合金棒 (爆発の方向性エネルギーを向上させるため)
- 軍用慣性システムジャイロウェイト;
- 爆雷用耐高圧タングステン棒構造部品;
- 軍用熱吸収/遮断構造 (EMP 防御など) におけるタングステン合金棒。

### 5.2.5 タングステン合金軍用製品の規格および適合システム

軍用タングステン合金棒は通常、以下の規格とシステム認証に準拠する必要があります。

標準/システム	コンテンツ
GJB/T 3765	軍用タングステン合金の技術要件
MIL-T-21014	米軍向けタングステン合金棒の技術仕様
ASTM B777 クラス IV	高密度タングステン合金の仕様
国家軍事規格 GJB 9001C	防衛品質管理システム
ISO 10204 3.2	軍事グレードの第三者品質認証レポート
NADCAP / ITAR / AS9100	航空軍事製品に使用される材料の要件

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

さらに、高品質の製品には、炉番号のトレーサビリティ、元の粉末バッチレポート、全プロセスの非破壊検査レポート、および完全な機械的特性検査データを提供する必要があります。

#### まとめ

タングステン合金棒は、軍事装備において「核を貫通する」機能と「構造安定化のアンカー」機能の二重性を有し、特に運動エネルギー弾の核やミサイル尾部構造への応用において、高密度、高強度、熱安定性といった材料の優位性を十分に発揮しています。劣化ウランの代替、環境に優しく無毒、そして精密製造の制御性といったトレンドに後押しされ、タングステン合金は現代の軍事精密攻撃システムや高機動飛行システムにとって重要な戦略材料となっています。

### 5.3 原子力分野（放射線防護棒、中性子吸収構造）

タングステン合金は、その超高密度、優れた高温安定性、そして優れた放射線防護能力により、原子力分野において重要な役割を果たしています。特に原子力発電所、研究炉、原子力発電所、核廃棄物処理システムにおいては、タングステン合金棒が放射線遮蔽部品の製造に広く使用されています。中性子吸収構造、核燃料包装保護部品などに使用され、その総合的な性能は従来の鉛、鋼、ウラン材料をはるかに上回っています。

#### 5.3.1 原子力分野における応用の背景とニーズ

原子力システムにおけるタングステン合金棒の主な機能は次のとおりです。

- **ガンマ線および X 線遮蔽:** タングステンは原子番号が大きい ( $Z=74$ ) ため、高エネルギー線の吸収能力に優れています。
- **中性子吸収と熱中性子遮蔽:** タングステン自体はホウ素やカドミウムほど優れた中性子捕獲断面積を持っていませんが、タングステン合金棒は複合構造で中性子吸収体を運ぶことができ、構造+遮蔽の二重の役割を果たします。
- **構造安定性と高温強度保持:** タングステン合金は、原子炉の高温、強い放射線環境において寸法安定性と機械的強度を維持し、原子力システムの構造部品の重要な基礎となります。
- **高い熱伝導率により熱管理が容易になります。** タングステンの優れた熱伝導性により、核反応中に効率的に熱を伝導し、構造疲労の原因となる熱応力の集中を回避できます。

#### 5.3.2 タングステン合金放射線防護棒の利点の分析

パフォーマンスプロジェクト	タングステン合金ロッド	鉛保護材	ウラン合金 (DU)
密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	17.0~18.5	約 11.3	約 19.1

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ガンマ線遮蔽能力	優秀（高Z、高密度）	一般的に	優秀（タングステンよりわずかに優れている）
中性子遮蔽能力	中（B/Cdを組み合わせて添加可能）	違い	正常（部分的に吸収される）
熱安定性	優秀（>1200°C安定）	不良（100°Cで軟化）	素晴らしい
毒性と放射能	無毒、非放射性	有毒	放射能がありリサイクルが難しい
処理およびリサイクル能力	良い	変形しやすく汚染されやすい	処理が難しく、安全上の制約が大きい

、環境保護、安全性、機械的/放射線の利点により、ウラン合金や鉛材料に代わる理想的なソリューションとなっています。

### 5.3.3 原子力用タングステン合金棒の典型的な構造形態

#### 1. シールドロッド

- 必要な厚さに応じて、コア周辺、チャンネルシールドなどに中実または中空のタングステン合金棒が使用されます。
- シェルと組み合わせて使用されます。
- 一般的な密度要件は  $\geq 17.8 \text{ g/cm}^3$  です。

#### 2. 中性子複合吸収構造棒

- 芯線はタングステン合金棒で、表面には  $\text{B}_4\text{C}$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cd}$  などの材料が噴霧またはコーティングされています。
- 熱中性子の吸収とガンマ線の遮断を統合。
- 原子炉安全制御棒、急速停止棒などに使用されます。

#### 3. 高熱負荷構造ロッド

- 冷却流体はタングステン合金の中空構造を通して流れます。
- 原子力発電所の放熱支援システムに使用されます。
- 要件には、高い熱伝導性、寸法安定性、耐腐食性などがあります。

#### 4. 核燃料輸送・貯蔵遮蔽棒

- タングステン合金棒は包装バレル/容器の内層に設置されます。
- ガンマ線遮蔽と機械的衝撃耐性の2つの役割を果たします。
- IAEA 輸送安全規制に準拠しています。

### 5.3.4 材料性能要件

原子力エネルギー用のタングステン合金棒には、高密度と放射線吸収能力が求められるだけでなく、極限環境下でも構造的完全性と物理的安定性を維持する必要があります。

- **密度制御:**  $\geq 17.5 \text{ g/cm}^3$ 、良好な均一性が必要。
- **寸法安定性:**  $300^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ での連続使用でも変形しません。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 耐腐食性: 脱イオン水、ホウ酸溶液、蒸気などに対して耐性があります。
- 熱伝導率:  $> 90 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、熱勾配応力を低減します。
- 強度要件: 引張強度 $\geq 700 \text{ MPa}$ 、優れた衝撃靱性。
- 照射安定性: 照射後も格子構造の破壊は発生しません。
- 中性子捕捉設計: Gd、B、Cd の複合ドーピングでは高い均一性が求められます。
- 寿命と疲労性能: 10 年を超える長期連続使用をサポートします。

### 5.3.5 実際の応用例

#### (1) 原子力発電所の炉心保護モジュール

- タングステン合金棒は原子炉の炉心構造の周囲にガンマ線遮蔽層を形成します。
- グラファイト、水冷、ジルコニウム合金などと組み合わせて使用します。
- 国内の第三世代原子力発電プロジェクトでは、鉛層の代わりにタングステン合金遮蔽を採用した。

#### (2) 研究炉用制御棒と安全棒

- 制御棒として、B<sub>4</sub>C 粉末構造でコーティングされた中空のタングステン合金棒が使用されます。
- 核反応を急速に停止させる必要がある場合、タングステン合金棒を炉心に挿入してエネルギーを吸収し、ガンマ線を遮断することができます。
- ほとんどの科学研究用原子炉では、安全端末部品として「W-Ni-Fe/B<sub>4</sub>C」複合材料が使用されています。

#### (3) 核廃棄物乾式貯蔵容器のライニング構造

- 核廃棄物乾燥タンクの外層にタングステン合金保護棒が設置されている。
- 鉛ライニングに比べ、漏洩のリスクがなく、より強力な保護を提供します。
- 強い地震や衝撃にも耐える性能を持っています。

### 5.3.6 関連する規格および認証制度

タングステン合金棒は原子力分野で使用され、以下の国際規格/業界規格を満たす必要があります。

標準/システム	コンテンツ
ASTM B777	高密度タングステン合金の分類と性能要件
ISO 12749/BS EN 61331	核防護材料性能評価基準
IAEA TS-G-1.1	核物質の包装および輸送に関する安全ガイドライン
GB/T 24298	原子力用タングステン合金材料の特性と試験方法
CNNC/中国核集団内部標準	原子力グレード物質の調達および受入プロセス基準

さらに、原子力目的の製品の輸出は、原子力供給国グループ (NSG) の規制規定に準拠し、原子力目的の最終用途宣言を宣言する必要があります。

### 5.3.7 開発動向と技術展望

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **複合タングステン合金構造:** 共焼結、ホットプレス、ナノコーティングなどを通じてタングステン合金を B、Gd などの材料と統合し、中性子とガンマ線の協調遮蔽能力を向上させます。
- **モジュール式原子力遮蔽構造の応用:** タングステン合金棒を精密に加工し、機械的に接続して取り外し可能で再構築可能な遮蔽モジュールを形成します。移動式原子力発電所や船舶原子炉に適しています。
- **高温高压サービス性能の向上:** 将来の先進的原子炉（高速炉、ADS システムなど）の高エネルギー条件を満たす耐高温タングステン合金配合および熱処理プロセスを開発する。
- **3D プリントされたタングステン合金の原子力部品:** 付加製造技術を使用して、複雑な形状とキャピティ構造を持つ原子力タングステン合金部品を製造し、重量を軽減して放熱性能を向上させます。

## まとめ

タングステン合金棒は、原子力分野において構造支持、放射線防護、熱管理など、多様な機能を有しています。高密度、環境保護、安全性を特徴とするタングステン合金は、原子力システムに不可欠な中核材料の一つとなっています。クリーンな原子力エネルギーと安全な原子力施設に対する世界的な需要の高まりに伴い、タングステン合金の防護部品や中性子制御部品への応用展望はますます広がっています。

## 5.4 医療機器（放射線治療装置）用高密度構造ロッド

現代の放射線治療技術の急速な発展に伴い、タングステン合金は高密度、高吸収性能、優れた機械的特性を有し、医療機器における放射線遮蔽および線量調整の重要な材料となっています。タングステン合金棒を放射線治療機器（直線加速器、ガンマナイフ、サイバーナイフなど）に適用することで、機器の正確な放射線制御が保証されるだけでなく、医療従事者と患者を不必要な放射線障害から効果的に保護することができます。

### 5.4.1 放射線治療装置におけるタングステン合金の応用の背景

放射線治療では、高エネルギー X 線、ガンマ線、または電子線を用いて腫瘍部位を正確に照射します。装置の遮蔽および調整構造は、以下の要件を満たす必要があります。

- **放射線を効率的に吸収し、放射線の漏れを防ぎます。**
- **材料は高密度であり、限られた体積内で最大の遮蔽効果を実現します。**
- **強力な機械的安定性、機器の動きや振動に耐えることができます。**
- **高い加工精度により、放射線ビームの正確な誘導が保証されます。**
- **バイオセーフ、無毒、無害、医療および健康基準に準拠。**

タングステン合金（ $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ）は、ガンマ線や X 線を遮蔽するのに理想的な素材で、従来の鉛素材よりも優れており、環境にも優しい素材です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 5.4.2 タングステン合金棒の典型的な用途箇所

1. 放射線治療装置用の保護シールドとブッシング
  - 直線加速管の周囲に使用し、散乱線を遮断します。
  - 精密機械加工により放射線ビームの形状と線量の均一性が保証されます。
2. 調整ブレードのカウンターウェイトとブレード構造（多葉ダイヤフラム、MLC）
  - MLC ブレードは、通常、高密度のタングステン合金で作られており、放射線を効果的に遮断し、治療領域の形状を制御できます。
  - タングステン合金ロッドを使用してブレードの骨組みとカウンターウェイトを作成し、スムーズで正確なブレードの動きを確保できます。
3. 放射線防護遮蔽壁および可動遮蔽パネルライニング
  - 高密度タングステン合金棒または板が放射線の浸透を阻止する保護構造を形成します。
  - 軽量設計により、重量が軽減され、安全性が向上します。
4. 投与量調整装置の内部重量構造
  - 治療を正確に制御するために放射線量と方向を調整します。
  - タングステン合金棒は、安定したサイズと優れた加工性により、機械設計の厳しい要件を満たしています。

#### 5.4.3 主要なパフォーマンス要件

医療用放射線治療装置用のタングステン合金棒は、以下の技術指標を満たす必要があります。

- **密度:**  $\geq 17.5 \text{ g/cm}^3$ 、十分な放射線吸収能力を確保。
- **寸法精度:**  $\pm 0.01 \sim 0.03 \text{ mm}$ 、構造の整合性と放射精度を保証します。
- **機械的性質:**
  - 引張強度は 700MPa 以上、機器の動作中に発生する応力に耐えることができます。
  - 硬度  $\geq \text{HRC } 30$ 、耐摩耗性を確保。
- **表面品質:**  $Ra \leq 0.4 \mu\text{m}$ 、機器の動きや放射線透過に影響を与えないようにします。
- **無毒・無害:** 医療機器の安全基準に準拠し、有害物質の漏出を防ぎます。
- **環境安定性:** 耐腐食性、耐高温性（通常の作業環境下）、長期使用後も変形しません。

#### 5.4.4 加工・製造技術

医療グレードのタングステン合金棒は、通常、高純度粉末冶金技術によって製造され、その後、精密機械加工によって成形されます。主な工程は以下の通りです。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **精密熱間静水圧プレス（HIP）**により、材料の密度が高まり、気孔がなくなります。
- 複雑な形状と高い寸法精度を実現する **CNC 旋削および研削**。
- 加工痕や汚れを除去するための**表面研磨・洗浄**。
- 内部欠陥がないことを確認するための**非破壊検査（超音波、X線）**。
- **表面コーティング**（酸化膜やセラミックコーティングなど）により、耐腐食性と生体適合性が向上します。

#### 5.4.5 典型的なケース

- **線形加速器多葉絞り用タングステン合金ブレード**
  - W-Ni-Fe タングステン合金製で、ブレードの密度は  $18.0 \text{ g/cm}^3$  に達します。
  - ブレードのサイズは正確に制御され、高精度の機械伝達システムによりミリメートルレベルの調整が可能です。
  - 治療対象部位の位置決め精度と患者の安全性が大幅に向上します。
- **ガンマナイフ頭部保護シールド**
  - 超高密度タングステン合金製で、厚さは鉛保護材の半分です。
  - 精密機械加工と熱処理により、長期安定性と保護性能が保証されます。
  - デバイスの携帯性を向上させ、全体の重量を軽減します。

#### 5.4.6 開発動向と技術の最先端

- **高性能タングステン合金材料**
  - ナノ粒子はタングステン合金を強化して強度と靱性を向上させ、機器の寿命を延ばします。
  - 低磁性タングステン合金は MRI 適合性の要件を満たしています。
- **タングステン合金ブレードのインテリジェント製造**
  - 付加製造（3D プリント）技術を使用して複雑な構造を製造し、重量を削減します。
  - レーザー加工と組み合わせることで表面品質と製造効率が向上します。
- **従来の鉛材料に代わる環境に優しい代替品**
  - タングステン合金は、無毒の代替材料として、医療環境保護の傾向と規制に準拠しています。
  - 医療廃棄物の安全な処理とリサイクルを実現します。

#### まとめ

タングステン合金棒は、高密度、高精度、優れた機械的特性により、現代の医療用放射線治療機器に欠かせないコア材料となっています。放射線防護、線量調整、構造安定性といった優れた特性により、放射線治療技術の精度と安全性が大幅に向上しています。材料科

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

学と製造技術の進歩に伴い、医療分野におけるタングステン合金の応用は、今後さらに広範かつ深化していくでしょう。

## 5.5 高精度機器における動的バランスロッドと回転慣性部品

タングステン合金棒は、高密度、高剛性、優れた加工性能を有することから、様々な高精度機器・装置に広く使用されています。特に、高精度の動バランス調整や慣性制御が求められる回転部品に多く用いられています。タングステン合金棒は、質量分布の微調整と動特性の最適化を効果的に実現し、機器の測定精度と動作安定性を向上させます。

### 5.5.1 アプリケーションの背景と重要性

ジャイロスコープ、フライホイールジャイロスコープ、航空宇宙航行機器、精密電力システム、高速回転機械などの高精度機器は、動バランスと慣性性能に対する要求が極めて高いです。動バランスバーと慣性部品の主な機能は次のとおりです。

- 回転体の質量分布を調整し、アンバランスなトルクを排除し、振動と騒音を低減します。
- 回転体の安定性と寿命を向上させ、不均衡によるベアリングの摩耗や機器の故障を回避します。
- 慣性モーメントを正確に調整することで、計器の応答性能と制御精度を最適化します。

タングステン合金棒は、高密度(17.0~18.8 g/cm<sup>3</sup>)と優れた機械的特性を備えているため、これらの主要部品の製造に最適な材料です。

### 5.5.2 ダイナミックバランスバーの構造と設計

- **材料の選択:** 高密度と十分な機械的強度を確保するために、主に W-Ni-Fe または W-Ni-Cu 高密度タングステン合金を使用します。
- **形状仕様:** 円筒形のロッド、段付きのロッド、または特殊断面のロッドが一般的で、質量分布を調整するために機械構造に組み込みやすい。
- **寸法精度:** 加工精度の要求は非常に高く、動的バランス効果を確保するために寸法公差は通常  $\pm 0.01\text{mm}$  以内に制御されます。
- **表面処理:** 研磨、ニッケルメッキ、コーティングにより表面品質を向上させ、摩擦と腐食を軽減します。

### 5.5.3 回転慣性部品の性能要件

回転慣性部品には通常、次の特性が必要です。

- **高密度と均一性**により、慣性モーメントの正確な計算が保証されます。
- **優れた機械的強度と靱性**を持ち、高速回転中に発生する遠心力に耐えることができます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 長期動作においても安定したサイズと性能を保證する**熱安定性**。
- **耐腐食性があり**、特に湿度の高い環境や腐食性の高い環境で耐用年数を延ばします。

高速運転時にも変形や故障が起こらず、装置の高精度な動作を維持します。

#### 5.5.4 典型的な適用例

##### 1. ダイナミック

バランスロッドは、航空宇宙用ジャイロスコープの回転部に広く使用されています。質量分布を精密に調整することで、機器の偏差ゼロと極めて低いドリフトを実現できます。

##### 2. 高速回転機械は

、高速モーターとタービンブレードの動的バランス調整に使用され、振動を効果的に低減し、機器の信頼性と寿命を向上させます。

##### 3. 電子顕微鏡のターンテーブルやレーザー干渉計などの**精密測定機器**

の回転部分において、スムーズな回転と測定精度を確保する部品です。

#### 5.5.5 製造工程と試験方法

- **製造プロセス**：高密度タングステン合金棒は粉末冶金によって製造され、精密旋削と研削によって成形されます。
- **熱処理**：機械的特性と内部構造の均一性を改善します。
- **表面処理**：耐用年数を延ばすための防錆コーティングと研磨。
- **品質検査**：ダイナミックバランスングテスター、高精度座標測定機、非破壊検査技術を使用して、欠陥ゼロを保證します。

#### 5.5.6 将来の開発動向

- **マイクロナノ構造タングステン合金**：機械的特性と疲労耐性を向上します。
- **軽量設計**：構造の最適化によりタングステン合金の量を減らし、軽量かつ高強度を実現。
- **付加製造技術**：複雑な形状の動的バランス部品の統合製造を実現します。
- **インテリジェントなダイナミックバランスングシステム**：センシング技術と組み合わせることで、タングステン合金ダイナミックバランスングロッドの位置がリアルタイムで調整され、システムの動的パフォーマンスが向上します。

#### まとめ

タングステン合金棒は、高精度機器の動バランス棒や回転慣性部品の分野で重要な役割を果たしています。高密度と優れた機械的特性により、機器の動作はよりスムーズになり、精度も向上します。材料技術と製造プロセスの継続的な進歩により、タングステン合金は精密回転機械やハイエンド機器において、より大きな可能性を発揮するでしょう。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5.6 電子産業および通信機器における支持構造と放熱構造

電子機器と通信技術の急速な発展に伴い、デバイスの小型化、高電力密度化、高速動作といった要求性能は、材料に対する要求をさらに高めています。タングステン合金棒は、高密度、高熱伝導性、優れた機械的強度といった特性から、電子機器や通信機器における重要な支持・放熱構造材料として、機器の安定性と熱管理効率を効果的に向上させています。

### 5.6.1 アプリケーションの背景

の熱管理と機械的支持性能:

- 機器は動作中に大量の熱を発生し、放熱が不十分だと性能が低下したり、損傷したりすることがあります。
- 支持構造は機械的ストレスと熱的ストレスに耐え、デバイスの位置決め精度を維持する必要があります。
- 材料には優れた寸法安定性と電磁両立性が必要です。

タングステン合金棒は、高密度、優れた熱伝導性、および低い熱膨張係数を備えているため、これらのニーズを満たす理想的な選択肢です。

### 5.6.2 電子機器および通信機器におけるタングステン合金の主な用途

#### 1. 高出力デバイス向け放熱支持構造

- パワーアンプおよび RF モジュール用の放熱ベースとサポート。
- タングステン合金は、デバイスによって生成された熱を素早く除去するのに役立ちます。
- 素材の高密度と高剛性により、安定した構造が確保され、振動の影響が軽減されます。

#### 2. マイクロ波およびミリ波通信機器のダンピングウェイト

- タングステン合金カウンターウェイトを通して;
- RF コンポーネントの微小な動きと位置の偏差を効果的に制御します。

#### 3. 半導体パッケージのヒートシンク材料

- タングステン合金は、ハイエンドのチップパッケージのヒートシンクとして使用され、チップの放熱効率を向上させるのに役立ちます。
- 熱応力によるチップの損傷を防ぐために、機械的強度と熱膨張のマッチングの両方を考慮してください。

#### 4. 精密機械位置決めおよびサポート部品

- 小さな機械部品の相対的な位置と安定性を維持します。
- 光ファイバー通信機器やレーザー システムの機械ブラケットや固定具によく使用されます。

### 5.6.3 主要材料パフォーマンス指標

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 密度:  $\geq 17.0 \text{ g/cm}^3$ 、構造の高い剛性と安定性を確保。
- 熱伝導率:  $\geq 120 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、急速な熱放散。
- 熱膨張係数:  $\leq 6 \times 10^{-6} /\text{K}$ 、半導体材料の熱膨張に一致。
- 機械的強度: 引張強度  $\geq 800 \text{ MPa}$ 、硬度  $\geq \text{HRC } 30$ 。
- 寸法精度: 加工精度はミクロンレベルに達し、組み立て精度を保証します。
- 表面粗さ:  $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ 、応力集中と熱抵抗を避けるため。
- 電磁両立性: 磁気応答性が低く、信号干渉を低減します。

