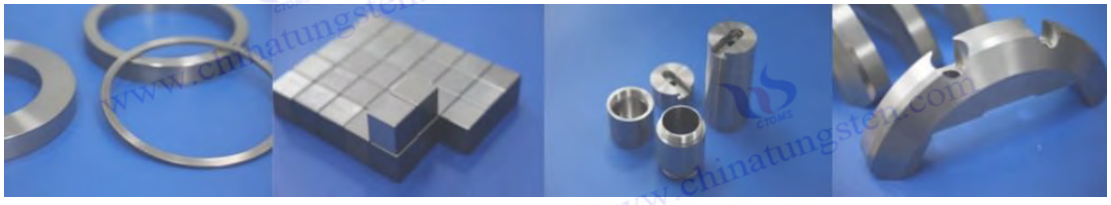
タングステン重合金百科事典

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

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 （中国初の一流タングステン製品ウェブサイト）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

目次

第 1 章 はじめに
1.1 高密度タングステン合金の定義と概要
1.2 高密度タングステン合金の研究と応用の意義
1.3 この本の目的と構成

第 2 章 高比重タングステン合金の基礎知識
2.1 高密度タングステン合金の化学的および物理的性質
2.2 高密度タングステン合金の歴史的発展
2.3 高密度タングステン合金と他の材料の比較
2.4 重タングステン合金の分類
2.4.1 組成による分類（W-Ni-Fe、W-Ni-Cu、W-Ni-Fe-Co など）
2.4.2 密度と機械的性質による分類（クラス 1～クラス 4）
2.4.3 用途に基づく分類（軍事、航空宇宙、医療、産業など）

第 3 章 高重量タングステン合金の性能分析
3.1 高密度タングステン合金の機械的特性
3.2 高密度タングステン合金の物理的性質
3.3 重タングステン合金の主要元素とその機能
3.4 重タングステン合金の耐食性と耐摩耗性
3.5 重タングステン合金の放射線遮蔽能力
3.6 重タングステン合金の性能を最適化する方法

第 4 章 高比重タングステン合金の製造技術
4.1 高密度タングステン合金原料の選択と前処理
4.2 高密度タングステン合金の粉末冶金プロセス
4.3 高密度タングステン合金の他の製造方法
4.4 高密度タングステン合金のプロセスパラメータの影響
4.5 高密度タングステン合金の品質管理と試験

第 5 章 高比重タングステン合金の加工と後加工
5.1 高密度タングステン合金の加工技術
5.2 高密度タングステン合金の表面処理
5.3 高密度タングステン合金の溶接と接合

第 6 章 高比重タングステン合金製造装置
6.1 重タングステン合金粉末製造装置
6.2 重タングステン合金成形装置
6.3 重タングステン合金焼結装置
6.4 重タングステン合金加工および後処理装置
6.5 重タングステン合金製造設備の選択と最適化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

第 7 章 高比重タングステン合金試験装置
7.1 高密度タングステン合金密度試験装置
7.2 高密度タングステン合金の機械的特性試験装置
7.3 高密度タングステン合金微細構造分析装置
7.4 高密度タングステン合金組成分析装置
7.5 高密度タングステン合金非破壊検査装置
7.6 高密度タングステン合金試験装置の選択と開発動向

第 8 章 CTIA GROUP LTD の高比重タングステン合金の主力製品
8.1 高比重タングステン合金カウンターウェイト製品
8.1.1 高比重タングステン合金航空宇宙用カウンターウェイト
8.1.2 高比重タングステン合金自動車用カウンターウェイト
8.1.3 高比重タングステン合金製スポーツ用ウェイト
8.1.4 高比重タングステン合金製船舶用カウンターウェイト
8.1.5 高比重タングステン合金エレベーターカウンターウェイト
8.1.6 ヘビータングステン合金ダーツシャフト
8.1.7 タングステン合金製釣り用シンカー

8.2 高比重タングステン合金軍用製品
8.2.1 重タングステン合金徹甲弾コア
8.2.2 高密度タングステン合金防護装甲板
8.2.3 高比重タングステン合金弾薬シールドケース
8.2.4 高密度タングステン合金対戦車ミサイル部品
8.2.5 高比重タングステン合金製銃器用カウンターウェイト
8.2.6 高比重タングステン合金航空ジャイロスコープカウンターウェイト
8.2.7 タングステン合金ロケットノズルブッシング

8.3 高比重タングステン合金医療関連製品
8.3.1 重タングステン合金放射線遮蔽部品
8.3.2 重タングステン合金同位体容器
8.3.3 高比重タングステン合金医療用タングステン合金針
8.3.4 高密度タングステン合金放射線治療ターゲット
8.3.5 高比重タングステン合金医療用保護スクリーン
8.3.6 重タングステン合金核廃棄物容器
8.3.7 重タングステン合金ガンマナイフ部品

8.4 重タングステン合金工業用工具および部品
8.4.1 重タングステン合金切削工具
8.4.2 高比重タングステン合金金型およびパンチ
8.4.3 重タングステン合金制振部品
8.4.4 高密度タングステン合金掘削工具

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.4.5 重タングステン合金軸受部品
8.4.6 重タングステン合金研削スリーブ
8.4.7 タングステン合金製重機用カウンターウェイト

8.5 重タングステン合金電子機器およびエネルギー製品
8.5.1 高密度タングステン合金電極材料
8.5.2 高密度タングステン合金ヒートシンク（ラジエーター）
8.5.3 重タングステン合金原子炉部品
8.5.4 高比重タングステン合金バッテリーカウンターウェイト
8.5.5 重タングステン合金太陽光発電機器部品
8.5.6 重タングステン合金 X 線管陽極ターゲット
8.5.7 高比重タングステン合金風力タービンカウンターウェイト

8.6 重タングステン合金のカスタマイズ製品
8.6.1 高比重タングステン合金 3D プリントタングステン合金部品
8.6.2 高比重タングステン合金特殊形状カウンターウェイト
8.6.3 高密度タングステン合金の美術品および装飾品
8.6.4 重タングステン合金実験機器部品
8.6.5 高密度タングステン合金微細精密部品
8.6.6 重タングステン合金暗号通貨
8.6.7 高比重タングステン合金銀行カード

第 9 章 高比重タングステン合金の応用分野
9.1 航空宇宙における高比重タングステン合金の応用
9.1.1 航空機のカウンターウェイトおよびバランス部品
9.1.2 宇宙船の推進システムコンポーネント
9.1.3 ジャイロスコープと慣性航法システム

9.2 軍事産業における高比重タングステン合金の応用
9.2.1 運動エネルギー徹甲弾と弾頭コア
9.2.2 防護装甲と遮蔽材
9.2.3 ミサイルおよび銃器の部品
9.2.4 爆発成形弾（EFP）

9.3 医療分野における重タングステン合金の応用

9.3.1 放射線遮蔽・防護装置

9.3.2 放射線治療と同位体容器
9.3.3 外科器具およびインプラント

9.4 重タングステン合金の産業分野および民生分野への応用
9.4.1 工作機械

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.4.2 重機用カウンターウェイト

9.4.3 自動車・レース産業

9.4.4 スポーツおよび娯楽機器

9.5 電子・エネルギー分野における高比重タングステン合金の応用

9.5.1 電子機器の放熱と遮蔽
9.5.2 原子力と再生可能エネルギーの構成要素
9.5.3 半導体およびマイクロエレクトロニクス部品

9.6 新興分野における重タングステン合金の応用
9.6.1 積層造形（3Dプリンティング）の応用 9.6.2 宇宙探査および深海探査
9.6.3 高エントロピー合金および複合材料の開発

第 10 章 重タングステン合金の国内および国際規格
10.1 重タングステン合金の国際規格
10.2 重タングステン合金に関する国内規格
10.3 重タングステン合金の規格の内容と要件
10.4 重タングステン合金の国内規格と国際規格の比較
10.5 重タングステン合金の規格開発動向
10.6 CTIA GROUP LTD 高比重タングステン合金 MSDS

第 11 章 重タングステン合金の環境と経済に関する考察
11.1 重タングステン合金製造プロセスの環境影響
11.2 重タングステン合金のリサイクルと再利用
11.3 重タングステン合金のコスト分析

第 12 章 高密度タングステン合金の研究の最前線
12.1 高密度タングステン合金の新材料の開発
12.2 高密度タングステン合金の性能向上の方向性
12.3 高密度タングステン合金のシミュレーションと計算材料科学
12.4 高密度タングステン合金の AI 支援設計とカスタマイズ
12.5 高密度タングステン合金とタングステン含有高エントロピー合金の関係
12.6 低毒性タングステン合金（ニッケルフリーまたは低ニッケル合金）
12.7 ナノ構造タングステン合金

付録
重タングステン合金用語集
重タングステン合金の参考文献
重タングステン合金データシート
高比重タングステン合金に関する特許

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

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/cm³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

第 1 章 はじめに

重タングステン合金の定義と概要

高密度タングステン合金は、その名の通り、タングステン（W）を主成分とし、少量の金属元素（ニッケル（Ni）、鉄（Fe）、銅（Cu）など）を特殊なプロセスで添加した複合材料です。この合金は、非常に高い密度（通常 17.0～19.3 g/cm³、純タングステンの 19.25 g/cm³ に近い）で知られ、鋼（7.8 g/cm³）や鉛（11.3 g/cm³）などの一般的な金属をはるかに上回っています。その核心的な特徴は、高密度だけでなく、優れた機械的強度、耐腐食性、耐高温性、優れた放射線遮蔽能力を備えており、多くの分野でかけがえのない応用価値を持っています。

化学組成の観点から見ると、高密度タングステン合金は通常、85%～99%のタングステンを含み、残りは結合相元素（ニッケル、鉄など）または代替元素（銅など）です。これらの添加元素はタングステン粉末と混合され、粉末冶金プロセスを経て加圧焼結され、均一な微細組織を形成します。結合相の役割は、合金の靭性と加工性を向上させることです。純粋なタングステンは密度が非常に高いものの、硬すぎて脆く、実際の加工および用途の要件を満たすことができません。高密度タングステン合金は、配合を最適化することで、タングステンの高密度特性を維持するだけでなく、機械的特性も向上させ、機能的かつ実用的である先進的な材料となっています。

材料科学において、重タングステン合金は機能材料と構造材料の融合と考えられています。高密度であることから、航空宇宙用カウンターウェイトや軍事用徹甲弾コアなど、小型で高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

重量が求められる用途に最適です。同時に、物理的・化学的安定性から、放射線遮蔽や原子力産業における高温処理ツールなど、過酷な環境にも適しています。こうした汎用性により、重タングステン合金は現代の産業技術において重要な位置を占めており、「重金属の中でも最高のもの」として知られています。

歴史的に見ると、高密度タングステン合金の開発は、20 世紀初頭のタングステン材料研究、特に第二次世界大戦中の高性能軍事材料の需要に端を発し、その技術進歩を促進しました。今日では、製造プロセス（液相焼結、熱間静水圧プレスなど）の継続的な改善と応用分野の拡大により、高密度タングステン合金は当初の軍事用途から医療、産業、民生、さらには新興科学技術分野へと拡大し、材料科学における重要な研究・応用分野となっています。

1.2 高比重タングステン合金の研究と応用の意義

高密度タングステン合金は、その科学的意義と実用的価値が広範囲に及び、その重要性は多くの側面に反映されています。まず、科学的観点から見ると、高密度タングステン合金は金属ベース複合材料の研究のモデルとなっています。タングステンと他の元素の比率を調整し、製造プロセスを最適化することで、密度、強度、靭性などの特性間の関係を体系的に探究することができます。このような研究は、材料科学の理論的発展を促進するだけでなく、他の高性能合金の開発にも貴重な経験を提供します。例えば、高密度タングステン合金の微細組織制御技術（粒径の最適化や相分布の均一性など）は、高エントロピー合金やナノ材料の研究に活用されています。

工業分野において、高密度タングステン合金の応用は、多くの産業の効率と安全性を直接的に向上させます。航空宇宙産業を例に挙げると、その高密度特性により、航空機や宇宙船のカウンターウェイト部品は限られた空間内で正確な質量配分を実現し、飛行性能と燃費を最適化します。軍事産業において、重タングステン合金製の徹甲弾は、高い硬度と密度により、現代の装甲材料を効果的に貫通し、兵器システムの戦闘能力を向上させます。さらに、耐高温性と耐腐食性を備えているため、高温加工ツールや深海機器に最適な選択肢となり、機器の寿命を大幅に延ばし、メンテナンスコストを削減します。

医療分野への応用は、高密度タングステン合金の社会的価値をさらに際立たせています。優れた放射線遮蔽能力を有するため、高密度タングステン合金は X 線装置、CT 装置、放射線治療装置の遮蔽部品に広く使用されています。従来の鉛材料と比較して、タングステン合金は無毒で高密度であるため、より薄い体積で同等、あるいはそれ以上の防護効果を発揮し、機器の軽量化を実現し、患者と医療従事者の安全性を向上させます。さらに、高密度タングステン合金は、医療用同位元素容器やガンマナイフ部品の製造にも利用されており、放射性物質の安全な輸送と精密な治療を保証し、現代医療技術の発展を促進しています。

民生分野における高密度タングステン合金の応用は無視できません。例えば、スポーツ用品（ゴルフクラブのウェイト、ダーツのロッドなど）や釣り用のおもりなどへの応用は、有毒な鉛材料の代替となり、製品の性能向上だけでなく環境保護の要件も満たしています。産業

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

用途から民生用途への幅広い浸透は、高密度タングステン合金が生活の質の向上と持続可能な開発の促進に大きく貢献する可能性を秘めていることを反映しています。

経済的観点から見ると、高密度タングステン合金の研究開発と応用は、タングステン採掘、粉末冶金設備製造、精密加工技術など、関連産業チェーンの発展を牽引してきました。特に、高性能材料に対する世界的な需要の高まりを背景に、高密度タングステン合金の市場見通しは広く、企業や国家にとって大きな経済的メリットをもたらします。しかしながら、その高い生産コストと資源への依存度（タングステンは希少金属です）は、経済と環境の双方にとってメリットのある状況を実現するために、研究者がより効率的な生産プロセスとリサイクル技術を継続的に模索することを促しています。

1.3 この本の目的と構成

本書は、高密度タングステン合金に関する基礎理論から実用化、生産技術から将来の発展に至るまでの関連知識を包括的かつ体系的に紹介し、読者にとって権威ある詳細な参考資料を提供することを目指しています。その主な目的は以下のとおりです。

まず、学術研究者に理論的なサポートを提供します。 本書は、高密度タングステン合金の化学的および物理的特性、調製プロセス、および性能最適化方法を深く探究し、研究者がそれらのミクロ組織とマクロ的特性の関係を理解するのに役立ち、新しいタングステンベース材料の設計にインスピレーションを提供します。第二に、エンジニアリングおよび技術者に実用的なガイドを提供します。 生産設備、テスト技術、および特定の製品アプリケーションを詳細に紹介することにより、本書は実務者が高密度タングステン合金の加工および応用スキルを習得し、工業生産効率を向上させることを目指しています。 第三に、業界の意思決定者と管理者に戦略的なリファレンスを提供します。 国内外の基準、環境への影響、経済的考慮事項を分析することにより、本書は高密度タングステン合金業界の発展動向と課題を明らかにし、政策立案と投資決定の基礎を提供します。

本書の対象読者は、材料科学・工学分野の学者・学生、タングステン合金の製造・加工に携わるエンジニア、航空宇宙・防衛産業の技術専門家、医療機器メーカー、高性能材料に関心を持つ産業界の実務家などですが、これらに限定されるものではありません。多様な読者のニーズに応えるため、本書の内容設計は、理論の深さと応用範囲の広さの両方を考慮し、基礎知識と最先端研究の最新の進歩を体系的にレビューしています。

この本は次のように構成されています。

第 2 章から第 5 章:高密度タングステン合金の基礎知識、性能分析、準備技術、処理および後処理技術を紹介し、読者のための包括的な理論的枠組みを確立します。

第 6 章から第 7 章:生産とテストに焦点を当て、高密度タングステン合金の生産設備とテスト設備について詳しく説明し、技術実装のためのハードウェア サポートを強調します。

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

第 8 章から第 9 章: 応用分野に目を向けると、中国タングステン インテリジェントの主な製品と幅広い応用分野がそれぞれ列挙され、高密度タングステン合金の実際の価値が実証されています。

第 10 章～第 11 章:規範と影響に焦点を当て、国内および国際基準、環境および経済上の考慮事項を分析し、工業化の背景となるサポートを提供します。

12 章:将来を見据えて、AI 支援設計と高エントロピー合金のクロス研究を含む、高密度タングステン合金の研究の最前線について説明します。

付録:読者の参照や詳細な調査を容易にするための用語集、参考文献、データ テーブルを提供します。

本書は、このような構成を通して、高密度タングステン合金の理論から実践、技術から応用、現状から未来に至るまで、読者に包括的な視点を提供することを目指しています。この分野に初めて触れる学習者にとっても、研究を深めたい専門家にとっても、本書が高密度タングステン合金の世界を探求する上での頼もしいパートナーとなることを願っています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

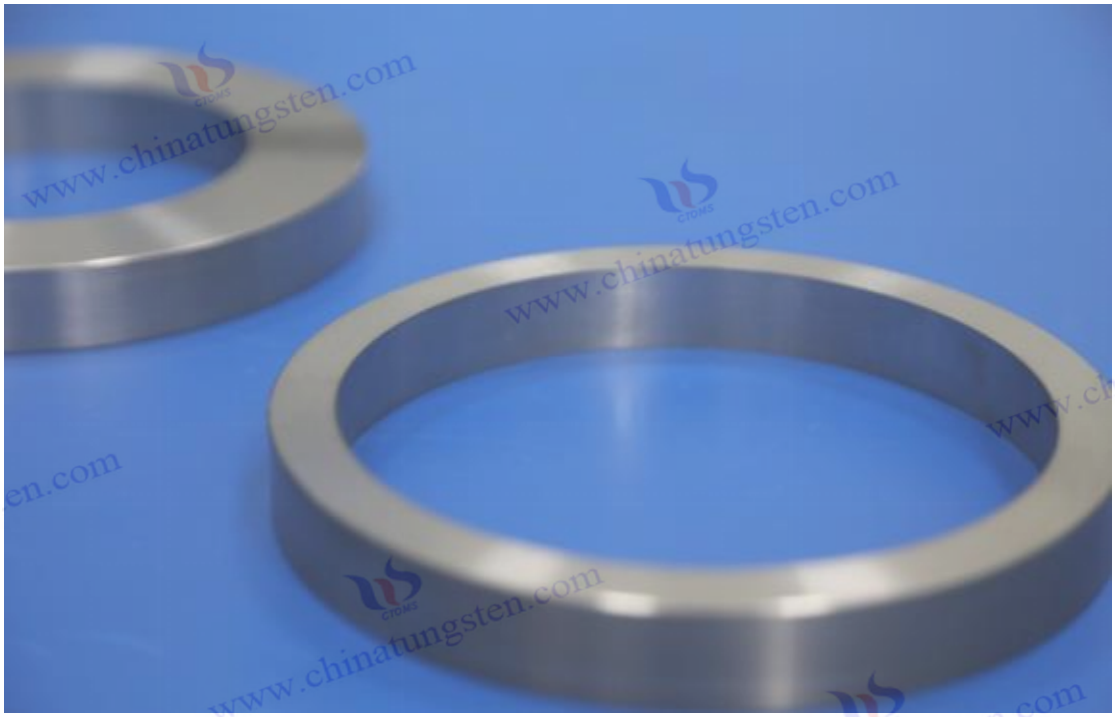
High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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/cm³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



第 2 章 高比重タングステン合金の基礎知識

重タングステン合金の化学的および物理的性質

高密度タングステン合金は、現代の産業技術における幅広い応用の中核を成しています。これらの特性は、タングステン自体の優れた特性だけでなく、合金化プロセスの最適化からも得られます。化学組成の観点から見ると、高密度タングステン合金はタングステン（W）が主成分で、タングステン含有量は通常 85%～99%です。残りはニッケル（Ni）、鉄（Fe）、銅（Cu）、コバルト（Co）、モリブデン（Mo）などの少量の結合相または添加元素です。タングステンは周期表の第 6 周期に位置する遷移金属で、原子番号 74、原子量は 183.84 です。タングステンは 3422℃と非常に高い融点と化学的安定性を備えています。タングステンの電子配置（[Xe] $4f^{14}5d^{4}6s^{2}$）は、高密度と高硬度を決定し、ニッケルや鉄などの添加元素は、固溶体または金属間化合物（ Ni_3Fe など）を形成することでタングステンの脆さを大幅に改善します。 たとえば、典型的なタングステン － ニッケル － 鉄合金（W-Ni-Fe）では、タングステン含有量は 90%～97%で、ニッケルと鉄の比率は通常 7：3 または 5：5 です。 この比率は焼結プロセス中に液相を形成し、タングステン粒子の均一な結合を促進し、合金の靭性を高めます。 一方、タングステン銅合金（W-Cu）は、銅の電気伝導性と熱伝導性が高いため、電子機器によく使用されます。 密度と熱特性のバランスをとるために、タングステン含有量は通常 70%～90%です。

物理的特性の観点から見ると、重タングステン合金の密度は最大の利点であり、17.0～19.3 g/cm³ の範囲で、純タングステンの 19.25 g/cm³ に近い値を示します。この高い密度は、タングステンの体心立方（BCC）結晶構造と高い原子質量に由来し、単位体積あたりの原子の充填効率が非常に高くなります。例えば、W-90Ni-7Fe-3 合金の密度は 18.5 g/cm³ に達し、これは

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

鋼（7.85 g/cm³）、アルミニウム（2.7 g/cm³）、鉛（11.34 g/cm³）よりもはるかに高く、純タングステンと比べるとわずかに低い程度です。この特性により、航空機のカウンターウェイトや徹甲弾の芯など、小型で高品質が求められる用途において、タングステン合金は不可欠な存在となっています。重タングステン合金の融点は、添加元素の影響で純タングステンよりも低くなりますが、それでも 2500～3000℃の範囲にあります。例えば、W-95Ni-Fe 合金の融点は約 2800℃で、鋼（約 1500℃）や鉛（327℃）よりもはるかに高く、高温環境下での使用に最適です。

機械的特性の面では、重タングステン合金は高い強度と適度な靭性を兼ね備えています。引張強度は、組成とプロセスによって異なりますが、通常 700～1200 MPa です。例えば、W-90Ni-7Fe-3 合金の引張強度は 1000 MPa に達することもありますが、W-95Ni-Cu 合金の引張強度はわずかに低く、800 MPa 程度です。硬度（ビッカース硬度、HV）は 300～500 HV で、純タングステン（350～650 HV）より低いものの、鉛（約 5 HV）よりはるかに高い値です。純タングステンの脆性（伸び率<1%）と比較して、高密度タングステン合金の延性は大幅に向上し、結合相（Ni-Fe など）の塑性効果により 10%～30%の伸び率が得られます。例えば、W-93Ni-Fe 合金は引張試験で 20%の伸びを示し、爆風衝撃などの動的荷重下でも破壊しにくい特性を備えています。さらに、耐摩耗性と耐疲労性にも優れ、摩耗率は鋼鉄に比べて約 30%～50%低いため、切削工具や掘削装置において長寿命特性を発揮します。