#### 5.6.4 加工技術と品質管理

- 高純度タングステン粉末は粉末冶金法によって製造され、材料の密度と均一性を保証します。
- 熱間静水圧プレス（HIP）と高温焼結により機械的および熱伝導性を向上させます。
- 複雑な構造と高い寸法精度を実現する CNC 加工。
- 表面欠陥を減らすための研削および研磨を含む表面仕上げ。
- 複数の非破壊検査技術（超音波、X線 CT）により内部品質を保証します。

#### 5.6.5 典型的なケース

- **5G 基地局 RF パワーモジュール放熱ブラケット**
  - タングステン合金ロッドは高出力アンプモジュールをサポートし、放熱効率と機械的安定性を確保します。
  - 機器の信頼性と耐用年数を向上させます。
- **ハイエンドサーバーチップ冷却モジュール**
  - タングステン合金ヒートシンク構造を採用し、チップの温度制御を改善します。
  - 熱ストレスを軽減し、長期にわたる安定した動作を保証します。
- **レーザー機械サポート**
  - タングステン合金ブラケットはレーザーパスの安定性を保証します。
  - 防振設計により光学エラーを低減します。

#### 5.6.6 開発動向と技術展望

- ナノ構造タングステン合金の熱管理性能が向上し、より効率的な放熱が実現します。
- タングステン合金とカーボンベースの材料により、放熱性能を確保しながら全体の重量を軽減します。
- 複雑な放熱構造とデバイスサポートを製造するために積層製造技術を統合します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- インテリジェントな放熱システムはタングステン合金材料と組み合わせられ、リアルタイムの温度制御と適応的な放熱を実現します。

#### まとめ

タングステン合金棒は、電子産業や通信機器の支持構造や放熱構造に用いられています。高密度、高熱伝導性、そして機械的安定性により、機器の性能と信頼性を大幅に向上させます。電子機器の電力密度の継続的な向上と小型化の傾向に伴い、タングステン合金の役割はますます重要になり、産業の効率的かつインテリジェントな発展に貢献しています。



## 第 6 章 特殊タングステン合金棒の研究開発と改良

### 6.1 ナノ粒子強化タングステン合金ロッド

ハイエンド設備の製造と過酷な作業環境により、タングステン合金の性能に対する要求がますます高まるにつれ、従来のタングステン合金の強度、靱性、熱安定性におけるボトルネックがますます顕著になっています。ナノ粒子強化技術は、材料の性能限界を突破するための重要な方法の一つとなっています。タングステン合金マトリックス中にナノスケールの強化相を均一に分散させることで、材料の総合的な性能を効果的に向上させ、タングステン合金の応用分野を拡大することができます。

#### ナノ粒子強化タングステン合金の設計コンセプト

ナノ粒子強化タングステン合金棒は、主に以下の設計コンセプトに基づいています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ナノ粒子強化効果:** ナノサイズの粒子が第2相としてマトリックス内に均一に分散し、粒界移動や転位運動を妨げ、強度と硬度を向上させます。
- **界面強化:** ナノ粒子とタングステンマトリックスがしっかりと結合して強力な界面を形成し、材料の靱性と破壊靱性が向上します。
- **熱安定性の向上:** ナノ粒子は粒界を固定し、高温での粒成長を抑制し、微細粒構造を維持し、高温性能を維持します。
- **耐放射線性の強化:** ナノ粒子は放射線欠陥の捕捉点として機能し、原子力などの高放射線環境におけるタングステン合金の耐用年数を延ばします。

### 6.1.2 一般的に使用されるナノ強化相材料とその特性

ナノ粒子材料	主な特徴	利点	アプリケーションの焦点
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> など)	優れた熱安定性と化学的不活性	高温不動態化、粒子安定化	高温耐腐食性、高強度、高靱性タングステン合金
TiC など)	高硬度、耐摩耗性	硬度と耐摩耗性を大幅に向上	工具材料、機械部品
ケイ酸塩および複合酸化物	良好な熱膨張マッチングと優れた靱性	熱応力を軽減し、熱機械特性を向上させる	電子パッケージング、熱的に安定した構造
カーボンナノチューブとグラフェン誘導体	高い導電性、高い強度	強度と導電性が大幅に向上	機能性タングステン合金、電磁気応用

### ナノ粒子強化タングステン合金の製造プロセス

ナノ粒子強化タングステン合金は、高精度の粉末混合・成形技術を駆使して製造されます。

主な工程は以下のとおりです。

- 1. ナノ粒子粉末の調製と分散**
  - ナノ粒子は、化学沈殿、スプレー乾燥、機械的合金化などによって製造されます。
  - 超音波分散と高エネルギーボールミル技術を使用して、タングステン粉末内のナノ粒子を均一に分散させ、凝集を回避します。
- 2. 粉末混合と前処理**
  - ナノ粒子とタングステン粉末は不活性雰囲気下で完全に混合され、きれいな界面が確保されます。
  - いくつかのプロセスでは、粉末の流動性を向上させるために分散剤と結合剤が添加されます。
- 3. 成形とプレス**
  - 冷間等方圧プレス（CIP）、ダイプレス、または熱間等方圧プレス（HIP）による成形。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 熱間静水圧プレスにより、高密度かつ低多孔性の緻密な構造を実現できます。
- 4. 焼結と熱処理
  - 高温真空焼結により、タングステンマトリックスとナノ粒子間の界面結合が促進されます。
  - 適切な熱処理により、粒径と強化相の分布を制御できます。
- 5. 機械加工および表面処理
  - 必要なサイズと形状を得るための精密機械加工。
  - 表面研磨とコーティングにより性能が向上します。

#### 6.1.4 パフォーマンス改善メカニズムの分析

- 強化メカニズム
  - ナノ粒子は転位運動を防ぐ障壁として機能し、引張強度と降伏強度を大幅に向上させます。
  - ナノ粒子は粒子を微細化し、硬度を高め、靱性を向上させます。
  - 粒子強化インターフェースは粒界を効果的に固定し、高温での粒粗大化を防ぎます。
- 熱安定性と耐腐食性
  - ナノ粒子の熱安定性により、材料の高温使用能力が向上します。
  - 不動態層の形成により酸化腐食が抑制され、耐用年数が延長されます。
- 放射線障害の抑制
  - ナノ粒子は放射線によって生成された欠陥を捕捉し、転位滑りと空孔凝集を減らします。
  - 原子炉などの環境におけるタングステン合金の照射安定性を向上します。

#### 6.1.5 適用事例と効果検証

- 原子力用タングステン合金棒
  - 添加されたナノ  $Y_2O_3$  粒子は、高温および放射線条件下でより優れた構造安定性と耐放射線性を示す。
  - 従来のタングステン合金よりも 30%以上長くなります。
- 高温航空機エンジン部品
  - ナノ TiC 強化タングステン合金により、熱疲労耐性が大幅に向上します。
  - 材料強度が 20%~40% 増加し、靱性が大幅に向上します。
- 電子パッケージ用ヒートシンク材料
  - ナノ  $Al_2O_3$  強化タングステン合金は熱伝導性と熱膨張率のマッチングを改善し、熱応力を軽減します。
  - 熱安定性の向上により、長期にわたる安定した動作が保証されます。

#### 6.1.6 開発動向と課題

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **多成分ナノ複合強化システム**
  - 複数のナノ粒子を組み合わせることで相乗効果が得られ、性能限界に到達します。
- **ナノ粒子界面工学**
  - 粒子とマトリックス間の界面構造を最適化し、界面の結合強度と靱性を高めます。
- **環境に優しく低コストな調製技術**
  - ナノ粒子の製造および配合プロセスのコストを削減し、工業化の実現可能性を向上させます。
- **ナノ粒子のサイズと分布を正確に制御**
  - 高度な特性評価技術を使用して、精密な材料設計のための微細構造をリアルタイムで監視します。

## まとめ

ナノ粒子強化タングステン合金棒は、高性能ナノ強化相の導入により、タングステン合金の強度、靱性、高温安定性、耐放射線性を大幅に向上させ、原子力、航空宇宙、エレクトロニクスといったハイエンド分野におけるタングステン合金の応用に強固な材料基盤を提供します。今後、ナノ材料製造技術と複合技術の継続的な進歩により、ナノ粒子強化タングステン合金はより広範な応用展望とより優れた性能を示すでしょう。

## マイクロアロイドタングステン合金棒の設計と性能向上

マイクロアロイド技術は、タングステン合金マトリックスに微量の合金元素を添加し、微細な第二相粒子または固溶体強化を形成することで、材料の機械的特性と熱安定性を向上させる効果的な方法です。従来の合金化と比較して、マイクロアロイドは添加量が少なく、コストが低く、性能が大幅に向上するため、タングステン合金棒の性能を最適化するための重要な戦略となっています。

### 6.2.1 マイクロアロイド設計コンセプト

マイクロアロイングの中核は、微量の合金元素を添加することで以下の目標を達成することです。

- **固溶強化:** 合金元素が固溶体の形でタングステンマトリックス内に均一に分散し、格子歪みを増加させ、転位の移動を妨げます。
- **析出強化:** 小さく均一に分散した第 2 相析出物を形成し、転位と粒界を固定し、強度と靱性を向上させます。
- **結晶粒微細化:** 結晶粒の成長を抑制し、微細構造を最適化し、材料の総合的な機械的特性を向上させます。
- **高温性能の向上:** 材料の熱安定性とクリープ耐性を向上させ、耐用年数を延ばします。
- **プロセスの適応性を最適化:** 材料の成形および加工性能を向上させ、加工の難易度を軽減します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2.2 一般的に使用されるマイクロロイ元素とその作用機構

合金元素	作用機構	典型的な効果
チタン (Ti)	安定した炭化物または酸化物を形成し、粒子を微細化する	強度、靱性、耐摩耗性の向上
ニオブ (Nb)	固溶強化と析出強化	高温強度と耐腐食性の向上
バナジウム (V)	安定した第二相粒子を形成するための析出強化	降伏強度と疲労耐性の向上
アルミニウム (Al)	固溶強化により組織の均一性が向上する	高温酸化耐性と靱性を向上
ジルコニウム (Zr)	安定した酸化物粒子を形成し、粒界を固定する	高温での機械的特性と抗酸化能力を向上
銅 (Cu)	粒界強化を促進し、可塑性を向上させる	加工性能を最適化し、総合的な機械的特性を向上させる

## マイクロロイタングステン合金棒の製造方法

### 1. 合金元素の選択と添加方法

- 目標とする性能に応じて適切な元素とその含有量（通常は微量、0.1%～2%の範囲内）を選択します。
- 均一な分布を確保するために、高純度の合金粉末または元素粉末混合物を使用してください。

### 2. 粉末の混合と均質化

- 高エネルギーボールミル、メカニカルアロイングなどの技術を使用して、合金元素とタングステン粉末の均一な混合を実現します。
- ボールミルパラメータを制御することで過度の粉碎と凝集を回避します。

### 3. 成形と焼結

- 密度を確保するために、冷間等方加圧、成形、その他の方法を使用します。
- 高温焼結プロセスにより、合金元素の拡散と第 2 相の析出が促進されます。

### 4. 熱処理と機械加工

- 適切な熱処理により合金元素が活性化され、強化相が形成されます。
- 精密機械加工により、最終的な寸法と表面品質が保証されます。

## 6.2.4 パフォーマンス向上効果

### ● 大幅に改善された機械的特性

- 引張強度と降伏強度は 10%～30% 向上し、一部の高性能マイクロロイタングステン合金棒は 1000MPa を超えることもあります。
- 伸び、破壊靱性が向上し、耐衝撃性も向上します。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **熱安定性と高温強度の向上**
  - マイクロ合金元素の析出強化により粒成長が抑制され、材料は高温でも安定した組織構造を維持します。
  - クリープ耐性が向上し、高温用途に適しています。
- **耐腐食性と耐酸化性の向上**
  - 安定した不動態層を形成し、高温酸化や化学腐食を防ぎます。
  - 材料の耐用年数と信頼性を向上します。
- **処理パフォーマンスの最適化**
  - マイクロアロイ元素により粉末の流動性と成形性が向上し、処理の難しさやコストが低減します。

### 6.2.5 アプリケーション例

- **軍事分野におけるタングステン合金コア材料**
  - 微量の Ti と Nb を添加することで、高強度、高靱性が得られ、装甲貫通力も向上します。
  - コアの耐摩耗性と耐熱性を大幅に向上します。
- **航空宇宙用高温構造部品**
  - エンジンの高温部分にマイクロアロイタングステン合金を使用すると、耐用年数が延長されます。
  - 高温強度を維持し、熱疲労によるダメージを軽減します。
- **医療用放射線治療装置のタングステン合金棒**
  - 微量の Zr および V 元素を添加すると、耐摩耗性および耐腐食性が向上し、機器の寿命が伸びます。

### 6.2.6 開発動向と課題

- **微量合金元素の含有量と分布の精密制御**
  - 高度な特性評価技術を使用して合金設計を最適化し、正確なパフォーマンス制御を実現します。
- **多元素相乗効果のメカニズムに関する研究**
  - 複数のマイクロ合金要素間の相乗効果を探索して、パフォーマンスをさらに向上させます。
- **環境に優しいグリーン調製技術**
  - 環境保護要件を満たす、低エネルギー消費、低汚染のマイクロアロイタングステン合金生産プロセスを開発します。
- **工業化と大規模応用**
  - コストとプロセスの複雑さの問題を解決し、より多くの分野でのマイクロアロイタングステン合金の広範な応用を促進します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## まとめ

マイクロアロイ技術は、タングステン合金棒に微量の機能性合金元素を添加することで、材料の機械的特性、熱安定性、加工性を多面的に向上させます。この技術は、タングステン合金の応用範囲を拡大するだけでなく、高性能タングステン合金材料の研究開発に有効な道筋を提供します。今後、製造技術と理論研究の深化に伴い、マイクロアロイ・タングステン合金はより広範な発展の可能性を切り開くでしょう。

## 6.3 高強度・高靱性タングステン合金棒の組成制御

タングステン合金棒は、航空宇宙、軍事産業、原子力エネルギーといった過酷な使用条件で使用されるため、通常、高強度と高靱性の両方が求められます。従来のタングステン合金は高強度に重点を置いていますが、靱性が不足しており、破損しやすいという問題がありました。高強度で靱性の高いタングステン合金棒を製造するための重要な戦略は、合金組成を精密に制御することにより、マトリックスと第二相の最適な組み合わせを実現することです。

### 6.3.1 高強度・高靱性タングステン合金の組成制御の基本原則

#### 1. 主要合金元素比の適切な選択

- タングステンマトリックス中のニッケル (Ni)、鉄 (Fe)、銅 (Cu) などの主要な元素の割合によって、マトリックスの機械的特性と組織構造が決まります。
- Ni/Fe 比と銅含有量を適切に調整して、強度と靱性のバランスを実現します。

#### 2. 複数の合金元素を導入して相乗的な強化を実現

- チタン (Ti)、ジルコニウム (Zr)、バナジウム (V) などの微量合金元素を添加することで強化相を形成し、細粒強化と析出強化を実現します。
- 複数の要素の相乗効果により、界面の結合が強化され、全体的な靱性が向上します。

#### 3. 不純物元素の含有量を制御する

- 酸素、炭素、硫黄などの不純物を減らし、脆い相の形成を防ぎ、材料の靱性を向上させます。

#### 4. 合金組成勾配設計の最適化

- 勾配合金設計を採用することで、硬度と靱性のゾーン分布を実現し、全体的なパフォーマンスを向上させます。

### 6.3.2 組成調節による組織構造への影響

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **タングステンマトリックスと合金元素の固溶挙動** タングステンマトリックス中の合金元素の固溶強化により強度は向上しますが、過剰な固溶は韌性が低下するため、含有量を厳密に制御する必要があります。
- **第 2 相析出物の形成** マイクロ合金化元素によって形成された炭化物および酸化物粒子は析出相として機能し、粒子を微細化し、亀裂の伝播を妨げます。
- **粒径と分布** 組成の制御は粒径に影響を及ぼし、粒成長を抑制することで韌性と疲労性能を向上させます。

### 6.3.3 典型的な高強度・高韌性タングステン合金組成設計

成分システム	主な特徴	パフォーマンス
W-Ni-Fe-Cu-Ti-Zr	複数のマイクロアロイ元素、結晶粒微細化、析出強化	強度が 20%～30% 増加し、韌性が大幅に向上
W-Ni-Fe-Cu-V-Al	相乗的な固溶強化と析出強化、優れた耐疲労性	衝撃韌性の向上と疲労寿命の延長
W-Ni-Cu-微量希土類元素	希土類元素は粒界結合を改善し、脆性破壊を防ぐ	破壊韌性の向上と耐熱性の向上

### 6.3.4 成分規制による性能向上メカニズム

- **界面強化と亀裂固定** 小さな第 2 相粒子が粒界の結合力を高め、粒界に沿って亀裂が広がるのを防ぎます。
- **結晶粒微細化と転位障害** 成分の調整により、結晶粒微細化が促進され、転位移動抵抗が増大し、強度と塑性が向上します。
- **固溶強化および韌性最適化では、** 固溶元素の含有量を正確に制御して、強度と韌性の関係のバランスをとります。

### 6.3.5 適用分野と効果検証

- **軍用徹甲弾芯材の** 高強度かつ強靭なタングステン合金棒は、貫通能力と耐摩耗性を大幅に向上させ、脆性破壊のリスクを軽減します。
- **航空機エンジンの耐高温構造部品の製造により、** 高温環境下における材料の韌性と強度を確保し、安全性を向上させます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 原子力設備の耐放射線部品の採用により、耐用年数が延び、メンテナンスコストが削減されます。

#### 6.3.6 今後の開発方向

- **計算材料設計**  
では、計算シミュレーションを使用して組成と性能の関係を正確に予測し、カスタマイズされた高強度、高靱性のタングステン合金を製造できます。
- **高度な合成技術は、成分設計**  
、熱処理、熱間静水圧プレスなどの技術と組み合わせられ、成分調整の効果を高めることができます。
- ナノレベルからマクロレベルまでのマルチスケール構造制御によりパフォーマンスの最適化を実現します。

#### まとめ

高強度・高靱性タングステン合金棒の組成制御は、合金元素の種類と割合を精密に設計し、微細組織を最適化することで、強度と靱性の相乗的な向上を実現します。この戦略は、タングステン合金の脆性というボトルネックを解消するだけでなく、過酷な作業条件における幅広い応用のための確固たる基盤を築きます。材料設計理論と製造技術の進歩に伴い、高強度・高靱性タングステン合金の性能は今後も飛躍的に向上し、関連産業の技術向上を促進します。

### 6.4 耐熱タングステン合金棒の熱処理に関する研究

タングステン合金は、高い融点、高密度、優れた機械的特性を有するため、高温環境で広く使用されています。しかし、タングステン合金は、極度の高温条件下では、粒成長、構造不安定性、性能劣化を起こしやすいという欠点があります。熱処理は、タングステン合金の微細組織と特性を調整するための重要なプロセスであり、タングステン合金の耐高温性を向上させる重要な手段です。

#### 6.4.1 タングステン合金の熱処理の目的と意義

- **均一性の向上:** 適切な焼鈍および時効プロセスを通じて内部応力を除去し、粒径を均一にします。
- **特性の改善:** 粒度と第 2 相の析出を最適化して強度と靱性を強化します。
- **高温性能の安定化:** 粒成長を抑制し、高温クリープおよび軟化を遅らせます。
- **耐食性の向上:** 表面熱処理により酸化膜の密度と安定性を向上します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 6.4.2 一般的に使用される熱処理プロセスとパラメータ

プロセスタイプ	温度範囲(°C)	絶縁時間	主な機能
アニーリング	800~1200	1~5 時間	内部応力を除去し、粒子を微細化する
エージング	500~900	2~10 時間	第二相の沈殿を促進し、マトリックスを強化する
溶解処理	1200~1400	0.5~3 時間	相を溶解し、組成を均一にする
表面熱処理（窒化・浸炭）	900~1100	1~4 時間	表面硬度と耐酸化性の向上

#### 6.4.3 熱処理による微細構造への影響

- 粒度制御:**  
適切な焼鈍温度により、粒を微細化し、過度な粒成長を防ぎ、材料の強度と靱性のバランスを維持できます。
- 第二相析出・分散**  
時効処理により、強化相の微細かつ均一な析出が促進され、転位の移動を阻害する効果が向上します。
- 内部応力の除去**  
焼鈍処理により加工残留応力が解放され、応力集中が軽減され、脆性破壊のリスクが軽減されます。

#### 6.4.4 耐高温性向上のメカニズム

- 結晶粒微細化により、**  
細かく均一な結晶粒構造が強化され、高温クリープ耐性と疲労寿命が向上します。
- 析出相は**  
安定した第 2 相粒子を強化し、粒界を固定して粒界移動を妨げ、高温強度を向上させます。
- 酸化膜保護:**  
表面熱処理により緻密な酸化膜が形成され、酸化腐食を防ぎ、抗酸化特性が向上します。

#### 6.4.5 典型的な研究結果と事例

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **高温焼鈍処理の最適化**  
研究により、1100°Cで3時間焼鈍処理すると、結晶粒が大幅に微細化され、タングステン合金の引張強度が15%増加し、伸びが10%増加することがわかりました。
- **時効強化効果**  
650°Cで6時間時効処理すると、強化相が均一に析出し、材料の高温クリープ速度が20%減少します。
- **表面窒化処理**  
表面窒化処理により硬度が40%増加し、酸化温度が約200°C上昇し、耐酸化性が大幅に向上します。