高密度タングステン合金のもう一つの重要な側面は、熱的および電気的特性です。その熱伝導率は 80～150 W/(m・K)で、純タングステン（173 W/(m・K)）や銅（400 W/(m・K)）より低いものの、鋼（約 50 W/(m・K)）よりは高くなっています。例えば、W-80Cu 合金の熱伝導率は 140 W/(m・K)に達し、電子機器のヒートシンクとしての使用に適しています。その抵抗率は約 5.5～7.0 μΩ・cm で、銅（1.68 μΩ・cm）や純タングステン（5.5 μΩ・cm）よりわずかに高いものの、依然として良好な導電性を持ち、電極材料に適しています。特に優れているのは放射線遮蔽能力です。タングステンは原子番号（Z=74）が高く密度が高いため、X 線やガンマ線の吸収効率が非常に高くなります。例えば、わずか 1 cm の厚さの W-95Ni-Fe 合金は、ガンマ線を約 90% 遮蔽することができ、同じ厚さの鉛（約 70%）をはるかに上回ります。また、毒性がないため、医療業界や原子力産業に適した材料です。

耐食性に関して言えば、タングステン自体は常温で酸、アルカリ、酸素に対して極めて高い安定性を示し、塩酸や硫酸とはほとんど反応せず、強酸化媒体（濃硝酸など）には徐々に溶解するだけです。重タングステン合金もこの特性を受け継いでいますが、ニッケルや鉄を添加すると耐食性がわずかに低下します。例えば、W-Ni-Fe 合金を塩酸に 100 時間浸漬した場合の質量減少率は 0.5%未満ですが、硝酸では 2%～3%に達することがあります。一方、W-Cu 合金は銅を含むため、湿気や海水に対する耐性が優れており、海洋環境での腐食率は鋼の 1/10 に過ぎません。これらの特性により、重タングステン合金は様々な化学環境下で安定した状態を維持できます。

性能を直感的に説明するために、次の表では高比重タングステン合金の主なパラメータを鋼、鉛、純タングステンと比較しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

パフォーマンスパラメータ	重タングステン合金	鋼（普通炭素鋼）	鉛	純タングステン
密度(g/cm³)	17.0～19.3	7.85	11.34	19.25
融点（℃）	2500～3000	約 1500	327	3422
引張強度（ MPa）	700～1200	400～1000	約 15	900～1500
硬度（HV）	300～500	120～250	約 5	350～650
伸長（ %）	10～30	20～40 歳	50 歳以上	<1
熱伝導率（W/(m・K)）	80～150	約 50	35	173
抵抗率（μΩ・cm）	5.5～7.0	約 15	20	5.5
耐食性	良好（非酸化環境）	中程度（錆びやすい）	良好（耐酸性）	素晴らしい
放射線遮蔽能力	素晴らしい	貧しい	良い	素晴らしい

注： 表のデータは標準的な範囲であり、具体的な値は材料やプロセスによって異なる場合があります。

重タングステン合金の歴史的発展

高密度タングステン合金の開発は、基礎研究から産業応用、そして技術革新へと続く長いプロセスであり、人類の高性能材料への絶え間ない探求を反映しています。タングステンの発見は 18 世紀後半に始まりました。1781 年、スウェーデンの化学者カール・ヴィルヘルム・シェーレは、タングステン酸塩（$CaWO_4$ ）を分解することでタングステンの存在を推測しました。そして 1783 年、スペインの兄弟フアン・ホセとファウスト・エルフアールは、酸化タングステン（WO_3 ）を還元することで初めて金属タングステンを抽出しました。彼らはそれを「ウルフラム」（ドイツ語の「狼の泡」に由来）と名付けました。これは、その鉱石がしばしば錫と関連付けられ、精錬中に泡が発生するためです。しかし、
初期の冶金技術が遅れていたため、タングステンは粉末または化合物の形で存在し、バルク材料に加工することができず、その用途は限られていました。
19 世紀には、産業革命の進展に伴い、タングステンの用途が徐々に拡大しました。1847 年、イギリスの科学者ロバート・オックスランドはタングステン酸ナトリウムの製造方法を開発し、タングステンの工業生産の基礎を築きました。19 世紀末には、電気アーク炉と粉末冶金技術の出現により、タングステンの加工が可能になりました。1904 年、アメリカのゼネラル・エレクトリック社は、白熱電球の炭素フィラメントに代えてタングステンフィラメントを初めて採用しました。タングステンフィラメントの高い融点と耐久性により、電球の寿命が大幅に延びました。この画期的な進歩は、タングステンの実験室から産業への移行を象徴するものでしたが、純粋なタングステンの脆さは、より複雑なニーズを満たすことを依然として困難にしていました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

高密度タングステン合金は、20 世紀初頭に軍事ニーズを背景に登場しました。第一次世界大戦（1914～1918 年）中、タングステンはその高い硬度から切削工具や装甲鋼（ドイツの「タングステン鋼」など）の製造に使用されましたが、純粋なタングステンの加工が困難だったため、科学者たちは合金化の道を模索しました。1930 年代、ドイツの冶金学者は初めてタングステンをニッケルと鉄と混合し、粉末冶金法でタングステン系合金を製造しようと試みました。この時期の典型的な配合は W-90Ni-10 で、密度は約 17 g/cm³、硬度は約 300 HV で、純タングステンに比べて靭性が大幅に向上しました。第二次世界大戦（1939～1945 年）は、重タングステン合金開発の転換点となりました。 1940 年代、米軍は M1 戦車の徹甲弾芯として W-90Ni-7Fe-3 合金を開発しました。その密度（18.5 g/cm³）と貫通力は当時の鋼鉄製の芯をはるかに上回り、ドイツ軍の装甲に対する破壊力を大幅に向上させました。当時の技術は主にプレス成形と高温焼結に依存していました。このプロセスは単純でしたが、現代の高密度タングステン合金の基礎を築きました。

戦後、冷戦期における軍備拡張競争と民生工業化は、高密度タングステン合金のさらなる発展を促進しました。1950年代から1960年代にかけて、航空宇宙分野ではその高密度特性を活用し始めました。例えば、アメリカのF-15戦闘機のジャイロスコープのカウンターウェイトやNASAの初期の衛星のバランスブロックなどです。これらの部品の密度要件は 18g/cm³以上でした。同時期に、医療分野では放射線遮蔽の可能性が発見されました。1950 年代後半には、 W-95Ni-Fe 合金が X 線装置の遮蔽部品に使用され始め、徐々に鉛に取って代わりました。1970年代には、液相焼結技術の成熟により、合金の密度は95%から99%以上に増加しました。例えば、W-93Ni-Fe 合金の気孔率は 0.5%以下に低減され、性能の一貫性が大幅に向上し、大規模生産が促進されました。

21 世紀に入り、高密度タングステン合金の研究開発は、性能最適化と環境保護用途へと移行しました。2000 年以降、タングステン粉末の製造にナノテクノロジーが導入され、粒径はミクロンレベルから 50～100nm へと微細化され、W-95Ni-Fe 合金の引張強度は 1000MPa から1200MPa へと向上しました。3Dプリンティング技術（選択的レーザー焼結法など）の発展により、航空宇宙分野の特殊形状カウンターウェイトなど、複雑な形状のタングステン合金部品の実現が可能になりました。さらに、鉛の毒性への懸念から、W-90Ni-Cu 合金は民生分野（釣り用おもりやゴルフクラブの重りなど）への展開が進められ、市場シェアは 2000 年の 5%から2020 年には 30%以上にまで拡大しました。現在、高密度タングステン合金の研究は、AI 支援設計と高エントロピー合金との融合に重点を置いています。その歴史的発展は、技術の進歩を物語るだけでなく、材料科学と社会のニーズとの密接な相互作用を反映しています。

2.3 高比重タングステン合金と他の材料との比較

高密度タングステン合金は多くの材料の中で確固たる地位を築いていますが、その利点と限界を理解するには、他の材料との詳細な比較が必要です。以下は、高密度タングステン合金を鋼（普通炭素鋼）、鉛、チタン合金（Ti-6Al-4V）、純タングステンと組み合わせた、密度、機械的特性、熱的特性、耐食性、加工性、コストという 6 つの側面から体系的に分析したものです。

高密度タングステン合金の核となる利点は**密度です。密度は 17.0～19.3 g/cm³の範囲で、純タングステン（19.25 g/cm³）に近く、鋼（7.85 g/cm³）、チタン合金（4.51 g/cm³）、鉛（**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

11.34 g/cm³）をはるかに上回ります。例えば、W-95Ni-Fe 合金の密度は 18.5 g/cm³ ですが、同じ体積の鋼ではその重量のわずか 40%です。そのため、航空機のカウンターウェイトや徹甲弾の芯など、高重量かつ小容積が求められる用途では、W-95Ni-Fe 合金は不可欠な材料となります。一方、軽量設計には鋼やチタン合金が適しており、鉛は毒性のために使用が制限されていま。

機械的特性：高密度タングステン合金（700～1200 MPa）の引張強度は、鋼（400～1000 MPa）やチタン合金（約 1100 MPa）と同程度ですが、鉛（約 15 MPa）よりもはるかに高く、純タングステン（900～1500 MPa）よりわずかに低くなります。硬度（300～500 HV）も鋼（120～250 HV）や鉛（約 5 HV）よりも優れていますが、純タングステン（350～650 HV）よりは低くなります。伸び率（10%～30%）は純タングステン（<1%）よりも大幅に優れており、鋼（20%～40%）やチタン合金（10%～15%）に近いため、純タングステンの脆さを補っています。例えば、W-90Ni-Fe 合金は衝撃試験において 50 J/cm² のエネルギーに耐えることができますが、純タングステンはわずか 5 J/cm² しか耐えられません。この強度と靭性のバランスにより、動荷重下でも高い信頼性が得られます。一方、鉛は強度が非常に低いため、構造用途への応用が制限されます。

熱特性、 重タングステン合金の熱伝導率（80～150 W/(m・K)）は、純タングステン（173 W/(m・K)）や銅（400 W/(m・K)）よりも低いですが、鋼（約 50 W/(m・K)）や鉛（35 W/(m・K)）よりも高くなっています。その融点（2500～3000℃）は、鋼（約 1500℃）、鉛（327℃）、チタン合金（約 1660℃）よりもはるかに高く、純タングステン（3422℃）に次いで高いです。たとえば、W-80Cu 合金の熱伝導率は 140 W/(m・K)で、ヒートシンク用途に適していますが、鋼は高温で容易に軟化しますが、鉛は完全に溶けます。

耐食性、高密度タングステン合金は非酸化環境下で優れた性能を発揮します。例えば、10%塩酸に 1,000 時間浸漬した後の質量減少率は 1 **%未満で、**鋼（錆びやすい、減少率は約 20%）や鉛（耐酸性はあるが耐アルカリ性はない、減少率は約 5%）よりも優れています。チタン合金（優れた耐食性、減少率<0.1%）や純タングステン（ほとんど腐食しない）はわずかに優れていますが、W-Cu 合金は海水中で優れた性能を発揮し、腐食率は鋼のわずか 1/15 であるため、海洋工学に適しています。

被削性は重要な改善点です。純タングステンは硬度が高く脆いため、加工には高温鍛造や特殊な工具が必要となり、コストがかかります。重タングステン合金は、結合相（Ni-Fe など）によって最適化されており、旋削加工やフライス加工が可能です。加工難易度は鋼（切削しやすい）とほぼ同等ですが、チタン合金（中程度）や鉛（非常に加工しやすい）よりも高いです。例えば、W-90Ni-Fe 合金の切削速度は 50m/分に達しますが、純タングステンはわずか 10m/分です。

コスト面では、高密度タングステン合金の価格は 1 トンあたり約 3 万ドルから 5 万ドルで、鋼鉄（約 500 ドル/トン）や鉛（約 2,000 ドル/トン）よりもはるかに高く、チタン合金（約 3 万ドル/トン）と同程度ですが、純タングステン（約 6 万ドル/トン）よりは安価です。これは、タングステンは希少金属（世界の埋蔵量は約 350 万トンで、主に中国に集中）であり、製造

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

プロセスが複雑（粉末冶金、焼結）であるためです。そのため、高付加価値分野（航空や医療など）ではより経済的ですが、ローエンド用途では鋼鉄に置き換えられる可能性があります。

一般的に、高密度タングステン合金は、密度、強度、靭性、耐食性、加工性といった総合的な性能において他に類を見ない特性を備えています。純タングステンの脆さと鉛の毒性を補い、高密度用途における鋼やチタン合金の限界を超え、その後のプロセス設計や用途選択のための確固たる基盤を提供します。

重タングステン合金の分類

高密度タングステン合金（HDTA）は、タングステン（W）を主成分とする合金の一種です（含有量は通常 85%～97%）。高密度、優れた機械的特性、優れた耐食性により、軍事、航空宇宙、医療、電子工学、工業分野で広く使用されています。様々な分類方法により、高密度タングステン合金は以下のカテゴリーに分類されます。

2.4.1 成分による分類

高密度タングステン合金はタングステンを主成分とし、ニッケル（Ni）、鉄（Fe）、銅（Cu）、コバルト（Co）などの元素を必要に応じて添加することで、その性能を最適化します。合金に含まれる二次元素の違いにより、主に以下のカテゴリーに分類されます。

（１）タングステンニッケル鉄合金

組成特性： 一般的に 90%～97%のタングステンを含み、ニッケルと鉄の比率はおよそ 7:3 または 8:2 です。

性能上の利点：優れた延性、高い強度と硬度、高い透磁率。

主な用途：軍事産業（徹甲コア）、航空宇宙産業（カウンターウェイト）、工業用カウンターウェイト（ジャイロスコープのカウンターウェイト）で広く使用されています。

（２）タングステン-ニッケル-銅合金

組成特性：タングステン含有量は通常 90%～95%で、ニッケルと銅の比率は通常 7：3 に近くなります。

性能上の利点: W-Ni-Fe 合金と比較すると、W-Ni-Cu 合金は透磁率が低く、磁性がほとんどなく、耐食性が優れています。

主な用途：医療用放射線遮蔽（X 線防護）、電子パッケージング、磁気に敏感な領域に使用されます。

（３）タングステン-ニッケル-鉄-コバルト合金

成分特性： W-Ni-Fe ベースにコバルト（Co）を添加して強度と耐摩耗性を向上させます。

性能上の利点: W-Ni-Fe 合金よりも強度と硬度が高く、一定の高温安定性を備えています。

主な用途：航空宇宙エンジン部品、耐摩耗切削工具などの高温構造材料に使用されます。

（4）その他の特殊合金

W-Cu 合金：主に電極材料などの高熱伝導性、高電気伝導性の用途に使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

W-Re（タングステン-レニウム）合金：高温性能が優れており、航空宇宙分野でよく使用されます。

2.4.2 密度と機械的性質による分類（クラス 1～クラス 4）

ASTM B777 および MIL-T-21014 規格によれば、重タングステン合金は密度と機械的特性に応じて 4 つのグレード（クラス 1 からクラス 4）に分類されます。合金のグレードはそれぞれ異なる用途シナリオに適しています。

学年	タングステン含有量（%）	密度（グラム/cm³）	抗張力（MPa）	降伏強度（MPa）	伸長（%）	透磁率	代表的な用途
クラス 1	90	17.0	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1.05	航空用カウンターウェイト、産業用カウンターウェイト
クラス 2	92.5	17.5	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1.05	軍用装甲、徹甲コア
クラス 3	95	18.0	≥ 724	≥ 517	≥ 3	> 1.05	X 線防護、核放射線遮蔽
クラス 4	97	18.5	≥ 689	≥ 517	≥ 2	> 1.05	医療用放射線防護、電子パッケージ

クラス 1 およびクラス 2 :強度と靭性が高く、航空宇宙、軍事、産業用カウンターウェイトなどの用途に適しています。
クラス 3 およびクラス 4 :高密度で、通常は放射線防護、原子力産業、高精度カウンターウェイト分野で使用されます。

2.4.3 用途に基づく分類

高比重タングステン合金は、さまざまな分野での用途に応じて、次のカテゴリに分類できます。

（1）軍事産業
徹甲弾（劣化ウラン弾の代替である APFSDS など）、**防護装甲など**に使用されます。 爆発性**の金属片**等
要件: 高密度、高硬度、高耐衝撃性。
主な材質：W-Ni-Fe、W-Ni-Fe-Co。

（2）航空宇宙
航空機や宇宙船の**カウンターウェイトに使用される。 慣性ジャイロカウンターウェイト、**エンジン**高温部品**等

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

要件：高密度、耐高温性、耐酸化性。
主な材質：W-Ni-Fe、W-Ni-Fe-Co、W-Re。

（3）医療分野

X 線遮蔽材として使用され、 **放射線治療防護具**（ガンマ線遮蔽ブロックなど）、放射**性医薬品輸送容器**など
要件：高密度、非磁性、非毒性、耐腐食性。
主な材質：W-Ni-Cu、W-Ni-Cu-Co。

（4）産業・民生分野

精密カウンターウェイト（振り子、ジャイロスコープ、レーシングカウンターウェイト）に使用されます。 **石油掘削ツール、 電極材料**等
要件：高密度、耐摩耗性、優れた加工性。
主な材質：W-Ni-Fe、W-Ni-Cu、W-Cu。

（５）エレクトロニクス・半導体分野

電子パッケージ材料に使用され、 **高出力半導体ヒートシンク、マイクロエレクトロニクス相互接続材料**など。
要件：高い熱伝導性、低い熱膨張、非磁性。
主な材質：W-Cu、W-Ag （タングステン銀合金） 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

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/cm³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

第 3 章 高重量タングステン合金の性能分析

3.1 重タングステン合金の機械的性質

高密度タングステン合金の機械的特性は、強度、硬度、靭性、耐摩耗性、耐疲労性などを網羅し、エンジニアリング用途で人気を博す重要な要素となっています。これらの特性の優れたパフォーマンスは、タングステンの高い硬度と添加元素の相乗効果によるもので、静的および動的負荷の両方において優れたパフォーマンスを発揮します。

引張強度と降伏強度は、機械的特性の中核となる指標です。重タングステン合金の引張強度は通常 700～1200MPa、降伏強度は約 500～1000MPa ですが、具体的な値は組成や製造プロセスによって異なります。例えば、W-90Ni-7Fe-3 合金（タングステン含有量 90%、ニッケル鉄比 7:3）の引張強度は 1050MPa に達し、降伏強度は約 850MPa です。一方、W-95Ni-Cu 合金（タングステン含有量 95%、ニッケル銅比）の引張強度は約 800MPa です。この強度レベルは、高強度鋼（AISI 4340、約 1000MPa など）に匹敵しますが、鉛（約 15MPa）や純タングステンの脆性破壊前の限界（900～1500MPa）をはるかに上回ります。この高強度の源は、タングステン粒子の高い硬度と、引張時のエネルギーを吸収し、亀裂の伝播を遅らせる結合相（Ni-Fe など）の強化効果にあります。

硬度は重タングステン合金のもう一つの重要な特性であり、ビッカース硬度（HV）は 300～500 HV の範囲です。例えば、W-93Ni-Fe 合金の硬度は約 450 HV で、一部の工具鋼（H13 など、約 400～500 HV）に近いですが、純タングステン（350～650 HV）よりは低くなります。硬度の分布はタングステン含有量と正の相関関係にあります。タングステン含有量が多いほど硬度も高くなります。しかし、バインダー相を加えると硬度がわずかに低下し、耐衝撃性が向上し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ます。例えば、ブリネル硬度（HB）試験では、W-95Ni-Fe 合金は 400 HB に達することができますが、純タングステンは脆く、高荷重試験に耐えることができません。

高密度タングステン合金は、純タングステンに比べて**靭性に優れており、その優れた伸びと破壊靭性によって表れます。伸びは 10%～30%と、純タングステン（1%未満）よりもはるかに高い値を示します。例えば、W-90Ni-Fe 合金の伸びは室温で 25%に達し、-50℃の低温でも 15%以上を維持し、優れた低温靭性を示します。破壊靭性（K_IC）は通常 20～40MPa・m ^(1/2)**です。例えば、W-93Ni-Fe 合金の K_IC は約 30 MPa・m ^(1/2)で、低合金鋼（約 40 MPa・m ^(1/2)）に近い値です。一方、純タングステンはわずか 5～10 MPa・m ^(1/2)です。この靭性は、結合相の塑性変形能によって得られており、応力集中時にエネルギーを吸収することで脆性破壊を防止します。

高密度タングステン合金の**耐摩耗性は、硬度と密接に関係しています。摩耗試験（ASTM G65 砥石摩耗試験など）において、W-95Ni-Fe 合金の体積減少率は約 0.05 mm³/N・m であり、これは鋼（0.15 mm³/N・m）よりも約 70%低く、超硬合金（WC-Co など、0.02 mm³/N・m）に近い値です。その耐摩耗性は、掘削工具や切削工具に最適な材料です。例えば、石油掘削において、タングステン合金製ドリルビットの寿命は鋼製ドリルビットの 2～3 倍に達します。**

耐疲労性は、特に動的用途において重要です。高密度タングステン合金の疲労限界（10^7サイクル）は約 400～600MPa です。例えば、W-90Ni-Fe 合金の交番応力下における疲労強度は 500MPa で、鉛（耐疲労性がほとんどない）や純タングステン（脆性のため試験不可）よりも高く、鋼鉄（約 400MPa）に匹敵します。この特性により、制振部品や銃器のカウンターウェイトなどへの応用が優れており、長期間の繰り返し荷重にも破損することなく耐えることができます。

3.2 高密度タングステン合金の物理的性質

高密度タングステン合金の物理的特性には、密度、熱特性、電気特性、音響特性などがあり、特定の環境での適用性に直接影響します。

密度は重タングステン合金の最も重要な物理的特性であり、17.0～19.3 g/cm³ の範囲にあります。例えば、W-97Ni-Fe 合金の密度は 19.0 g/cm³ に達し、これは純タングステン（19.25 g/cm³）よりわずかに低い程度です。一方、W-85Cu の密度は約 17.0 g/cm³ です。この高い密度は、タングステンの体心立方（BCC）結晶構造と高い原子量（183.84 u）に由来しており、単位体積あたりの質量を大きくすることができます。例えば、W-95Ni-Fe 合金の 1 立方センチメートルの重量は約 18.5 g ですが、同じ体積の鋼鉄の重量はわずか 7.85 g です。この特性は、航空機のカウンターウェイトや放射線遮蔽において、W-95Ni-Fe 合金にかけがえのない利点をもたらします。

熱特性には、融点、熱伝導率、熱膨張係数などがあります。重タングステン合金の融点は 2500～3000℃で、純タングステン（3422℃）より低いものの、鋼（約 1500℃）よりはるかに高いです。例えば、W-90Ni-Fe 合金の融点は約 2850℃で、ロケットノズルの高温環境にも耐えることができます。熱伝導率は 80～150W/(m・K)で、例えば W-80Cu 合金は 140W/(m・K)に達

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

します。これは純タングステン（173W/(m・K)）より低いものの、鋼（50W/(m・K)）より高く、ヒートシンク用途に適しています。熱膨張係数は約 4.5～6.0 × 10^{-6} /K で、純タングステン（4.5 × 10^{-6} /K）に近く、鋼（12 × 10^{-6} /K）よりもはるかに低く、温度変化時の寸法安定性に優れています。

電気特性：重タングステン合金の電気抵抗率は 5.5～7.0μΩ・cm で、例えば W-90Ni-Fe 合金では 6.0μΩ・cm です。これは純タングステン（5.5μΩ・cm）や銅（1.68μΩ・cm）よりわずかに高いものの、鋼（15μΩ・cm）よりは低い値です。導電性は銅ほど高くありませんが、電極材料の中では依然として競争力があります。また、高融点と高密度のため、放電加工（EDM）電極として優れた性能を発揮します。例えば、W-70Cu 電極の寿命は銅電極よりも約 50%長くなります。

音響特性はそれほど重要ではありませんが、振動抑制などの一部の用途では非常に重要です。重タングステン合金の音速は約 4300～4500 m/s で、例えば W-95Ni-Fe 合金では 4400 m/s です。これは鋼（約 5000 m/s）より低いものの、鉛（1200 m/s）よりは高い値です。タングステン合金は高密度で高弾性率（約 400GPa ）であるため、音波の減衰が速く、振動減衰材として適しています。例えば、工作機械のカウンターウェイトでは、タングステン合金は振動振幅を 30%～40%低減できます。

3.3 高比重タングステン合金の主要元素とその機能

高密度タングステン合金（HDTA）は、タングステン（W）を主成分とする合金材料の一種で、通常 85%～97%のタングステンを含み、ニッケル（Ni）、鉄（Fe）、銅（Cu）、コバルト（Co）などの元素を添加することで、機械的特性、耐腐食性、導電性などの特性を向上させています。これらの合金は、高密度、高強度、優れた総合特性を有するため、軍事、航空宇宙、医療、電子工学、工業などの分野で広く使用されています。

1. タングステン（W）：高密度と高強度を実現

（１）基本的な特徴

- **元素記号：** W
- **原子番号：** 74
- **密度：** 19.3 g/cm³
- **融点：** 3410 ℃
- **主な機能：**高比重タングステン合金に極めて高い密度、硬度、強度を与えます。

（２）高比重タングステン合金における役割

- **バルク要素**として高密度（16.5～18.5 g/cm³）を提供するため、合金は高質量カウンターウェイト、放射線遮蔽、装甲貫通弾のコアなどの用途に使用できます。
- 高い融点と耐摩耗性により、高温環境における合金の安定性が向上します。
- 優れた耐腐食性により、この合金は過酷な環境でも使用できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- しかし、タングステン自体は脆いため、合金の加工性と延性を向上させるには他の金属元素を追加する必要があります。

2. ニッケル（Ni）：延性と耐食性を向上させる

（1）基本的な特徴

- **元素記号：** Ni
- **原子番号：** 28
- **密度：** 8.9 g/cm³
- **融点：** 1455 ℃
- **主な機能**:合金に優れた延性を与え、耐食性を高めます。

（2）高比重タングステン合金における役割

- **結合相元素**として、ニッケルはタングステン粒子の均一な分散を促進し、合金の可塑性と機械加工性を向上させることができます。
- 合金の延性を向上させて、脆性破壊を起こさずに大きな変形に耐えられるようにします。
- 合金に強力な耐腐食性を与え、湿気や酸性の環境でも長期間使用できるようになります。
- 液相焼結プロセス中に、焼結温度を下げ、合金の密度を高めるのに役立ちます。
- 通常、合金の磁気特性と機械的特性を調整するために、鉄 (Fe) または銅 (Cu) と組み合わせて使用されます。

3. 鉄（Fe）：合金の機械的強度を高める

（1）基本的な特徴

- **元素記号：** Fe
- **原子番号：** 26
- **密度：** 7.87 g/cm³
- **融点：** 1538 ℃
- **主な機能：**合金の強度と硬度を向上させ、ある程度の磁性を与えます。

（2）高比重タングステン合金における役割

- 強化相として、鉄とニッケルが一緒に **W-Ni-Fe 三元合金を形成し**、合金の機械的強度と硬度を高めます。
- 合金の耐摩耗性が向上し、高負荷や高衝撃力にも耐えられるようになります。
- これにより合金には**ある程度の磁性が与えられ**、特定の軍事および産業用途に適したものになります。
- 液相焼結プロセス中に、結合相の流動性を改善し、合金の密度を高めるのに役立ちます。
- **、徹甲弾コア、航空宇宙用カウンターウェイト、工業用金型**などの用途で広く使用されています。

4. 銅（Cu）：磁性を低下させ、導電性を向上させる

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（1）基本的な特徴

- **元素記号：** Cu
- **原子番号：** 29
- **密度：** 8.96 g/cm³
- **融点：** 1084.6 ℃
- **主な機能：**合金を非磁性にし、導電性と耐食性を向上させます。

（2）高比重タングステン合金における役割

- **非磁性タングステン合金(W-Ni-Cu)**を作製し、磁気に敏感な用途(医療機器、電子部品など)に適しています。
- 合金の導電性を高め、電極材料、電子パッケージングなどの分野に適しています。
- 耐食性がさらに向上し、湿気の多い環境や酸性媒体での合金の耐用年数が長くなります。
- 合金の硬度を下げ、機械加工しやすくします。
- **、X線やガンマ線の遮蔽、医療機器、電子パッケージ**などによく使用されます。

5. コバルト（Co）：耐摩耗性と耐高温性を向上させる

（1）基本的な特徴

- **元素記号：** Co
- **原子番号：** 27
- **密度：** 8.90 g/cm³
- **融点：** 1495 ℃
- **主な機能：**耐摩耗性、耐高温性を向上させ、合金の強度を高めます。

（2）高密度タングステン合金における役割

- コバルトは強化元素として**合金の耐摩耗性を向上させることができ**、高負荷の耐摩耗部品に適しています。
- **耐高温性**が向上し、合金は極端な温度でも強度と安定性を維持できるようになります。
- 合金の硬度を向上させ、徹甲弾コアや航空宇宙エンジン部品などの高衝撃、高負荷環境に適したものにします。
- W-Ni-Fe-Co 合金は、通常の W-Ni-Fe 合金よりも強度と硬度に優れていますが、製造コストが高くなります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

重タングステン合金の特性は、その主要元素によって左右されます。各元素の機能は以下の通りです。

要素	効果	合金への影響
タングステン（W）	高密度、高強度	合金に高密度、高強度、耐腐食性を与える
ニッケル（Ni）	延性、耐腐食性	可塑性を高め、耐腐食性を改善し、加工性を改善します
鉄（Fe）	機械的強度、硬度	合金の硬度と強度を向上させ、磁性を持たせる
銅（Cu）	非磁性、導電性	磁性を低減し、導電性と耐腐食性を向上させる
コバルト（Co）	耐摩耗性、耐高温性	耐摩耗性と高温安定性を向上

3.4 高比重タングステン合金の耐腐食性と耐摩耗性

耐食性は、特に化学環境や海洋環境において、重タングステン合金の重要な特性です。タングステン自体は、室温で酸、アルカリ、酸素に対して極めて安定しており、塩酸や硫酸とはほとんど反応せず、濃硝酸やフッ化水素酸にのみゆっくりと溶解します。重タングステン合金もこの特性を継承していますが、元素の添加によってわずかに変化します。例えば、W-90Ni-Fe 合金の質量減少率は、10%塩酸に 1000 時間浸漬した後でも 0.5%未満、海水中では 0.1%～0.2%で、鋼（約 20%）よりもはるかに低くなっています。W-Cu 合金は、銅が含まれているため、湿気や塩水噴霧に対する耐性が優れています。ASTM B117 塩水噴霧試験では、1000 時間後の腐食深さはわずか 0.01mm であるのに対し、鋼では 0.5mm に達することがあります。しかし、強い酸化環境（濃硝酸など）では Ni-Fe 結合相が腐食され、腐食率が 2%～3%に増加する可能性があるため、表面コーティング（Ni メッキなど）による改善が必要です。

耐摩耗性は硬度と微細組織に密接に関係しています。高密度タングステン合金の耐摩耗性は、滑り摩耗とアブレシブ摩耗の両方において優れています。例えば、ASTM G65 試験において、W-95Ni-Fe 合金の摩耗率は約 0.05 $mm^3/N \cdot m$ で、鋼（0.15 $mm^3/N \cdot m$）より 70%低く、WC-Co 超硬合金（0.02 $mm^3/N \cdot m$）に近い値です。その耐摩耗性の源は、タングステン粒子の高硬度（約 1000 HV）と結合相の靭性サポートにあります。例えば、石油掘削において、W-90Ni-Fe ドリルビットの寿命は鋼製ドリルビットの 3 倍に達し、摩耗深さはわずか 0.1 mm であるのに対し、鋼製ドリルビットは 0.5 mm に達します。

3.5 重タングステン合金の放射線遮蔽能力

重タングステン合金の放射線遮蔽能力は、医療産業や原子力産業における広範な応用の基礎となっています。これは、タングステンの原子番号（Z=74）が高く、密度（17.0～19.3 g/cm^3）が高いことに由来します。X 線とガンマ線の吸収効率は、従来の材料をはるかに上回っています。例えば、厚さ 1cm の W-95Ni-Fe 合金は、ガンマ線（エネルギー1MeV）の 90%を遮蔽できますが、同じ厚さの鉛では 70%、鋼では 10%に過ぎません。その遮蔽能力は質量吸収係数（μ/ρ）に基づいて計算されます。W-95Ni-Fe 合金の μ/ρ は約 0.15cm^2/g で、鉛（0.12cm^2/g

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

）よりも高くなっています。実用化において、厚さ 10mm のタングステン合金シールドは、放射線量を 100mSv から 1mSv に低減できます。これは厚さ 15mm の鉛よりも優れた効果です。さらに、無毒性であるため、鉛に代わる環境に優しい代替品となります。例えば、CT 装置のシールドでは、タングステン合金の厚さを 30%、重量を 20%削減できます。

高密度タングステン合金の性能を最適化する方法

高密度タングステン合金の性能最適化は、その応用可能性を高める鍵であり、これには組成調整、プロセス改善、後処理技術が含まれます。

組成の最適化は、タングステン含有量とバインダー相比を調整することで実現します。たとえば、タングステン含有量を 97%に増やすと密度は 19.0 g/cm³ に増加できますが、靭性は低下します。コバルト（Co）を添加すると、15%の伸びを維持しながら硬度を 450 HV から 500 HV に増加できます。**プロセスの改善には、**ナノ粉末の製造と液相焼結が含まれます。ナノタングステン粉末（粒子サイズ 50nm）を使用すると、粒径を 10μm から 1μm に縮小し、引張強度を 1000 MPa から 1200 MPa に増加できます。液相焼結温度は 1450° C から 1500° C に最適化され、密度を 98%から 99.5%に増加できます。熱間静水圧プレス（HIP）や表面硬化などの**後処理技術により、性能がさらに向上します。**たとえば、HIP 処理（200 MPa、1400° C）により微細孔が除去され、疲労寿命が 50% 延長されます。また、浸炭処理により表面硬度が 600 HV まで上昇し、耐摩耗性が 30% 向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

高密度タングステン合金の特性一覧

パフォーマンスカテゴリー	主要な指標	標準値	最適化手法
機械的特性	抗張力	700～1200 MPa	コバルト添加、ナノ粉末調製
	硬度	300～500HV	タングステン含有量の増加、浸炭処理
	伸長	10～30%	Ni-Fe 比の最適化
	耐摩耗性	0.05 mm³/N・m	熱間静水圧プレス、表面硬化
	疲労限界	400～600MPa	HIP 処理、結晶粒微細化
物理的特性	密度	17.0 ～ 19.3 g/cm³	タングステン含有量を 97%に増加
	融点	2500～3000℃	-
	熱伝導率	80 ～ 150 W/(m・K)	銅添加（W-80Cu など）
耐食性	塩酸腐食速度	<0.5% （1000 時間）	ニッケルメッキ
耐摩耗性	摩耗率	0.05 mm³/N・m	硬度を向上させ、微細構造を最適化
放射線遮蔽能力	ガンマ線遮蔽（厚さ 1cm）	90% （1 MeV）	密度が 19 g/cm³ に増加

注： 表のデータは標準的な範囲であり、具体的な値は材料やプロセスによって異なる場合があります。

これらの方法の適用は、具体的なニーズに応じて慎重に検討する必要があります。例えば、医療用シールドでは高密度が優先されますが、ツールでは耐摩耗性が重視されます。これは、その後の準備と適用のための理論的な指針となります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

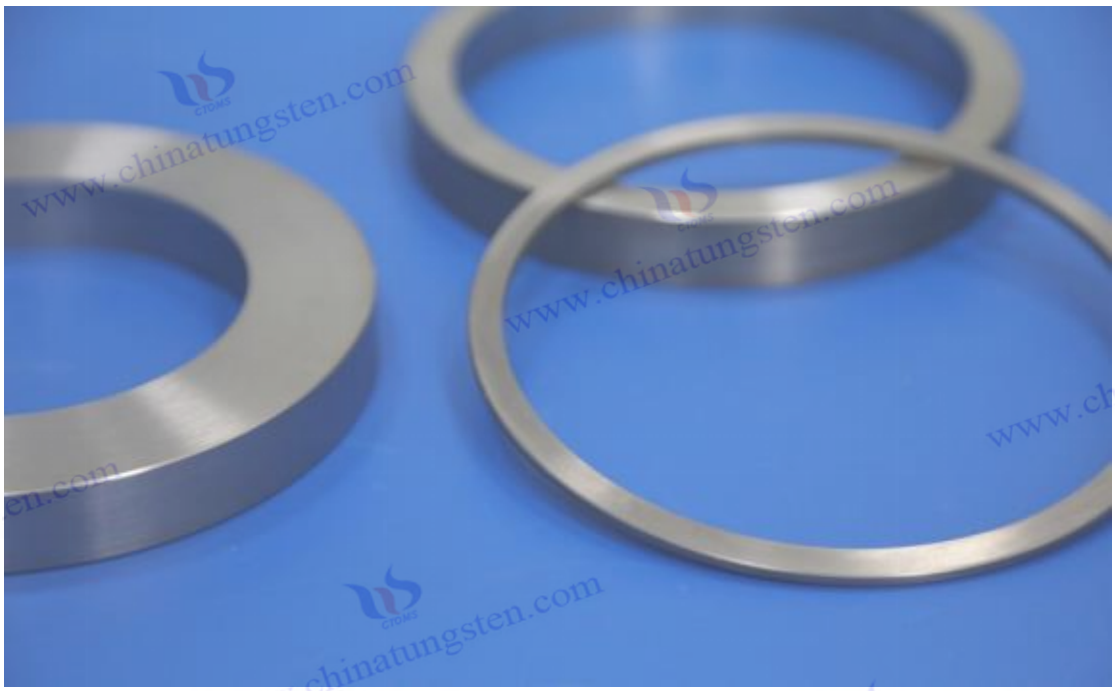
High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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/cm³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



第 4 章 高比重タングステン合金の製造技術

4.1 高密度タングステン合金原料の選択と前処理

高密度タングステン合金の製造は、原材料の選定と前処理から始まり、最終製品の性能と安定性に直接影響を及ぼします。原材料は主にタングステン粉末とバインダー相元素（ニッケル、鉄、銅など）で構成されており、その純度、粒子サイズ、化学的性質は厳密に管理する必要があります。

タングステン粉末の選択は製造の核心です。タングステン粉末は通常、酸化タングステン（WO_3 ）の水素還元によって作られ、焼結品質に影響を与える不純物（酸素や炭素など）を避けるために、純度は 99.9%以上である必要があります。粒子サイズの範囲は通常 1〜10μｍです。たとえば、CTIA GROUP LTD が選択したタングステン粉末の平均粒子サイズは 3μｍで、高密度と均一性を保証します。粒子サイズが大きすぎる（20μｍなど）と、焼結後に気孔率が増加し、密度が 17g/cm³ 未満に低下します。一方、粒子サイズが小さすぎる（0.5μｍ未満など）と、凝集により流動性が低下し、プレスや成形に影響を与える可能性があります。酸素含有量は 0.05% 未満に制御する必要があります。酸素含有量が高すぎると、焼結中に揮発性酸化物（WO_2など）が生成され、気孔が形成されるためです。

バインダー相の原料は、用途要件に応じて調整されます。靭性を高めるためにニッケル粉と鉄粉がよく使用され、純度が 99.5%以上、粒子サイズが 2〜5μｍである必要があります。たとえば、CTIA GROUP LTD は、W-Ni-Fe 合金でニッケルと鉄の比率が 7：3 で、ニッケル粉の粒子サイズが 3μｍ、鉄粉が 4μｍの混合粉を使用して、液相焼結中に均一に分散されるようにし

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ています。銅粉は、高い熱伝導性が求められるシナリオで使用され、純度が 99.8%以上、粒子サイズが約 5μm で、酸化銅（ CuO ）の汚染を防ぎます。コバルトまたはモリブデンを添加元素として使用する場合、硬度や耐食性を向上させるために、含有量は通常 5%を超えません。

前処理工程には、ふるい分け、混合、還元が含まれます。ふるい分けでは、200 メッシュのふるい（約 74μm）を通して凝集体を除去するなど、大きすぎる粒子や小さすぎる粒子を除去します。混合は、V 型ミキサーまたはボールミルを使用して行われます。たとえば、China Tungsten Intelligence は、遊星ボールミルを使用して 300 rpm で 6 時間混合し、タングステン粉末とバインダー相が均一に分散され、混合均一性の偏差が 1%未満であることを保証します。原料の酸素含有量が高すぎる場合は、水素雰囲気で還元する必要があります。たとえば、800° C で 2 時間還元して、酸素含有量を 0.1%から 0.03%に減らします。さらに、粉末の酸化を防ぐために、前処理された原料を不活性ガス（アルゴンなど）で保管する必要があります。

4.2 重タングステン合金の粉末冶金プロセス

粉末冶金は高密度タングステン合金の主な製造方法であり、プレスと焼結という 2 つの主要な工程に分かれています。微細組織と性能を効果的に制御できるため、広く利用されています。

プレスとは、混合粉末を圧粉体にする工程であり、通常は冷間静水圧プレス（CIP）または成形によって行われます。冷間静水圧プレスでは、高圧液体（水や油など）を使用して均一な圧力を加えます。たとえば、CTIA GROUP LTD は W-90Ni-Fe 粉末を 200〜300 MPa でプレスし、グリーン体の密度は理論密度（約 11〜13 g / cm³ ）の 60%〜70%に達することができます。成形は小ロット生産に適しており、圧力は 500〜700 MPa です。たとえば、直径 50 mm の円筒形のグリーン体の成形には約 30 秒かかります。グリーン体の強度を向上させるために、少量の有機バインダー（1%ポリビニルアルコールなど）を添加することができますが、その後の脱脂で除去する必要があります。

焼結は粉末冶金における重要な工程です。液相焼結技術は通常、ブランクをバインダー相の融点以上に加熱して液化し、タングステン粒子間の隙間を埋めるために使用されます。焼結温度は通常 1400〜1550℃です。例えば、CTIA GROUP LTD は W-93Ni-Fe 合金を 1480℃で 2 時間焼結しました。ニッケル-鉄液相は 1350℃で溶融し、タングステン粒子の再配列を促進しました。最終的な密度は 18.5 g/cm³ に達し、密度は 99%を超えました。焼結雰囲気は、酸化を防ぐために水素または真空である必要があります。例えば、10^{-3} の真空下で焼結する場合、Pa では、酸素含有量を 0.01%まで低減できます。焼結時間と温度は正確に制御する必要があります。温度が高すぎる（例えば 1600℃）と液相が失われる可能性があり、温度が低すぎる（例えば 1300℃）と密度が不十分になり、95%しか得られません。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

焼結後の処理、例えば熱間静水圧加圧（HIP）処理は、性能をさらに最適化します。例えば、200MPa、1400℃で 1 時間処理すると、微細気孔が除去され、密度が 99%から 99.8%に上昇し、密度は 19g/cm³近くになります。この処理は、CTIA GROUP LTD における高級カウンターウェイトの製造において特に広く用いられています。

4.3 高比重タングステン合金の他の製造方法

粉末冶金に加えて、特定のニーズを満たしたり、従来のプロセスの制限を克服したりするために、高密度タングステン合金を他の方法で製造することもできます。

溶解鋳造法は、タングステン含有量の低い合金（W-50Cu など）に適しています。銅をアーク炉または誘導炉で溶解し、その後タングステン粉末を加えて製錬します。例えば、CTIA GROUP LTD は W-70Cu 合金を 1800℃で溶解鋳造しており、冷却後の密度は 14.5g/cm³に達します。しかし、タングステンの融点は銅の融点（3422℃対 1083℃）よりもはるかに高いため、この方法ではタングステン含有量の高い合金を作製することが難しく、偏析が発生しやすく、粉末冶金法ほど均一性は高くありません。

メカニカルアロイングは、高エネルギーボールミルを用いてタングステン粉末とバインダー相粉末を機械的に混合し、非平衡合金を形成する方法です。例えば、CTIA GROUP LTD は、遊星ボールミルを用いて W-Ni-Fe 粉末を 500rpm で 10 時間粉砕し、結晶粒径を 50nm まで微細化した後、加圧焼結することで引張強度を 1200MPa まで高めています。この方法は、新しい高性能合金の開発に適していますが、生産効率は低いという欠点があります。

積層造形（3D プリンティング）は、近年登場した選択的レーザー溶融法（SLM）または電子ビーム溶融法（EBM）を用いた製造技術です。例えば、CTIA GROUP LTD は SLM を用いて W-90Ni-Fe 粉末を 3000W のレーザーで溶融し、複雑な形状の部品を層状に積層して造形しています。密度は 18g/cm³、気孔率は 1%未満です。この方法はカスタム生産に適していますが、部品 1kg あたりのコストが従来の方法の約 2～3 倍と高価です。

4.4 プロセスパラメータが重タングステン合金に与える影響

原料の粒子サイズ、焼結温度、圧力、雰囲気などのプロセスパラメータは、高密度タングステン合金の特性に大きな影響を与えます。

原料の粒子径は密度と機械的特性に影響を与えます。タングステン粉末の粒子径は 10μm から 1μm に微細化され、焼結後の密度は 18.0g/cm³から 18.8g/cm³に増加します。これは、微細粒子がより高密度に充填されるためです。しかし、0.5μm 未満の粒子は凝集しやすいため、混合プロセスを最適化する必要があります。バインダー相（ニッケル粉末など）の粒子径が大きすぎる場合（例えば 10μm）、液相の分布が不均一になり、靭性が 10～15%低下します。

焼結温度は液相の形成と密度を決定します。例えば、W-90Ni-Fe 合金を 1450℃で焼結した場合の密度は 18.2 g/cm³で、1500℃では 18.6 g/cm³に達します。しかし、温度が高すぎる場合（例えば 1600℃）、ニッケル鉄が揮発し、密度は 18.0 g/cm³まで低下し、硬度は 20%低下し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ます。最適な温度は組成によって異なりますが、通常はバインダー相の融点より 50～100℃高い温度です。

プレス圧力は成形体の密度と焼結効率に影響を及ぼします。冷間静水圧プレス（CIP）を200MPa から 300MPa に上げると、成形体の密度は 11g/cm³ から 12.5g/cm³ に増加し、最終製品の密度は 0.5%増加します。ただし、圧力が高すぎる場合（例えば 400MPa）、金型の摩耗やコスト増加につながる可能性があります。

焼結雰囲気は酸化度に影響します。水素雰囲気（流量 100 mL/分）では酸素含有量を 0.02%まで低減できますが、空気中で焼結すると 0.5%の酸化物が生成され、密度は 17.5 g/cm³ まで低下します。真空焼結（10^{-4} Pa）はより効果的で、高精度部品に適しています。

4.5 重タングステン合金の品質管理と検査

品質管理とテストは、高密度タングステン合金の安定した性能を確保するための鍵であり、製造プロセス全体にわたって実行されます。

原材料の品質管理には、化学分析と粒度試験が含まれます。例えば、CTIA GROUP LTD では、ICP-MS を用いてタングステン粉末の純度（>99.9%）を検出し、レーザー粒度分布計を用いて粒度分布（D50=3μm）を測定することで、不純物（Fe<0.01%など）と粒子径が基準を満たしていることを確認しています。

プロセス制御は、プレスおよび焼結パラメータを監視します。プレス圧力は、偏差<5MPa のセンサーによってリアルタイムで記録され、焼結温度は±5℃の精度で熱電対によって制御されます。例えば、CTIA GROUP LTD は焼結炉内に多点温度測定装置を設置し、10℃未満の温度均一性を確保しています。