#### 6.4.6 熱処理プロセスの最適化戦略

- **多段階熱処理プロセス設計では、**  
焼鈍、溶体化処理、時効処理を組み合わせることで組織構造を調整します。
- **正確な温度制御と雰囲気制御により、**  
真空または保護雰囲気を 사용하여二次酸化を回避し、熱処理効果を保証します。
- **熱処理は成形プロセスと連動しており、**  
組織の損傷を避けるために、前回の成形プロセスの特性に応じて熱処理計画をカスタマイズします。

#### 6.4.7 開発動向と課題

- **インテリジェントな熱処理技術は、**  
オンライン監視と制御を使用して、熱処理プロセスのリアルタイムの最適化を実現します。
- **高温使用性能の長期評価**  
熱処理が高温クリープおよび疲労特性に与える影響を詳細に研究します。
- **微細構造と性能を組み合わせることで熱処理プロセスの設計をガイドする**  
マルチスケールシミュレーションツールを開発します。

#### まとめ

熱処理技術は、タングステン合金棒の耐高温性を向上させるための中核技術です。科学的かつ合理的な熱処理プロセス設計により、微細組織を効果的に制御し、強度、靱性、高温安定性を向上させることで、航空宇宙、原子力などの分野における高温タングステン合金材料に対する厳しい要求を満たすことができます。将来的には、インテリジェント化とデジタル化が進み、タングステン合金の熱処理プロセスはより高いレベルへと進化していくでしょう。

### 6.5 表面コーティングと耐摩耗性強化タングステン合金棒

タングステン合金棒は高密度、高強度といった利点を有するものの、高応力、摩擦、腐食環境下では、露出したタングステン合金表面が摩耗、酸化、腐食を受けやすく、寿命と性能安定性に影響を与えます。表面コーティング技術は、タングステン合金の表面性能を向

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

上させる重要な手段です。保護層を形成することで耐摩耗性と耐腐食性を大幅に向上させるため、特殊タングステン合金棒の研究開発における重要な方向性となっています。

### 6.5.1 タングステン合金表面の摩耗と腐食のメカニズム

- 機械的摩耗**  
タングステン合金の接触および摩擦プロセス中に、表面材料は摩擦とせん断力により塑性変形および疲労亀裂を起し、材料の剥離や砥粒の脱落を引き起こします。
- 化学腐食と酸化**  
高温または腐食性媒体の作用により、タングステン合金の表面に酸化物層または腐食生成物が形成され、表面強度が低下し、剥がれやすくなり、摩耗が悪化します。
- 疲労摩耗と界面劣化**  
繰り返し荷重により、微小亀裂が伝播し、表面コーティングが剥がれ、保護効果が失われます。

### 6.5.2 表面コーティング材料の選択

コーティングタイプ	主な特徴	利点と用途
硬質セラミックコーティング (TiN など) CrN、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	高硬度、耐摩耗性、耐高温性	機械部品、金型、耐摩耗部品
炭素系コーティング (ダイヤモンド、窒化炭素など)	非常に高い硬度、低い摩擦係数	精密機器、切削工具
NiCr など)	優れた靱性、耐摩耗性、耐腐食性	高負荷の機械部品
多層機能性コーティング	硬度、靱性、耐酸化性を兼ね備えた	複雑なサービス環境における包括的なパフォーマンス要件

### 6.5.3 表面コーティング技術

- 物理蒸着法 (PVD)**  
は、蒸発またはスパッタリングを用いて硬質膜を堆積します。コーティングは緻密で強力な結合力を有し、高精度のタングステン合金部品に適しています。
- 化学蒸着法 (CVD)**  
は化学反応を利用して均一なコーティングを形成します。複雑な形状の部品に適しており、耐高温性に優れています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **溶射技術は**  
、熔融粒子を噴射することで皮膜を堆積させる技術です。厚膜や補修に適しており、皮膜の靱性も優れています。
- **レーザー表面クラディング**  
では、レーザーを使用して粉末材料を溶かし、コーティングと基材の間に冶金結合を実現し、コーティングに耐摩耗性と耐腐食性を与えます。
- **電気めっきと電気化学堆積は、**  
金属コーティングを堆積して表面の導電性と耐腐食性を向上させるのに適しています。

#### 6.5.4 表面コーティングによるタングステン合金の性能向上

- **硬度と耐摩耗性が大幅に向上**  
コーティングは基材よりも硬度が高く、摩擦、摩耗、表面の塑性変形を効果的に防止します。
- **耐食性と耐酸化性を強化して**  
安定した保護膜を形成し、腐食性媒体を隔離し、酸化プロセスを遅らせます。
- **表面摩擦性能を向上させ**  
、摩擦係数を低減し、発熱と材料損失を低減します。
- **高温使用能力を向上。**  
コーティングは優れた耐高温性を備え、高温環境における構造安定性を確保します。

#### 6.5.5 耐摩耗性強化タングステン合金棒の設計戦略

- **コーティングと基材のマッチング設計**  
により、コーティングの熱膨張係数が基材の熱膨張係数と一致するように制御され、高温下での熱応力によるコーティングのひび割れや剥離を回避します。
- **多層複合コーティング技術は、**  
硬質層と強靱層を使用することで、耐摩耗性と耐衝撃性を兼ね備えています。
- **表面粗さの最適化:**  
コーティング前の詳細な表面処理によりコーティングの密着性が向上します。
- **コーティングの厚さと均一性の管理**  
コーティングの厚さを合理的に設計し、厚さの不均一による性能低下を防ぎます。

#### 6.5.6 適用事例

- **航空宇宙エンジンのタービンブレードのタングステン合金コーティング**  
を採用 TiN / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>複合コーティングにより、耐摩耗性が 50% 向上し、ブレードの寿命が大幅に延長されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **軍用徹甲弾コアコーティング技術：**  
硬質炭化物コーティングにより、コアの表面硬度が高まり、貫通力と耐摩耗性が向上します。
- **電子放熱部品の表面に**  
コーティングを施すことで、熱伝導性と耐腐食性が向上し、機器の長期安定動作が保証されます。

#### 6.5.7 開発動向と課題

- **ナノ構造コーティングの開発**  
ナノ結晶コーティングは密度が高く、硬度と靱性の両方を備え、耐摩耗性も優れています。
- **インテリジェントコーティング機能統合**  
により、自己修復、抗菌、防錆などの機能が組み合わせられ、応用分野が拡大します。
- **環境に優しいコーティング技術と**  
グリーン製造プロセスにより、環境への影響が軽減され、業界の持続可能性が向上します。
- **コーティングと基板間のインターフェースエンジニアリングの最適化**  
により、インターフェースの結合強度が向上し、コーティングの剥離や疲労破損が防止されます。

#### まとめ

表面コーティング技術は、タングステン合金棒に効率的な耐摩耗性と耐腐食性を提供し、極限環境下における耐用年数と性能安定性を大幅に向上させます。先進的なコーティング材料と製造プロセスの継続的な開発により、耐摩耗性と強度が向上したタングステン合金棒は、航空宇宙、軍事産業、そしてハイエンド製造業においてより重要な役割を果たすようになるでしょう。将来的には、コーティング機能の多様化とインテリジェント化が、技術開発の新たな方向性となるでしょう。

#### 6.6 機能性タングステン合金棒：導電性、熱伝導性、耐磁性

高密度・高性能材料であるタングステン合金棒は、優れた機械的特性と高温安定性を有するだけでなく、現代産業やハイテク分野における多機能材料としての需要が高まっています。導電性、熱伝導性、耐磁性といった機能性タングステン合金棒は、徐々に研究開発の焦点となっています。材料設計とプロセス制御を通じて、タングステン合金棒の機能化を実現し、その応用分野を拡大し、全体的な性能を向上させることができます。

#### 導電性タングステン合金棒の設計と応用

- **設計原則**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 優れた機械的特性を維持しながら合金の電気伝導性を向上させます。
- 合金元素の種類と含有量を最適化して電子移動の障害を低減します。
- 微細構造を制御し、粒界や欠陥が抵抗に与える影響を軽減します。
- 一般的な合金元素
  - 銅 (Cu) は優れた導電性元素であり、タングステン合金の導電性を向上させるためによく使用されます。
  - 銀 (Ag) やニッケル (Ni) などの元素を適切に添加すると、導電性と機械的特性のバランスが向上します。
- 応用分野
  - 電子包装材料
  - 真空電子機器の電極材料
  - 高周波回路の放熱をサポートします。
- パフォーマンス特性
  - 抵抗率はマイクロオーム cm レベルまで低減できます。
  - 同時に、高い強度と熱安定性を維持します。
  - 機械加工性と寸法安定性に優れています。

## 熱伝導性タングステン合金棒の設計と応用

- デザイン戦略
  - タングステン自体の高い熱伝導性を活かし、高熱伝導性合金元素と組み合わせることで、全体の熱伝導性を向上させます。
  - 微細構造を最適化し、熱抵抗インターフェースを低減します。
  - 散乱効果を低減するために、粒子微細化および欠陥制御プロセスを適用します。
- 典型的な合金系
  - タングステン銅 (W-Cu) 複合合金は、高熱伝導性アプリケーションで広く使用されています。
  - マイクロアロイとナノ構造設計による熱伝導率の向上。
- アプリケーションシナリオ
  - 高出力電子機器の放熱部品。
  - 航空機エンジンの燃焼室および熱交換器
  - レーザーおよび原子炉の熱管理コンポーネント。
- パフォーマンス上の利点
  - 熱伝導率は純タングステンに比べて大幅に優れており、 $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以上に達します。
  - 高密度、高強度、優れた熱安定性を兼ね備えています。

## 耐磁性タングステン合金棒の設計と応用

- 設計目標

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 強磁場環境でタングステン合金を非磁性または弱磁性にする。
- 磁場干渉を防ぎ、機器の正常な動作を確保します。
- **原材料管理**
  - 鉄 (Fe)、コバルト (Co)、ニッケル (Ni) などの強磁性元素の含有量を減らします。
  - クロム (Cr) やマンガン (Mn) などの非磁性合金元素を添加する。
  - 固溶強化と第 2 相制御を利用して磁気応答を低減します。
- **応用分野**
  - 磁気共鳴画像 (MRI) 装置
  - 高精度磁場測定器
  - 粒子加速器および原子炉のコンポーネント。
- **パフォーマンス**
  - 透磁率は 1 (真空の透磁率) に近いです。
  - 優れた機械的特性と耐高温特性を維持します。
  - 優れた耐放射線性と耐腐食性。

#### 機能性タングステン合金棒の製造技術

- **精密粉末冶金技術は、**  
粉末の純度と粒子サイズを制御し、均一な組成を確保して欠陥を減らします。
- **高度な熱処理技術**  
により微細構造を調整し、機能性能を最適化します。
- **表面改質技術は**  
、導電性コーティング、耐摩耗性コーティングなどの表面機能を向上させます。
- **付加製造により**  
、複雑な構造と機能勾配の設計が可能になり、多機能のニーズに対応できます。

#### 6.6.5 将来の開発動向

- **多機能統合設計では**  
、電気伝導性、熱伝導性、耐磁性などの複数の機能を考慮し、複雑なアプリケーション要件を満たします。
- **ナノ構造の操作**  
では、ナノテクノロジーを使用してパフォーマンスをさらに向上させ、安定性を強化します。
- **スマート材料開発**  
環境の変化に対応し、適応的な性能調整を実現するスマートタングステン合金材料を開発します。
- **グリーンで環境に優しい調製技術は、**  
低エネルギー消費と低汚染の調製プロセスを促進し、持続可能な開発を促進します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## まとめ

機能性タングステン合金棒は、合理的な組成設計とプロセスの最適化により、導電性、熱伝導性、耐磁性といった複数の特殊機能を実現し、ハイテク分野におけるタングステン合金の応用範囲を大きく拡大しています。材料科学と製造技術の継続的な進歩に伴い、機能性タングステン合金棒は、エレクトロニクス、航空、医療といった多くの最先端分野においてますます重要な役割を果たすようになるでしょう。

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

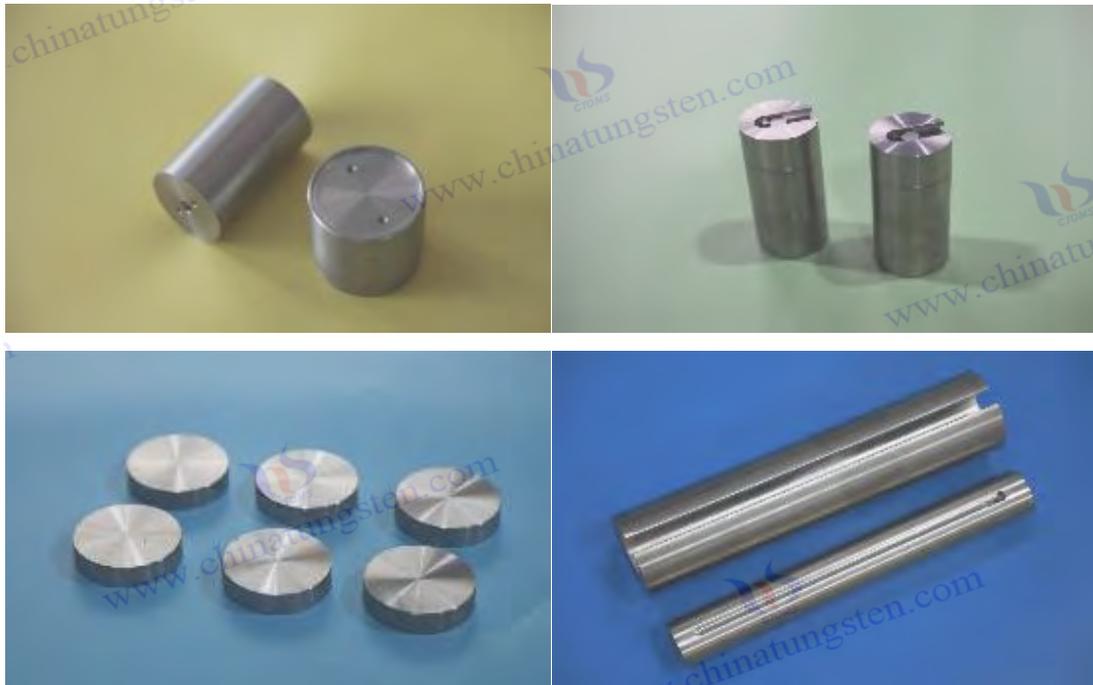
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 第7章 タングステン合金棒のコンプライアンスシステム

### 7.1 中国の国家規格/業界規格（GB/T、YS/T）

タングステン合金棒は重要な高性能材料であるため、工業生産および応用において厳格な品質・性能基準を満たす必要があります。中国の国家規格（GB/T）および業界規格（YS/T）システムは、タングステン合金棒の製造、試験、応用に規制上の根拠を提供し、安定した製品品質と業界の健全な発展を保証しています。

#### 7.1.1 中国の標準システムの概要

- **国家標準（GB/T）**  
国家標準は、国家市場監督管理総局と国家標準化管理局によって発行され、材料特性、試験方法、技術要求などを網羅しており、企業の生産および品質検査の基礎となります。例：GB/T 23789-2017「高比重タングステン合金材料」、GB/T 20211-2006「タングステン合金棒」。
- **業界標準（YS/T）**  
は、関係する業界機関によって策定され、業界の特性に応じて標準要件を精緻化し、業界内の技術仕様および評価に適用できます。例：YS/T 531-2014「タングステン合金およびタングステン銅合金材料に関する一般技術条件」

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **地域標準と企業標準**

一部の地域や企業では、経営の洗練化や競争力の強化を図るため、実際のニーズに基づいて補足標準を策定しています。

### 7.1.2 主な国家規格（GB/T）

規格番号	標準名	主な内容と応用
GB/T 23789-2017	高比重タングステン合金材料	タングステン合金の分類、技術要件、性能指標など。
GB/T 20211-2006	タングステン合金ロッド	タングステン合金棒の化学組成および機械的性質の試験方法
GB/T 13298-2009	タングステン合金材料の機械的特性試験方法	機械的特性試験規格および試験方法を標準化する
GB/T 19290-2003	タングステン合金材料の密度測定方法	タングステン合金密度の測定と誤差分析

### 7.1.3 主な業界標準（YS/T）

規格番号	標準名	適用範囲と特徴
YS/T 531-2014	タングステン合金およびタングステン銅合金材料の一般的な技術要件	タングステン合金およびタングステン銅合金の技術要件の詳細仕様
YS/T 155-2012	高密度タングステン合金製品	タングステン合金製品の製造工程と性能管理
YS/T 786-2016	タングステン合金の機械的特性試験方法	正確な試験データを確保するための機械的特性試験規格

### 7.1.4 規格の要点

- **化学成分管理**

規格では、タングステン、ニッケル、鉄、銅などの元素の含有量範囲と不純物の制限が明確に定義されており、安定した材料性能が確保されます。

- **機械的性能指標は、**

さまざまな用途の要件を満たすために、引張強度、降伏強度、伸び、硬度などの主要な性能指標を指定します。

- **寸法精度と表面品質は、**

タングステン合金棒の寸法公差、表面粗さ、欠陥限界に対して特定の要件を課します。

- **検査および試験方法には、**

製品の品質が管理可能であることを保証するための密度測定、金属組織分析、機械的特性試験、非破壊検査技術基準が含まれます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 7.1.5 標準の実施と監督管理

- **製造企業の責任**  
企業は、製品が仕様を満たしていることを保証するために、生産と検査において国家および業界の標準に厳密に従う必要があります。
- **監督機関の品質**  
監督部門は、基準の実施と製品品質の抜き取り検査を監督する責任を負います。
- **認証および試験機関**  
サードパーティの認証機関は、市場での受け入れを強化するために、企業および製品の品質認証を提供します。

### 7.1.6 標準の更新と開発動向

- 航空宇宙、原子力産業などの分野における技術の向上に伴い、ハイエンドのアプリケーションニーズに適応し、パフォーマンス指標と検出精度を向上させるために標準が絶えず改良されています。
- **環境基準と安全基準の統合**  
により、グリーン製造と国際コンプライアンス要件に沿って、環境保護と安全性性能仕様が強化されます。
- **国際的な統合と調整は、**  
ISO などの国際標準との統合を促進し、中国のタングステン合金棒産業の国際化を促進します。

#### まとめ

中国のタングステン合金棒国家規格（GB/T）および業界規格（YS/T）システムは、タングステン合金棒の生産と応用に包括的な技術サポートと品質保証を提供します。技術の進歩と市場需要の変化に伴い、規格システムは継続的に改善され、中国のタングステン合金棒産業が着実に高品質な発展と国際競争力の確保に向けて前進することを支援しています。

## 7.2 アメリカ規格システム（ASTM、MIL）

先進的な製造技術と材料技術の世界における重要な国として、米国はタングステン合金棒の生産、試験、そして応用に広範な影響力を持っています。ASTM（米国材料試験協会）規格と MIL（米国軍事規格）は、米国のタングステン合金材料規格の中核を成しており、製品の性能が民生・軍事分野の厳しい要件を満たすことを保証しています。

### 7.2.1 ASTM 規格システムの概要

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ASTM International は、国際的に有名な標準設定組織として、材料科学と産業用途の発展を促進するために、材料特性、試験方法、品質管理を網羅した一連の標準の開発を担当しています。
- タングステン合金に関する ASTM 規格  
ASTM 規格は、タングステン合金の化学組成、機械的特性、試験方法、品質評価を体系的に規制します。

### 7.2.2 主な ASTM 規格とアプリケーション

規格番号	標準名	コンテンツ
ASTM B777	タングステンおよびタングステン合金粉末の仕様	粉末の品質要件と検査方法
ASTM B777-18	タングステン合金の密度および機械的特性試験規格	タングステン合金の密度、引張強度、硬度試験
ASTM E8/E8M	金属材料引張試験規格	タングステン合金の引張試験手順を標準化する
ASTM B765	タングステン合金材料の化学分析方法	タングステン合金組成のスペクトル分析および検出方法
ASTM E112	粒度測定基準	タングステン合金の微細構造

### 7.2.3 MIL（軍事規格）システムの概要

- MIL 規格システムは、米国国防総省が策定した軍事規格であり、軍用製品に極めて高い性能、信頼性、安全性の要件を定めています。主要材料の一つであるタングステン合金についても、MIL 規格は材料調製、性能指標、品質管理を網羅しています。
- MIL 規格の特徴は、材料の使用性能と環境適応性に重点を置いていることです。その仕様は厳格かつ運用性に優れており、軍用弾薬、航空宇宙、原子力機器などに広く使用されています。

### 7.2.4 代表的な MIL 規格とその適用

規格番号	標準名	メインコンテンツ
MIL-T-21005	タングステン合金棒および製品	タングステン合金棒の組成、機械的特性および寸法仕様
MIL-STD-810	環境工学上の考慮事項と実験試験基準	過酷な環境におけるタングステン合金材料

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MIL-STD-883	マイクロエレクトロニクスデバイス の材料試験方法	マイクロエレクトロニクスパッケージにおける タングステン合金
-------------	-----------------------------	-----------------------------------

### 7.2.5 規格の要点

- 厳格な化学組成と不純物管理**  
 MIL 規格では、材料特性の一貫性を保ち、軍事用途の厳しい基準を満たすために、合金の組成と不純物含有量に厳しい制限を設けています。
- 包括的な機械的特性試験に**  
 は、引張強度、降伏強度、伸び、硬度、疲労性能が含まれており、過酷な条件下でのタングステン合金棒の信頼性を保証します。
- 環境適応性テスト:**  
 高温、低温、湿度、振動、衝撃などの環境に対する詳細なテスト計画を作成します。
- 品質管理およびトレーサビリティ システムは、**  
 材料品質のライフサイクル全体の管理を確実にするために、生産プロセスの制御と製品のトレーサビリティを重視します。

### 7.2.6 米国標準システムの利点と影響

- 高い国際的認知度**  
 ASTM および MIL 規格は世界中で広く認知、採用されており、タングステン合金棒の国際貿易と技術協力を促進しています。
- 技術革新**  
 基準を推進し、材料性能と試験技術の継続的な向上を促進し、産業技術の進歩を推進します。
- 重要な用途の安全性を確保します**  
 。航空宇宙、軍事、原子力産業におけるタングステン合金材料の安全かつ安定した使用を確保するために、厳格な基準が設けられています。

#### まとめ

米国の ASTM 規格と MIL 規格は、タングステン合金棒の品質管理と性能保証のための完璧な枠組みを提供し、民生用途から軍事用途まで多様なニーズに対応しています。その科学的かつ厳格な規格内容と幅広い業界への適用性は、世界中でタングステン合金材料の開発と応用を促進する上で積極的な役割を果たしてきました。

### 7.3 EU および ISO 国際規格

世界的なタングステン合金材料の貿易と技術交流の頻度が高まるにつれ、欧州連合 (EU) と国際標準化機構 (ISO) が策定した関連規格は、タングステン合金棒業界の国際化を促進し、技術仕様を統一する上で重要な力となっている。EU 規格は環境保護、安全性、コ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンプライアンスを重視し、ISO 規格は材料特性と試験方法の国際統一に焦点を当て、世界市場におけるタングステン合金棒に権威ある技術的枠組みを提供している。

### 7.3.1 EU 規格システムの概要

- EU の標準化機関は**  
 、主に欧州標準化委員会（CEN）、欧州電気標準化委員会（CENELEC）、欧州電気通信標準化機構（ETSI）で構成されています。タングステン合金棒に関する規格は、通常、安全性、環境、性能要件に重点を置いて CEN によって策定されます。
- EU コンプライアンス フレームワーク タングステン**  
 合金材料は、製品の安全性と環境コンプライアンスを確保するために、RoHS (有害物質の使用制限に関する指令)、REACH (化学物質の登録、評価、認可および制限) などの EU 環境規制に準拠する必要があります。

### 7.3.2 主な EU 関連規格および規制

規格/規制名	メインコンテンツ	適用範囲
EN 12502 シリーズ	タングステンおよびタングステン合金材料の規格および試験方法	タングステン合金材料の性能と品質試験
RoHS 指令 (2011/65/EU)	電気電子機器における有害物質の使用制限	タングステン合金電子部品および関連製品
REACH 規則 (EC 1907/2006)	化学物質の登録および安全管理要件	タングステン合金の生産とサプライチェーンにおける環境コンプライアンス
CE マーキング	製品の安全性とコンプライアンスの認証マーク	タングステン合金製品が EU 市場に参入

### 7.3.3 ISO 国際規格システムの概要

- ISO 組織の概要**  
 国際標準化機構 (ISO) は、材料特性、試験方法、品質管理など、多くの側面を網羅する世界統一規格を策定する権威ある組織です。
- タングステン合金に関する ISO 規格**  
 ISO 規格は、タングステン合金材料の性能指標、試験方法、品質管理を規制することに重点を置いており、国際貿易と技術協力の統一された基盤を提供します。

### 7.3.4 主な ISO 規格とその適用

規格番号	標準名	メインコンテンツ
ISO9001	品質管理システムの要件	タングステン合金棒製造企業の品質管理システム
ISO 16143	金属粉末材料 - 粉末冶金タングステン合金	タングステン合金粉末の技術仕様と試験方法

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 4967	炭素と硫黄の測定方法	タングステン合金材料の化学組成試験
ISO 6892	金属材料の引張試験方法	タングステン合金の機械的性質引張試験規格
ISO 6507	金属硬度試験 - ビッカース硬度	タングステン合金硬度試験の国際規格

### 7.3.5 規格の要点

- **環境および安全コンプライアンス**  
EU 規格では、有害物質の使用が厳しく制限されており、タングステン合金材料が環境保護要件を満たし、グリーン製造が促進されることが保証されています。
- **性能試験の国際統一**  
ISO 規格は、タングステン合金の物理的および機械的性能試験方法を統一し、国をまたがる製品の性能データの比較可能性を確保します。
- **品質管理システムの構築は、**  
タングステン合金メーカーが健全な品質管理システムを確立し、生産および管理レベルを向上させることを促進します。
- **技術交流と市場アクセス**  
により国際貿易障壁が低減され、タングステン合金棒製品が世界市場に参入しやすくなります。

### 7.3.6 EU 規格と ISO 規格の相乗効果

- EU 規格は多くの場合、ISO 国際規格を参照して策定され、技術規格の世界的な一貫性を促進します。
- ISO 規格は、企業に品質管理と技術仕様の基盤を提供し、EU 規制に準拠したコンプライアンス認証をサポートします。
- 双方は共同でタングステン合金産業の技術向上とグリーン開発を推進し、国際協力を推進する。

#### まとめ

EU および ISO 規格システムは、タングステン合金棒業界に包括的な国際規制の枠組みを提供し、性能、試験、環境保護、品質管理など、多面的な側面を網羅しています。これらの規格への準拠は、製品の品質と安全性の確保に役立つだけでなく、中国のタングステン合金企業の国際競争力と市場拡大を促進します。今後、国際規格の継続的な改善と更新により、タングステン合金棒業界はより高いレベルの標準化と国際発展へと進むでしょう。

## 7.4 環境保護および材料安全認証（RoHS、REACH、MSDS）

世界が環境保護と労働安全衛生への関心を高めるにつれ、タングステン合金棒の製造と応用は、関連する環境法規制および材料安全基準を厳格に遵守する必要があります。RoHS、REACH、MSDS 認証は、タングステン合金企業が国際市場、特に EU 市場に参入するた

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

めの必須条件となっています。これらの認証は、材料の環境適合性を保証するだけでなく、ユーザーと環境の安全も保証します。

#### 7.4.1 RoHS 指令（有害物質の使用制限指令）

- 指令の概要

RoHS（有害物質の使用制限）指令は、電気電子機器における有害物質の使用を制限し、環境と人間の健康を保護するために、2003年に欧州連合によって発行されました。

- 主な規制物質

としては、鉛（Pb）、水銀（Hg）、カドミウム（Cd）、六価クロム（Cr（VI））、ポリ臭化ビフェニル（PBB）、ポリ臭化ジフェニルエーテル（PBDE）などがあります。

- タングステン合金棒への影響

タングステン合金材料を電子・電気製品に使用する場合、制限を超えて市場へのアクセスに影響を与えないように、上記の有害物質の含有量が RoHS 制限を満たしていることを確認する必要があります。

- 試験およびコンプライアンス企業には

、厳格な材料組成試験を実施し、RoHS コンプライアンス宣言および試験レポートを提供する義務があります。

#### 7.4.2 REACH 規則（化学物質の登録、評価、認可および制限）

- 規制の背景

REACH は、欧州連合が 2007 年に施行した包括的な化学物質管理規制であり、製造業者と輸入業者に化学物質の安全性の登録と評価を義務付けています。

- タングステン合金材料の登録義務

タングステン合金製造業者は、製品を欧州化学物質庁（ECHA）に登録し、安全性データとリスク評価を提出する必要があります。

- 材料の評価と制限

タングステンとその化合物が高懸念物質（SVHC）のリストに含まれている場合、特別な管理と制限が必要です。

- サプライチェーンの責任を

果たすには、企業はサプライチェーン内の化学物質情報について透明性を保ち、下流のユーザーが物質の安全性に関する情報を認識していることを確認する必要があります。

#### 7.4.3 MSDS（化学物質等安全データシート）

- 定義と機能

MSDS は、タングステン合金棒の化学的性質、健康への危険性、保護措置、および緊急時の処置ガイドラインを提供する物質安全データシートです。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **内容には**  
、物理的および化学的特性、危険性の特定、保管および輸送、暴露管理および個人の保護に関する情報が含まれている必要があります。
- **企業の義務**  
生産・供給企業は、安全な使用を確保するために国際基準に準拠した MSDS を作成し、提供する必要があります。

#### 7.4.4 環境保護と安全認証の重要性

- 有害物質の排出を抑制し、環境汚染や労働衛生リスクを軽減することで、**環境と健康を保護**します。
- **市場へのアクセスを促進**  
RoHS および REACH 認証を通じて、タングステン合金棒製品は EU および世界の主要市場で認められています。
- **企業競争力の向上**  
環境コンプライアンスは、企業の社会的責任とブランドの評判を示す重要なものです。
- **持続可能な開発をサポートし、**  
グリーン製造と循環型経済を推進し、業界の健全な発展を促進します。

#### 7.4.5 タングステン合金企業の対応戦略

- **材料成分管理を強化し**  
、原材料調達および生産プロセスにおける有害物質の含有量を厳しく管理します。
- **テストおよび監視システムを改善し、**  
内部テスト機能を確立し、サードパーティの認証機関と協力してコンプライアンステストを実行します。
- 顧客と市場のニーズを満たすために、RoHS、REACH などの認証を取得するために、**関連する認証を積極的に申請**します。
- **情報の透明性を高め**  
、完全な MSDS と技術サポートを提供して、顧客による安全な使用を保証します。

#### 要約:

環境保護と材料安全認証は、タングステン合金棒業界が国際市場に参入するための重要なパスです。RoHS および REACH 規制を厳格に遵守し、MSDS 管理を改善することで、企業は製品の安全性とコンプライアンスを確保するだけでなく、持続可能な発展とグローバル競争のための強固な基盤を築くことができます。今後、環境保護法規制の継続的な改善に伴い、タングステン合金棒企業は、より高い市場および社会の要求に適応するために、環境管理レベルを継続的に向上させる必要があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.5 航空、軍事、医療分野における品質システム要件

タングステン合金棒は、主要な高性能材料として、航空宇宙、軍事機器、医療機器といったハイエンド分野で使用されており、品質システムに対する要求は非常に高いです。関連業界では通常、厳格な品質管理システムと認証基準を導入し、材料の安全性、信頼性、一貫性を確保し、過酷な作業条件下でのサービス要件を満たしています。

### 7.5.1 航空宇宙分野における品質システム要件

- 業界標準と認証
  - AS9100: ISO 9001 に基づき、航空宇宙特有の要件を追加した航空宇宙品質管理システム規格。
  - NADCAP: 熱処理や非破壊検査などの重要なリンクをカバーする航空宇宙特殊プロセス認証。
- 主要な品質管理ポイント
  - 材料のバッチトレーサビリティと一貫性。
  - 厳格な物理的および化学的性能テスト。
  - 高精度のサイズ制御と表面品質の要件。
- 品質管理対策
  - リスク管理とプロセス制御を実装します。
  - 非破壊検査には高度な検査技術(X線、CT スキャンなど)を使用します。
  - サプライチェーン監査とオンサイトレビューを定期的に行います。

### 7.5.2 軍事産業における品質システム要件

- 軍事品質基準
  - MIL-Q-9858A: 軍事品質保証システム。
  - MIL-STD-105E: 軍事サンプル検査規格。
  - MIL-STD-1916: 軍事プロセス制御規格。
- パフォーマンスと信頼性の要件
  - 極端な温度、衝撃、振動環境に対する性能仕様を満たします。
  - 高い純度と低い不純物含有量により、材料の耐用年数が保証されます。
  - 厳格な不良率管理と不良修復基準。
- 品質保証措置
  - 完全な製品追跡システム。
  - 高度な測定およびテスト機器を使用します。
  - 従業員のトレーニングとプロセス仕様の実装を重視します。

### 7.5.3 医療分野における品質システム要件

- 医療機器の品質基準

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ISO 13485: 医療機器の品質マネジメントシステム規格。
- FDA 21 CFR Part 820: 米国食品医薬品局の医療機器に関する品質規制。
- **安全性と生体適合性**
  - タングステン合金材料は、毒性やアレルギー反応を避けるために生体適合性の要件を満たす必要があります。
  - 厳格な清掃および滅菌基準。
  - 放射線治療などの医療環境における材料の安定性と安全性を確保します。
- **品質管理対策**
  - 包括的なリスク管理システム（ISO 14971）を確立する。
  - 文書化された設計管理および変更管理プロセス。
  - 定期的な内部監査と外部認証。

#### 7.5.4 品質システムの共通実装ポイント

- **システム認証と継続的な改善**

企業は、関連分野の権威ある組織の品質管理システム認証に合格し、品質管理プロセスを継続的に改善し、最適化する必要があります。
- **厳格なサプライチェーン管理により、**

原材料の調達から最終製品の納品までの全プロセスを通じて品質管理と追跡が実施されます。
- **データ駆動型品質監視**

では、ビッグデータと情報技術を使用して、生産プロセスのリアルタイム監視と早期警告を実施します。
- **人材育成と文化構築では、**

品質意識の醸成に重点を置き、全従業員の参加による品質管理文化を創造します。

#### まとめ

航空、軍事、医療分野では、タングステン合金棒の品質システムに対して極めて高い基準と厳格な管理要件が定められています。企業は、業界特性に基づいた包括的な品質管理システムを構築し、過酷な使用環境下における材料の信頼性と安全性を確保する必要があります。これは、顧客ニーズを満たすための基盤であるだけでなく、企業の競争力を高め、業界の高品質な発展を促進するための鍵でもあります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 第 8 章 タングステン合金棒の包装、保管および輸送

### 8.1 包装方法および保護対策（真空包装、乾燥剤）

タングステン合金棒は高密度、高硬度で、特殊な用途要件を満たすため、包装と保護対策が特に重要です。合理的な包装設計は、製品を機械的損傷、腐食、環境影響から保護するだけでなく、輸送中の安全性と完全性を確保します。

#### 8.1.1 パッケージング

- **真空包装**
  - 真空技術を使用してパッケージ内の空気を抽出し、酸素と湿気によるタングステン合金表面の酸化と腐食を軽減します。
  - 特に湿度の高い環境や温度差の大きい環境での長期保管や輸出輸送に適しています。
  - 真空包装袋は一般的に、気密性と機械的強度に優れた多層複合材料で作られています。
- **防錆紙およびプラスチックフィルム包装**
  - タングステン合金棒の表面を防錆紙で包み、物理的な絶縁層を形成して、水蒸気や腐食性媒体の侵入を防ぎます。
  - 外側の層は、機械的な傷や粉塵による汚染を防ぐためにプラスチックフィルムで包まれます。
  - 通常的环境条件下での短期保管および輸送に適しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **木箱と木製パレット梱包**
  - 一次梱包後、タングステン合金棒は輸送中の衝撃や振動を防ぐために丈夫な木箱に入れられます。
  - 木箱には、製品をさらに保護するために、フォームやパールコットンなどのクッション材が装備されています。
  - 木製パレットはフォークリフトで簡単に運搬できるため、物流効率が向上します。
- **金属ドラムまたはスチールシリンダー包装**
  - 特殊仕様または高価値のタングステン合金棒、金属バレルまたはスチールシリンダーを使用して梱包し、保護強度を向上させます。
  - 同時に、密封や保護が容易で、海上輸送に適しています。

### 8.1.2 保護対策

- **乾燥剤の使用**
  - 包装空間内の水分を効果的に吸収し、湿気による酸化を防ぐために、包装内に乾燥剤（シリカゲル、モレキュラーシーブなど）を入れます。
  - 乾燥剤の量は、包装容積と輸送環境の湿度に応じて適切に設定する必要があります。
  - 包装環境の乾燥を保つために、乾燥剤を定期的に交換してください。
- **防錆コーティングまたは油膜**
  - タングステン合金棒の表面に防錆油または特殊な防錆コーティングを塗布して化学保護層を形成します。
  - 湿気や塩水噴霧環境による材料表面の腐食を防ぎます。
- **耐衝撃バッファ設計**
  - 輸送中の機械的振動と衝撃を軽減するために、梱包箱の中に多層緩衝構造を設計します。
  - タングステン合金ロッドは衝撃吸収材で包まれており、表面の傷や変形を防止します。
- **シーリング性能保証**
  - 梱包は空気やほこりの侵入を防ぐために良好な密封性能を備えている必要があります。
  - 真空包装や窒素充填包装により密封効果がさらに高まります。

### 8.1.3 パッケージデザインのポイント

- **製品のサイズと重量に応じて梱包構造をカスタマイズしてください。**

タングステン合金棒は重量があるため、輸送中の損傷を防ぐために、梱包材と構造には十分な耐荷重性が必要です。
- **ラベルは明確かつ完全です。**

製品の仕様、重量、注意事項、輸送方向が梱包箱の外側に表示されており、物流と倉庫管理が容易になります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 環境に優しい材料の選択では、環境に優しい製造と環境規制に準拠した、環境に優しくリサイクル可能な材料を優先します。

#### まとめ

科学的かつ合理的な包装方法と保護対策は、タングステン合金棒の品質と安全輸送を確保する鍵となります。真空包装、乾燥剤の使用、防錆コーティング、緩衝設計などにより、酸化、腐食、機械的損傷を効果的に防止し、タングステン合金棒の保管・輸送を強固に保護します。物流技術と環境保護コンセプトの発展に伴い、タングステン合金棒の包装ソリューションは継続的に最適化され、業界のグリーンで持続可能な発展に貢献していきます。

## 8.2 保管条件と注意事項（温度・湿度管理、腐食防止）

タングステン合金棒は保管過程において、周囲の温度、湿度、化学媒体の影響を大きく受けます。不適切な保管条件では、材料の表面酸化や腐食、さらには内部性能の劣化を引き起こす可能性があります。そのため、タングステン合金棒の品質を維持するには、科学的かつ合理的な保管管理が不可欠です。

### 8.2.1 温度と湿度の制御

- 温度要件
  - 保管環境は一定の適切な温度を維持し、通常は 15°C ~ 25°C が推奨され、急激な温度変化は避けてください。
  - 高温は材料表面の酸化反応を加速させ、表面仕上げや機械的特性に影響を及ぼす可能性があります。
  - 低温で湿度が上昇すると、結露水が発生しやすくなり、腐食の原因となります。
- 湿度要件
  - 過度の湿度によって金属表面に錆が発生するのを防ぐため、相対湿度を 40% ~ 60% に制御する必要があります。
  - 湿度が低すぎると乾燥剤がすぐに劣化し、適切な時期に交換する必要があります。
  - 乾燥した環境を維持するために、除湿器などの空気除湿装置を設置してください。
- 環境モニタリング
  - 保管倉庫には、環境パラメータをリアルタイムで監視するための温度と湿度の監視装置を備える必要があります。
  - 異常発生時にはタイムリーな調整措置を講じ、安定した環境を確保します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8.2.2 腐食対策

- **防錆剤とコーティング保護**
  - タングステン合金棒の表面に防錆グリースまたは特殊な防錆コーティングを施して絶縁層を形成し、酸素と水分の直接接触を防ぎます。
  - コーティングの完全性を定期的にチェックし、損傷が見つかった場合は修復または再コーティングしてください。
- **隔離包装**
  - 防錆紙またはプラスチックフィルムを使用して製品を包み、直接空気に触れることを減らします。
  - パッケージ内に乾燥剤を入れて湿気を吸収し、内部に湿気の多い環境が形成されないようにします。
- **倉庫環境管理**
  - タングステン合金棒は濡れた地面に直接接触しないようにし、頭上に保管してください。
  - 化学腐食性ガス（硫化物や塩化物など）が倉庫環境に侵入するのを防ぎます。
  - 密閉された空間に有害なガスが蓄積するのを防ぐため、定期的に換気してください。

## 8.2.3 ストレージ管理に関する注意事項

- **スタッキング法**
  - 圧力による変形を避けるために適切に積み重ねる必要があります。
  - 仕様に応じてバッチで積み重ねられるため、管理や取り出しが容易です。
- **保護ロゴ**
  - 保管場所には、「防湿、耐火、耐圧」などの安全に関する注意事項を明確に表示する必要があります。
  - 重要な材料は、混合や交差汚染を避けるために専用の保管場所を用意する必要があります。
- **定期的な点検とメンテナンス**
  - 梱包の完全性、防錆、環境パラメータをチェックするための保管検査システムを確立します。
  - 異常な状況が発見された場合は、品質問題の拡大を防ぐために速やかに対処する必要があります。

### まとめ

適切な温湿度管理と科学的な防錆対策は、タングステン合金棒の保管品質を確保する上で不可欠です。適切な環境パラメータを維持し、効果的な包装保護と保管管理を組み合わせることで、製品寿命を最大限に延ばし、使用前に材料が優れた物理的・機械的特性を維持

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

することを保証します。企業は保管経路に注意を払い、管理システムを導入し、タングステン合金棒の安全で安定した保管を確保する必要があります。

### 8.3 国際輸送規則および危険物申告ガイドライン

高密度金属材料であるタングステン合金棒の国際輸送は、多くの国の規制や通関要件の影響を受けます。輸送の安全性、コンプライアンス、そして円滑な通関を確保するためには、関連規制を厳格に遵守する必要があります。特に危険物申告においては、企業は製品の特性を正確に判断し、完全な輸送書類を準備する必要があります。

#### 8.3.1 国際輸送規制の概要

- **国際海上危険物規則 (IMDG コード)**  
国際海事機関 (IMO) によって制定された国際海上危険物規則は、海上輸送中の危険物の分類、梱包、ラベル表示および申告を規制しています。
- **国際航空運送協会 (IATA) の危険物規則は、**  
航空輸送される危険物に関する要件を規定しており、梱包、申告、ラベル付け、取り扱い手順などを網羅しています。
- **危険物の輸送に関する国際連合勧告 (国連勧告) は、**  
危険物の分類および表示基準を世界的に統一し、各国の危険物輸送規制の基礎となっています。
- **各国の税関や運輸部門は、**  
各国におけるタングステン合金棒の輸送に関して具体的な要件を定めており、輸入国と輸出国の関連法規に従う必要があります。

#### 8.3.2 タングステン合金棒の輸送分類と危険物申告

- **タングステン合金棒は危険物ですか？**
  - 一般的に言えば、純粋なタングステン合金棒は危険物ではなく、特別な危険な化学的性質を持っていません。
  - ただし、タングステン合金棒の表面に可燃性グリースが塗布されている場合、またはその他の危険な化学物質が含まれている場合は、対応するカテゴリに従って申告する必要があります。
- **申請プロセス**
  - 製品データシートおよび安全データシート (MSDS) を準備します。
  - 輸送モードに応じて危険物申告書に記入し、包装区分とラベルを指定します。
  - 基準を満たすパッケージングとラベルを提供します。
  - 運送業者および関係規制当局に申告し、承認を得ます。