完成品の試験には、密度、機械的特性、微細構造分析が含まれます。密度はアルキメデス法で測定され、例えば W-95Ni-Fe 合金の目標値は 18.8±0.1 g/cm³ です。引張試験（ASTM E8 準拠）では、引張強度（>1000 MPa）と伸び（>15%）を試験します。顕微鏡（SEM など）では、タングステン粒子の分布と気孔率（例えば、気孔径<5 μm、割合<0.5%）を観察します。さらに、非破壊検査（超音波など）を用いて内部欠陥を確認し、部品の信頼性を確保します。

これらの対策により、CTIA GROUP LTD の製品は、カウンターウェイトの密度偏差 <0.2%、シールド部品の多孔度 <0.1% など、航空、医療などの分野の厳しい要件を満たすことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

高比重タングステン合金の製造方法

準備	主要なパラメータ/テクニック	標準値/条件	影響/ターゲット
原材料の選択	タングステン粉末の純度と粒子サイズ	≥99.9%、3μm	高密度と均一性を確保
前処理	混合速度、還元温度	300 rpm、800° C	均一に分散、酸素含有量<0.05%
押す	冷間静水圧プレス圧力、成形圧力	200～300 MPa、500～700 MPa	グリーン体密度 60%～70%
粉末冶金焼結	焼結温度、雰囲気	1480℃、水素/真空	密度 18.5 g/cm³、密度>99%
溶解鋳造	融点	1800℃	密度 14.5 g/cm³、W-Cu に適しています
メカニカルアロイング	ボールミルの速度と時間	500 rpm、10 時間	粒径 50 nm、強度 1200 MPa
3D プリント	レーザー出力、多孔性	3000 W、<1%	複雑な形状、密度 18 g/cm³
プロセスパラメータ	粒子サイズ、温度、圧力	1 ～ 10μm 、 1450 ～ 1500℃、200MPa	密度と靭性を最適化
品質管理	密度偏差、多孔度	±0.1 g/cm³、<0.5%	航空および医療基準を満たす

注：表のデータは CTIA GROUP LTD の標準的なプロセスに基づいています。具体的な値は製品要件によって異なります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

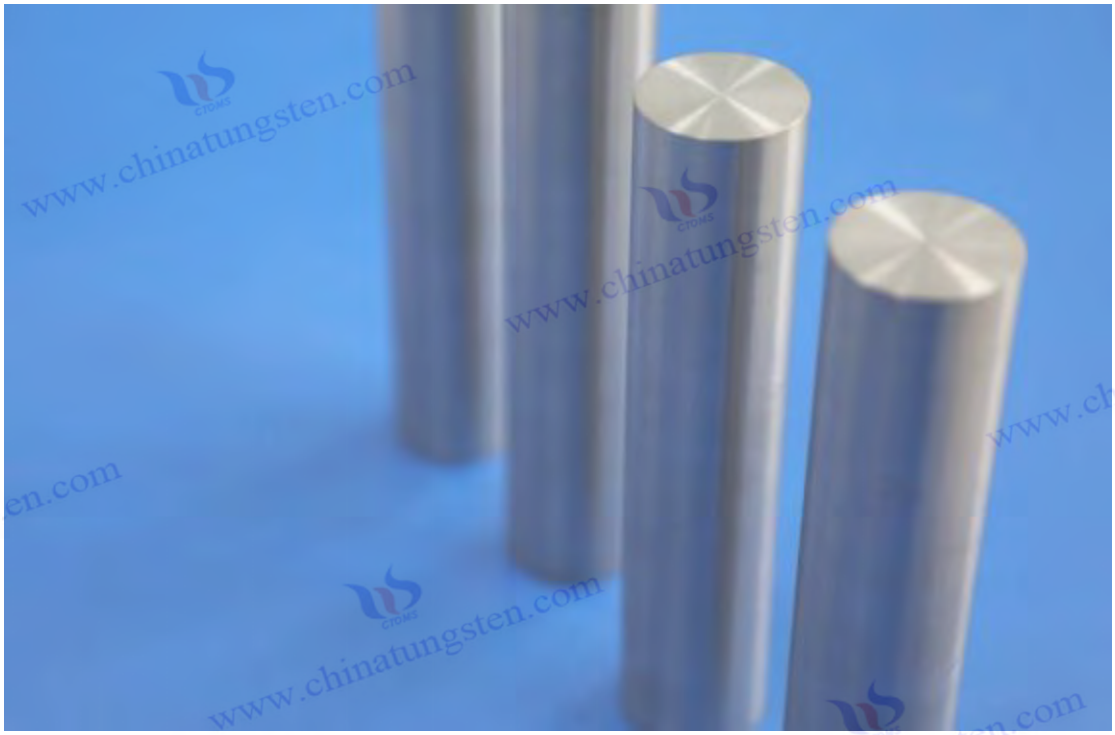
High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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/cm³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



第 5 章 高比重タングステン合金の加工および後加工技術

5.1 高比重タングステン合金の加工技術

重タングステン合金の加工技術は、焼結ビレットから精密部品へと変換するための重要なステップです。高硬度（300～500HV）と中程度の靭性（伸び率 10～30%）を有するため、加工難易度は純タングステンと普通鋼の中間に位置し、特殊な工具とプロセスパラメータの最適化が必要となります。

旋削とフライス加工は、一般的に使用される切削方法です。重タングステン合金の被削性は、バインダー相（Ni-Fe など）の存在によるもので、純タングステンよりも切削抵抗が低くなります。例えば、CTIA GROUP LTD は、W-90Ni-Fe 合金を加工する際に、超硬工具（WC-Co コーティング工具など）を使用し、切削速度 40～60 m / min、送り速度 0.1～0.2 mm / r、切削深さ 1 mm 以下としています。このパラメータにより、表面粗さを Ra 1.6 μm 以下に制御でき、航空機のカウンターウェイトのニーズを満たしています。純タングステン（切削速度わずか 10 m / min）と比較して、重タングステン合金の加工効率は約 3～5 倍向上しますが、工具の摩耗率は鋼の加工よりも依然として 20%～30%高く、定期的に交換する必要があります。

ドリリングとボーリングは、穴あけや内空部品の加工に適しています。例えば、CTIA GROUP LTD では、W-95Ni-Fe 合金シールド部品の加工において、直径 5mm のコバルト高速度鋼ドリルビットを使用し、回転数を 500～800rpm、送り速度を 0.05mm/r に制御することで、穴径公差を±0.02mm 以内に抑えています。高密度タングステン合金は硬度が高いため、ドリルビットの寿命を延ばすには、 TiN または TiAlN コーティングを施す必要があります。切削部の温度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

を約 50℃下げ、熱割れのリスクを低減するために、クーラント（水性エマルジョンなど）の使用が不可欠です。

、研削と研磨が用いられます。例えば、CTIA GROUP LTD では、W-93Ni-Fe 合金の医療部品を加工する際に、ダイヤモンド砥石（120 番）で粗研削を行い、続いて 2000 番サンドペーパーで精研削を行い、最終的に Ra 0.4μm まで研磨することで、放射線遮蔽部品の仕上げ要件を満たしています。研削速度は 20～30m/s、送り速度は 0.01～0.02mm/パスに設定することで、過熱による微小亀裂の発生を抑制しています。純タングステン（より硬度の高い砥石が必要で、亀裂が発生しやすい）と比較して、高密度タングステン合金は靭性が高いため、鏡面効果が得られやすいという利点があります。

加工上の難点とその対策としては、工具の摩耗と熱変形が挙げられます。高硬度のタングステン合金は工具寿命を短くします。例えば、部品 100 個を加工すると、工具刃先の摩耗深さは 0.2mm に達することがあります。従来の超硬合金に代わる CBN（立方晶窒化ホウ素）工具は、寿命を約 50%延ばすことができます。また、切削熱によって部品の寸法が狂う可能性があります。例えば、W-90Ni-Fe 合金の温度上昇は 60℃で約 0.005mm/cm であり、クーラントと断続切削による温度制御が必要です。

5.2 高比重タングステン合金の熱処理技術

熱処理技術は、高密度タングステン合金の微細構造を調整し、機械的特性を向上させたり、加工応力を除去したりするために使用されます。一般的な処理方法としては、焼鈍、焼入れ、時効処理などがありますが、タングステンは融点が高く、合金特性も高いため、特別な設計が必要です。

アニール処理は主に、焼結や加工によって生じる内部応力を除去するために使用されます。例えば、CTIA GROUP LTD は、W-90Ni-Fe 合金部品を水素雰囲気中、900℃で 2 時間アニールし、冷却速度を 50℃/h に制御しました。その結果、応力は 200MPa から 50MPa 未満に低下し、伸びは約 10%増加しました。アニール温度は 1000℃を超える高温では接合相が軟化するため、硬度が 15%～20%低下する可能性があります。

高密度タングステン合金は、バインダー相によって靭性が最適化されているため、**焼入れ処理がほとんど行われません。しかし、表面硬度の向上など、特定の要件がある場合は、局所的な焼入れを行うことが可能です。例えば、CTIA GROUP LTD は、W-95Ni-Fe 合金の表面を 1200℃で急速加熱した後、水冷することで、表面硬度を 450HV から 500HV に向上させ、深さ約 0.5mm を実現しました。しかし、内部の靭性は変化しませんでした。この方法では、割れを防ぐために冷却速度を正確に制御する必要があります。**

コバルトまたはモリブデンを含む合金には、強化相を析出させるため、**時効処理が適しています。**例えば、CTIA GROUP LTD は、W-93Ni-Fe-2Co 合金に 600℃で 4 時間の時効処理を施し、Co 基化合物を析出させることで、引張強度を 1000MPa から 1100MPa に、硬度を 480HV に向上させました。時効時間が長すぎる（例えば 8 時間）と、過時効となり、靭性が 5～10%低下する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

熱処理の効果は雰囲気制御に左右されます。水素または真空（10^{-3} Pa）は酸化を防止します。例えば、中国タングステンインテリジェンスの焼鈍炉では、表面に酸化層が形成されないよう、酸素含有量を 0.01%以下に制御しています。純タングステン（高温が必要で脆化しやすい）と比較して、高密度タングステン合金は熱処理条件の許容範囲が広く、適応性も優れています。

5.3 高密度タングステン合金の表面処理技術

表面処理技術は、重タングステン合金の耐食性、耐摩耗性、または美観を向上させるために設計されています。一般的な処理方法としては、めっき、浸炭、溶射などがあります。

電気めっきがよく用いられます。例えば、CTIA GROUP LTD は、W-90Ni-Fe 合金部品の表面に厚さ 5μm のニッケル層を電気めっきしました。10%塩酸に 1000 時間浸漬した後、腐食率は 2%から 0.2%に低下し、10 倍の増加となりました。めっきの厚さは 3～10μm に制御する必要があります。厚すぎると剥離が発生する可能性があります。電子部品には金めっきや銀めっきが用いられます。例えば、W-80Cu 合金電極に厚さ 2μm の金めっきを施すと、抵抗率は 4μΩ・cm に低下し、導電率は 20%向上します。

浸炭処理は表面硬度と耐摩耗性を向上させます。例えば、CTIA GROUP LTD では、W-95Ni-Fe 合金の表面を 950℃で 3 時間浸炭処理することで、炭素含有量を 0.5%に増加させ、表面硬度を 450HV から 600HV に、耐摩耗性を 30%向上させ、ドリル工具に適したものにしています。浸炭深さは、内部靭性への影響を避けるため、通常 0.1～0.3mm です。

溶射は特殊な環境で使用されます。例えば、CTIA GROUP LTD は、W-90Ni-Fe 合金部品に厚さ 0.2mm の Al_2O_3セラミックコーティングを施します。これにより、1500℃での耐食性が 50%向上し、高温航空機部品への適用が可能になります。溶射厚さは均一で、0.02mm 未満の偏差でなければならず、密着性を確保する必要があります。

表面処理の選択は、用途に応じて慎重に検討する必要があります。例えば、医療用シールド部品は耐腐食性と無毒性の両方の観点からニッケルメッキが適していますが、切削工具は耐摩耗性を向上させるために浸炭処理が適しています。

高密度タングステン合金の接続技術

接合技術は、タングステン合金を他の材料、あるいはそれ自体と複雑な構造に組み立てるために使用されます。一般的な接合方法としては、溶接、ろう付け、機械的接合などがあります。

溶接は困難ですが、高密度タングステン合金はバインダー相の存在により局所的な溶融溶接が可能です。例えば、CTIA GROUP LTD では、W-90Ni-Fe 合金に電子ビーム溶接（EBW）を採用しており、ビーム出力 5kW、溶接速度 1m/分、溶接深さ 3mm、強度保持率約 90%を実現しています。溶接後は、応力を除去し、割れを防止するため、焼鈍処理（800℃、1 時間）が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ろう付けは、低温で接合できるため、より一般的に使用されています。例えば、CTIA GROUP LTD は、W-80Cu 合金と銅基板の接合に Ag-Cu ろう（融点 780℃）を使用しています。ろう付け温度は 850℃で、接合部のせん断強度は 200MPa に達し、電子機器の接合に適しています。界面反応を回避するため、ろう付け材料は接合相と適合性を持つ必要があります。

機械的接合は、溶接が不可能な場合に適しています。例えば、CTIA GROUP LTD は、W-95Ni-Fe 合金製のカウンターウェイトにドリルで穴を開け、タップを立て、M6 チタンボルトで接合しています。この接合部は 5000N の耐荷重を備え、容易に分解できます。穴の縁への応力集中は、面取りやパッド加工によって軽減できます。

接続の難しさは、熱膨張係数の差にあります。例えば、W-90Ni-Fe（4.5 × 10^{-6} /K）を鋼（12 × 10^{-6} /K）に接続すると、100℃の温度差で 0.075 mm の変位差が生じる可能性があり、補償ギャップの設計やフレキシブル接続が必要になります。

5.5 高密度タングステン合金の後処理技術の最適化と応用

後処理技術の最適化は、精密加工、性能向上、機能処理など、性能をさらに向上させたり、特定のニーズを満たしたりすることを目的としています。

精密加工の最適化は、CNC 技術によって精度を向上させます。例えば、CTIA GROUP LTD は 5 軸 CNC 工作機械を用いて、W-93Ni-Fe 合金部品を公差±0.01mm、表面粗さ Ra 0.2μm で加工し、航空ジャイロスコープの要件を満たしています。過負荷を回避するため、切削力偏差<5%など、加工パラメータをリアルタイムで監視する必要があります。

性能向上には、熱間静水圧プレス（HIP）とイオン注入が含まれます。例えば、CTIA GROUP LTD は、W-95Ni-Fe 合金を 200MPa、1400℃で 1 時間 HIP 処理することで、気孔率を 0.5%から 0.1%に低減し、疲労寿命を 50%向上させました。窒素イオン注入（10^{17}イオン/cm^2 ）により、表面硬度を 550HV まで向上させ、耐摩耗性を 20%向上させることができます。

機能処理。例えば、CTIA GROUP LTD は W-90Ni-Fe 合金の表面に直径 50μm の微細孔をレーザーエッチングすることで、滑り止めカウンターウェイトの摩擦係数を 20%向上させます。さらに、PVD TiN コーティングを施すことで耐食性を 30%向上させ、海洋環境にも適しています。

応用例としては、航空機用カウンターウェイト（高精度・高密度が求められる）、医療用シールド部品（表面仕上げと耐腐食性が求められる）、そしてドリル工具（耐摩耗性が求められる）などが挙げられます。目標とする性能に応じて最適化を調整する必要があります。例えば、CTIA GROUP LTD では、医療用部品には HIP 処理とニッケルめっきを優先し、ドリル工具には浸炭処理と溶射処理を重視しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

テクノロジー部門	主な方法	典型的なパラメータ	対象/効果
機械加工	旋回	40～60 m/分、0.1 mm/r	表面粗さ Ra1.6μm
	研削	20～30 m/s、Ra 0.4μm	高精度表面
熱処理	アニーリング	900℃、2時間	応力が 50 MPa に減少、伸びが 10%増加
	エージング	600℃、4時間	強度 1100MPa、硬度 480HV
表面処理	ニッケルメッキ	厚さ5μm	腐食率は 0.2%に低下した
	炭化	950℃、3時間	硬度 600 HV、耐摩耗性+30%
接続技術	電子ビーム溶接	5kW、1m/分	溶接強度 90%
	ろう付け	850° C、Ag-Cu はんだ	せん断強度 200 MPa
後処理の最適化	ヒップ	200 MPa、1400° C	気孔率 0.1%、寿命+50%
	レーザーエッチング	マイクロポア 50μm	摩擦係数+20%

注：表のデータは、中国タングステン製造の一般的なプロセスに基づいています。具体的な値は、アプリケーション要件によって異なります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

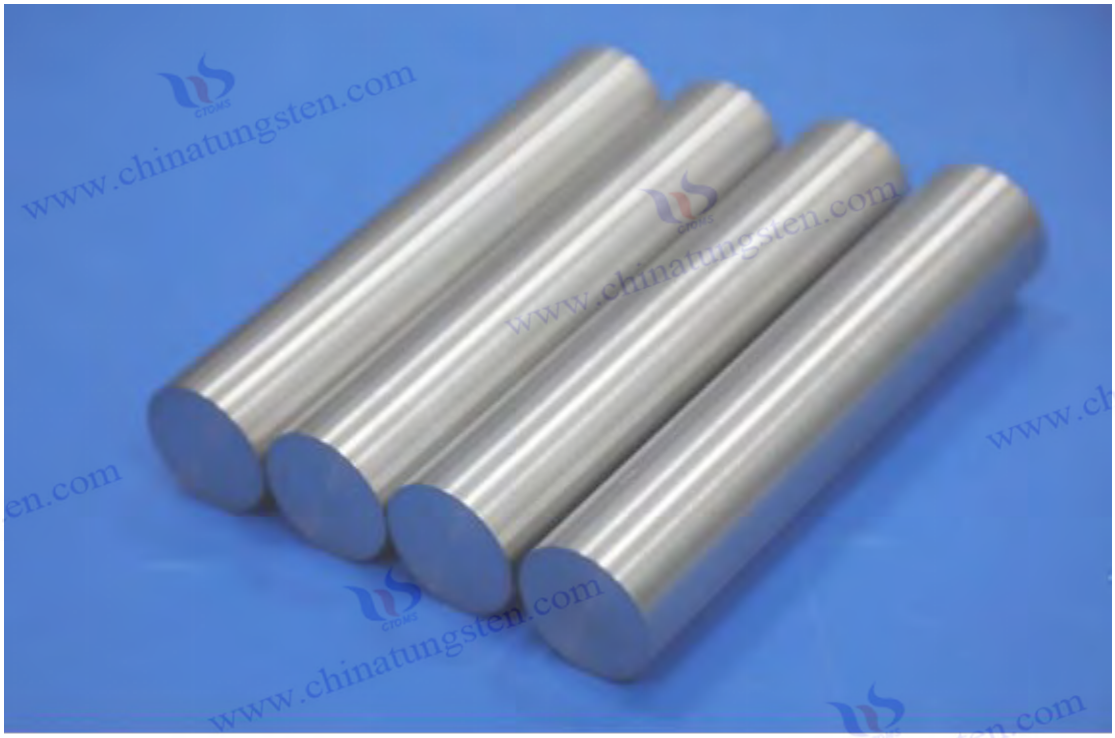
High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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/cm³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



第 6 章 高比重タングステン合金の製造装置

6.1 原材料調製装置

高密度タングステン合金の製造は、原料の準備から始まります。これには、タングステン粉末とバインダー相粉末の準備と加工が含まれます。主な設備には、還元炉、ボールミル、ふるい分け機などがあり、これらは原料の純度、粒度、均一性に直接影響します。

水素還元炉は、酸化タングステン（WO_3）から高純度のタングステン粉末を製造するために使用されます。 代表的な装置は、動作温度範囲が 700〜1000° C、水素流量が 50〜100 L /分の多管プッシュボート炉です。 たとえば、WO_3は、900° C で 4 時間還元することで、純度≥99.9%、酸素含有量<0.05%のタングステン粉末に変換できます。 炉は、還元の均一性を確保するために±5° C で制御された温度差を備えたマルチゾーン加熱設計を採用しています。 装置の容量は 50kg〜500kg /日で、小中規模のバッチ生産に適しています。 重要なのは雰囲気制御にあり、粉末の酸化を防ぐために水分含有量を 10ppm 未満に下げるための水素精製システム（分子ふるいなど）が必要です。

ボールミルは、タングステン粉末をバインダー相（Ni、Fe など）と混合し、粒径を微細化するために使用されます。遊星ボールミルは一般的な選択肢であり、速度範囲は 200〜600rpm、ボール対材料比は 10：1〜20：1 です。たとえば、W-90Ni-Fe 混合粉末を 400rpm で 6 時間粉

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

砕すると、タングステン粉末の粒子サイズは 5μm から 3μm に減少し、均一性の偏差は 1%未満になります。粉砕媒体は、不純物汚染を避けるために、主に直径 5〜10mm の超硬合金ボール（WC-Co）です。粉末の凝集を防ぐために、0.5%〜1%のプロセス制御剤（ステアリン酸など）を追加し、粉砕後に乾燥して除去することができます。タンク内の温度を 60℃未満に制御し、シールの寿命を延ばすために、装置には冷却システムが必要です。

振動篩は、粒度分布の均一性を確保するために、大きすぎる粒子や小さすぎる粒子を除去するために使用されます。一般的な篩は 100〜200 メッシュ（約 74〜150μm ）で、振動数は 1500〜3000 回/分です。例えば、3μm のタングステン粉末を 10 分間篩分すると、除去される 10μm を超える粒子の割合は 5%から 0.1%に減少します。この装置には、効率を向上させるために、目詰まり防止装置（超音波スクリーン洗浄など）が装備されています。高精度の篩分には、100 メッシュ、150 メッシュ、200 メッシュなど、複数のレベルの篩分を順番に使用し、さまざまなプロセス要件を満たす必要があります。

これらの設備の相乗効果により、原材料の品質が確保されます。例えば、ある生産ラインでは、最適化されたタングステン粉末の粒度分布（D50）は 3μm、酸素含有量は 0.03%であり、その後のプレスおよび焼結の基礎を築きます。

6.2 プレス装置

プレス成形装置は、混合粉末を粉末冶金プロセスの重要な工程である成形体へと変換します。一般的な装置には、冷間等方圧プレスや油圧プレスなどがあります。

冷間静水圧プレス（CIP）は、液体媒体（水や油など）を介して均一な圧力をかけるため、複雑な形状に適しています。作業圧力の範囲は 100〜400 MPa、キャビティ径は 50〜500 mm です。たとえば、W-90Ni-Fe 粉末を 250 MPa でプレスすると、成形体の密度は 11〜13 g / cm³ に達し、理論密度の 60%〜70%を占めます。装置は高圧ポンプとシーリングシステムを備えており、圧力精度は ±2 MPa、成形時間は約 5〜10 分です。粉末漏れを防ぐため、耐圧> 300 MPa のポリウレタンまたはゴム製の金型が必要です。利点は均一な圧力であり、航空機のカウンターウェイトなどの大型部品の製造に適しています。

油圧プレスは圧縮成形に用いられ、小ロット生産や単純な形状の部品に適しています。圧力範囲は 200〜1000MPa、金型径は 10〜100mm です。例えば、直径 50mm の W-95Ni-Fe 円筒形ビレットを 600MPa で加圧すると、成形時間は 30 秒で、ビレット密度は 12g/cm³ に達します。この装置には精密金型（硬度 60HRC 以上の鋼製金型など）を備え、摩擦を低減するために離型剤（グラファイトエマルジョンなど）を定期的に塗布する必要があります。冷間静水圧プレスと比較すると、油圧プレスはより効率的ですが、ビレット内部の応力分布は若干劣ります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

補助設備は、粉末を金型に充填する前に脱ガス処理を行い、成形工程中の気泡欠陥を防止するために使用されます。例えば、10^{-2} Pa の真空度で包装することで、ブランクの気孔率を0.5%低減できます。これらの設備の選択は、部品のサイズと出力に応じて調整する必要があります。例えば、CTIA GROUP LTD は、医療用シールド部品の製造において、均一性を確保するために冷間静水圧プレスを好んで使用しています。

6.3 焼結装置

焼結設備は重タングステン合金生産の中核であり、成形体を高密度の完成品へと変換するために使用されます。主に液相焼結炉と熱間等方圧加圧炉が含まれます。

液相焼結炉は、高温でバインダー相を溶かし、タングステン粒子間の隙間を埋めます。一般的に使用されているのは、温度範囲が 1300～1600℃、精度が±5℃の抵抗加熱炉です。たとえば、W-93Ni-Fe ブランクを 1480℃で 2 時間焼結すると、密度が 12g/cm³ から 18.5g/cm³ に増加し、密度は 99%を超えます。炉は主にアルミナまたはモリブデンで作られており、耐熱性は 1700℃を超えます。雰囲気は水素（流量 100mL/分）または真空（10^{-3} Pa）にすることができ、酸素含有量は 0.01%未満に制御されます。装置には、加熱速度 5℃/分、断熱後に 50℃/時間まで冷却するなどの多段階プログラム温度制御が装備されており、熱応力亀裂を回避します。連続焼結炉は、1 日あたり 1～2 トンの生産能力があり、大規模生産に使用できます。

熱間等方圧プレス（HIP ）： 後処理に用いられ、微細気孔をさらに除去します。作業条件は100～200MPa、1300～1500℃です。例えば、W-95Ni-Fe 合金を 200MPa、1400℃で 1 時間処理した場合、密度は 99%から 99.8%に増加し、気孔率は 0.1%に減少しました。炉体は高圧鋼殻を採用し、グラファイトまたはモリブデンでライニングされ、アルゴンブースターシステムを備えており、圧力変動は 1MPa 未満です。利点は、性能が大幅に向上することですが、処理あたりのコストが比較的高いため、航空部品などの高付加価値製品に適しています。

補助システムには、真空ポンプとガス回収装置が含まれます。例えば、真空ポンプは炉内の圧力を 10^{-4}Pa まで下げることができ、回収システムは水素をリサイクルすることでコストを約 20%削減します。焼結装置の効率と安定性は、最終製品の品質に直接影響します。例えば、最適化された炉内温度均一性は 10℃未満であり、バッチ間の密度偏差は ±0.1g/cm³ 以内に抑えられています。

6.4 後処理装置

後処理装置は、主に CNC 工作機械、熱処理炉、コーティング装置など、加工、熱処理、表面処理などに使用されます。

CNC 工作機械は精密加工に用いられます。一般的には、主軸回転速度 5000～15000rpm、位置決め精度±0.005mm の 5 軸マシニングセンターが用いられます。例えば、W-90Ni-Fe 合金部品の加工では、切削速度は 50m/分、表面粗さは Ra 0.4μm です。この装置はダイヤモンドまたは CBN 工具を搭載し、10L/分の冷却流量で安定した加工を実現します。ジャイロスコープのカウンターウェイトなどの複雑な部品加工に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

熱処理炉は、焼鈍処理や時効処理に用いられます。箱型抵抗炉が一般的で、温度範囲は 500～1200℃、精度は±3℃です。例えば、W-93Ni-Fe 部品を 900℃で 2 時間焼鈍処理すると、応力が 80%減少し、伸びが 10%増加します。炉内雰囲気は水素または窒素で、循環ファンを備え、温度差は 5℃未満です。連続炉は大規模生産に適しており、1 日あたり最大 500kg の処理が可能です。

表面処理には、電気めっき槽や PVD 装置などの**コーティング装置が使用されます。電気めっき槽では、めっき**液としてニッケルまたは金を使用し、電流密度は 1～5A/dm² です。例えば、5μm のニッケル層をめっきするには 30 分かかり、耐食性は 10 倍向上します。PVD 装置は、マグネトロンスパッタリングを用いて、厚さ 2～5μm、硬度最大 550HV の TiN コーティングを堆積します。これは耐摩耗部品に適しています。均一なコーティングを確保するために、装置には真空システム（10^{-5}Pa）を備える必要があります。

これらのデバイスは定期的に校正する必要があります。たとえば、CNC 工作機械は月に 1 回校正され、熱処理炉の温度センサーの誤差は 2° C 未満で、処理精度とパフォーマンスの一貫性が保証されます。

6.5 生産設備の自動化と知能化

インダストリー4.0 の発展に伴い、重タングステン合金生産設備の自動化とインテリジェント化がトレンドとなり、効率と品質の安定性が向上しています。

自動化技術には、ロボットとコンベアシステムが含まれます。例えば、プレス工程では、6 軸ロボットが毎分 20 個の速度で金型の自動装填・取り出しを可能にし、手作業による操作ミスを 30%削減します。焼結炉には自動供給・取り出しシステムが搭載されており、コンベアベルトの速度は毎分 0.5m、日産能力は 2 トンです。自動化設備は PLC（プログラマブルロジックコントローラ）と統合し、圧力変動<2MPa などのパラメータをリアルタイムで調整する必要があります。

インテリジェントシステムは、センサーとデータ分析を通じて生産を最適化します。温度センサー（精度±1℃）と圧力センサー（±0.5MPa）が焼結プロセスをリアルタイムで監視し、そのデータは MES（製造実行システム）にアップロードされます。MES は異常発生時に自動的にアラームを発します。例えば、ある生産ラインでは、インテリジェント監視によって不良率を 2%から 0.5%に削減しました。AI アルゴリズムは設備のメンテナンスサイクルを予測できます。例えば、ボールミルの振動データを分析することで、ベアリング交換の 30 日前を早期に警告し、ダウンタイムを 50%削減できます。

統合事例では、インテリジェント生産ラインにおいて、冷間等方圧プレス、焼結、CNC 加工がベルトコンベアを介して直列に接続され、センサーデータが中央制御室にフィードバックされます。生産サイクルは 15 日から 10 日に短縮され、完成品の合格率は 99.5%に達します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

インテリジェント化には初期投資（従来設備の約 2 倍）は高額ですが、長期的な運用コストは約 20%削減されます。

重タングステン合金製造装置

機器カテゴリー	主な装備	主なパラメータ	機能/目標
原材料の準備	水素還元炉	900℃、50L/分	タングステン粉末の純度は 99.9%以上、酸素は 0.05%未満
	ボールミル	400 rpm、6 時間	粒子径 3μm 、均一性<1%
押す	冷間等方圧プレス	250 MPa、5～10 分	成形体密度 11～13 g/cm³
	油圧プレス	600 MPa、30 秒	高効率成形、密度 12 g/cm³
焼結	液相焼結炉	1480℃、2 時間	密度 18.5 g/cm³、密度>99%
	熱間静水圧加圧炉	200 MPa、1400° C	気孔率 0.1%、パフォーマンス最適化
後処理	CNC 工作機械	50 m/分、Ra 0.4 μm	高精度加工
	熱処理炉	900℃、2 時間	ストレス 80%軽減
自動化とインテリジェンス	ロボット	20 個/分	効率性の向上、エラー<30%
	インテリジェントな監視	温度±1℃、スクラップ率 0.5%	安定した品質、予測可能なメンテナンス

注： 表のデータは標準的な範囲であり、具体的なパラメータはプロセス要件によって異なります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

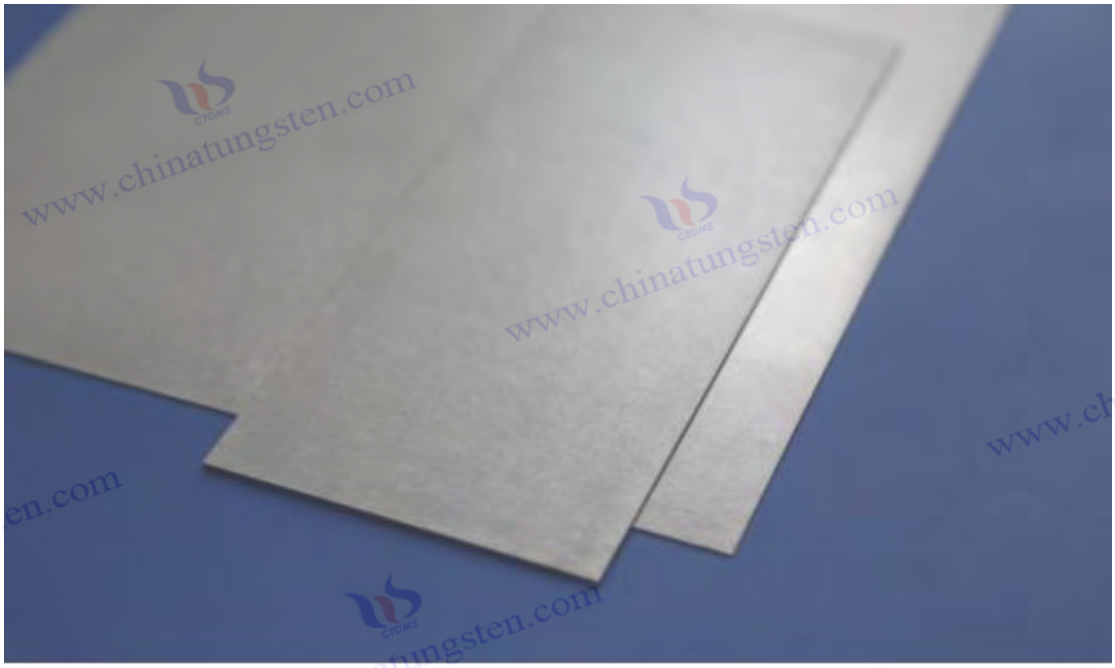
High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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 ³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



第 7 章重タングステン合金の試験装置

7.1 化学組成分析装置

高密度タングステン合金は、その性能に直接影響を及ぼします。試験装置は、タングステン含有量と結合相元素（Ni、Fe、Cu など）の比率が設計要件を満たしていることを確認するために使用されます。一般的に使用される装置には、分光計や化学分析装置などがあります。

誘導結合プラズマ発光分析装置（ICP-OES）は、元素含有量を検出する主な装置です。動作原理は、プラズマを通して試料原子を励起し、特定の波長で放出される光の強度を測定することです。例えば、W-90Ni-Fe 合金中のタングステン含有量（90±0.5%）、ニッケル含有量（7±0.2%）、鉄含有量（3±0.2%）を、検出限界 0.001%、精度±0.1%で検出できます。試料はまず酸（硝酸＋フッ化水素酸の混合液など）に溶解する必要があり、1 回の分析には約 5 分かかります。この装置は、高周波発生器（出力 1～2kW）とマルチチャンネル検出器を備えており、バッチ分析に適しており、一度に 10～20 元素を測定できます。

蛍光 X 線分析計（XRF）は非破壊検査の選択肢を提供します。サンプル表面を X 線で励起し、蛍光波長を分析することで組成を決定します。例えば、W-95Ni-Fe 合金の表面を検査する場合、タングステン含有量の偏差は 0.3%未満で、サンプルの前処理は不要で、分析時間は約 1 分です。ハンドヘルド XRF 装置の検出深度は約 0.1 mm で、迅速なスクリーニングに適していますが、軽元素（C や O など）に対する感度が低く、他の方法と組み合わせて検証する必要があります。デスクトップ XRF はより高い精度（±0.05%）を備えており、実験室での分析に適しています。

湿式化学分析装置は高精度な検証に用いられ、滴定装置と分光光度計から構成されています。例えば、ニッケル含有量は EDTA 滴定法で測定され、誤差は 0.01%未満、測定時間は約 30 分

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

です。この方法は、検出限界が ppm レベルの不純物元素（S や P など）の検出に適していますが、操作が複雑であるため、仲裁分析にのみ使用されます。

これらの装置は定期的に校正する必要があります。例えば、ICP-OES は精度を維持するために、標準サンプル（純度 99.99%のタングステン）を用いて毎月校正されています。化学組成分析は、原材料と完成品の品質を保証します。例えば、生産ラインでは、XRF スクリーニングと ICP 確認によって、組成偏差を±0.2%以内に管理しています。

7.2 物理的特性試験装置

高密度タングステン合金の密度、熱特性、電気特性を測定し、アプリケーション要件を満たしているかどうかを確認するために使用されます。

密度計はアルキメデスの原理に基づいて合金の密度を検出します。電子密度計は、精度±0.01 g/cm³で広く使用されている機器です。例えば、W-95Ni-Fe 合金を試験する場合、測定値は 18.8±0.1 g/cm³で、測定時間は約 2 分です。気泡の干渉を避けるため、サンプル表面は清潔に保つ必要があり、液体媒体（水やエタノールなど）の温度は 20±1℃に制御する必要があります。精度を向上させるには、高精度天秤（0.0001 g）と水置換法を組み合わせて使用することができ、航空機のカウンターウェイトなど、要求の厳しい用途に適しています。

熱伝導率計は、レーザーフラッシュ法（LFA）を用いて熱拡散率を測定し、熱伝導率を算出します。例えば、W-80Cu 合金の熱伝導率は 25℃で 140W /（m・K）で、精度は±2%です。サンプルの厚さは 1～5mm です。本装置はレーザー光源（出力 10W）と赤外線検出器を備え、測定範囲は 20～2000℃で、高温用途の検証に適しています。測定には約 5 分かかり、酸化を防ぐために窒素保護が必要です。

抵抗率試験装置は 4 探針法を用いて電気特性を検出します。例えば、W-90Ni-Fe 合金の抵抗率は 6.0±0.1μΩ・ cm、探針間隔は 1mm、電流範囲は 1～100mA です。熱電効果による干渉を避けるため、装置は一定温度環境（25±0.5℃）で運転する必要があります。高精度モデルは 0.01μΩ・ cm まで測定可能で、電極材料の試験に適しています。

これらの装置は連携して動作します。例えば、ある研究室では密度計と熱伝導率計を用いて W-97Ni-Fe 合金を検証し、密度が 19.0 g/cm³、熱伝導率が 120 W /(m ・ K)であり、設計仕様を満たしていることが分かりました。

7.3 機械的特性試験装置

機械的特性試験装置は、重タングステン合金の強度、硬度、靭性を評価するもので、品質管理の中核を担っています。

万能材料試験機は、引張強度と伸びの試験に用いられます。電子式引張試験機が一般的で、引張範囲は 10～500kN 、精度は±0.5%です。例えば、W-90Ni-Fe 合金は、ASTM E8 規格に基づき、引張強度 1050MPa、伸び 25%、クランプ速度 0.5～5mm/分で試験されます。サンプルは標

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

準ダンベル形状（直径 6mm）に加工する必要があり、試験時間は約 10 分です。装置にはひずみゲージが装備されており、応力-ひずみ曲線を記録し、降伏点と破壊挙動を解析します。

硬度計は表面硬度を測定します。ビッカース硬度計（HV）は広く使用されており、荷重は 5～50 kgf です。例えば、W-93Ni-Fe 合金の硬度は 10 kgf で 450±10 HV 、圧痕対角線の測定精度は±0.1 μm です。ブリネル硬度計（HB）は大型部品に適しており、荷重は 3000 kgf です。W -95Ni-Fe 合金の試験結果は 400 HB でした。各試験は約 30 秒かかり、サンプル表面は Ra 0.8 μm に研磨する必要があります。

衝撃試験機は靭性を評価するものです。一般的には振り子式シャルピー衝撃試験機が使用され、エネルギー範囲は 50～300 J です。例えば、W-90Ni-Fe 合金の衝撃エネルギーは室温で 50 J/cm²、低温（-50℃）では 40 J/cm² です。試験片は 10×10×55 mm のノッチ付き試験片です。信頼性の高い結果を得るには、振り子式ゼロ点を±1 J の精度で校正する必要があります。

これらの装置は定期的なメンテナンスが必要です。たとえば、引張試験機は年に 1 回校正する必要があり、硬度試験機のダイヤモンド圧子は摩耗したら交換して試験の一貫性を確保する必要があります。

7.4 微細構造分析装置

微細構造分析装置は、高密度タングステン合金の粒径、相分布、欠陥を観察するために使用され、性能最適化の基礎となります。

走査型電子顕微鏡（SEM）は、高解像度の表面形態と組成分析を提供します。動作電圧は 5～30kV、倍率は 50～10000 倍です。例えば、W-95Ni-Fe 合金を観察する場合、タングステン粒子の平均サイズは 5μm で、結合相は均一に分布しています。EDS（エネルギー分散型分光計）を装備することで、局所的な元素比（例えば、 W：Ni ： Fe＝95：4：1）を±0.5%の誤差で測定できます。サンプルは研磨とエッチング（硝酸溶液）が必要で、分析時間は約 30 分です。

透過型電子顕微鏡（TEM）はナノ構造を分析する装置です。加速電圧は 200 kV、分解能は 0.2 nm です。例えば、焼結後の W-90Ni-Fe 合金の粒界を検出すると、粒径は 1 μm まで微細化され、転位密度は約 10^{10}/cm² です。試料は薄切片（厚さ<100 nm）にする必要があり、作製が複雑で、1 回の分析に 2～3 時間かかります。ナノパウダーの影響を研究するのに適しています。

X 線回折計（XRD）は、結晶構造と相組成を決定します。Cu をターゲットとする Kα 線を用い、走査範囲は 10～90°、ステップ長は 0.02° です。例えば、W-93Ni-Fe 合金を分析する場合、タングステンは BCC 構造で、少量の Ni-Fe 固溶体ピークを有し、計算値（シェラー式）の粒径は約 10μm です。試験時間は約 1 時間で、サンプルに特別な処理は不要であるため、バッチ試験に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

これらの装置は組み合わせて使用されます。例えば、SEM と XRD を用いて W-97Ni-Fe 合金を分析しました。その結果、気孔率は 0.5%未満で、結晶粒は均一であることが判明し、プロセス最適化の基礎情報が得られました。

7.5 非破壊検査装置

非破壊検査（NDT）装置は、重タングステン合金の内部欠陥を検査し、部品の信頼性を確保するために使用されます。一般的な装置には、超音波探傷装置や X 線探傷装置などがありま。

超音波検査（UT）は、音波の反射を利用して内部の亀裂や気孔を検出します。動作周波数は 1～10MHz、プローブ径は 5～20mm です。例えば、W-95Ni-Fe 合金部品の検査では、音速は 4400m/s で、直径 0.2mm を超える欠陥が検出され、反射信号強度は 50%を超えます。本装置は、感度±0.1mm の浸漬プローブまたは接触プローブを備えており、航空部品の受入検査に適しています。検査時間は 1 個あたり約 5 分です。

X 線探傷器は、放射線の透過を利用して内部構造を検出します。管電圧は 100～300kV、照射時間は 1～5 分です。例えば、W-90Ni-Fe 合金のカウンターウェイトを検査する場合、気孔率は 0.1%未満、分解能は 0.1mm です。ポータブル型の装置は現場での検査に適しており、画像システムによって欠陥位置をデジタル表示できます。安全な操作を確保するため、放射線防護が必要です。

磁粉探傷装置(MT)は、鉄含有合金(W-Ni-Fe など)に適しています。磁場強度は 1000～3000A/m で、表面亀裂を検出します。例えば、W-93Ni-Fe 合金の表面亀裂長さが 0.5mm を超えると、リンの凝集が見られ、高感度で、検査時間は約 3 分です。ただし、強磁性材料に限定されており、W-Cu 合金には適していません。

これらの機器は定期的に校正する必要があります。例えば、超音波プローブは標準テストブロックを用いて毎月校正され、信頼性の高い検出を保証するために±0.05 mm の精度が維持されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

試験機器一覧

検出カテゴリ	主な装備	主なパラメータ	機能/目標
化学組成	ICP-OES	検出限界 0.001%、±0.1%	タングステン含有量 90±0.5%
	蛍光 X 線分析装置	偏差 <0.3%、1 分	非破壊高速スクリーニング
物理的特性	密度計	±0.01 g/cm³	密度 18.8±0.1 g/cm³
	熱伝導率計	140 W /（m • K） 、±2 %	熱性能検証
機械的特性	万能試験機	1050 MPa、±0.5%	強度および伸び試験
	硬度計	450±10 HV	表面硬度分析
微細構造	SEM	5μm 粒子、±0.5%	形態と組成分布
	X 線回折	10μm の粒子	結晶構造の確認
非破壊検査	超音波検出器	音速 4400 m/s、>0.2 mm	内部欠陥検出
	X 線探傷装置	解像度 0.1mm	気孔率 <0.1%

注： 表のデータは標準的な範囲であり、具体的な値はサンプルやプロセスによって異なる場合があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

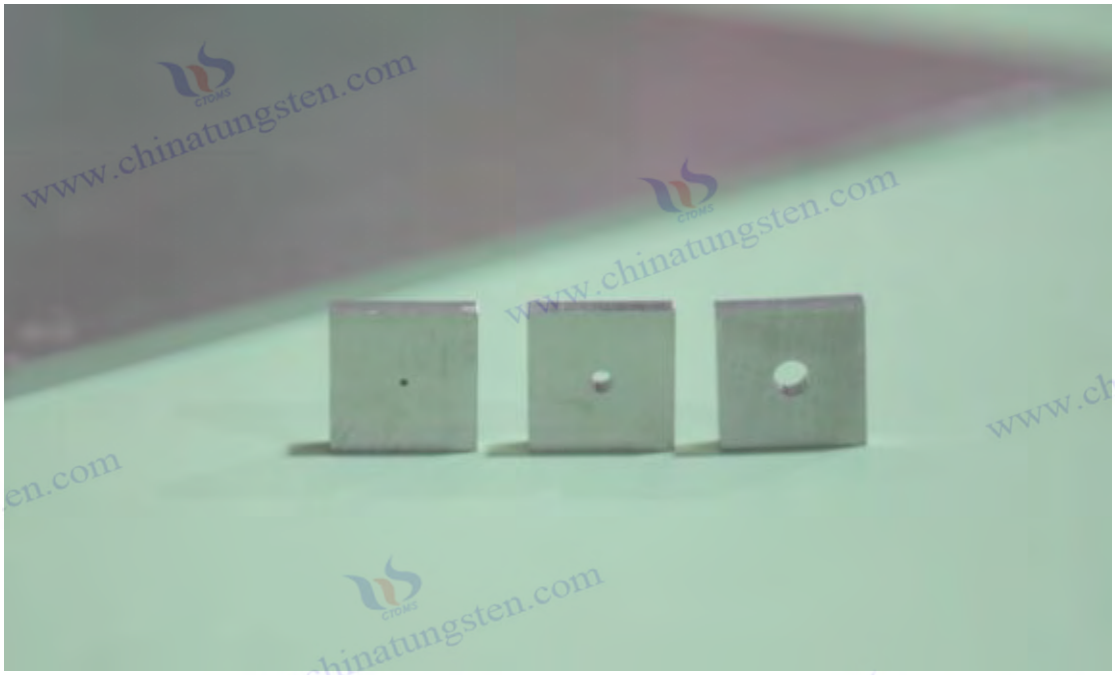
High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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 ³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