#### 8.3.3 包装およびラベルの要件

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **輸送基準を満たす包装**
  - 梱包材は、IMDG および IATA の強度および密封要件を満たしている必要があります。
  - 輸送中の振動、押し出し、気候の変化に梱包が耐えられることを確認してください。
- **危険物標識とラベル**
  - 非危険物には特別なラベルを貼る必要はありませんが、重量、サイズ、壊れやすさを記載する必要があります。
  - 危険物が含まれる場合は、それに応じた危険物ラベルや輸送マークを貼付しなければなりません。
- **危険物包装コード**
  - 梱包箱には UN 番号、梱包タイプ、性能試験マークを記載する必要があります。

### 8.3.4 国際輸送に関する注意事項

- **正確な分類**
  - 出荷の遅延や罰金につながる可能性のある誤報を避けるため、製品とその関連材料の特性を慎重に確認してください。
- **ファイル完了**
  - 商業送り状、梱包明細書、危険物申告書、安全データシート、関連ライセンスを含む完全な出荷書類を準備します。
- **準拠したキャリアを選択する**
  - 輸送計画が規制要件に準拠していることを確認するには、経験豊富な物流および通関業者を選択してください。
- **配送保険**
  - 輸送リスクを防ぐために適切な貨物輸送保険を購入してください。
- **緊急時対応計画**
  - 交通事故に対する緊急対応計画を策定し、必要な緊急用品を装備します。

#### まとめ

タングステン合金棒は複雑な規制と手続きを伴います。輸送分類と申告要件を正確に理解し、標準的な包装とラベルを使用することが、輸送の安全と円滑な通関を確保するための鍵となります。企業は、完全な輸送コンプライアンスシステムを構築し、管理レベルを向上させ、輸送リスクを軽減し、タングステン合金棒製品の円滑なグローバル流通を確保する必要があります。

### 8.4 タングステン合金棒の輸出に関する税関監督と許可要件

タングステン合金棒は戦略金属材料であるため、多くの政府によって輸出が厳しく規制されています。輸出企業は、関連する国の法律および規制を遵守し、必要な輸出許可を申請

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、税関申告義務を履行し、製品が円滑に輸出され、輸入国の要件を満たしていることを確保する必要があります。

#### 8.4.1 税関監督政策の概要

- **戦略資源管理**

タングステンは希少金属であるため、国は通常、重要管理を要する戦略資源としてタングステンの輸出に割り当て、輸出割当量管理およびライセンス制度を実施しています。

- **税関申告要件:**

タングステン合金棒の輸出は、正確な商品コード（HS コード）、仕様モデル、数量、価値などの情報を提供し、税関規則に従って申告する必要があります。

- **輸出制限および管理**

一部の国や地域では、技術的機密性管理、アンチダンピング調査など、タングステン合金の輸出に関して特別な制限があります。企業は事前に関連するポリシーを理解する必要があります。

#### 8.4.2 輸出ライセンス申請プロセス

- **ライセンス**

は通常、国家商務部門または金属材料管理部門によって発行されます。

- **応募書類**

- 企業の営業許可証および資格証明書。
- 製品テストレポートおよび品質認証文書。
- 契約書および注文書の証明。
- 税関申告書および関連する出荷書類。

- **承認プロセス**

1. 申請書類を管轄当局に提出する。
2. 関連部門が製品の品質とコンプライアンスをレビューします。
3. 承認後、輸出許可が発行されます。
4. 企業はライセンスに基づいて通関輸出手続きを行う必要があります。

- **有効期間と更新**

輸出ライセンスには通常、有効期間の制限があり、企業は輸出を継続するために期限通りに更新する必要があります。

#### 8.4.3 税関申告と監督の要点

- **正確な HS コード**

タングステン合金棒には、正確な関税分類と課税を確保するために、国際的に認められた調和システム（HS）コードを使用する必要があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **通関書類**  
には、請求書、梱包明細書、輸出許可証、契約書、船積み書類、原産地証明書などが含まれており、すべての書類が完全であることを確認します。
- **税関検査と抜き取り検査**  
タングステン合金棒は輸出時に検査を受ける場合があります、企業はサンプルとテストレポートの提供に協力する必要があります。
- **税制**  
輸出税還付政策と関連する特典を理解し、輸出プロセスを合理的に計画します。

#### 8.4.4 予防措置とリスクの予防と管理

- **虚偽の申告や違法輸出などの違法行為を回避し、**  
罰金や評判の低下を防ぎます。
- **政策の変更**  
国内外の貿易政策や輸出管理の動向に注意し、輸出戦略をタイムリーに調整します。
- **国境を越えた貿易コンプライアンスには、**  
輸入国の規制要件を遵守し、必要な認証および検査手続きを完了することが必要です。
- **サプライチェーンの調整により**  
、物流、通関、検査機関とのコミュニケーションが強化され、スムーズな輸出プロセスが確保されます。

#### 要約:

タングステン合金棒の輸出には、複雑な税関監督管理とライセンス管理が伴います。企業は関連法規や手続きを十分に理解し、厳格に遵守する必要があります。科学的な輸出管理は、コンプライアンス業務の確保だけでなく、企業の国際競争力と市場拡大能力の向上にも役立ちます。企業は専任の貿易コンプライアンスチームを設立し、リスク管理を強化し、輸出事業の健全な発展を促進することをお勧めします。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 第9章 タングステン合金棒の市場構造と発展動向

### 9.1 世界のタングステン資源および合金棒産業チェーンの概要

タングステンは希少かつ重要な戦略金属であり、その高い融点、高密度、優れた機械的特性により、航空宇宙、軍事産業、電子工学、医療などのハイエンド分野で広く利用されています。タングステン資源の深加工における重要な製品として、タングステン合金棒の市場需要は継続的に拡大しており、その産業チェーンシステムは複雑で、明確なグローバルな特徴を備えています。

#### 9.1.1 世界のタングステン資源分布

- **主な生産地域は**

世界のタングステン資源に集中しており、主に中国、ロシア、カナダ、ベトナム、ポルトガル、オーストリアなどの国に分布しています。

- 中国は世界最大のタングステン鉱石生産国であり、世界の生産量の 80% 以上を占め、豊富なタングステンの埋蔵量と成熟した採掘技術を誇ります。
- ロシアとカナダも大規模なタングステン鉱床を有しており、国際市場に一定の影響力を持っています。
- ベトナムとポルトガルは、タングステン資源が比較的集中しており、より大きな潜在性を持つ生産地域です。

- **資源の種類**

タングステン鉱石は主に黄銅鉱 ( $\text{CaWO}_4$ )、鉄マンガン重石 ( $\text{FeWO}_4$ ) と灰重石 ( $\text{WO}_3$ ) があります。鉱石の品位と採掘難易度が資源開発効率に影響します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **資源と環境の課題**

：タングステン採掘は環境圧力と資源枯渇リスクに直面しており、そのため業界は効率的な資源利用と循環型経済の方向へ発展するよう促されています。

### 9.1.2 タングステン資源の採掘と加工の現状

- **採掘技術は**

露天掘りと坑内採掘を組み合わせ、鉱床の状況に応じて柔軟に選択されています。採掘効率と安全性を向上させるため、最新の機械と自動化技術が徐々に導入されています。

- **一次製錬と精鉱製造**

タングステン鉱石は、選鉱、焙焼、化学浸出を経て高純度のタングステン精鉱を得ます。精鉱の品質は、その後に製造されるタングステン合金粉末および製品の性能に直接影響します。

- **製錬技術の進歩**

炭素熱還元、水素還元、化学蒸着などのタングステン製錬技術の継続的な革新により、高純度タングステンの製造が可能になりました。

### 9.1.3 タングステン合金棒産業チェーン構造

タングステン合金棒産業チェーンには主に以下のリンクが含まれます。

1. 以下の生産の基本原料です。 **タングステン合金棒**。

原材料の品質と安定供給は、製品の一貫性とコスト管理に大きく影響します。

2. **粉末冶金と合金製造**

粉末冶金プロセスでは、タングステン粉末を合金元素（ニッケル、鉄、銅など）と均一に混合し、加圧・焼結します。この工程によって、タングステン合金棒の組織構造と性能指標が決定されます。

3. **成形加工には、**

製品が設計サイズと性能要件を満たすようにするための機械加工、熱処理、表面処理が含まれます。

4. **性能テストと品質管理**

厳格な物理的、化学的、機械的な性能テストにより、製品の品質が保証されます。

5. **販売と応用**

タングステン合金棒は、航空宇宙、軍事、医療、電子工学などの分野で広く使用されており、市場の需要は継続的に拡大しています。

### 9.1.4 産業チェーンのグローバル化の特徴

- **サプライチェーンにおける国際協力**

タングステン鉱石資源の分布と下流加工能力の領域は完全には重なっていないため、タングステン合金棒産業チェーンにおいて国際協力のパターンが形成されて

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

います。中国は鉬物資源と大規模な製錬能力という優位性を有しており、欧州、米国、日本、韓国などの国々はハイエンドの加工と精密製造に重点を置いています。

- **技術と市場の二重の推進**

力 技術の進歩はタングステン合金棒の性能向上を促進し、市場需要の多様化は産業チェーンの調整を促進します。

- **貿易フロー**

タングステン原料は主に資源国から輸出され、加工製品は国際市場で流通しています。高付加価値製品であるタングステン合金棒の貿易量は徐々に増加しています。

## まとめ

世界のタングステン資源は比較的集中しているものの、タングステン合金棒産業チェーンは高度に国際化され、複雑化しています。資源分布と産業チェーン構造を理解することは、タングステン合金棒の市場構造と発展動向を把握する基礎となります。今後、技術の進歩とグリーン製造コンセプトの推進により、タングステン合金棒産業チェーンはより充実し、業界の高品質な発展を促進するでしょう。

## 9.2 タングステン合金棒市場規模と成長傾向分析

タングステン合金棒は、高性能機能材料として、航空宇宙、軍事機器、医療機器、ハイエンドエレクトロニクス、原子力工学などに広く使用されています。世界の製造業の変革とアップグレード、新興産業の台頭により、タングステン合金棒の市場規模は着実に拡大しており、需要の増加、地域の集積、用途の多様化などの顕著な特徴を示しています。

### 9.2.1 現在の世界市場規模

- **国際タングステン工業協会 (ITIA) や市場調査機関 (MarketsandMarkets、Grand View Research など) が発表したデータによると、2024 年の世界タングステン合金市場総額は約 13 億～15 億米ドルで、そのうちタングステン合金棒は約 30% にあたる 4 億～5 億米ドルを占めています。2030 年には、この数字は 8 億米ドルを超えると予想されています。**
- **生産と消費の地域分布**
  - **中国:** タングステン合金棒の世界最大の生産国および消費国であり、完全な産業チェーンと大規模な製造能力を備え、市場の 50% 以上を占めています。
  - **北米とヨーロッパ:** 主にハイエンドのアプリケーションに焦点を当て、品質と性能を重視し、輸入比率が高い。
  - **アジア太平洋地域のその他の地域 (韓国、日本、インドなど):** テクノロジー志向が強く、消費者需要が急速に拡大している新興成長市場。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **中東・アフリカ**: 規模は現時点では限られているが、原子力や医療機器への投資により成長の可能性が見られている。

## 9.2.2 市場成長の原動力

### 1. ハイエンド製造業の急速な発展

- 航空宇宙、ミサイルシステム、高精度機器などの産業の急速な発展に伴い、高密度、高強度のタングステン合金棒の需要は増加し続けています。
- インテリジェント製造、先進兵器システム、新エネルギー技術の発展により、タングステン合金の市場需要がさらに高まっています。

### 2. 医療・原子力分野への応用拡大

- タングステン合金棒は、世界的な人口の高齢化と医療投資の増加の恩恵を受けて、放射線治療装置、放射線遮蔽、ガンマナイフなどに広く使用されています。
- 原子力発電と核融合研究は、中性子吸収と高温部品の分野でタングステン合金棒の応用を推進してきました。

### 3. サプライチェーンとセキュリティ戦略の推進

- 各国は戦略金属に対する管理を強化し、現地製造の割合を高め、タングステン合金棒の生産能力の多様な地域への普及を促進する。
- 代替材料の世界的な探究は続いているものの、短期的にはタングステン合金と同等の代替品はまだ存在しません。

### 4. 技術の進歩により製品の付加価値が高まる

- ナノエンハンスメント、高純度制御、インテリジェント製造などの技術開発により、タングステン合金棒の性能は継続的に向上し、新たな用途が拡大しています。

## 9.2.3 業界の成長傾向予測（2025～2030年）

年	世界のタングステン合金棒市場評価額（10億米ドル）	複合年間成長率（CAGR）
2025	5.2	—
2026	5.6	7.7%
2027	6.1	8.0%
2028	6.7	9.0%
2029	7.4	10.0%
2030	8.1	10.3%

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

注：この予測は、ハイエンド製造業および医療用原子力エネルギーへの投資が継続的に増加するという前提に基づいています。原材料価格の変動や代替材料技術の進歩により、成長曲線は調整される可能性があります。

#### 9.2.4 市場発展の特徴

- **ローエンドからハイエンドへのアップグレードは、**  
従来の機械加工用のタングステン合金棒から、高密度、高靱性、耐腐食性、優れた高温性能を備えたハイエンド製品に移行しています。
- **地域競争が激化する**中で中国は依然として優位な地位を占めているものの、**欧州、米国、日本は**  
サプライチェーンのセキュリティ課題に対応するために、現地のタングステン資源処理能力を向上させている。
- **グリーンで持続可能なトレンドが台頭し、**  
タングステン資源のリサイクルが新たな成長分野となり、リサイクルタングステン合金棒に関する技術と政策が急速に進歩しています。

#### 9.2.5 課題

- **原材料価格は変動が激しく、**  
タングステン精鉱の価格は資源制約、環境保護政策、投機要因に大きく左右され、企業にとってコスト管理が課題となっています。
- **国際貿易**  
障壁、輸出制限、技術封鎖、反ダンピング調査などの貿易問題は、タングステン合金棒の国境を越えた流通に影響を及ぼす可能性があります。
- **ハイエンド市場における技術的障壁：**  
国産のタングステン合金棒は、航空や原子力などの一部のハイテク分野において、依然としてプロセスのギャップや認証の障壁に直面しています。

#### まとめ

タングステン合金棒市場は急速な成長段階にあり、世界的なハイエンド製造業、医療、エネルギー産業の発展の恩恵を受けている一方で、原材料への依存度、技術革新、貿易リスクといった課題にも直面しています。今後数年間、製造能力の向上と応用分野の拡大に伴い、タングステン合金棒市場は引き続き拡大する見込みです。業界企業は、ハイエンド製品、グローバル展開、グリーン化という3つの主要な方向性に注力し、戦略的機会を捉えるべきです。

### 9.3 主流メーカーと競合（中国、欧州、アメリカ、日本、韓国）

タングステン合金棒業界は、技術集約性と資源依存という典型的な二重の特性を有しています。世界市場は主に、中国、欧州、米国、日本、韓国など、豊富なタングステン資源や先進的な加工技術を有する国々によって支配されています。各地域の企業は、資源管理、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

技術戦略、製品ポジショニング、市場戦略において明確な違いを形成しており、これらがタングステン合金棒業界の現在の多極化した競争構造を形成しています。

### 9.3.1 中国企業：資源優位性と大規模製造の重視

棒分野において、中国は広範な企業基盤と充実した産業チェーンを有しています。中国企業の特長は、生産能力の高さ、豊富な品揃え、そして強力なコスト管理にあります。

- 代表的な企業
  - **CTIA GROUP LTD** は、リソースに対する強力な管理と、産業チェーンの強力なサポート能力を備えています。
- 競争優位性
  - 原材料の自給率が高く、安定供給が確保できます。
  - 強力なコスト管理能力と競争力のある製品価格。
  - 顧客のカスタマイズニーズと短い納期サイクルに迅速に対応します。
- 開発のボトルネック
  - 高精度な処理と極限のパフォーマンス制御という点では、中国と欧米日本の間にはまだ差があります。
  - 国際市場への影響は比較的限定的であり、ハイエンドの認証システムの構築はまだ進行中です。

### 9.3.2 欧米企業：技術的障壁とハイエンドアプリケーションが優勢

欧米企業は長年にわたり高性能合金材料の開発に深く関わっており、粉末冶金、高温合金、原子力材料などの分野における技術的優位性を背景に、タングステン合金棒のハイエンド応用分野において優位な地位を占めています。

- 代表的な企業
  - **プランゼーグループ (オーストリア)**: タングステンおよびモリブデン合金の世界有数の生産者。同社の製品は航空、半導体、医療機器に幅広く使用されています。
  - **HC Starck Tungsten (ドイツ/米国)** : 高純度タングステンおよび高性能タングステン合金に注力し、高度な粉末冶金技術と雰囲気制御技術を習得しています。
  - **Global Tungsten & Powders Corp (GTP、米国)**: 高純度タングステン粉末および合金棒の製造において成熟した技術を持ち、世界的な販売ネットワークを持っています。
- 競争優位性
  - 当社は豊富な技術的蓄積を有し、一連の独立した特許とコア技術を所有しています。
  - AS9100、NADCAP などのハイエンド認証システムに合格し、航空および軍事サプライチェーンに参入しました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ブランド効果が高く、欧米のハイエンド顧客に対して安定したサービスを提供しています。
- **課題とトレンド**
  - 高コスト、長い納期サイクル、中低価格市場における競争力の弱さ。
  - 環境規制やエネルギーコストの上昇による圧力に直面し、生産能力の一部は東ヨーロッパや東南アジアに移転されている。

### 9.3.3 日本と韓国の企業：精密機械加工と電子応用が牽引

日本と韓国の企業はタングステン合金棒の超精密加工と高純度管理において独自の優位性を持っており、その製品はマイクロエレクトロニクス、医療、精密機器の分野で広く使用されています。

- **代表的な企業**
  - **三井金属鉱業**：電子パッケージングおよび医療産業向けに、さまざまな微粒子強化タングステン合金を開発しています。
  - **日本の東ソー**：タングステン粉末の微細加工や高密度合金の開発技術を蓄積してきた。
  - **韓国の HEMC 株式会社**：強力な研究開発力と迅速な対応力を備え、高精度タングステン合金棒や特殊形状部品のカスタマイズ生産に重点を置いています。
- **技術的なハイライト**
  - 高純度材料を製造する優れた能力。
  - 微細構造制御とナノ強化をリード。
  - 複雑な小型タングステン合金部品をバッチ式で安定的に加工します。
- **市場ポジショニング**
  - 電子機器、ディスプレイデバイス、レーザー部品などの中高級市場をターゲットとしています。
  - 製品単価が高く、サービス力が強く、品質と技術で勝ちます。

### 9.3.4 世界の競争環境と動向のまとめ

エリア	会社概要	技術レベル	市場ポジショニング	利点	デメリット
中国	資源主導型十大規模製造	ミッドレンジとハイエンドが共存	ミッドレンジに重点を置き、ハイエンドに進出	低コストと安定供給	不十分なハイエンド認証システム
ヨーロッパとアメリカ	テクノロジー主導 + ブランド主導	ハイエンドリーダーシップ	航空、軍事、医療	強力な技術と完璧な基準	高コストと高価格
日本語と韓国語	精度 + カスタマイズ	高純度で上質な	電子機器および医療用途	高い処理精度	生産能力が低い

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## まとめ

世界のタングステン合金棒市場は、「中国の生産能力が優位に立ち、欧米がハイエンドを担い、日本と韓国が精密加工に深く関わっている」という競争環境にある。今後、新材料技術の発展、サプライチェーンの現地化傾向の強化、ハイエンド市場における競争の激化に伴い、各地域の企業は戦略的ポジショニングの最適化を継続していこう。中国企業が大企業から強企業への転換を実現するには、材料設計、精密加工、認証制度などに引き続き注力する必要がある。欧米企業はコスト削減とサプライチェーン再構築の圧力に対処し、技術リーダーシップを維持していく必要がある。日本と韓国の企業は、引き続き市場セグメントを深化させ、高付加価値製品における優位性を維持していこう。

## 9.4 原材料価格変動とコスト構造分析

タングステン合金棒は原材料価格、特にタングステン精鉱、タングステン粉末、合金元素（Ni、Fe、Cu など）の価格変動に大きく左右され、産業チェーン全体の安定性と収益性に深刻な影響を与えます。世界のタングステン資源の埋蔵量は限られており、市場は高度に集中しており、需給、政策、環境保護、地政学などの要因によって価格は周期的に変動します。

### タングステン合金棒の構造

タングステン合金棒は主に以下の部品で構成されています。

コストカテゴリ	割合（基準範囲）	説明する
タングステン原材料費	50%～65%	タングステン濃縮物、パラタングステン酸アンモニウム（APT）、タングステン粉末などを含め、価格変動は総コストに最も大きな影響を与える。
合金元素コスト	10%～15%	Ni、Fe、Cu などの価格変動はタングステンより小さいが、それでも変動が大きい。
エネルギーおよび補助材料	8%～12%	電気、水素、保護ガス、金型材料などは、エネルギー消費構造や地域政策の影響を受けます。
労務費と管理費	5%～10%	給与、工場賃料、管理費等を含みます。
設備費および減価償却費	3%～5%	大型焼結・プレス設備とそのメンテナンスコスト
環境保護と安全コスト	2%～5%	特に中国と EU では、環境保護への投資が増加し続けている。

注：コスト構造は、プロセス、原産地、生産規模、製品仕様によって異なります。

### 9.4.2 タングステン原料価格の変動傾向

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステンは多くの複雑な要因の影響を受けます。近年のタングステン主要原料の価格変動は以下の通りです。

(1) タングステン精鉱 ( $WO_3 \geq 65\%$ ) の価格動向

- 2020～2022年：価格は1トンあたり95,000～110,000 人民元程度で安定する。
- 2022年～2023年：新エネルギーへの投資ブーム、供給逼迫、環境保護規制の影響を受け、価格は1トン当たり12万5000元以上に上昇する。
- 2024年：国内政策の規制と世界経済の減速の影響で、価格は下落し、1トンあたり113,000～120,000 元の間で変動する。

(2) APT (パラタングステン酸アンモニウム) とタングステン粉末の価格

- 2024年半ばに1トン当たり17万5000 人民元から19万人民元。
- タングステン粉末の価格安定性はやや悪く、加工技術や粒度規格に大きく左右されるため、1トンあたり24万元から28万元の間で変動することが多い。

(3) 合金元素価格

- ニッケル (Ni) 価格は変動が大きく、新エネルギー産業やステンレス鋼産業の影響を受け、2023年には一時20万元/トンを超え、2024年には安定する見込みです。
- 銅 (Cu) と鉄 (Fe) の価格は比較的変動が少ないものの、国際貿易情勢の変化によってある程度影響を受けます。

9.4.3 原材料変動による事業運営への影響

影響の次元	具体的な症状
コスト管理が難しくなる	タングステン原料の不足は、特に中小企業の粗利益を圧迫している。
頻繁な価格変動	下流顧客の購買サイクルが原材料価格の変動と一致しておらず、発注の不確実性が高まっている
在庫と調達戦略のリスクが増大	原材料の価格を事前に固定すると、価格の不一致につながり、キャッシュフローと在庫価値に影響を与える可能性があります。
導電率の差別化	大手企業は技術プレミアムを通じてコスト圧力を転嫁できるが、中小企業は交渉力が弱い。

9.4.4 対応戦略と傾向判断

(1) 価格固定・ヘッジメカニズムの構築

- 企業は先物や長期契約を利用して原材料の購入価格を固定することができます。
- 資源サプライヤーとの連携を強化し、安定した調達チャネルを確立します。

(2) 製品構造の最適化と高付加価値化

- 高強度、耐高温性などの特殊特性を持つタングステン合金棒の開発により、単位当たりの粗利益率を向上します。
- プロセスの差別化により原材料コストの変動をヘッジします。

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### （3）生産工程における省エネとコスト管理の強化

- 等方加圧成形やレーザー焼結などの省エネプロセスを通じて特定のエネルギー消費を削減します。
- リーン生産管理を実装して、歩留まり率と原材料利用率を向上させます。

### （4）グリーンリサイクルとリサイクルタングステン合金の利用

- タングステン材料リサイクルシステムを確立し、リサイクルタングステン粉末技術を開発する。
- リサイクルされたタングステンのコストは鉱石の抽出コストよりも大幅に低いいため、将来的にコストを削減する重要な方法となります。

## まとめ

タングステン合金棒の生産は原材料価格、特にタングステン粉末と合金元素の価格変動に極めて敏感であり、企業の収益性に直接影響を与えます。世界的な資源戦略、環境保護政策の強化、ハイエンド用途の継続的な成長を背景に、原材料コストの高水準な変動は新たな常態となる可能性があります。今後、企業はリスク管理能力を強化し、コスト圧力に対処し、多様な原材料戦略、ハイエンド製品、グリーン製造を通じて持続可能な発展を実現する必要があります。

## 9.5 産業政策と輸出状況の解釈

タングステン合金棒は、高い技術力と高い付加価値を持つ希少金属製品であるため、産業政策や国際的な輸出規制の影響を強く受けます。特に、世界的な「資源戦略」と「サプライチェーンの現地化」という文脈において、各国政府は主要材料サプライチェーンの安全性を確保し、主要金属の貿易監督を強化するための政策を導入しています。企業は、コンプライアンスを前提として、政策変更の動向を的確に把握し、リスク耐性とグローバル競争力を強化する必要があります。

### 9.5.1 中国のタングステン産業政策の方向性

#### （1）資源保護と総量規制

- タングステンは国家が保護する重要鉱物に指定されており、強制的な総生産管理が実施されています。
- タングステン鉱山については、2002年から総採掘量抑制計画が実施されており、2024年のタングステン精鉱（ $WO_3$ 含有量 65%）の義務生産量は約 11 万トンとなっている。
- 同国は違法採掘を厳しく規制し、違法な資源取引を取り締まっている。

#### （2）産業の高度化とグリーン化

- 「レアメタル産業発展計画」と「新素材産業発展ガイドライン」は、タングステン資源の高性能合金、先進構造材料、機能性材料への転化を奨励しています。
- 材料などのハイエンド製品の製造を加速し、高汚染と非効率な生産能力を排除します。

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- タングステン合金分野における技術革新と設備現地化能力を強化し、「資源・製品・応用」のフルチェーンを形成します。

### (3) 輸出管理・制限政策

- タングステン合金棒およびその母材は、「軍民両用物品および技術の輸出管理リスト」に掲載されている敏感な製品であり、法律に従って輸出許可が必要です。
- 商務部と税関総署が共同で監督し、輸出企業は関連する資格と管理システムを備えていなければならない。
- 輸出申告を隠蔽したり、第三者を介して製品名を変更したりすることで輸出管理を逃れることは禁止されています。違反者は罰金が科せられ、輸出資格が凍結されます。

## 9.5.2 国際輸出環境の変化

### (1) 欧州と米国間の「双方向管理」の強化

- 米国と欧州はタングステン合金を「重要鉱物」または「戦略物資」のリストに含め、輸入タングステン製品の審査を強化した。
- 技術的な追跡要件や二重使用の審査など、中国のタングステン製品（タングステン合金棒を含む）に対する一定の貿易制限を課す。
- 米国は一部の軍用タングステン製品を国内供給国や「友好国」から優先的に購入しており、技術的な障壁を形成している。

### (2) 日本と韓国の市場は比較的オープンだが、参入障壁が高い

- 韓国と日本は、特に医療、電子機器、半導体などの高精度用途において、技術審査や製品性能基準に関して非常に高い要求を持っており、タングステン合金棒のカスタマイズや微細組織制御などの技術的限界を提唱している。
- 企業は、ISO、JIS、MIL などの一連の標準認証に合格する必要があると、顧客の工場監査やバッチ安定性検証などの厳格なプロセスにも合格する必要があります。

### (3) 一帯一路沿線諸国の市場ポテンシャルは高まっている

- 中央アジア、中東、東ヨーロッパなど「一帯一路」沿線諸国におけるインフラ建設やエネルギー投資の拡大により、高密度カウンターウェイトや放射線防護タングステン合金製品に対する新たな需要が生まれています。
- 政策は、輸出信用保険、国境を越えた人民元決済、租税協定などのツールを通じて、企業が新興市場を開拓することをサポートしています。

## 9.5.3 輸出状況とリスクの予防と管理

主なリスクの種類	説明と対策
貿易摩擦が激化	米国などの市場における潜在的な「反ダンピング調査」や「原産国差別」政策に対処するために、製品の差別化と回避パスのレイアウト（再輸出貿易など）を採用することができます。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

認証基準の制限	AS9100（航空宇宙）、NADCAP（熱処理）などの国際標準システム認証能力の構築を加速し、ハイエンドサプライチェーンに参入する。
輸出承認の遅延	輸出ライセンスサイクルの延長は、納品に影響を与える可能性があります。企業は、事前に通関サイクルを計画し、社内のコンプライアンス準備能力を強化することをお勧めします。
地政学的な不安定さ	単一国への過度な依存を避けるため顧客市場を多様化し、リスクを分散するために現地パートナーとの連携を強化する

#### 9.5.4 政策提言と企業の対応戦略

1. 政策追跡と情報早期警戒メカニズムを強化する。企業は、国家発展改革委員会、商務部、税関、国際業界団体が発表する政策動向を注視し、規制変更に対して積極的に適応するための専任チームを設置する必要があります。
2. コンプライアンスに準拠した輸出システムと資格管理機能を構築する
  - 「デュアルユースアイテムライセンス」や「輸出登録証明書」などの必要な資格を申請します。
  - 製品トレーサビリティシステムと全プロセス通関申告書類アーカイブメカニズムを確立します。
3. 国際標準の構築に積極的に参加し、科学研究機関と共同で新しい ISO/ASTM 標準の策定に参加して、国際的な発言力を高め、製品品質システムの構築を向上させます。
4. 多様化した国際市場の拡大
  - 欧州、アメリカ、日本のハイエンド顧客を深く開拓します。
  - 同時に、地政学的な集中リスクを低減するため、中東、インド、東南アジアなどの新興市場を開拓してまいります。

#### まとめ

戦略材料であるタングステン合金棒の輸出状況は、政策誘導と国際環境の変動に深く影響されています。中国は資源管理と高付加価値化への転換戦略を実施し、欧米は技術・貿易障壁を強化し、日本と韓国は技術認証による製品参入を誘導しています。企業はこれらの政策論理を正確に理解し、適応し、技術内容の向上、コンプライアンス体制の整備、多様化された市場の拡大を通じて、独自の国際競争上の優位性を確立する必要があります。

#### 9.6 ハイエンド製造業におけるタングステン合金棒の将来需要予測

世界の製造業が高性能、軽量、インテリジェント、そしてグリーンという新時代へと加速するにつれ、材料に対する要求はより高水準かつ多様化しています。タングステン合金棒は、その優れた高密度、高融点、強固な機械的特性、耐放射線性、そして熱安定性により、航空宇宙、原子力、軍事産業、電子医療といったハイエンド製造分野において不可欠な基幹材料となっています。今後、これらの産業の高度化は、タングステン合金棒の需要、性能要件、そして応用範囲の拡大を継続的に促進していくでしょう。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 9.6.1 ハイエンド製造業の発展動向の概要

業界の方向性	開発動向	タングステン合金棒の要件
航空宇宙	より高い推力対重量比とより強い荷重抵抗に向けて開発	高比重＋高靱性＋制御可能な慣性構造部品
極超音速兵器	高速飛行＋高温衝撃環境	耐熱衝撃性＋熱安定性＋耐キャビテーション疲労性
核融合/核分裂	極端な気温＋高い放射線強度	耐放射線性＋高温強度＋中性子吸収
医療機器	小型化と精度	高密度＋加工性＋材料の生体適合性
半導体および電子パッケージング	高電力密度＋熱管理の課題	熱伝導性＋包装強度＋小型精密構造
精密機械とロボット工学	高い動的制御＋慣性カスタマイズコンポーネント	高密度＋幾何学的精密制御能力

### 9.6.2 主要分野における将来の需要予測

#### (1) 航空宇宙および慣性制御部品

- 群の開発が加速するにつれ、再使用ロケットや民間航空機の分野では、カウンターウェイトや慣性制御部品用のタングステン合金棒の需要が大幅に増加しました。
- 新世代の航空機では、寸法精度、機械的強度、材料の信頼性に対する要求がさらに厳しくなります。
- 2030年までに航空宇宙分野におけるタングステン合金棒の需要は年平均成長率が10～12%になると予測されています。

#### (2) 原子力・核融合エネルギー工学

- ITERやCFETRなどの核融合プロジェクトにおけるタングステン材料の研究は深化し続けており、放射線遮蔽や制御棒構造におけるタングステン合金棒の応用は拡大し続けています。
- 第4世代の核分裂炉（高速中性子炉、溶融塩炉）でも、タングステン合金が構造材料の候補として挙げられています。
- 中国、欧州連合、米国、日本、その他の国々はいずれもタングステンベースの核物質の開発プロジェクトを開始している。
- 2035年までに、原子力エネルギー分野におけるタングステン合金棒の複合年間成長率は13%を超えると予想されます。

#### (3) 高級医療機器

- 医療用タングステン合金棒は放射線治療加速器に使用されています。ガンマ線ナイフ、放射線源防護構造物等
- 人口の高齢化とがん治療機器の需要の急増。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 高密度、低不純物の医療用タングステン棒の分野では、中国企業は欧米の規格の壁を突破する動きを加速している。
  - 世界の医療用タングステン合金棒市場は 2030 年までに 3 億米ドルを超えると予測されています。
- (4) インテリジェント製造とハイエンド工作機械
- 高速、高慣性のツールカウンターウェイト、自動化ツール治具などでは、従来の鋼鉄に代わって高密度タングステン合金が徐々に使用されています。
  - CNC 工作機械や高精度スピンドル部品用のタングステン合金棒が新たな成長点となっている。
  - 特にアジア（中国、日本、韓国）の需要が大きく、今後 5 年間で 8~10% の成長が見込まれています。
- (5) 国家防衛と極超音速兵器システム
- 戦術兵器が高速貫通、軌道調整、小型化へと進化するにつれ、弾頭コア、バランスステールコンパートメントなどにタングステン合金棒がますます使用されるようになっていきます。
  - 徹甲弾および運動エネルギー兵器については、ナノ強化、高密度、高靱性材料へのアップグレードに重点を置く。
  - 軍用グレードのタングステン合金棒は、年間平均 8~9 % の成長率を維持すると予想されます。

### 9.6.3 パフォーマンス技術のトレンド

パフォーマンス指標	開発方向	テクノロジーパスの例
比重制御精度	±0.01 g/cm <sup>3</sup> 以内	ターゲットプレス + CNC 押し出し成形
耐熱衝撃性	1000°Cを超える熱勾配衝撃	ZrC / La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 複合セラミック粒子の添加
微細構造の均一性	粒径は 5μm 以内に制御されています	ナノパウダー+真空焼結
処理精度	φ±0.005mm、表面 Ra<0.1μm	微粒子の緻密化+超微粉砕
放射線耐性	中性子吸収/ガンマ線防護の強化	B/C およびその他の元素のコーティング/共焼結

### 9.6.4 企業開発の提案と将来を見据えたレイアウト

1. 製品構成は高性能カスタマイズに向けて発展し、航空宇宙慣性カウンターウェイトシリーズ、医療用放射線治療遮蔽シリーズ、半導体放熱シリーズなど、さまざまな用途向けの製品シリーズを開発して、顧客の粘着性を高めています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. **ハイエンド顧客認証システムを確立し、**  
AS9100、ISO13485、MIL などの品質システムを事前に計画し、グローバルなハイエンド製造顧客基盤を拡大します。
3. **グリーンおよびリサイクル製造システムへの投資は、**  
タングステン合金粉末リサイクル、グリーン焼結、低炭素技術を支点として、将来のサプライチェーンに新たな利点を生み出します。
4. **、スマート製造とデジタル監視を採用し、**  
インダストリー4.0 の概念を導入して、材料準備プロセス全体にわたってデジタル監視とデータ駆動を実現し、一貫性と歩留まりを向上させます。

#### まとめ

タングステン合金棒は、今後 10 年間で新たな発展機会の波を迎えるでしょう。それはハイエンド化、細分化、グローバル化が進むでしょう。航空宇宙、核融合、医療保護、精密製造、防衛産業は、引き続き需要の中核を担う原動力となるでしょう。企業がこのハイエンド製造の波の中で開発の主導権を握るには、材料革新、品質システム、市場拡大、技術向上への継続的な努力が必要です。

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

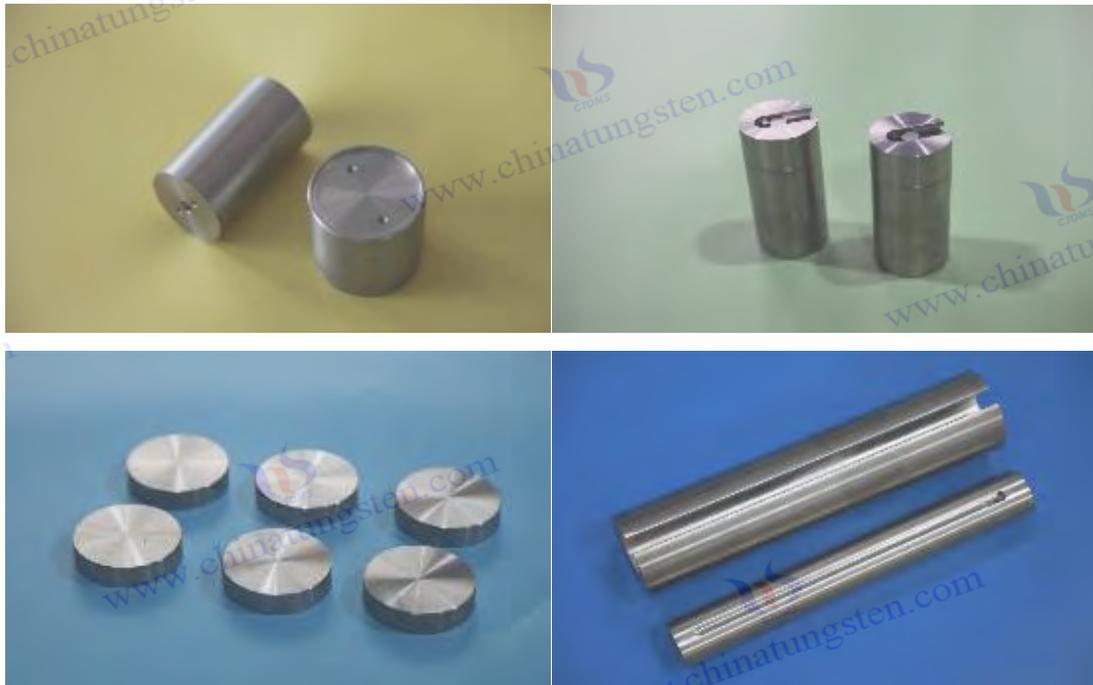
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 第 10 章 タングステン合金棒の研究ホットスポットと最先端技術

### 10.1 高密度タングステン合金棒の緻密化プロセスに関する研究

タングステン合金棒の密度は、その機械的特性、熱伝導率、耐食性、そして耐用年数に決定的な影響を与えます。タングステン合金棒を理論密度（98.5%超）に近い密度、あるいは完全な密度に近い密度にまで高めることは、現在の材料工学および粉末冶金分野における重要な研究課題です。高密度化プロセスの品質は、ハイエンド用途（核融合構造部品、ミサイルバランス部品、高出力電子機器用ヒートシンクなど）における製品の構造的完全性、微細構造の均一性、そして信頼性を直接的に左右します。

#### 10.1.1 緻密化の基本原則と指標要件

緻密化とは、粉末成形体に温度、圧力、その他のエネルギー入力を加えることで、粒子間の細孔が徐々に閉じられ、粒子の界面が結合し、粒子が効果的に積み重ねられ、拡散するプロセスを指します。

主な指標:

- かさ密度  $\geq 18.5 \text{ g/cm}^3$  (W 含有量 > 90% 合金)
- 気孔率  $\leq 1.5\%$
- 明らかな介在物、亀裂、または細孔集中領域がない
- 粒径は  $20\mu\text{m}$  以下に制御可能

#### 10.1.2 従来の焼結緻密化技術

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### (1) 従来の真空焼結

- 典型的な処理温度: **1450~1550°C**
- W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 系に適用可能
- 利点: 成熟した技術、バッチ生産に適している
- 欠点: 細孔を完全に排水することが難しく、緻密化を促進するために液相が必要である。

#### (2) 液相焼結

- Ni または Cu による臨界液相の形成は焼結温度における粒子の再配列を促進する。
- 組織の均一性と接着力を向上させることができます
- 「液相分離」や「粒成長」のリスクがあり、液相比を厳密に管理する必要がある

#### (3) 多段焼結と遅延焼結

- 多段階加熱や異なる温度帯を一定時間維持することで、粒子の排出と粒度制御が可能になります。
- 超微粉末やナノ粉末に特に効果的

### 10.1.3 高度な高密度化技術パス

#### (1) 熱間等方圧加圧 (HIP)

- 高温で等方性ガス圧 (100~200 MPa) をかけると、内部の微細孔が崩壊します。
- 密度を 99.5% 以上に高めることができます
- デメリット: 高価な設備、長いサイクル、高級部品の後処理に適している

#### (2) 放電プラズマ焼結 (SPS)

- 高電流パルス+軸圧による急速な緻密化
- 高速加熱速度 (最大 100°C/分) と短い焼結時間 (数分以内)
- ナノ粒子を維持し、過剰な成長を抑制します
- デメリット: 製品サイズは金型によって制限されるため、小型で高価値の材料に適しています。

#### (3) マイクロ波焼結

- タングステンのマイクロ波吸収を利用して均一な内部加熱を実現
- 高い熱効率と速い緻密化速度だが、アークとホットスポットの問題を解決する必要がある

#### (4) レーザー支援による緻密化

- 特殊形状構造または多層複合構造を有するタングステン合金棒。
- この技術はまだ研究と実験段階にあり、産業化にはさらなる進歩が必要である。

### 10.1.4 密度化に対する材料要因の影響

- **粉末粒子サイズ:** 粒子サイズが小さいほど (特に 1 $\mu$ m 未満)、緻密化温度は低くなり、速度は速くなりますが、異常な焼結ネック成長が発生しやすくなります。
- **粉末の形態:** 球状の粉末は密度が高くなりやすいが、薄片状または角張った粉末は焼結中に空隙凝集体を形成しやすくなる。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **不純物と酸素含有量:** Si、O、C などの不純物は界面に中間層または第 2 相を形成する傾向があり、緻密化プロセスを妨げます。
- **合金元素の分布:** Ni/Cu の均一な分布により、液相拡散経路が最適化され、密度が向上します。

### 10.1.5 緻密化の微視的メカニズム

- **拡散機構:** バルク拡散と粒界拡散が支配的であり、活性元素（La、Zr など）を添加すると短距離拡散を促進できます。
- **粒子再配置理論:** 液相が存在すると、粒子は最小エネルギー構成になり、高密度の積層構造を形成します。
- **細孔の移動と収縮:** 小さな細孔が大きな細孔に向かって集まったり、熱と機械の結合作用により閉じて完全な緻密体を形成します。
- **粒成長抑制:** 加熱速度を制御し、粒界抑制剤（希土類酸化物など）を添加して、細粒構造を維持します。

### 10.1.6 応用例と研究の進捗

- **中国科学院金属研究所:** SPS を用いて W-5Ni-2Fe 合金の密度 99.4%、平均粒径 6.2 $\mu$ m を達成。
- **プランゼー、オーストリア:** 商業的な HIP+等温鍛造技術を、気孔率 0.3%未満の航空宇宙用の高密度タングステン棒に適用します。
- **中国タングステンハイテック:** 液相およびマイクロ波複合緻密化プロセスを開発し、W-Ni-Cu ロッドの密度を 18.9 g/cm<sup>3</sup> 以上に高めました。これは軍事用の発射体のコアに広く使用されています。