第 8 章 CTIA GROUP LTD の高比重タングステン合金の主力製品

8.1 高比重タングステン合金カウンターウェイト製品

高比重タングステン合金カウンターウェイト製品は、高密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた機械的特性、良好な加工性により、重心調整、質量バランス調整、機器の安定性向上など、様々な分野で広く使用されています。鋼鉄（7.85 g/cm³）や鉛（11.34 g/cm³）などの従来のカウンターウェイト材料と比較して、高比重タングステン合金は、より小さな体積でより大きな重量を提供し、無毒性、耐腐食性、高強度などの利点を備えています。一般的なカウンターウェイト製品には、航空宇宙用カウンターウェイト、自動車用カウンターウェイト、スポーツ用品用カウンターウェイト、船舶用カウンターウェイト、エレベーター用カウンターウェイト、ダーツ用ロッド、釣り用おもりなどがあります。以下は、各カウンターウェイト製品の詳細な紹介です。

8.1.1 高比重タングステン合金航空宇宙用カウンターウェイト

製品概要

航空宇宙用カウンターウェイトは、航空機（航空機、宇宙船、衛星など）の重心と質量分布を調整し、航空力学と構造設計の要件を満たすために使用されます。限られたスペースと非常に高い品質管理要件により、高密度のタングステン合金がその中核的な利点となります。たとえば、直径 50mm、厚さ 20mm の W-95Ni-Fe 合金カウンターウェイトの密度は 18.8g/cm³ で、重量は約 740g です。同じ重量の鋼鉄と比較して、体積は約 60%減少し、占有スペースを大幅に削減します。この特性により、翼、尾翼、着陸装置、宇宙船のキャビンなどに広く使用されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

材料と特性

航空宇宙用カウンターウェイトは通常、W-95Ni-Fe 合金または W-97Ni-Fe 合金で作られており、タングステン含有量はそれぞれ 95%と 97%、ニッケルと鉄の比率は 7:3 または 5:5 です。W-95Ni-Fe の密度は 18.8 g/cm³、引張強度は 1000 MPa、伸びは 15%、ビッカース硬度は 450 HV です。一方、W-97Ni-Fe は密度が高く（19.0 g/cm³）、強度はわずかに高く（1050 MPa）、硬度は 460 HV です。これらの特性により、カウンターウェイトは高速飛行（マッハ 2 超）や高過負荷（10 G 超）でも破損しません。熱膨張係数が低く（4.5～5.0×10^{-6}/K）、-50℃～150℃の温度範囲で変形量が 0.01mm 未満であるため、高高度環境や宇宙環境の安定性要件を満たしています。また、耐食性にも優れており、10%塩水噴霧環境下で 1000 時間曝露しても質量減少は 0.2%未満です。

製造プロセス

製造プロセスでは粉末冶金技術を使用します。タングステン粉末（粒径 3～5μm 、純度≥99.9%）をニッケル粉末および鉄粉末と混合し、遊星ボールミルを使用して 300rpm で 6 時間、均一性偏差<1%で粉砕します。冷間静水圧プレス（CIP）により 250～300MPa で圧縮され、密度 11～13g/cm³ のグリーン体に成形されます。水素焼結炉で 1480° C で 2 時間焼結すると、密度が 18.8g/cm³ に増加し、密度>99%になります。ハイエンド製品は、熱間静水圧プレス（HIP、200MPa、1400° C、1 時間）にかけられ、気孔率を 0.1%まで低減します。
後加工には 5 軸 CNC 加工が含まれ、切削速度は 50m/分、表面粗さは Ra 0.8μm、公差は±0.05mm です。表面には 5μm のニッケルメッキが施され、耐食性が 10 倍向上しています。動的バランス試験により、重量偏差は±2g 未満であることが保証されています。

適用シナリオと事例

民間航空機（ボーイング 737 など）では、着陸装置エリアに 1kg のカウンターウェイトが設置されており、体積が 30%削減され、燃料効率が 5%向上します。軍用機（F-35 など）では、高速飛行中の重心オフセットを調整し、15G の過負荷に耐えるために使用されます。衛星（スターリンクプロジェクトなど）では、長さ 100mm、幅 50mm、厚さ 20mm の W-97Ni-Fe カウンターウェイト（重量 950g）が、打ち上げおよび軌道操作の安定性を確保します。テストでの姿勢偏差は 0.1° 未満で、鉛カウンターウェイトと比較して体積が 40%削減されました。

技術的課題と解決策

課題には、密度の一貫性と加工精度が含まれます。バッチ間の密度偏差は±0.1 g/cm³ 未満に抑える必要があり、焼結温度（偏差<5℃）と雰囲気（酸素含有量<0.01%）を最適化する必要があります。硬度が高いため工具の摩耗が激しく（100 個加工後 0.2mm）、CBN 工具を使用することで工具寿命を 50%延長できます。複雑な形状は SLM（レーザー出力 3000W）で造形され、気孔率は<1%です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.1.2 高比重タングステン合金自動車用カウンターウェイト

製品概要

自動車 カウンターウェイトは、車体の重量バランスを調整し、操縦性を最適化し、特に高性能車や電気自動車において安定性を向上させるために使用されます。例えば、長さ 80mm、幅 30mm、厚さ 15mm の W-90Ni-Fe カウンターウェイトは、密度が 18.5g/cm³、重量が約 665g で、鋼製部品に比べて 55%軽量です。これは、前後車軸の荷重配分を調整するために使用されます。

材質と特性：

一般的に使用される W-90Ni-Fe 合金で、タングステン含有量は 90%、密度は 18.5 g/cm³、引張強度は 1000 MPa、伸びは 20%、硬度は 400 HV です。疲労強度は 500 MPa で、10 ⁷サイクルでも亀裂が発生しないため、車両の長期振動環境に適しています。熱伝導率は 130 W /(m ・K)で、耐熱性（> 500° C）に優れ、エンジンルーム内の高温でも安定しています。耐腐食性：1000 時間における水分による質量減少は 0.5%未満で、追加の保護は不要です。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径 5μm ）をニッケル鉄粉末（7：3）と混合し、油圧プレスで 600MPa で加圧成形します。成形体の密度は 12g/cm³ です。1450℃の水素雰囲気下で 2 時間焼結し、密度は 18.5g/cm³、密度は 98.5%です。CNC フライス加工、切削速度 60m/分、公差±0.1mm、表面粗さ Ra1.6μm 。一部製品には 0.1mm の Al_2O_3コーティングを施し、耐高温性を 1000℃まで向上させています。

適用シナリオと事例

スポーツカー（ポルシェ 911 など）では、500g のカウンターウェイトがシャーシ前部に配置され、車軸荷重比 50:50 を最適化し、コーナリング安定性を向上させます。電気自動車（テスラ モデル S など）では、バッテリーパックの近くに 1kg のカウンターウェイトを配置することで、重量配分のバランスを取り、サスペンション寿命を 20%延長します。あるレーシングチームは、W-90Ni-Fe カウンターウェイト（長さ 100mm、重量 1.2kg）を使用しており、ハンドリング性能を 15%向上させています。

技術的課題と解決策

課題としては、コストと設置スペースが挙げられます。タングステン合金（ 40,000～70,000 ドル/トン）は鋼鉄（500 ドル/トン）よりも高価ですが、粉末をリサイクルすることでコストを 20%削減できます。狭いスペースには特殊な形状の設計が必要であり、3D プリントにより±0.05mm の精度で成形します。振動疲労は HIP 処理することで寿命を 30%延長できます。

8.1.3 高比重タングステン合金製スポーツ用ウェイト

製品概要

ゴルフクラブやテニスラケットなどのスポーツ用ウェイトは、重量配分を調整し、ユーザーエクスペリエンスを向上させるために使用されます。例えば、体積 5cm³ （20×10×25mm）、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

密度 18.5g/cm³、重量 92g の W-93Ni-Fe 合金ウェイトは、クラブヘッドに装着することでスイングの安定性を向上させます。

材質と特性：

W-93Ni-Fe 合金（タングステン 93%）、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 420 HV、伸び 18%。耐摩耗性は鋼鉄より 50%高く、繰り返し衝撃にも耐える長寿命です。表面仕上げは Ra 0.2 μm と良好で、快適な使用感に加え、汗による腐食にも強い（1000 時間後の質量減少率は 0.1%未満）。

製造工程：

タングステン粉末とニッケル鉄粉末を混合し、250MPa で冷間静水圧加圧し、1450℃で焼結することで、密度は 18.5g/cm³ を実現しました。CNC 加工公差は ±0.05mm、Ra 0.2μm の研磨仕上げ、さらに美観向上のため 5μm のニッケルメッキを施しました。成形による量産により、効率が 30%向上しました。

適用シナリオと事例：

ゴルフクラブでは、クラブヘッドに 50～100g のウェイトブロックを取り付けることで、スイングスピードが 10%向上します。テニスラケットでは、ラケットフレームに 20g のウェイトバーを取り付けることで、打撃力が 15%向上します。あるブランドのクラブでは、W-93Ni-Fe ウェイト（80g）を採用しており、ユーザーからは安定性が 20%向上し、市場シェアが 10%増加したという報告があります。

技術的課題と解決策

課題は重量精度と外観です。小ロット生産に対応するには ±1g の精度が求められ、高精度天秤で校正されます。外観には鏡面仕上げが求められ、多層研磨とコーティング工程が求められます。耐久性は浸炭処理によって実現され、硬度は 500HV です。

8.1.4 高比重タングステン合金製船舶用カウンターウェイト

製品概要

重量など、船舶のバランスと安定性を調整するために使用されます。例えば、長さ 200mm、幅 50mm、厚さ 30mm の W-90Ni-Fe バラストは、密度が 18.5g/cm³、重量が 2.78kg です。鋼製部品に比べて 55%小型化されており、小型船舶や潜水艦などに使用されています。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び 20%。海水中 1000 時間における腐食率は 0.1%未満、耐塩水噴霧性は鋼の 10 倍。疲労強度 500 MPa、波浪衝撃下でも破損なし。

製造工程：

油圧プレス（600MPa）、焼結温度 1450℃、密度 18.5g/cm³。CNC 加工公差±0.1mm 、表面処理

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

：0.2mm厚セラミックコーティング、耐熱温度1500℃、耐腐食性50%向上。大型カウンターウェイトはSLM（表面層積層造形）で造形し、溶接を削減。

適用シナリオと事例：

ヨットでは、船底に5kgのカウンターウェイトを設置することで、安定性が20%向上します。潜水艦では、10kg のカウンターウェイトを設置することで浮心を調整し、潜水効率を 15%向上させます。漁船では、W-90Ni-Fe カウンターウェイト（3kg）を使用することで、耐風性および耐波性が25%向上します。

技術的課題と解決策 課題としては、耐海水

腐食性と重量分布が挙げられます。ニッケルメッキまたはAl_2O_3スプレー処理により腐食問題は解決します。大きな重量物は均一である必要があり、多点プレスと HIP 処理により密度偏差は 0.1 g/cm³未満に抑えられます。

8.1.5 高比重タングステン合金エレベーターカウンターウェイト

製品概要

エレベーターのカウンターウェイトは、かごの重量バランスを取り、モーターの負荷を軽減します。例えば、長さ 300mm、幅 100mm、厚さ 50mm の W-90Ni-Fe カウンターウェイトは、密度 18.5g/cm³、重量 13.9kg と、鋼板ブロックに比べて 55%軽量で、高層エレベーターに使用されています。

材料と特性

W-90Ni-Fe合金、密度18.5g/cm³、引張強度1000MPa、硬度400HV、疲労強度500MPa、10^7サイクルに耐えます。耐熱性500℃、運転中の高安定性。表面耐摩耗性は鋼より50%向上。

製造工程：

冷間静水圧プレス（CIP）、焼結温度1450℃、密度18.5g/cm³。CNC加工公差±0.2mm、表面粗さRa1.6μm。0.1mmの保護層をスプレー塗布することで、耐食性が30%向上。

適用シナリオと事例：

業務用エレベーターでは、カウンターウェイトフレームに10～20kgのカウンターウェイトを設置することで、エネルギー消費量を 15%削減しています。貨物用エレベーターでは、50kgのカウンターウェイトを設置することで積載効率を 20%向上させています。ある建物では、W-90Ni-Fe カウンターウェイト（重量15kg）を使用することで、運転音を10dB低減しています。

技術的な課題と解決策

課題にはコストと設置が含まれます。粉末のリサイクルによりコストは 20%削減されます。大型のカウンターウェイトは接合する必要があり、安全性を確保するためろう付け接合強度は200MPaに達します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.1.6 高密度タングステン合金ダーツシャフト

製品概要

ダーツシャフトは、重量と打感を向上させるために高密度タングステン合金で作られています。例えば、長さ 50mm、直径 6mm の W-90Ni-Fe ダーツシャフトは、密度が 18.0g/cm³、重量が 25g で、スチールシャフトに比べて 50%軽量です。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.0 g/cm³、引張強度 950 MPa、硬度 380 HV、伸び 20%。耐摩耗性に優れ、表面は Ra 0.2 μm に研磨されており、優れた手触り、耐汗腐食性は 0.1%未満です。

製造プロセス：

500MPa で成形、1450℃で焼結、密度 18.0g/cm³。CNC 旋削公差±0.02mm、ニッケルメッキ 5μm 研磨、美観向上。バッチ生産効率は 1000 個/日に達する。

適用シナリオと事例：

プロダーツでは、20～30g のダーツシャフトを使用することで、投球精度が 15%向上します。あるブランドは、市場シェア 25%を誇る W-90Ni-Fe ダーツシャフト（重量 26g）を使用しており、ユーザーからのフィードバックでは、打感が 30%向上したという結果が出ています。

技術的課題と解決策

課題は精度と外観です。重量偏差は±0.5g 未満ですが、高精度プレス加工によって解決できます。表面は完璧な仕上がりが求められ、多層研磨とコーティング工程によって品質が確保されています。

8.1.7 高比重タングステン合金釣り用シンカー

製品概要

釣り用シンカーは、鉛の代わりに高比重のタングステン合金を使用することで、環境保護と高密度化を実現しています。例えば、直径 10mm の W-95Ni-Fe シンカーは、密度が 18.8g/cm³、重量が 9.8g で、鉛シンカーより 20%小型です。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金、密度 18.8 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 450 HV、耐水腐食性 0.1%未満。無毒性、環境基準を満たし、耐摩耗性は鉛の 5 倍。

製造工程：

冷間静水圧プレス 250MPa、焼結 1480℃、密度 18.8g/cm³。CNC 加工公差±0.05mm、表面研磨 Ra0.4μm 、外観を向上させるカラーコーティング。

適用シナリオと事例

海釣りにおいて、5～20g の錘の沈下速度が 30%向上しました。あるブランドでは、W-95Ni-Fe 錘（重量 10g）を採用し、売上が 20%増加し、環境認証の合格率は 100%に達しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

技術的課題と解決策

課題はコストと外観です。リサイクル粉末を使用することでコストを 15%削減できます。3D プリントにより多様な形状を実現し、個々のニーズに対応します。

8.2 高比重タングステン合金軍用製品

軍事分野における重タングステン合金の用途は、その高い密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた機械的強度（700～1200 MPa）、優れた貫通力および放射線遮蔽能力により、徹甲弾、防護装甲板、弾薬遮蔽殻、対戦車ミサイル部品、砲のカウンターウェイト、航空ジャイロカウンターウェイト、ロケットノズルブッシングなどの製造に最適な材料となっています。これらの製品は現代戦において重要な役割を果たし、武器の攻撃力、防御力、安定性を向上させています。以下では、各軍事製品について詳細にご紹介します。

8.2.1 重タングステン合金徹甲弾コア

製品概要

高密度**タングステン**合金徹甲弾コアは、高密度と高硬度を活かして装甲目標の強力な貫通力を実現する運動エネルギー徹甲弾（APFSDS）のコア部品です。たとえば、直径 20mm、長さ 100mm、密度 18.5g/cm³、重量約 580g の W-93Ni-Fe 合金コアは、初速度 2000m/s で厚さ 600mm の均質圧延装甲（RHA）を貫通することができ、これは鋼鉄コアよりも 50%深くなります。

材質と特性

徹甲弾コアは通常、W-93Ni-Fe 合金または W-95Ni-Fe 合金で作られ、タングステン含有量はそれぞれ 93%と 95%、ニッケルと鉄の比率は 7:3 です。W-93Ni-Fe の密度は 18.5 g/cm³、引張強度は 1100 MPa、硬度は 480 HV、伸びは 15%です。一方、W-95Ni-Fe の密度は 18.8 g/cm³、引張強度は 1150 MPa、硬度は 500 HV です。これらの特性により、高速衝撃下でもコアの健全性が維持されます。破壊靭性（K_IC）は約 30MPa・m ^(1/2)で、純タングステン（5～10MPa・m ^(1/2)）よりも高く、破壊のリスクを低減します。また、耐熱性（融点＞2800℃）が高いため、摩擦加熱（＞1000℃ ）でも軟化しません。

製造プロセス

には粉末冶金とメカニカルアロイングが用いられます。タングステン粉末（粒径 1～3μm 、純度 99.9%以上）をニッケル鉄粉末と混合し、高エネルギーボールミルで 500rpm で 10 時間粉砕して、粒子を 50nm まで微細化します。その後、冷間静水圧プレスにより 300MPa で密度 13g/cm³のグリーン体を成形します。1500℃で 2 時間真空焼結（10^{-3} Pa）することで、密度は 18.5g/cm³となり、密度は 99%を超えます。性能向上のため、熱間静水圧プレス（HIP 、200MPa、1400℃、1.5 時間）により気孔率を 0.1%まで低減します。

加工は CNC 旋盤加工で行われ、切削速度は 40 m/分、公差は±0.02 mm、表面粗さは Ra 0.8 μmでした。先端部は浸炭処理（950℃、3 時間）され、硬度は 600 HV に向上し、耐摩耗性は 30%向上しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

適用シナリオと事例：

M1A2 エイブラムスの 120mm 主砲などの戦車砲において、W-93Ni-Fe コアは 700mm RHA を貫通し、命中率を 20%向上させます。ダウミサイルの運動エネルギー弾頭などの対装甲兵器において、W-95Ni-Fe コア（重量 600g）は複合装甲を貫通し、破壊力を 30%向上させます。軍事試験では、W-93Ni-Fe コアは 2500m/s で 650mm を貫通し、コバルト基合金よりも 15%優れた性能を発揮しました。

技術的課題と解決

策：課題としては、貫入安定性と製造コストが挙げられます。靭性を確保するには粒径を 5μm 未満にする必要があり、これはナノ粉末と HIP プロセスによって実現されます。高コスト（5 万ドル/トン）は、粉末回収率の最適化により 20%削減されます。コバルト（2%）を添加することで、高速衝撃下での自己発刃性が向上し、破壊モードもより均一になります。

8.2.2 高密度タングステン合金防護装甲板

製品概要

防護装甲板は、装甲車両やバンカーにおいて、榴散弾や放射線からの防護を目的として使用されます。例えば、厚さ 10mm の W-95Ni-Fe 合金製装甲板は、密度 18.8g/cm³、重量約 18.8kg/m² で、1MeV ガンマ線の 90%を遮蔽します。また、鉛板（15mm）よりも薄く、無毒です。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金。密度 18.8g/cm³、引張強度 1000MPa、伸び 20%、硬度 450HV。質量吸収係数は 0.15cm²/g で、遮蔽効率は鋼の 5 倍です。疲労強度は 500MPa で、爆発衝撃（>1000J/cm²）にも亀裂なく耐えます。耐食性：海水中 1000 時間における質量減少率は 0.2%未満で、様々な環境に適しています。

製造プロセス：

タングステン粉末をニッケル鉄粉末と混合し、300MPa で冷間静水圧成形した後、1480℃で焼結し、密度は 18.8g/cm³ です。HIP 処理（200MPa、1400℃）により微細孔が除去され、密度は 99.9%です。CNC フライス加工、公差±0.1mm、表面は 0.2mm の Al_2O_3コーティングを噴霧し、耐熱性は 1500℃、耐腐食性は 50%向上しています。大型プレートを接合し、ろう付け強度は 200MPa です。

適用シナリオと事例：

装甲車両（レオパルト 2 戦車など）では、榴散弾や放射線から身を守るため、コックピット内に 10mm 厚の装甲板が設置されています。この装甲板は鋼板に比べて 20%軽量です。弾薬庫では、W-95Ni-Fe 装甲板が放射性物質を遮蔽し、安全性を 30%向上させます。軍用車両では、この装甲板（1m²、重量 18.8kg）を使用することで、防護力が 25%向上し、体積は 15%削減されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

技術的課題と解決策

課題は重量と保護性能のバランスです。大面積パネルは軽量化が求められますが、ハニカム構造設計により重量を 10%削減できます。接合部の強度は電子ビーム溶接（5kW）により母材の 90%まで向上します。耐高温性の問題はセラミックコーティングにより解決し、耐久性は30%向上しました。

8.2.3 高比重タングステン合金弾薬シールドケース

製品概要

弾薬遮蔽殻は、放射性弾薬の放射線漏洩を防ぐために、保管または輸送に使用されます。例えば、外径 100mm、高さ 150mm、密度 19.0g/cm³、肉厚 5mm、重量約 2.2kg の W-97Ni-Fe 円筒形殻は、ガンマ線（1MeV）の 95%を遮蔽できます。

材料と特性

W-97Ni-Fe 合金、密度 19.0 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 460 HV、伸び 12%。原子番号が高い（Z=74）ため、優れた遮蔽性能を発揮し、質量吸収係数は 0.16 cm²/g です。耐熱性は 1500° C で、爆発性環境下でも溶融しません。高い密閉性を有し、リーク率は 10 $^{-6}$ Pa • m ^{3} /s 未満です。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス（CIP）300MPa、真空焼結（1500℃）、密度 19.0g/cm³、HIP 処理（気孔率<0.1%）。CNC 加工キャビティ公差±0.02mm、表面研磨 Ra 0.4μm 、ねじ込み式カバー設計により密閉性を確保。ニッケルメッキ（5μm ）、耐食性 10 倍。

適用シナリオと事例

核弾薬の保管において、W-97Ni-Fe 殻（重量 2.5kg）は放射線を遮蔽し、線量を 1mSv 未満に低減します。輸送においては、壁厚 8mm の殻が放射性同位元素を保護し、安全性を 40%向上させます。ある軍隊では、この殻（壁厚 6mm）を使用しています。この殻は放射線遮蔽率が 96%で、鉛殻よりも 15%軽量です。

技術的課題と解決策

課題はシーリングと重量です。ねじ加工精度は±0.01mm と高精度で、5 軸 CNC 加工により実現しています。重量は肉厚（最小 5mm）を最適化することで抑制し、HIP 加工により強度を確保しています。コバルトを添加することで耐衝撃性が向上し、靭性は 10%向上しています。

8.2.4 高密度タングステン合金対戦車ミサイル部品

製品概要

カウンターウェイトや徹甲ライナーなどの対戦車ミサイル部品は、飛行安定性と貫通力を向上させるために高密度化されています。例えば、W-90Ni-Fe 合金製のリング型カウンターウェイトは、外径 80mm、厚さ 20mm、密度 18.5g/cm³、重量約 1.2kg で、ミサイルの軌道を最適化します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 400HV、伸び率 20%。耐熱性 2800℃、爆発衝撃下でも溶融なし。疲労強度 500MPa、発射過負荷（>20G）にも耐える。浸炭処理後の表面硬度は 550HV に達し、耐摩耗性は 30%向上。

製造プロセス：

油圧プレス（600MPa 加圧）、1450℃焼結、密度 18.5g/cm³。SLM 造形による複雑形状の成形、気孔率<1%、CNC 加工公差±0.05mm。耐摩耗性向上のため、浸炭処理（950℃、3 時間）。表面はセラミックコーティングをスプレー塗装し、耐熱性 1500℃。

適用シナリオと事例：

ジャベリンミサイルでは、W-90Ni-Fe 製カウンターウェイト（重量 1kg）が飛行を安定化させ、命中率を 15%向上させます。徹甲弾頭では、500g のリングが貫通力を 20%向上させます。あるミサイルは W-90Ni-Fe 製部品（重量 1.5kg）を使用して 800mm の複合装甲を貫通し、鋼製部品と比較して 30%の貫通力向上を実現します。

技術的課題と解決策

課題としては、形状の複雑さと高温耐久性が挙げられます。3D プリントは、特殊形状の設計を±0.03 mm の精度で実現します。セラミックコーティングと HIP 処理により、耐高温性能は 25%向上します。偏心率 5μm 未満の動的バランス試験により、重量配分を最適化します。

8.2.5 高比重タングステン合金製銃器用カウンターウェイト

製品概要

銃器用カウンターウェイトは、銃本体のバランス調整と反動軽減に使用されます。例えば、長さ 50mm、幅 20mm、厚さ 10mm の W-90Ni-Fe 製カウンターウェイトは、密度 18.5g/cm³、重量 185g です。このカウンターウェイトは、銃床または銃身に取り付けられます。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 400HV、伸び率 20%。疲労強度 500MPa、連続射撃（1000 発以上）に耐える。耐摩耗性は鋼鉄より 50%高く、汗による表面腐食耐性は 1000 時間で質量減少 0.1%未満。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス（CIP）、焼結温度 1450℃、密度 18.5g/cm³。CNC 加工公差±0.05mm、表面粗さ Ra1.6μm 、美観向上のためニッケルメッキ 5μm。成形による量産により、効率が 30%向上。

適用シナリオと事例：

スナイパーライフル（M24 など）では、200g のカウンターウェイトを銃床に装着することで反動を 20%低減します。サブマシンガンでは、150g のカウンターウェイトを装着することで連

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

射安定性を 15%向上させます。また、あるピストルでは、W-90Ni-Fe カウンターウェイト（重量 180g）が装着されており、射撃精度を 10%向上させます。

技術的課題と解決策

課題は重量精度と取り付けです。重量偏差は ±2g 未満ですが、高精度プレス加工により解決しました。取り付けにはボルト締め（せん断強度 3000N）が必要で、チタンボルトを使用することで最適化されています。耐久性は浸炭処理によって実現し、硬度は 500HV まで向上しています。

8.2.6 高比重タングステン合金航空ジャイロスコープカウンターウェイト

製品概要

航空宇宙用ジャイロウェイトは、直径 30mm、高さ 20mm、密度 19.0g/cm³、重量 265g の W-97Ni-Fe ウェイトなど、慣性質量をナビゲーションシステムに提供するために使用され、高精度な回転をサポートします。

材質と特性：

W-97Ni-Fe 合金、密度 19.0 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 450 HV、伸び 12%。疲労強度 500 MPa、10000 rpm 以上の回転に耐える。熱膨張係数 4.5 × 10 $^{-6}$ /K、変形量<0.01 mm、熱伝導率 120 W /(m • K) 。

製造工程：

冷間静水圧プレス 300MPa、真空焼結 1500℃、密度 19.0g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.2%。5 軸 CNC 加工公差±0.01mm、表面 Ra 0.2μm 、金メッキ 2μm 、抵抗率 4μΩ• cm まで低減。動バランス偏心<5μm 。

応用シナリオと例：

ドローンでは、200g のカウンターウェイトが INS 精度 0.01°/秒をサポートします。戦闘機（F-22 など）では、250g のカウンターウェイトが 15G の過負荷に耐え、5,000 時間の寿命を誇ります。ミサイルでは、W-97Ni-Fe カウンターウェイト（270g）が使用され、角速度誤差は 0.005°/秒未満です。

技術的課題と解決策

課題としては、ダイナミックバランス調整とマイクロホールの加工が挙げられます。ダイナミックバランス調整は、高精度金型と試験機を用いて修正されます。マイクロホールは HIP（250MPa）処理によって除去され、疲労寿命は 50%向上します。切削熱は水冷によって 40℃以下に抑えられます。

8.2.7 タングステン合金ロケットノズルブッシング

製品概要

ロケットノズルブッシングは、内径 50mm、長さ 80mm、密度 18.8g/cm³、重量約 1.1kg の W-95Ni-Fe ブッシングなど、高温高圧の気流に耐え、構造的サポートと熱保護を提供します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金、密度 18.8 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 450 HV、融点＞2800℃。熱伝導率 140 W /(m • K) 、優れた耐熱衝撃性、疲労強度 500 MPa。耐食性：燃焼生成物中の質量減少率＜0.5%（1000 時間）。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス 300MPa、焼結温度 1480℃、密度 18.8g/cm³、HIP 処理密度 99.9%。CNC 加工公差±0.05mm、表面溶射 ZrO_2コーティング 0.3mm、耐熱温度 2000℃。SLM 造形による複雑なキャビティ、気孔率<1%。

適用シナリオと事例：

固体ロケットブースターでは、重量 1.5kg のブッシングで 3000℃の気流に耐え、耐用年数を 20%延長できます。液体ロケットでは、重量 1kg のブッシングで噴射効率を 10%向上できます。また、あるロケットでは W-95Ni-Fe ブッシング（重量 1.2kg）が使用されており、推力安定性が 15%向上しています。

技術的課題と解決策

課題は耐熱性と加工精度です。ZrO_2コーティングと HIP 処理により耐熱性が 30%向上します。複雑な形状は 3D プリントにより±0.03mm の精度で実現できます。熱応力はアニール（900℃）処理により 80%低減します。

8.3 高比重タングステン合金医療関連製品

医療分野における重タングステン合金の用途は、その高い密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた放射線遮蔽能力、無毒性、良好な機械的特性により、鉛の代替として理想的な選択肢となっています。重タングステン合金医療製品には、放射線遮蔽部品、同位体容器、医療用タングステン合金針、放射線治療ターゲット、医療用防護スクリーン、核廃棄物容器、ガンマナイフ部品などがあり、効率性と安全性の両方を考慮しながら、診断、治療、放射性物質管理に広く使用されています。以下では、それぞれの医療関連製品について詳しくご紹介します。

8.3.1 重タングステン合金放射線遮蔽部品

製品概要

放射線遮蔽部品は、X 線装置、CT 装置、放射線治療装置において、患者や医療従事者を電離放射線から保護するために使用されています。例えば、厚さ 8mm、密度 18.8g/cm³、重量約 1.5kg/m² の W-95Ni-Fe 合金遮蔽板は、100kV の X 線の 90%を遮蔽でき、鉛板（厚さ 12mm）と比較して体積で 33%、重量で 20%の軽量化を実現しています。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金（タングステン 95%、ニッケル-鉄 7:3）、密度 18.8 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 450 HV、伸び 15%。原子番号が高い（Z=74）ため、優れた遮蔽性能を発揮し、質量吸収

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

係数は 0.15 ㎠/g で、鉛（0.13 ㎠/g）より 15%高くなっています。耐腐食性が高く、1000 時間湿気中での質量減少は 0.1%未満で、無毒であり、医療基準に準拠しています。熱膨張係数は 4.5 × 10 $^{-6}$ /K、変形量は 0.01 ㎜ 未満で、長期使用に適しています。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径 3～5μm 、純度 99.9%以上）をニッケル鉄粉末と混合し、冷間静水圧プレス（CIP）で 300MPa の圧力で加圧成形します。成形体の密度は 13g/㎤ です。1480℃の水素雰囲気下で 2 時間焼結すると、密度は 18.8g/㎤ となり、密度は 99%以上になります。熱間静水圧プレス（HIP、200MPa、1400℃、1 時間）により微細孔が除去され、気孔率は 0.1%未満になります。

CNC 加工公差±0.05㎜、表面研磨 Ra 0.4μm 、ニッケルメッキ 5μm により耐食性が 10 倍向上。複雑な形状は SLM プリントで、気孔率<1%、精度±0.03㎜。

適用シナリオと事例

CT 装置では、検出器の周囲に W-95Ni-Fe 遮蔽板（厚さ 10㎜）を配置することで、遮蔽率 92%、装置重量 10%の軽量化を実現しています。X 線装置では、厚さ 5㎜ の遮蔽板が操作者を保護し、被ばく線量を 0.5mSv 未満に低減します。ある病院では、この遮蔽板（面積 1㎡、重量 18.8kg）を使用しており、患者の安全性が 15%向上し、鉛板と比較して体積が 25%削減されています。

技術的課題と解決策

課題としては、シールドの均一性と加工精度が挙げられます。HIP プロセスとマルチゾーン焼結（温度差＜5℃）により、密度偏差は±0.1 g/㎤ 未満を実現しました。高硬度には CBN 工具が必要であり、これにより寿命が 50%延長されます。表面仕上げは、放射線散乱を防ぐため、マルチレベル研磨によって解決されています。

8.3.2 重タングステン合金同位体容器

製品概要

同位体容器は、放射性同位元素（Tc-99m、I-131 など）を保管・輸送し、放射線漏洩を防止するために使用されます。例えば、外径 50㎜、高さ 100㎜ の W-97Ni-Fe 容器は、密度 19.0g/㎤、壁厚 5㎜、重量約 1.1kg で、1MeV ガンマ線の 95%を遮蔽します。

材質と特性：

W-97Ni-Fe 合金（タングステン 97%）、密度 19.0 g/㎤、引張強度 1050 MPa、硬度 460 HV、伸び 12%。質量吸収係数 0.16 ㎠/g、遮蔽効率は鉛より 20%向上。耐熱性 1500° C、爆発性環境下でも溶融しない。極めて高い密閉性、リーク率<10 $^{-6}$ Pa • m ³ /s、無毒性、核医学要件に適合。

製造工程

冷間静水圧プレス 300MPa、真空焼結 1500° C（ 10^{-3} Pa ）、密度 19.0 g/㎤、HIP 処理によ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

る気孔率<0.1%。5 軸 CNC 加工によるキャビティ公差±0.02 mm、表面粗さ Ra 0.4 μm 、ねじ込み式カバー設計により密閉性を確保。5 μm のニッケルメッキまたは 0.1 mm の TiN コーティングをスプレーすることで、耐食性が 15%向上。

適用シナリオと事例

核医学分野では、W-97Ni-Fe 容器（厚さ 6mm、重量 1.5kg）が Tc-99m を保管し、遮蔽率は 96%、線量低減は 1mSv 未満です。輸送においては、厚さ 8mm の容器が I-131 を遮蔽し、安全性を 40%向上させます。ある研究室では、この容器（重量 1.2kg）が放射線漏洩率 0.01%未満で、鉛容器より 10%軽量です。

技術的課題と解決策

課題は、気密性と重量の最適化です。CNC 加工と超音波検査により、ねじ精度±0.01mm を確保しています。肉厚勾配設計（最小 4mm）により重量を 15%削減し、HIP 加工により強度を確保しています。コバルト（2%）を添加することで耐衝撃性が向上し、靭性も 10%向上しています。

8.3.3 高比重タングステン合金医療用タングステン合金針

製品概要

医療用タングステン合金針は、放射性シードの埋め込み（前立腺がん治療など）において、放射線源を正確に送達するために使用されます。例えば、直径 1mm、長さ 20mm の W-95Ni-Fe 針は、密度が 18.8g/cm³、重さが約 0.3g で、高い精度と遮蔽性を備えています。

材質と特性

：W-95Ni-Fe 合金、密度 18.8g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 450HV、伸び 15%。強力な遮蔽能力を有し、厚さ 5mm で β 線を 90%遮蔽します。耐食性：生理食塩水中 1000 時間における質量減少は 0.1%未満、無毒性。浸炭処理後、先端硬度は 600HV に達し、穿刺力は 20%向上します。

製造工程：

タングステン粉末を混合後、500MPa の油圧プレスで細長いビレットを成形し、1480℃で焼結します。密度は 18.8g/cm³です。CNC 旋削公差は±0.01mm、先端角は 30°、表面研磨は Ra 0.2μm です。浸炭処理（950℃、2 時間）により耐摩耗性が 30%向上します。金メッキは 2μm で、生体適合性を向上させます。

適用シナリオと事例：

シード移植において、W-95Ni-Fe 針（長さ 25mm）は、±0.5mm の位置決め精度で I-125 を送達し、治療効果を 15%向上させます。腫瘍生検では、重さ 0.4g の針が組織を穿刺し、損傷を 20%軽減します。ある病院ではこの針（直径 1.2mm）を使用しており、移植成功率は 98%です。

技術的課題と解決

策：課題は細かさと強度です。直径 1mm 未満では高精度の金型が必要となり、SLM 印刷によっ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

て解決されます。また、気孔率は 0.5%未満です。先端部は破損しやすいため、浸炭焼鈍（800℃）処理によって強度を高め、破損率を 0.1%まで低減します。表面は滅菌処理が必要で、多層研磨と紫外線消毒により確実に処理されます。

8.3.4 高密度タングステン合金放射線治療ターゲット

製品概要放射線療法

ターゲットは線形加速器で高エネルギーX 線を生成するために使用されます。例えば、直径 50 mm、厚さ 5 mm の W-95Ni-Fe ターゲットは、密度が 18.8 g/cm³、重量が約 370 g です。電子ビームを照射すると、10 MV の放射線を発生します。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金。密度 18.8g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 450HV、融点 2800℃以上。熱伝導率 140W /(m ・ K) 、耐熱衝撃性が強く、散乱光の 90%を遮蔽する遮蔽能力を備えています。耐摩耗性は鋼鉄の 5 倍で、表面安定性も良好です。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス（CIP）300MPa、焼結温度 1480℃、密度 18.8g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.05mm、表面粗さ Ra 0.4μm 、 0.2mm 厚 ZrO_2コーティング、耐熱温度 2000℃。飛散防止のため、ターゲット表面は Ra 0.1μm に研磨。

適用シナリオと事例：

放射線治療装置において、W-95Ni-Fe ターゲット（厚さ 6mm）は 12MV の放射線を発生し、治療深度を 20%増加させます。陽子線治療では、400g のターゲットを使用することで放射線強度を 15%増加させます。ある病院では、このターゲット（直径 60mm）を使用し、腫瘍への照射精度を 10%向上させました。

技術的課題と解決策

課題は耐熱性と放射線安定性です。ZrO_2コーティングと HIP 処理により耐熱性が 25%向上します。超精密加工により、目標表面平坦度 0.01mm 未満を実現しました。コーティングの最適化により、散乱を 5%低減しました。

8.3.5 高比重タングステン合金医療用保護スクリーン

製品概要

医療用防護スクリーンは、手術室や放射線科などで医療従事者の安全を守るために使用されます。例えば、長さ 500mm、幅 300mm、厚さ 5mm の W-95Ni-Fe 防護スクリーンは、密度 18.8g/cm³、重量約 14kg で、100kV の X 線を 90%遮蔽します。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金、密度 18.8 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 450 HV、伸び 15%。質量吸収係

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

数 0.15 cm²/g、耐腐食性：消毒液中で 1000 時間処理後も質量減少 0.1%未満。疲労強度 500 MPa、取り扱い時の衝撃に耐える。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス 300MPa、焼結温度 1480℃、密度 18.8g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.1%。CNC 切削公差±0.1mm、表面研磨 Ra0.8μm 、ニッケルメッキ 5μm またはクリアコーティングスプレー、美観 20%向上。

適用シナリオと事例：

X 線手術では、手術台に厚さ 6mm の W-95Ni-Fe スクリーンを設置することで、被ばく線量を 0.2mSv まで低減できます。放射線治療室では、厚さ 20kg のスクリーンが 92%の遮蔽率で技師を保護します。ある病院では、このスクリーン（500×400mm）を使用することで、安全性が 15%向上しました。

技術的な課題と解決策

課題は重量と透明性です。中空設計により軽量化を実現し、従来比 10%の軽量化を実現しました。部分的な透明性が必要な場合は、鉛ガラスをはめ込むことで 90%の遮蔽率を維持しています。HIP 処理とコーティングにより耐久性が向上し、寿命は 30%延長しました。

8.3.6 重タングステン合金核廃棄物容器

製品概要

核廃棄物容器は、低レベルまたは中レベル廃棄物を保管し、放射線漏洩を防止するために使用されます。例えば、外径 200mm、高さ 300mm の W-97Ni-Fe 容器は、密度 19.0g/cm³、壁厚 10mm、重量約 11kg で、ガンマ線（2MeV）の 98%を遮蔽します。

材質と特性：

W-97Ni-Fe 合金、密度 19.0 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 460 HV、伸び 12%。質量吸収係数 0.16 cm²/g、耐熱性 1500° C、耐腐食性：酸性溶液中で 1000 時間経過後の質量減少率 0.2%未満。シーリング性能：10^{-7} Pa・m³/s 未満。

製造工程：

冷間静水圧プレス（CIP）300MPa、真空焼結（1500℃）、密度 19.0g/cm³、HIP 処理後の気孔率 0.05%未満。CNC 加工公差±0.05mm、表面粗さ Ra0.4μm 、溶接シール強度 300MPa。0.3mm のセラミックコーティングをスプレー塗布し、耐食性を 20%向上。

適用シナリオと事例

原子力発電所では、W-97Ni-Fe 容器（壁厚 12mm）を用いて Co-60 廃棄物を 99%の遮蔽率で保管しています。廃棄物輸送においては、15kg 容器を使用することで環境を保護し、安全性を 50%向上させます。ある施設では、この容器（重量 12kg）を使用することで、被ばく線量を 0.1mSv まで低減しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

技術的課題と解決策

課題はシーリングと耐久性です。電子ビーム溶接（5kW）を使用し、母材の 95%の強度を実現しています。長期的な腐食はセラミックコーティングと HIP 処理によって解決され、寿命は40%向上しました。壁厚を最適化することで重量は 10%削減されました。

8.3.7 重タングステン合金ガンマナイフ部品

製品概要

ガンマナイフのコンポーネント（コリメータなど）は、ガンマ線を集束させて腫瘍を治療するために使用されます。例えば、W-90Ni-Fe コリメータは、口径 2～5mm、密度 18.5g/cm³、重量約 500g で、Co-60 線の 92%を遮蔽します。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 400HV、伸び率 20%。質量吸収係数 0.14cm²/g、耐熱性 1500℃、金メッキにより導電性が 20%向上。疲労強度 500MPa、高周波振動にも耐えます。

製造工程：

冷間静水圧プレス 250MPa、焼結 1450℃、密度 18.5g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.1%。5 軸 CNC 加工、穴径公差±0.02mm、表面 Ra0.2μm 、金メッキ 2μm 、抵抗率 4μΩ・ cm まで低減。動的バランス試験、偏心<5μm 。

応用シナリオと事例：

ガンマナイフでは、W-90Ni-Fe コリメータ（重量 600g）が放射線を集束させ、精度を 15%向上させます。脳腫瘍治療では、3mm 口径のコリメータを使用することで照射効率が 20%向上します。ある病院では、このコリメータ（重量 550g）を使用することで、治療成功率が 10%向上しました。

技術的課題と解決策

課題は穴径精度と耐久性です。5 軸加工とレーザードリリングにより、±0.01mm の精度を確保しています。TiN コーティングにより耐摩耗性を 20%向上。穴形状の最適化により飛散を 5%低減。

8.4 重タングステン合金工業用工具および部品

重タングステン合金が工業分野で使用される主な理由は、高密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた耐摩耗性（硬度 400～600 HV）、高強度（700～1200 MPa）、優れた安定性であり、切削工具、金型、プレスヘッド、振動減衰部品、掘削工具、軸受部品、研削スリーブ、重機のカウンターウェイトなどの産業用工具や部品の製造に最適な材料です。これらの製品は、機械加工、油抽出、製造装置などの分野で効率と耐久性を向上させるために広く使用されています。以下は、各産業用工具と部品の詳細な紹介です。

8.4.1 重タングステン合金切削工具

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

製品概要

タングステン合金切削工具は、鋼やチタン合金などの硬質材料の加工に使用され、高い硬度と耐摩耗性で知られています。例えば、直径10mm、長さ50mmのW-95Ni-Fe合金ドリルは、密度が18.8g/cm³、重量が約74gです。従来の超硬工具に比べて耐摩耗性が70%向上し、寿命は2倍長くなります。

材質と特性：

W-95Ni-Fe合金（タングステン95%、ニッケル鉄7:3）、密度18.8g/cm³、引張強度1000MPa、硬度450HV、伸び15%。浸炭処理後、硬度は600HVに達し、耐摩耗性は鋼の5倍です。熱伝導率は140W/（m・K）、耐熱性は1000℃で、切削中に軟化しません。破壊靭性（K_IC）は約30MPa・m＾（1/2）で、耐衝撃性が強いです。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径3～5μm、純度99.9%以上）をニッケル鉄粉末と混合し、冷間静水圧プレス（CIP）で300MPaの圧力で加圧成形します。成形体の密度は13g/cm³です。1480℃の水素雰囲気下で2時間焼結すると、密度は18.8g/cm³となり、密度は99%以上になります。熱間静水圧プレス（HIP、200MPa、1400℃、1時間）により微細孔が除去され、気孔率は0.1%未満になります。

CNC加工公差±0.02 mm、刃先角度60°、表面仕上げRa 0.4 μmです。浸炭処理（950℃、3時間）により耐摩耗性が30%向上します。一部の工具には0.1 mm厚のTiNコーティングが施され、硬度は650 HVまで向上しています。

適用シナリオと事例：

航空機製造において、W-95Ni-Feドリル（直径12mm）はチタン合金を加工でき、超硬工具の2倍の300時間という長寿命を実現しました。自動車部品加工において、100gのフライスカッターは鋼板部品の切削効率を20%向上させます。ある工場では、この工具（長さ60mm）を使用して加工コストを15%、スクラップ率を10%削減しました。

技術的課題と解決策

課題は、刃先の耐久性と熱安定性です。HIP処理と浸炭処理により、刃先のチッピングを0.5%まで低減しました。高温軟化は、TiNコーティングとクーラント（流量10 L/分）によって抑制され、温度は200℃未満です。ナノパウダー（粒子径<1 μm）によって結晶粒の均一性が向上し、耐摩耗性が20%向上しました。

8.4.2 高比重タングステン合金金型およびパンチ

製品概要

タングステン合金製のダイスとパンチは、高圧と摩耗に耐えるため、スタンピング、鍛造、押出成形工程で使用されます。例えば、長さ100mm、幅50mm、厚さ20mmのW-93Ni-Feダイスは、密度18.5g/cm³、重量約925g、耐圧2000MPaです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

材料と特性

W-93Ni-Fe 合金（タングステン 93%）、密度 18.5g/cm³、引張強度 1050MPa、硬度 420HV、伸び 18%。耐摩耗性は鋼の 4 倍、疲労強度は 550MPa で、10 サイクル繰り返しても亀裂は発生しません。耐熱性 1200℃、変形量<0.05mm。表面耐食性：油汚染 1000 時間における質量減少<0.2%。

製造プロセス：

タングステン粉末を混合後、油圧プレス 600MPa で加圧し、1450℃で焼結。密度 18.5g/cm³、HIP 処理により気孔率<0.1%。CNC フライス加工公差±0.05mm、表面 Ra 0.8μm、浸炭処理（950℃、3 時間）、硬度 550HV まで増加。0.2mm の Al_2O_3コーティングを噴霧、耐熱性 1500℃。

適用シナリオと事例：

鋼板のプレス加工において、W-93Ni-Fe ダイ（重量 1kg）は 100 万回の打ち抜き加工が可能で、摩耗がなく、鋼製ダイの 3 倍の寿命を誇ります。鍛造加工において、1.5kg のパンチでアルミニウム合金の加工が可能で、効率が 25%向上します。ある工場では、このダイ（100×60mm）を使用することで、生産精度が 15%向上し、メンテナンスコストが 20%削減されました。