### 10.1.7 将来の開発動向と課題

開発方向	テクニカルパス	チャレンジ
ナノスケール粉末の高密度化	超高速焼結と冷間焼結	粉末の凝集と酸化抑制は難しい
大型タングステン合金棒の緻密化	多段 HIP+熱間鍛造の組み合わせ	熱応力制御、コスト管理
高密度複合構造の設計	コアシェル粉末、傾斜構造材料	プロセスの精度と設備の能力の制限
インテリジェントな焼結プロセス監視	オンライン密度評価 + フィードバック制御	知覚技術と AI アルゴリズムを統合するのは難しい

#### まとめ

高密度タングステン合金棒は、粉体工学、熱力学制御、界面物理、加工技術を統合した材料科学における複合システム工学です。今後、ハイエンドアプリケーションのニーズの継

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

続的な向上、高密度化技術の継続的な反復、そしてインテリジェント製造コンセプトの深層統合により、タングステン合金棒の高密度化プロセスは、精密化、グリーン化、そしてパーソナライゼーションの方向へとさらに発展していくでしょう。

## 10.2 インテリジェント製造と自動化タングステン合金棒生産ライン

世界の製造業が「ハイエンド、スマート化、グリーン化」へと変革する中、タングステン合金棒の生産分野も、従来の大量生産モデルから徐々にスマート製造段階へと移行しています。サイバーフィジカルシステム（CPS）、産業用 IoT（IIoT）、人工知能（AI）、デジタルツインといった次世代製造技術を導入し、高度な自動化、高い品質安定性、高い対応柔軟性を備えたスマート工場の構築は、先進的なタングステン材料企業の中核的な戦略方向となっています。

### 10.2.1 タングステン合金棒のインテリジェント製造の必要性

ドライバー	説明する
多様な製品仕様	異なるサイズ、合金組成、組織構造を持つカスタマイズされた製品の需要が増加しています。
コストと効率の圧力	人件費の上昇、エネルギー消費量の抑制、品質の変動が生産上の課題をもたらす
品質安定性要件	航空、原子力、医療などの分野では、バッチ一貫性に対する要件が非常に高い。
コンプライアンスとトレーサビリティの圧力	国際認証システムでは、完全なプロセストレーサビリティと完全な生産データ記録が求められます。
安全および環境保護要件	粉末プロセスは可燃性および爆発性があり、自動化により安全レベルが向上します。

### 10.2.2 スマート製造生産ラインの主要モジュール

インテリジェントなタングステン合金棒生産ラインは通常、粉末の準備→成形→焼結→熱処理→加工→試験および包装までの完全なプロセスチェーンをカバーし、自動化設備と情報システムを統合してエンドツーエンドの協調制御を実現します。

#### (1) 自動粉末混合・ブレンドシステム

- さまざまなタングステンベースの粉末と添加元素の割合を正確に制御します。
- 自動計量器、真空供給システム、密閉式ボールミル、乾燥システムを装備。
- MES システムと連携し、配合とバッチデータの管理を実現します。

#### (2) インテリジェントプレスユニット（成形・等方圧プレス）

- 成形: サーボ油圧システムと位置閉ループ制御を備えた自動プレス。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 等方圧プレス：リモートプリセットとプロセス曲線管理を備えたインテリジェントなオートクレーブ制御システム。
- 自動ローディング・プレス・脱型の一体化を実現します。

### (3) 焼結・雰囲気制御自動ライン

- 自動温度およびガス制御真空炉または水素炉。
- 連続焼結を実現するトラック式材料ラック搬送システムを装備。
- プロセスパラメータのリモートスケジューリングとリアルタイムの大気品質モニタリング（O<sub>2</sub>およびH<sub>2</sub>含有量のオンライン分析）。

### (4) 熱処理と緻密化の統合制御

- 熱間等方圧プレス（HIP）自動ローディングおよびアンローディングシステムを装備。
- 高温鍛造や押し出し加工と連携し、高密度かつ均一な組織加工能力を実現します。
- 温度と圧力の曲線は自動的に制御され、プロセスデータの記録はクラウドにアップロードされます。

### (5) CNC 加工およびオンライン試験システム

- CNC 旋盤、グラインダー、研磨ラインは MES システムに接続されています。
- CCD ビジョンとレーザー直径測定器がサイズの偏差をリアルタイムで監視します。
- 適応加工をサポートするために加工パラメータが自動的に調整されます。

### (6) 自動包装・ラベル貼り

- インテリジェント包装ラインは、真空、乾燥剤充填、防振バッファ構成を実現します。
- バーコード/QR コード + RFID 自動ラベル印刷およびトレーサビリティ システム。

## 10.2.3 デジタル化と情報システムのサポート

システムタイプ	関数
MES（製造実行システム）	生産計画管理、設備スケジュール、バッチトレーサビリティ、プロセス実行監視を実現
SCADA システム	温度、雰囲気、圧力、電流などの主要なパラメータをリアルタイムで収集し、視覚的に表示します。
QMS（品質管理システム）	欠陥警告と統計的プロセス管理（SPC）を実現するための全プロセス品質管理プロセスを確立する
ERP システム連携	注文、調達、在庫、製造を統合して閉ループ管理を形成する
AI 支援による意思決定エンジン	複数のデータバッチを分析し、パラメータ設定を最適化し、初回合格率を向上させます

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

デジタルツインシステム	プロセスの最適化、設備の予知保全、シミュレーションを実現するための仮想生産モデルを構築する
-------------	---

#### 10.2.4 現在のボトルネックと将来の方向性

主な課題	パフォーマンス	開発方向
高コスト閾値	自動化設備への初期投資は大きい	大規模製造+政府支援+段階的投資
特殊形状のワークへの適応性が低い	既存の設備のほとんどは標準バー仕様です	多様な形状の加工に対応するモジュール式インテリジェントユニットの開発
データシステムサイロ	情報システム間のインターフェースの不一致	オープンスタンダードと産業プロトコルの統一（OPC UA など）を推進する
人間と機械の連携が不十分	重要なリンクでは依然として人間の介入が必要	人間と機械の連携と仮想現実統合製造の強化

#### 10.2.5 将来の技術動向の見通し

- エッジコンピューティングと AI エッジ展開:** 主要なプロセスリンクに AI スマート端末を展開して、リアルタイムのエッジ監視、パラメータの自動調整、機器の状態予測を実現します。
- マルチソースデータ融合分析:** 画像、音響、熱画像、振動などの複数のセンサーデータを融合し、製品の品質と欠陥の位置を総合的に判断します。
- 低炭素製造とカーボンフットプリント追跡システム:** タングステン合金棒のライフサイクル全体にわたる炭素排出量を評価し、グリーン製造評価システムを確立します。
- クラウド製造と柔軟な連携ネットワーク:** 5G+産業用インターネットを通じて、上流と下流の製造リソースが接続され、複数の工場の連携生産スケジュールとリモートプロセス構成を実現します。

#### まとめ

タングステン合金棒の製造は、「部分自動化」から「全工程インテリジェンス化」への移行という重要な段階にあります。今後、コアプロセスパラメータの深層デジタル化、設備のインテリジェンス化能力の向上、管理システムの相互接続・統合により、タングステン合金棒の製造は徐々に「経験主導型」から「データ主導型」への根本的な転換を実現し、高性能金属材料業界全体を新たなインテリジェンス時代へと推進していくでしょう。

#### タングステン合金棒と積層造形の統合開発

航空宇宙、原子力、軍事、医療分野における積層造形技術の応用が加速する中、従来の高性能合金材料は、複雑な形状、カスタマイズされた組織、効率的な製造といった新たな課

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

題に直面しています。タングステン合金は、極限環境下における構造・機能材料として、積層造形可能な精密部品の材料体系に徐々に参入しつつあります。タングステン合金棒は、印刷母材（ワイヤー、粉末）の原料として用いられるだけでなく、積層造形と徐々に融合し、機能部品の直接印刷や金型と冶金の混合製造など、様々な応用シナリオに進出しています。

### 積層造形に適したタングステン合金材料の技術的価値

特性	積層造形需要	対応するタングステン合金の利点
非常に高い融点	3000°C以上のホットメルトプロセス	タングステンベースの合金は耐熱性と耐腐食性に優れているため、極端な熱場における部品の印刷に適しています。
高密度	機能的なカウンターウェイト、放射線防護構造	AMは複雑なカウンターウェイトや中空構造を印刷して軽量化を実現
放射線遮蔽	核融合/医療機器への応用	統合性を向上させるカスタマイズ可能な中性子吸収構造部品
熱伝導率	ヒートシンク、ノズル、マイクロチャンネル冷却	AMは非常に複雑な冷却チャンネルの製造を可能にする
制御可能な組織	微細構造最適化	AMは方向性凝固/傾斜組成制御を実現します

### 10.3.2 タングステン合金に適用可能な積層造形プロセスの種類

#### (1) レーザー粉末床溶融結合法 (LPBF)

- 原理: レーザーは金属粉末を層ごとに溶かし、急速に冷却して固化させます。
- 利点: 高い印刷精度、複雑な微細構造を実現可能。
- 適切な粉末: 球状 W、W-Ni-Fe、W-Cu 合金粉末。
- 課題: 融点が高いとレーザー吸収効率が低下し、ひび割れが発生しやすくなります。

#### (2) 電子ビーム溶解法 (EBM)

- 原理: 高エネルギー密度の電子ビームを使用してタングステン粉末を溶かします。
- 純タングステンや W-Ta 合金などの高融点金属に適しています。
- 真空環境と低酸素含有量の利点があります。
- 航空宇宙推進システムのノズルなどの高温部品に使用されます。

#### (3) 指向性エネルギー蒸着 (DED)

- 原理: 同期粉末供給またはワイヤ供給+レーザー/電子ビーム/プラズマ源。
- シェイプを実現できる大型タングステン合金構造。
- タングステン合金棒セグメントおよび高温部品の再構築、修理、厚肉化に適しています。

#### (4) 溶融フィラメント造形 (FDM メタル版) + 脱脂焼結

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 押し出し成形には金属粉末+ポリマーバインダーを使用します。
- 印刷後、脱脂と焼結を行って緻密な構造を実現します。
- タングステン合金は、小型で低コストのカスタマイズされた部品を生産する可能性があります。
- W-Cu マイクロ波機器、カウンターウェイト等への利用を目的として商品化されています。

### 10.3.3 タングステン合金 AM の主な技術的難しさ

質問	パフォーマンス	対処戦略
高融点材料は溶けにくい	レーザーエネルギー不足または溶融池制御の困難	レーザー出力を上げ、予熱した基板を使用する
粉末の酸化に敏感	印刷中に酸化物介在物や気孔が容易に形成される	高純度アルゴン保護/真空印刷システムを使用
熱亀裂と残留応力	急速な冷却により亀裂が形成される	予熱されたプラットフォームと最適化された走査経路を使用する
材料の流動性が悪い	粉末の不均一な堆積と不安定な溶融池	粉末球状化の改良、等粒度混合粉末の使用
コンポーネント分離	W の融点は合金元素の融点とは大きく異なります	メカニカルアロイングを用いた均一な予混合

### 10.3.4 応用例と研究の進捗

- **NASA と ORNL :**  
DED 技術を使用して純タングステン ノズル モジュールを印刷し、高温推力テストに成功しました。また、核熱推進テスト用の W-Re 合金構造部品を開発しました。
- **中国科学院金属研究所:**  
W-5Ni 合金の LPBF 印刷により、レーザーパラメータを最適化した後、密度は 97% 以上に達し、微細構造は均一で、亀裂抑制は良好でした。
- **フラウンホーファー研究所（ドイツ） :**  
高熱流束電子パッケージング用の W-Cu 粉末 LPBF 印刷プロセスを確立し、埋め込み型マイクロチャンネル ヒートシンク構造の実現に成功しました。
- **ロシア、トムスク工科大学:**  
高温プラズマ容器の内壁材料の研究のために、W-Mo-Ta 合金の 3D プリントパスを探索します。

### タングステン合金棒と積層造形の結合開発モデル

モデル	説明する	アプリケーションの価値

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

積層+切削複合製造	タングステン合金棒は粗いブランクにプレファブ리케이션され、その後 AM を使用して微細構造の強化または機能的なクラッキングを実現します。	コストを削減し、パフォーマンスを向上
付加的なツール製造	AM で作られたロッドの逆粉末プレス用の複雑な金型	特殊形状の棒材のバッチ生産に適しています
ロッド → ワイヤ → ワイヤ送り印刷	高純度タングステン合金棒を引抜き加工し、大型部品の DED 印刷に使用します。	完全な材料プロセスチェーンを確立する
ロッド性能の改造	タングステン棒の表面に局所機能層（酸化防止層、徐放剤など）を印刷する	サービス機能と寿命の向上
デジタルツイン構造部品の進化	AM を用いて慣性調整ロッドやエネルギー吸収ロッドなどの傾斜密度構造部品を実現する	方向性のあるパフォーマンス制御設計を実現する

### 10.3.6 将来の開発動向と道筋の提案

1. 特殊なタングステン合金 AM 粉末システムを構築し、最適化された粒度分布、高い球形度、低い酸素含有量、強い流動性を備えたタングステン合金粉末を開発し、標準化を推進します。
2. 装置およびエネルギー源のアップグレードには、タングステンベースの材料印刷に適応するための、より高エネルギー密度のレーザー/電子ビーム装置およびインテリジェント制御プラットフォームの開発が含まれます。
3. マルチスケール組織制御およびシミュレーションでは、熱応力結合シミュレーションとプロセスパラメータ反転アルゴリズムを導入して、構成、構造、パフォーマンスのマッピングの正確な制御を実現します。
4. ハイエンド部品の量産・検証は、  
単品試作から大規模一貫生産に移行し、成形・熱処理・試験の標準体系を確立し、航空宇宙、原子力、医療機器などの分野に適応しています。
5. タングステン合金-AM 統合生産ラインは、タングステン合金棒原料の準備 - 球状化粉末の製造 - 印刷成形 - 後処理 - テストまでの統合された「印刷工場」を構築し、プロセス全体の制御を改善します。

#### まとめ

タングステン合金と積層造形は、従来の加工課題の解決と複雑な部品製造の実現において、これまでにない可能性を提供します。材料適応性、設備能力、プロセス基準の継続的な向上により、タングステン合金棒は単なる最終製品ではなく、3D プリントの原料、コア部品、そして複合技術の担い手となり、金属製造業界がインテリジェンス、機能性、そして精密さという新たな時代へと進むことに貢献します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 高性能合金代替材料の比較と技術的方向性

新材料技術の発展に伴い、タングステン合金は、いくつかの応用分野において、様々な高性能新合金との競争と代替に直面しています。特に航空宇宙、原子力、電子機器の放熱、高温構造といった分野においては、顧客の材料性能に対する多面的な要求が絶えず高まっており、タングステン合金は、より軽量で、より強度が高く、より耐熱性が高く、より環境に優しいという方向へと進化を続けています。

同時に、「同様の機能」や「明らかな費用対効果の優位性」を持つさまざまな代替材料の産業化が加速しており、タングステン合金の市場構造に大きな影響を与えています。

### 10.4.1 タングステン合金の主な性能上の利点と限界

パフォーマンス ディメンション	利点	制限事項
密度	非常に高い（19.3 g/cm <sup>3</sup> ）、カウンターウェイト、保護、慣性システムには欠かせない	高密度は処理の困難さと輸送コストをもたらす
融点と熱安定性	融点は 3422°Cまでで、極度の高温環境に適しています。	高温処理や溶接が難しく、熱応力が大きい
放射線耐性	優れた中性子吸収およびガンマ線遮蔽性能	腐食性の高い原子力環境では、保護層のサポートが依然として必要である。
熱伝導率	銅、銀に次いでヒートシンク・放熱構造に適している	熱伝導性と耐酸化性のバランスを取るの は難しい
加工性	合金化（W-Ni-Fe など）後、一定の加工性を有する	純タングステンや高タングステン比合金は依然として加工が難しい
価格と資源の保証	中国は豊富な資源埋蔵量と安定した供給を誇っている	高純度タングステンは高価で加工が難しい

### 10.4.2 代表的な高性能代替材料の比較分析

材料	融点/密度	典型的な利点	制限	アプリケーションの重複
モリブデン合金（Mo）	約 2620°C / 10.3 g/cm <sup>3</sup>	軽量、優れた熱伝導性、優れた成形性	耐食性が弱く、タングステンよりも耐熱性が低い	高温電極、熱伝導シート、電子機器の放熱構造
タンタル合金（Ta）	約 3017°C / 16.6 g/cm <sup>3</sup>	耐食性、優れた延性	高価で希少な資源	原子炉材料、生体適合性材料
高エントロピー合金（HEA）	可変融点 / 中密度	多段階制御、耐腐食性/高強度	複雑なプロセス、研究開発段階	航空ホットエンド部品および構造部品

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

セラミックマトリックス複合材料 (CMC)	>2000°C / 低密度	高温強度と軽量	脆く、耐衝撃性が低い	航空宇宙用ノズル、断熱構造
タングステン銅複合材料 (W-Cu)	高密度/中密度	優れた熱伝導性、耐アーク性、耐熱衝撃性	高コスト、平均強度	スポット溶接電極、ヒートシンクモジュール
炭素系材料 (C/C、グラファイト)	高/非常に明るい	非常に軽量で、耐熱衝撃性、耐アブレーション性に優れています	酸化しやすく、耐腐食性がない	ノズル、ミサイル断熱材

#### 10.4.3 代替トレンド下におけるタングステン合金の差別化戦略

##### 1. 機能セグメンテーション応用戦略:

- 極めて高い密度と慣性性能（慣性航法システム、動的バランスウェイト）が求められる状況では、依然としてかけがえのない存在です。
- 原子力や高エネルギー物理学の実験では、その中性子吸収能力は他の金属よりも優れており、長期安定性の利点があります。

##### 2. パフォーマンス境界戦略の改善:

- 希土類元素強化とナノ粉末高密度化技術により、高温強度と衝撃靱性が向上します。
- 複合構造（タングステン/タンタルバイメタル、タングステン被覆銅複合材など）を開発し、多機能応用分野を拡大します。

##### 3. 製造コラボレーション戦略:

- 付加製造、超精密加工、高エネルギービーム溶接技術により複雑な構造の実現可能性を向上します。
- 異種材料（チタン合金とニッケル基合金など）を組み合わせ、多材料共同製造と機能統合を実現します。

##### 4. グリーン環境保護とフルライフサイクル戦略:

- 環境規制および資源の持続可能性の要件を満たすために、リサイクル、再処理、再利用の閉ループシステムを確立します。
- RoHS/REACH に準拠した低汚染処方と処理技術を推進します。

#### 10.4.4 総合比較: 将来の材料システムにおけるタングステン合金の地位

寸法	タングステン合金	代替材料の利点と欠点	開発戦略
高密度保護	明らかな利点	タンタルとタングステン銅のみが部分的に代替できるが、コストは高い。	優位な地位を維持する
高温構造部品	強力	HEA、CMC などは競争力がある	合金システムの強化と複合材料の開発

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ヒートシンクと放熱	利用可能	W-Cu と Mo の方が有利	マルチマテリアル複合パス
原子力エネルギー構造	素晴らしい	タンタルとモリブデンにはいくつかの用途がある	表面コーティング+多層合金
コストと環境保護	デメリット	Mo、C/C は軽量で安価です	グリーン製造システムの構築

#### 10.4.5 技術パスの推奨事項と研究開発の方向性

##### 1. 多成分合金の最適化:

- 高温強度、延性、加工性を考慮して、W-Mo-Re、W-Ta-Ni などの 3 元/4 元系を開発します。

##### 2. 複合材料開発:

- タングステン/セラミック、タングステン/金属、タングステン/グラファイトの複合構造を設計して、インターフェースの強化と多機能パフォーマンスを最大化します。

##### 3. プラットフォームの構築:

- LPBF、DED、HIP+鍛造、真空拡散溶接などのプラットフォームに投資し、タングステン合金+代替材料の共同成形を模索します。

##### 4. サービスシミュレーションと信頼性データベースの構築:

- 新材料の耐用年数と経済性を評価するために、高温・照射・腐食の多場結合シミュレーションプラットフォームを構築します。

##### 5. 「タングステン+」開発戦略:

- 「タングステン・慣性モジュール」「タングステン・放熱保護一体ブロック」など、タングステンを核とした多機能一体構造ユニットを発売。

#### まとめ

タングステン合金は、様々な高性能材料の潜在的な代替圧力にさらされていますが、密度、放射線遮蔽性、そして極めて高い環境適応性といった核心的な優位性により、今後も長きにわたり多くの重要分野において代替不可能な地位を維持するでしょう。今後は、材料の高度化と製造の融合に注力し、タングステン合金の\*\*「代替不可能+相乗効果融合」\*\*という発展パターンを構築し、ハイエンド製造における戦略的地位をさらに強化していく必要があります。

#### 10.5 将来の過酷な使用条件下でのタングステン合金の性能の進化

タングステン合金は、その極めて高い融点、高密度、優れた熱伝導率、そして中性子吸収能により、核融合装置の第一壁、航空宇宙用ノズル、原子炉中性子シールド、極超音速航空機の熱防護構造など、極限環境におけるコア部品に長年使用されてきました。しかしな

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

から、これらの使用条件下では、材料は強い熱負荷、深刻な熱応力、放射線損傷、ガス浸食、そして多場カップリング劣化の影響に直面することになります。タングステン合金構造部品の長期的かつ安定した使用を保証する鍵は、使用中の性能変化を深く理解することです。

### 10.5.1 極限使用環境の分類と特性

環境タイプ	特性パラメータ	典型的なアプリケーションシナリオ
高温熱衝撃	>2000°C、熱流束>10 MW/m <sup>2</sup>	航空宇宙用ノズル、プラズマヒーター、核融合の第一壁
強力な照射野	中性子束 > 10 <sup>25</sup> n/m <sup>2</sup> （ガンマ線照射時）	核分裂/核融合炉
高衝撃/高ひずみ率	衝撃波、爆風荷重、慣性加速度	弾道徹甲体、運動エネルギー兵器のカウンターウェイト
化学腐食と酸化	高温酸化雰囲気、液体金属冷却剤	航空機の再突入段階、大型冷却システム
真空熱サイクル環境	真空+熱応力の頻繁な交替	宇宙船殻構造、深宇宙探査機

### 10.5.2 微細構造と性能進化のメカニズム

#### (1) 高温再結晶と結晶粒粗大化

- 高温で長期使用すると、粒界移動や粒成長が起こりやすくなります。
- これにより、特に微粒子タングステン合金の場合、強度が低下し、可塑性も低下します。
- (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) または粒界ピンニング戦略によって遅らせることができます。

#### (2) 照射誘起転位蓄積とバブル形成

- 高速中性子照射により転位ループと空孔格子間原子対が生成されます。
- He/H ガス注入によりナノキャビテーションが発生し、さらには「バブルチェーン」も発生します。
- 材料の脆化、熱伝導率の低下、寸法変化（膨張）を引き起こします。
- ソリューションには、ナノ結晶化、インターフェース設計、He 堆積バリア構造が含まれます。

#### (3) 熱疲労と熱衝撃腐食

- 加熱と冷却を繰り返すと、ひび割れの発生や伝播を引き起こす可能性があります。
- 熱流束密度が高い場合 (> 20 MW/m<sup>2</sup>)、材料の表面に「ひび割れ」や侵食が発生しやすくなります。
- 表面前処理（粗面化）と機能性コーティング（W-Re、W-TaC）により耐衝撃性が向上します。

#### (4) 酸化と腐食による劣化

- 高温では、タングステンは O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O などと容易に反応して WO<sub>3</sub> を生成し、蒸発損失が増加します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- PbLi などの液体金属冷却剤は、粒界に対する浸透性が強いです。
- 高密度表面コーティングと酸化抑制合金化が主流の対処戦略です。

### 10.5.3 性能劣化挙動と寿命予測モデル

進化的行動	パフォーマンスへの影響	モデリングアプローチ
再結晶と粒成長	強度と靱性の低下	粒成長速度モデル
熱疲労き裂成長	構造上の欠陥	パリの公式、コフィン・マンソンモデル
放射線脆化	伸びと破壊靱性の低下	速度論 + MD シミュレーション
酸化蒸発	質量損失と熱伝導率の低下	アレニウス反応速度 + 多場結合モデル
キャビテーション膨張	寸法変化、構造の歪み	クラスターダイナミクスモデル

### 10.5.4 典型的なアプリケーションシナリオにおける適応性の最適化

#### ◎核融合炉タンクステン合金第一壁（ITER 計画など）

- $10^{26}n/m^2$  を超える中性子束耐性と高い熱流束安定性が必要です。
- 超微粒子 W、W-Re 合金、W/鋼の機能傾斜構造を開発します。
- 研究方向：He 気泡制御、微小亀裂自己修復機構。

#### ◎極超音速機先端材料

- スタンピング加熱により局所温度が 2500°C 以上に達し、激しい熱衝撃が発生します。
- W ベースのセラミック複合材料またはタンクステン繊維強化構造を使用できます。
- コーティングシステムは、酸化耐性、高い放射線透過率、および低い放射線透過率を備えている必要があります。

#### ◎徹甲コア/運動エネルギー弾

- 衝撃加速度は  $10^4 \sim 10^5g$  に達し、激しいせん断と変形を引き起こします。
- ドープされた W-Ni-Fe 合金は、破壊モードの制御を改善するように設計されています。
- 高ひずみ速度下での動的強度と破壊靱性を詳細に検討する必要があります。

#### ◎医療用放射線治療散乱体 / 遮蔽体

- 正確な線量制御と安定した形状が必要です。
- 寸法と物理的特性は、照射/温度上昇環境において安定した状態を保つ必要があります。
- 表面処理とレーザー修復により耐用年数を延ばすことができます。

### 10.5.5 材料最適化と構造設計のための新しい戦略

#### 1. 勾配組織化とマルチスケール構造設計

- 表面層では耐食性、中間層では高強度、コア層では靱性を実現する傾斜機能材料（FGM）。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 積層造形+拡散溶接により「カスタマイズ構造」を実現。
- 2. 界面強化と異種粒界制御
  - 熱間静水圧プレス+急速冷却プロセスにより高エネルギー粒界が導入され、耐放射線性が向上します。
  - 多相インターフェースは He キャビテーション「トラップ」として機能し、膨張と脆化を遅らせます。
- 3. 耐放射線コーティングと自己修復システム
  - 表面の酸化/浸透を防ぐために、ZrC や HfN などの高融点セラミックの薄い層を使用します。
  - Bi や Cr をドーピングするなど、照射場で自己修復できる小規模構造を開発する。
- 4. AI によるサービス劣化予測
  - 高スループット実験と機械学習を組み合わせ、複雑な動作条件下でのパフォーマンスの低下を予測します。
  - タングステン合金の「寿命データベース」とデジタル材料設計プラットフォームを構築します。

## まとめ

将来、極限環境下におけるタングステン合金は、多分野・多スケールの横断的な最先端研究課題です。高温、放射線照射、熱衝撃などの課題は深刻な課題をもたらしますが、材料設計、プロセス最適化、デジタルモデリングを通じ、原子力、航空宇宙、防衛といった重点分野における極限環境へのサービス能力を継続的に拡大することができます。将来のタングステン合金開発は、従来の「単一材料+静的サービス」というモデルではなく、「マルチスケール構造+動的適応+インテリジェント予測」という新たな材料システムへと進化していくでしょう。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 付録

## 付録 1: タングステン合金棒の一般的な技術パラメータの概要

この付録では、工業生産および応用におけるタングステン合金棒の主要な技術的パラメータをまとめ、化学組成の範囲、物理的性能指標、機械的性能パラメータ、サイズ仕様などを網羅し、生産管理および品質検査の参考とします。

## 1. 化学組成（標準的な比率の範囲）

要素	含有量範囲（質量パーセント）	述べる
タングステン (W)	85%～98%	主な成分が密度と強度を決定する
ニッケル (Ni)	0%～10%	バインダー相、靱性と成形性の向上
鉄 (Fe)	0%～5%	接着相、機械的特性の向上
銅 (Cu)	0%～5%	熱伝導性と耐摩耗性の向上
コバルト (Co)	0%～3%	特殊合金配合に使用
その他の要素	トレース	モリブデン、マンガン、チタン、ニオブなどの微量添加物

## 2. 身体パフォーマンス指標

パフォーマンス	数値範囲	試験基準/方法
密度	17.0～18.8 g/cm <sup>3</sup>	ASTM B311、GB/T 3879
割合	17.0 – 18.8	同上
融点	≈ 3400°C	—
線膨張係数	4.5～6.0 ×10 <sup>-6</sup> /°C	ASTM E228
熱伝導率	70 – 180 W/ m·K	ASTM E1461
抵抗率	1.5 – 5.0 μΩ·cm	ASTM B193
磁気	低磁性または非磁性	—

## 3. 機械的特性パラメータ

パフォーマンス	数値範囲	試験基準/方法
引張強度 (σ <sub>b</sub> )	400～1200MPa	ASTM E8、GB/T 228.1
降伏強度 (σ <sub>0.2</sub> )	200～900MPa	同上
伸び (δ)	1%～25%	同上
硬度	HV 200 – HV 500	ASTM E384
衝撃強度	10～80J	ASTM E23

## 4. 寸法と許容差

パラメータ	共通仕様	述べる
直径範囲	3mm～150mm	カスタマイズ可能な製品範囲が広がる

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

長さの範囲	100mm～2000mm	顧客の要件に応じてカスタマイズ可能
寸法公差	±0.01 mm～±0.1 mm	加工技術と製品要件に応じて
表面粗さ	Ra 0.2 – 1.6 μm	研磨/研削工程に応じて
真直度	≤0.05 mm/m	高精度ロッド

## 5. 特別な仕様と性能

タイプ	説明する
高密度タングステン合金ロッド	W 含有量>95%、高カウンターウェイト、高シールド用途に使用
高靱性タングステン合金ロッド	Ni と Fe の含有量を増やして衝撃靱性と加工性能を向上
タングステン銅複合ロッド	熱伝導性と強度の両方を考慮して、Cu >5%を含有
表面処理されたタングステン合金棒	ニッケルメッキ、スプレー、酸化皮膜処理により耐食性と耐用年数を向上
ナノ粒子強化タングステン合金ロッド	ナノスケールの強化相を追加して機械的特性と安定性を向上

## 6. 典型的な製品モデルの例

モデル	化学組成 (W-Ni-Fe)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (MPa)	主な用途
WG-90	90 勝 6 敗 4 分け	17.8	900	航空カウンターウェイト、軍事産業
WG-95	95 勝 3 敗 2 分け	18.5	700	核防護、医療機器
WG-97	97-2-1	18.7	600	高級機器、精密部品

## VII. 参照標準

- ASTM B311 — タングステンおよびタングステン合金棒の技術規格
- GB/T 3879 — タングステン合金棒の一般仕様
- ISO 683-11 — タングステン合金の技術仕様
- MIL-STD-1567 — 軍用タングステン合金の品質管理要件

## 8. 注記

- タングステン合金はメーカーによって特性が異なります。パラメータ表は標準的な範囲を示したものであり、参考値としてのみご利用ください。
- 特定の製品は、顧客のニーズとアプリケーション環境に基づいてカスタマイズおよび最適化する必要があります。
- 製品の品質を確保するには、製造プロセスで粉末の純度、密度、熱処理条件を厳密に管理する必要があります。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 付録 2: タングステン合金のグレードと化学組成の比較表

この付録では、市場で一般的なタングステン合金のグレードと標準システム、および対応する主な化学組成の範囲をまとめており、エンジニア、購入者、品質管理担当者が迅速に対応して選択するのに便利です。

### 1. 一般的なタングステン合金のグレードの分類と組成（質量パーセント）

ブランド	W(タングステン)	Ni(ニッケル)	Fe(鉄)	Cu(銅)	Co(コバルト)	述べる
WG-90	90.0±1	6.0±0.5	4.0±0.5	≤0.5	—	高密度、高強度で、航空宇宙分野でよく使用されます
WG-93	93.0±1	4.0±0.5	3.0±0.5	≤0.5	—	軍事分野で好まれる高い強度と靱性
WG-95	95.0±1	3.0±0.3	2.0±0.3	≤0.3	—	原子力および電子機器の遮蔽
WG-97	97.0±1	2.0±0.3	1.0±0.3	≤0.2	—	高純度タングステン合金、精密機器用途
WG-Cu5	92.0~95.0	—	—	5.0±0.5	—	タングステン銅合金、熱伝導率と強度
WG-Co3	92.0~95.0	—	—	—	3.0±0.3	タングステンコバルト合金、優れた耐摩耗性と耐腐食性

### 2. 中国規格（GB/T）ブランドの比較

GB/T ブランド	タングステン含有量 (W)	ニッケル含有量 (Ni)	鉄含有量 (Fe)	銅含有量 (Cu)	述べる
GBW90	89.5~90.5	5.5~6.5	3.5~4.5	≤0.5	航空カウンターウェイトと軍事産業
GBW93	92.5~93.5	3.5~4.5	2.5~3.5	≤0.5	一般的な高強度・高靱性合金
GBW95	94.5~95.5	2.5~3.5	1.5~2.5	≤0.3	原子力エネルギーと防護の応用
GBW97	96.5~97.5	1.5~2.5	0.5~1.5	≤0.2	高純度・高密度タングステン合金

### 3. 米国 ASTM 規格と MIL 規格の等級の対応

ASTM/MIL グレード	タングステン含有量 (W)	ニッケル含有量 (Ni)	鉄含有量 (Fe)	銅含有量 (Cu)	述べる
ASTM B386 WG90	89.5~90.5	5.5~6.5	3.5~4.5	≤0.5	航空宇宙向け共通グレード

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM B386 WG93	92.5~93.5	3.5~4.5	2.5~3.5	≤0.5	軍事および高 韌性用途
MIL-W-24441 WG95	94.5~95.5	2.5~3.5	1.5~2.5	≤0.3	原子力・放射線 防護分野

#### 4. 特殊機能タングステン合金グレード

ブランド	主な要素の組み合わせ	特徴と用途
WG-ナノ	W + Ni + Fe + ナノ粒子	韌性と強度を向上させるナノ粒子強化
WG-ハイタフ	W + 高 Ni/Fe 比	衝撃や動的荷重に対する耐性に適した高韌性設計
WG-高 Cu	W + Cu 高含有量	高熱伝導性タングステン銅合金、電子機器の放熱および電極用途
WG-Co	W + Co 高含有量	優れた耐摩耗性と耐腐食性、工作機械、高温部品

#### 5. 注記

- メーカーによって配合は異なり、実際のグレード範囲は若干調整される場合があります。
- グレードの数字は一般にタングステン含有量のパーセンテージに対応し、接尾辞は主な合金元素または特別なプロセスを表します。
- 適用する場合は、具体的な性能要件やプロセスの制限に基づいて総合的に選択する必要があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 付録 3: タングステン合金棒の規格文書と参考索引

この付録には、タングステン合金棒の分野における権威ある標準文書、技術仕様、および主要な参考資料が集められており、科学研究者、エンジニア、品質管理担当者が参照したり適用したりするのに便利です。

## 1. 国際基準と国内基準

規格番号	標準名	出版代理店	適用範囲
ASTM B311	タングステンおよびタングステン合金棒およびロッドの標準規格	ASTM インターナショナル	タングステンおよびタングステン合金棒の仕様と技術要件
GB/T 3879	タングステン合金棒の一般的な技術要件	中国国家标准局	タングステン合金棒の物理的・機械的特性と試験方法
ISO 683-11	熱処理鋼、合金鋼及び快削鋼 — 第 11 部: タングステン合金	国際標準化機構 (ISO)	タングステン合金の技術仕様
MIL-STD-1567	タングステン合金品質管理に関する軍事規格	米国国防総省	軍用タングステン合金製品
YS/T 547	高密度タングステン合金の技術要件	中国冶金工業規格	タングステン合金棒産業技術基準

## 3. 主要なジャーナル論文と会議論文

論文タイトル	著者	ジャーナル/会議	出版	研究の焦点
タングステン合金の高温挙動	S. チャン、Y. リュー	材料科学ジャーナル	2022	タングステン合金の高温特性と微細構造の進化
W-Ni-Fe 合金の微細構造の進化	M. チェン、X. ワン	粉末冶金	2021	微細構造の進化と機械的特性の関係
耐放射線タングステン合金の進歩	J. リー、H. キム	核物質	2023	タングステン合金の放射線損傷メカニズムと耐放射線設計
航空宇宙用高密度タングステン合金の開発	L. スミス、D. ジョンソン	国際航空宇宙会議	2022	航空宇宙におけるタングステン合金

## 4. 技術レポートと業界情報

材料名	リリースユニット	年	まとめ
タングステン合金材料性能試験技術仕様	中国タングステン産業協会	2021	タングステン合金の物理的性質、機械的性質および試験方法の規格
タングステン合金棒の製造工程と品質管理レポート	大手タングステン合金製造会社	2023	タングステン合金棒の製造工程と主要品質指標

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

原子力分野におけるタングステン合金	国立原子力技術研究センター	2022	原子炉および保護材料におけるタングステン合金
-------------------	---------------	------	------------------------

## 5. 参考ウェブサイトとデータベース

- 国際タングステン産業協会 (ITIA)**  
<https://www.itia.info/International Tungsten Industry Association>、タングステン資源および業界動向。
- ASM 国際材料データベース**  
<https://www.asminternational.org/> タングステン合金材料データを含む材料科学およびエンジニアリングデータベース。
- NIST 材料データ リポジトリ**  
<https://materialsdata.nist.gov/> 米国国立標準技術研究所 材料データ リポジトリ。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 付録 4: タングステン合金用語集と英語略語

この付録では、タングステン合金の分野でよく使用される専門用語と関連する英語の略語の定義と説明を集め、読者が技術内容と国際文献をよりよく理解できるようにすることを目的としています。

### 1. タングステン合金関連の専門用語

用語	解釈
タングステン合金	タングステンを主成分とし、結合金属（ニッケル、鉄、銅など）を添加した高密度合金材料。
粉末冶金（PM）	粉末プレスおよび焼結プロセスによって金属材料を製造する方法。
焼結	粉末粒子を高温で高密度の固体に結合するプロセス。
高密度化	焼結、熱処理、その他のプロセスを通じて材料の多孔性を減らし、密度を高めるプロセス。
熱処理	加熱、断熱、冷却によって物質の構造と特性を変化させるプロセス。
微細構造	材料の粒子形態、相構造、欠陥分布は顕微鏡で観察できます。
硬度	材料が局所的な塑性変形に抵抗する能力は、通常、ロックウェル硬度とビッカース硬度で表されます。
抗張力	引張荷重下で最大の応力に耐える材料の能力。
降伏強度	材料が永久変形し始める応力値。
伸長	材料が破損する前に塑性変形する能力。通常はパーセンテージで表されます。
熱膨張係数（CTE）	物質の温度の単位変化によって引き起こされる寸法変化の割合。
熱伝導率	物質の熱伝導能力。W/(m·K)で測定されます。
非破壊検査（NDT）	超音波検査やX線検査など、材料の完全性を損なわない検出方法。
ナノ強化	ナノスケールの粒子または構造を使用して材料の機械的特性を改善する技術。
サービスパフォーマンス	実際の使用条件で材料がどのように機能するか。

### 2. よく使われる英語の略語の説明

略語	フルネーム	解釈
W	タングステン	タングステン
ニ	ニッケル	ニッケル
鉄	鉄	鉄
銅	銅	銅
共同	コバルト	コバルト
首相	粉末冶金	粉末冶金
ASTM	アメリカ材料試験協会	ASTM
GB/T	国標規格（中国国家規格）	中国国家規格
ISO	国際標準化機構	国際標準化機構

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ミル	軍事規格	軍事規格
非破壊検査	非破壊検査	非破壊検査
熱線膨張係数	熱膨張係数	線膨張係数
HV	ピッカース硬度	ピッカース硬度
SEM	走査型電子顕微鏡	走査型電子顕微鏡
蛍光 X 線分析装置	X 線蛍光	X 線蛍光分光法
ICP	誘導結合プラズマ	誘導結合プラズマ発光分光法
ONH	酸素、窒素、水素	酸素、窒素、水素含有量分析
女性器切除	機能傾斜材料	機能的に傾斜した材料
医学博士	分子動力学	分子動力学
人工知能	人工知能	人工知能

### 3. よく使われる用語の補足

用語	解釈
重合金	通常 10 g/cm <sup>3</sup> を超える高密度の合金材料であるタングステン合金は、このカテゴリに属します。
接着相	タングステン合金内のタングステン粒子を結合するために使用される、Ni や Fe などの低融点金属相。
熱膨張の不一致	異なる材料または相間の熱膨張係数の違いによって生じる応力または変形。
微小亀裂	材料の内部または表面の小さな亀裂が疲労破壊につながる場合があります。
衝撃強度	衝撃荷重を受けたときにエネルギーを吸収する材料の能力。
表面粗さ	材料表面の微細な粗さは、摩擦、疲労、腐食特性に影響を与えます。
粒度分布	粉体材料における粒子サイズの統計的分布特性。
雰囲気制御	焼結または熱処理中の周囲のガス組成と圧力を制御します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

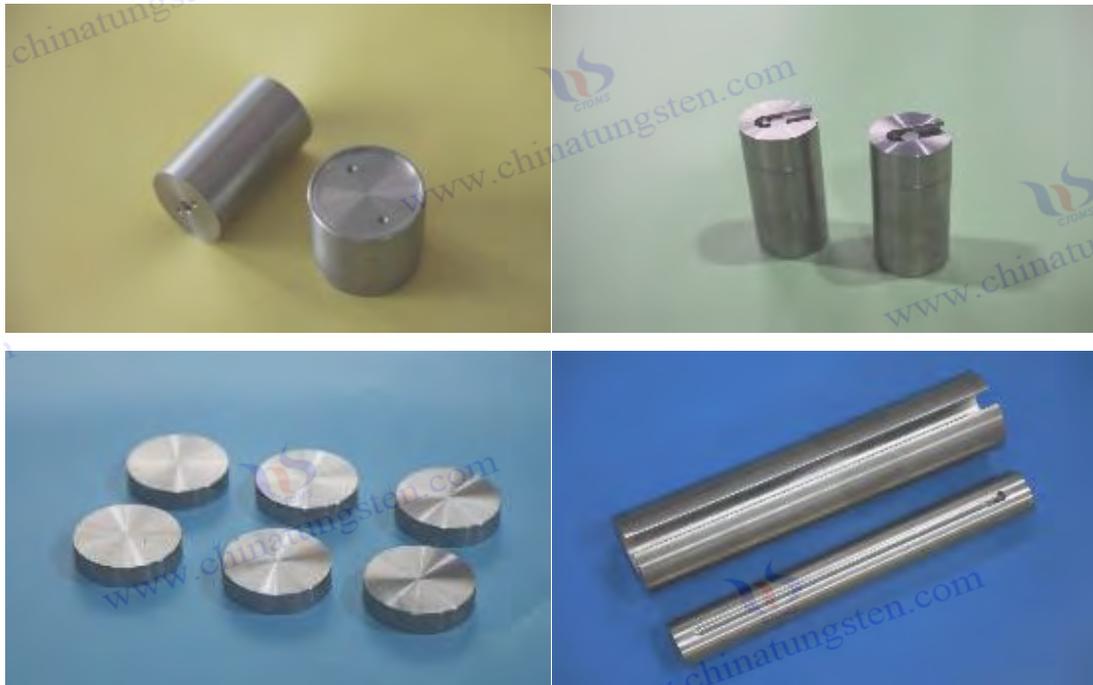
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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