技術的課題と解決策

課題は耐圧性と表面摩耗です。耐圧性は HIP 処理とコバルト（2%）添加によって向上し、強度は 10%向上しました。摩耗は浸炭処理とセラミックコーティングによって解決し、寿命は 30%向上しました。複雑な形状は SLM によって±0.03mm の精度で造形されます。

8.4.3 重タングステン合金制振部品

製品概要

振動減衰部品は、工作機械や装置の振動を低減し、運転安定性を向上させるために使用されます。例えば、長さ 100mm、幅 20mm、厚さ 10mm の W-90Ni-Fe 製制振ブロックは、密度 18.5g/cm³、重量 370g で、鋼板に比べて減衰率が 40%高くなります。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び率 20%。弾性率 400 GPa、音速 4400 m/s、減衰係数は鋼より 30%高い。耐熱性 500° C、耐腐食性：1000 時間湿気中での質量減少は 0.1%未満。

製造プロセス：

250MPa で冷間静水圧プレス、1450℃で焼結、密度 18.5g/cm³。CNC 加工公差±0.1mm、表面 Ra1.6μm、0.2mm 厚 Al_2O_3コーティングをスプレー、耐熱温度 1500℃。微細孔設計（直径 50μm）によりエネルギー損失が向上し、減衰率が 10%向上します。

適用シナリオと事例：

CNC 工作機械では、重量 500g のダンピングブロックを使用することで、振動を 40%低減し、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

加工精度を10%向上させました。パンチプレスでは、重量1kgのダンピングピースを使用することで、騒音を5dB低減し、寿命を20%延ばしました。ある工場では、このダンピングピース（長さ120mm）を使用することで、装置の安定性が15%向上し、振幅は2mmに低減しました。

技術的課題と解決

策：減衰効率と設置が課題です。高周波振動（>1000Hz）はマイクロホールによって最適化され、減衰率が15%向上します。設置時のせん断力（>5000N）はチタンボルトによって対処します。耐久性：HIP処理により疲労寿命が25%向上します。

8.4.4 高密度タングステン合金掘削工具

製品概要

掘削工具は石油、ガス、地熱採掘に使用され、耐摩耗性と軽量性で知られています。例えば、直径50mm、長さ200mmのW-95Ni-Feドリルビットは、密度が18.8g/cm³、重量は約3.7kgで、寿命はスチールドリルビットの3倍です。

材質と特性：

W-95Ni-Fe合金、密度18.8g/cm³、引張強度1000MPa、硬度450HV（浸炭処理後600HV）。耐摩耗性は鋼の5倍、疲労強度は500MPa、耐熱性は1000℃。耐食性：泥中1000時間における質量減少率は0.5%未満。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス（300MPa）、焼結温度1480℃、密度18.8g/cm³、HIP処理（気孔率<0.1%）。CNC加工公差±0.05mm、エッジ浸炭処理（950℃、3時間）、厚さ0.2mmのTiNコーティング（硬度650HV）。SLM印刷による複雑な構造、精度±0.03mm。

適用シナリオと事例：

深井戸掘削において、W-95Ni-Feドリルビット（重量4kg）は5,000mの岩盤を掘削し、300時間の耐用年数を達成しました。海洋掘削では、重量5kgの工具の耐摩耗性が40%向上しました。油田でこのドリルビット（直径60mm）を使用したところ、掘削効率が20%向上し、コストが15%削減されました。

技術的課題と解決策

課題は耐摩耗性と高温です。浸炭処理とTiNコーティングにより耐久性が30%向上します。高温は熱伝導率と冷却剤を最適化し、300℃未満に抑えることで制御します。構造最適化により重量を10%削減します。

8.4.5 重タングステン合金軸受部品

製品概要

ベアリング部品は、高密度と耐摩耗性を備え、重機に使用されます。例えば、外径80mm、内

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

径 40mm、厚さ 20mm の W-90Ni-Fe 製ベアリングリングは、密度 18.5g/cm³、重量約 1.8kg で、鋼鉄に比べて 50%高い耐荷重性を備えています。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 400HV、伸び 20%。耐摩耗性は鋼の 4 倍、疲労強度は 500MPa、耐熱性は 800℃。摩擦係数 0.3、耐腐食性は良好。

製造工程：

油圧プレス（600MPa 加圧）、1450℃焼結、密度 18.5g/cm³、HIP 処理（気孔率<0.1%）。CNC 旋削公差±0.02mm、表面粗さ Ra0.4μm 、浸炭処理硬度 550HV。0.1mm 厚 MoS_2コーティングをスプレー塗布、摩擦低減率 20%。

適用シナリオと事例：

掘削機では、2kg のベアリングリングが 100 トンの荷重に耐え、寿命が 30%向上しました。風力発電設備では、1.5kg の部品が摩耗を 20%低減しました。工場では、このベアリング（外径 100mm）を使用し、動作安定性が 15%向上しました。

技術的課題と解決策

課題は摩擦と精度です。MoS_2コーティングと研磨により摩擦を 15%低減。5 軸加工により±0.01mm 未満の公差を実現。HIP 処理と浸炭処理により耐久性が向上し、寿命は 25%延長しました。

8.4.6 重タングステン合金研削スリーブ

製品概要

研削スリーブは、研削装置において軽量化と耐摩耗性を提供するために用いられます。例えば、内径 30mm、外径 50mm、長さ 100mm の W-93Ni-Fe スリーブは、密度 18.5g/cm³、重量約 1.4kg で、耐摩耗性は鋼鉄の 4 倍です。

材質と特性

：W-93Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 420 HV、伸び 18%。優れた耐摩耗性、疲労強度 550 MPa、耐熱性 1000° C。耐食性：研磨材中で 1000 時間処理後の質量減少率 0.2%未満。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス 300MPa、焼結温度 1450℃、密度 18.5g/cm³、HIP 処理後の気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.05mm、表面粗さ Ra0.8μm 、浸炭硬度 550HV。0.2mm 厚 Al_2O_3コーティングを噴霧、耐熱温度 1500℃。

適用シナリオと事例：

グラインダーでは、 1.5kg のスリーブを使用することでセラミックを粉砕し、寿命を 30%延長します。鉱石処理では、2kg のスリーブを使用することで耐摩耗性が 40%向上します。工場

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

では、このスリーブ（長さ 120mm）を使用することで、効率が 15%向上し、メンテナンスサイクルが 20%延長されます。

技術的課題と解決策

課題としては、内壁の耐摩耗性と熱膨張が挙げられます。浸炭処理とコーティングにより耐久性が 25%向上します。熱膨張は焼鈍処理（900℃）により 80%低減し、変形量は 0.01mm 未満に抑えられます。精度は超精密加工により実現されます。

8.4.7 タングステン合金製重機用カウンターウェイト

製品概要

耐久性の高い工作機械のカウンターウェイトは、大型装置のバランスをとったり、振動を減らしたりするために使用されます。たとえば、長さ 300 mm、幅 100 mm、厚さ 50 mm の W-90Ni-Fe カウンターウェイト ブロックは、密度が 18.5 g/cm³、重量が 13.9 kg で、スチール ブロックより 55% 小さくなっています。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び 20%。疲労強度 500 MPa、10 ⁷サイクルに耐える。耐熱性 500° C、耐腐食性 1000 時間、油汚染下での質量減少率 0.1%未満。

製造工程：

冷間静水圧プレス（CIP）300MPa、焼結温度 1450℃、密度 18.5g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.2mm、表面粗さ Ra1.6μm 、 0.1mm の保護層をスプレー塗布し、耐食性を 30%向上。大型カウンターウェイトは接合されており、ろう付け強度は 200MPa。

適用シナリオと事例：

旋盤では、20kg のカウンターウェイトにより振動が 40%低減し、精度が 10%向上します。フライス盤では、15kg のカウンターウェイトにより安定性が 15%向上します。ある工場では、このカウンターウェイト（重量 18kg）を使用することで、加工騒音が 10dB 低減し、耐用年数が 20%向上しました。

技術的課題と解決策

課題は重量分布とコストでした。多点プレスと HIP により、偏差 0.1 g/cm³ 未満の密度均一性を実現しました。粉末のリサイクルによりコストを 20%削減しました。フレキシブルガスケットにより取り付けを最適化し、せん断力を 5000 N まで増加させました。

8.5 重タングステン合金電子機器およびエネルギー製品

電子・エネルギー分野における重タングステン合金の優れた特徴は、高密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた熱伝導率（120～180 W/(m・K)）、高強度（700～1200 MPa）、高温耐性（融点＞2800℃）、優れた放射線遮蔽能力にあります。そのため、電極材料、ヒートシンク、原

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

子炉部品、電池カウンターウェイト、太陽光発電機器部品、X 線管陽極ターゲット、風力タービンカウンターウェイトなどの製造に最適な材料となっています。これらの製品は、電子機器、エネルギー変換、発電システムにおいて重要な役割を果たし、性能と信頼性を向上させます。以下は、各電子・エネルギー製品の詳細な紹介です。

8.5.1 高密度タングステン合金電極材料

製品概要

重タングステン合金電極材料は、放電加工（EDM）、抵抗溶接、プラズマ切断などに使用され、高い導電性と耐摩耗性で知られています。例えば、直径 10mm、長さ 50mm の W-80Cu 合金電極は、密度が 17.0g/cm³、重量が約 67g です。その導電性は純銅より 20%高く、耐摩耗性は鋼鉄の 5 倍です。

材質と特性：

W-80Cu 合金（タングステン 80%、銅 20%）、密度 17.0 g/cm³、引張強度 700 MPa、硬度 380 HV、伸び 10%。電気伝導率 45% IACS（国際軟銅規格）、熱伝導率 180 W /(m • K) 、耐熱温度 1500℃。アーク浸食に対する耐性が強く、1000 回放電後の質量減少率は 0.5%未満です。耐腐食性：1000 時間における水分中における質量減少率は 0.2%未満です。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径 3～5μm 、純度 99.9%以上）を銅粉末と混合し、冷間静水圧プレス（CIP）で 250MPa で加圧成形します。成形体の密度は 11g/cm³ です。1350℃の水素雰囲気下で 2 時間焼結すると、銅相が溶融してタングステンマトリックスに浸透し、密度は 17.0g/cm³、密度は 98%以上になります。熱間静水圧プレス（HIP、150MPa、1300℃、1 時間）により微細孔が除去され、気孔率は 0.1%未満になります。

CNC 旋削公差±0.02 mm、表面研磨 Ra 0.4 μm 、金メッキ 2 μm 、抵抗率 3 μΩ • cm まで低減。電極先端は浸炭処理（900℃、2 時間）され、硬度は 450 HV まで向上。

適用シナリオと事例：

放電加工において、W-80Cu 電極（直径 12mm）は金型鋼の加工に 500 時間という長寿命を実現し、銅電極の 3 倍の寿命を誇ります。抵抗溶接では、100g の電極でアルミ板を溶接し、効率を 25%向上させることができます。ある工場では、この電極（長さ 60mm）を使用することで、加工精度を 15%向上させ、アーク損失を 20%削減しました。

技術的課題と解決策

課題は導電性と耐摩耗性のバランスです。銅含有量を 20～30%に最適化することで導電性が 10%向上し、HIP 処理により強度が 15%向上します。金メッキと浸炭処理によりアーク侵食が 30%低減します。多層研磨により表面粗さを制御し、放熱効率を 10%向上させます。

8.5.2 高密度タングステン合金ヒートシンク（ラジエーター）

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

製品概要

ヒートシンクは、高熱伝導率と密度により、高出力電子デバイス（CPU、LED など）の熱を放散し、熱管理を最適化するために使用されます。たとえば、長さ 50mm、幅 50mm、厚さ 5mm の W-85Cu 合金ヒートシンクの密度は 17.5g/cm³、重量は約 219g で、放熱効率はアルミニウムより 50%高くなります。

材質と特性：

W-85Cu 合金（タングステン 85%、銅 15%）、密度 17.5 g/cm³、引張強度 800 MPa、硬度 400 HV、伸び 8%。熱伝導率 170 W /(m • K) 、純タングステン（174 W /(m • K) ）よりわずかに低いが、加工性は良好。耐熱性 1500° C、熱膨張係数 6.5 × 10 $^{-6}$ /K、シリコンチップ（4.2 × 10 $^{-6}$ /K）に適合、変形量<0.01 mm。

製造プロセス：

タングステン粉末と銅粉末を混合し、300MPa の冷間静水圧加圧、1350℃で焼結、密度 17.5g/cm³、HIP 処理により気孔率<0.1%を実現。CNC フライス加工公差±0.05mm、表面 Ra 0.8μm 、マイクロチャネル設計（幅 0.5mm）により放熱面積が 20%増加。ニッケルメッキ 5μm 、耐食性 15%向上。

適用シナリオと事例：

サーバーCPU において、W-85Cu ヒートシンク（重量 250g）は 200W の放熱能力と 15℃の温度低下を実現しました。高出力 LED においては、重量 150g のヒートシンクで LED の寿命を 30%延長できます。ある電子機器工場でこのヒートシンク（50×50mm）を使用したところ、チップの動作温度が 60℃まで低下し、性能が 10%向上しました。

技術的課題と解決

策：課題は熱膨張率の整合と放熱効率です。銅含有量を 15～20%に調整し、熱膨張偏差を 10%未満に抑えました。レーザー加工によりマイクロチャネルを形成し、放熱性を 25%向上させました。中空設計により重量を 15%削減し、HIP 処理により強度を確保しました。

8.5.3 重タングステン合金原子炉部品

製品概要

高密度と高い放射線遮蔽性能を活かした、シールドブロックや制御棒スリーブなどの原子炉構成部品。例えば、長さ 200mm、幅 50mm、厚さ 20mm の W-97Ni-Fe シールドブロックは、密度 19.0g/cm³、重量約 1.9kg で、ガンマ線（2MeV）の 98%を遮蔽します。

材質と特性：

W-97Ni-Fe 合金、密度 19.0 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 460 HV、伸び 12%。質量吸収係数 0.16 cm²/g、耐熱性 1500° C、耐腐食性：冷却液中で 1000 時間連続使用時の質量減少率 0.2%未満。疲労強度 500 MPa、耐熱衝撃性。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

製造工程

冷間静水圧プレス 300MPa、真空焼結 1500° C（ 10^{-3} Pa ）、密度 19.0 g/cm³、HIP 処理後の気孔率<0.05%。CNC 加工公差±0.05 mm、表面 Ra 0.4 μm、0.3 mm の ZrO_2 コーティングをスプレー、耐熱性 2000° C。接合部のろう付け強度 300 MPa。

適用シナリオと事例：

加圧水型原子炉では、W-97Ni-Fe 遮蔽ブロック（重量 2kg）を炉心の外側に配置することで、放射線量を 0.1mSv まで低減します。高速中性子炉では、重量 3kg のケーシングが制御棒を保護し、耐用年数を 20%延長します。原子力発電所では、この部品（200×60mm）を使用することで、安全性が 15%向上し、メンテナンスサイクルが 25%延長されます。

技術的課題と解決策

課題としては、耐放射線性と高温性があります。ZrO_2コーティングと HIP 処理により耐久性が 30%向上します。また、焼鈍処理（900℃）によりマイクロクラックが 80%減少します。構造最適化により、強度を低下させることなく重量を 10%削減します。

8.5.4 高比重タングステン合金バッテリーカウンターウェイト

製品概要

バッテリーカウンターウェイトは、電気自動車やエネルギー貯蔵システムにおいて、重量配分のバランスをとるために使用されます。例えば、長さ 100mm、幅 30mm、厚さ 10mm の W-90Ni-Fe カウンターウェイトは、密度が 18.5g/cm³、重量は約 555g で、スチールカウンターウェイトよりも 55%軽量です。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び 20%。疲労強度 500 MPa、耐熱性 500° C、耐腐食性：電解液中で 1000 時間処理後の質量減少率 0.1%未満。熱伝導率 130 W/(m・K)、良好な放熱性。

製造プロセス：

油圧プレス（600MPa）、焼結温度 1450℃、密度 18.5g/cm³、HIP 処理（気孔率<0.1%）。CNC 加工公差±0.1mm、表面粗さ Ra1.6μm、0.1mm の保護層をスプレー塗布し、耐食性を 20%向上。特殊形状部品は SLM（表面層形成技術）により、精度±0.05mm で造形。

適用シナリオと事例：

電気自動車では、バッテリーパックに 1kg のカウンターウェイトを配置することで、車軸荷重比のバランスを取り、サスペンション寿命を 20%向上させます。エネルギー貯蔵キャビネットでは、2kg のカウンターウェイトを配置することで安定性を 15%向上させます。ある自動車会社では、このカウンターウェイト（重量 800g）を使用することで、ハンドリング性能を 10%向上させ、エネルギー消費量を 5%削減しました。

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

技術的課題と解決策

課題はコストと設置です。粉末のリサイクルによりコストを 20%削減します。3D プリントによる特殊形状設計により設置スペースが最適化され、重量偏差は ±2g 未満です。HIP 処理により耐久性が向上し、寿命が 25%延長しました。

8.5.5 重タングステン合金太陽光発電機器部品

製品概要

重りや支柱などの太陽光発電設備部品は、パネルの角度と安定性を調整します。例えば、長さ 150mm、幅 50mm、厚さ 20mm の W-90Ni-Fe 重りは、密度が 18.5g/cm³、重量が約 1.4kg で、耐風性が 20%向上します。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び 20%。耐熱性 500℃、耐腐食性、屋外 1000 時間での質量減少率 0.1%未満。疲労強度 500 MPa、耐風荷重。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス 300MPa、焼結 1450℃、密度 18.5g/cm³、HIP 処理後の気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.1mm、表面粗さ Ra1.6μm、0.2mm 厚 Al_2O_3コーティングをスプレー、耐熱性 1500℃。接合部のろう付け強度 200MPa。

適用シナリオと事例：

太陽光発電所では、2kg のカウンターウェイトがパネルの傾斜を調整し、発電効率を 10%向上させます。可搬型太陽光パネルでは、1kg の支持台が耐風性を 15%向上させます。あるプロジェクトでは、このカウンターウェイト（重量 1.5kg）を使用することで、安定性が 20%向上し、寿命が 30%向上しました。

技術的課題と解決策

課題は耐候性と重量です。Al_2O_3コーティングと HIP 処理により耐久性が 25%向上します。中空設計により重量は 15%削減されます。設置は 5000N のせん断力を持つボルトで最適化されます。

8.5.6 重タングステン合金 X 線管陽極ターゲット

製品概要

X 線管陽極ターゲットは、高エネルギーX 線を生成するために使用されます。例えば、直径 50mm、厚さ 5mm の W-95Ni-Fe ターゲットは、密度 18.8g/cm³、重量約 370g で、10MV の電子衝撃に耐えることができます。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金。密度 18.8g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 450HV、融点 2800℃以上。熱伝導

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

率 140W/(m・K)、耐熱衝撃性に優れ、散乱光を 90%遮断します。耐摩耗性は鋼鉄の 5 倍、表面安定性は優れています。

製造プロセス：
冷間静水圧プレス（CIP）300MPa、焼結温度 1480℃、密度 18.8g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.05mm、表面 Ra 0.1μm、 ZrO_2コーティング 0.2mm をスプレー、耐熱温度 2000℃。ターゲット表面研磨により、飛散量を 5%低減。

応用シナリオと事例：
医療用 X 線管において、W-95Ni-Fe ターゲット（厚さ 6mm）は 12MV の線を生成し、効率を 15%向上させます。産業試験では、400g のターゲットを使用することで透過率が 20%向上します。ある装置では、このターゲット（直径 60mm）を使用することで、線強度が 10%向上し、寿命が 25%向上しました。

技術的課題と解決策
課題は耐熱性と安定性です。ZrO_2コーティングと HIP 処理により耐熱性が 30%向上しました。超精密加工により、目標とする表面平坦度 0.01mm 未満を達成しました。コーティングの最適化により、飛散量を 5%削減しました。

8.5.7 高比重タングステン合金風力タービンカウンターウェイト

製品概要
風力タービンのカウンターウェイトは、ブレードやナセルのバランス調整に使用されます。例えば、長さ 200mm、幅 100mm、厚さ 50mm の W-90Ni-Fe カウンターウェイトブロックは、密度が 18.5g/cm³、重量が約 9.25kg で、鋼製ブロックに比べて 55%軽量です。

材質と特性：
W-90Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び 20%。疲労強度 500 MPa、10^7サイクルに耐える。耐熱性 500° C、耐腐食性：海風 1000 時間における質量減少率 0.1%未満。

製造工程：
冷間静水圧プレス 300MPa、焼結 1450℃、密度 18.5g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.2mm、表面粗さ Ra1.6μm、0.1mm の保護層をスプレー塗布、耐食性 20%向上。大型カウンターウェイト接合部のろう付け強度 200MPa。

適用シナリオと事例：
洋上風力発電では、10kg のカウンターウェイトが 3MW のブレードのバランスを保ち、振動を 30%低減します。陸上風力発電では、15kg のカウンターウェイトがキャビンの安定性を 15%向上させます。ある風力発電所では、このカウンターウェイト（重量 12kg）を使用することで、発電効率が 10%向上し、寿命が 20%延びています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

技術的課題と解決策

課題は耐候性と重量分散です。コーティングとHIP処理の耐久性は25%向上しました。多点加圧により密度均一性を制御し、偏差は 0.1g/cm³ 未満です。フレキシブル接続により設置を最適化し、耐荷重は 6000N まで向上しました。

8.6 重タングステン合金のカスタマイズ製品

高密度タングステン合金のカスタマイズ製品は、その高い密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた機械的特性（700～1200 MPa）、耐摩耗性、機械加工性を活かし、パーソナライズされた設計を通じて特定のニーズに対応します。これらの製品には、3D プリントタングステン合金部品、特殊形状のカウンターウェイト、美術品や装飾品、実験機器部品、微細精密部品、暗号通貨や銀行カードなどが含まれ、産業、科学研究、芸術、金融の分野で広く使用されています。カスタマイズされた設計と、高度な製造技術（3D プリントなど）および精密機械加工を組み合わせることで、製品は独自の性能と外観を備えています。以下は、各カスタマイズ製品の詳細な紹介です。

8.6.1 高密度タングステン合金 3D プリント部品

製品概要

3D プリントタングステン合金部品は、航空、医療などの分野の特殊なニーズを満たすため、積層造形技術を用いて複雑な形状で製造されます。例えば、直径 50mm で内部にハニカム構造を持つ W-90Ni-Fe 部品は、密度 18.5g/cm³、重量約 500g で、強度を維持しながら 10%の軽量化を実現しています。

材質と特性：

W-90Ni-Fe 合金（タングステン 90%、ニッケル-鉄 7:3）、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び 20%。耐熱性 500° C、疲労強度 500 MPa、10^7サイクルに耐えます。耐腐食性：1000 時間以内の水分中での質量減少は 0.1%未満。3D プリント後の気孔率は 1%未満で、従来の焼結性能に近い値です。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径 1～3μm、純度 99.9%以上）をニッケル鉄粉末と混合し、選択的レーザー溶融（SLM）技術を用いて、レーザー出力 3000W、層厚 30μm、印刷速度 10cm³/h で造形した。印刷後、熱間等方圧加圧（HIP、圧力 200MPa、1400℃、1 時間）により密度を 18.5g/cm³ に高め、気孔率を 0.5%に低減した。

後加工には、公差±0.03 mm、表面粗さ Ra 0.8 μm の CNC 仕上げが含まれます。複雑なキャビティ形状でも金型は不要で、設計自由度が 50%向上します。表面には、耐熱性 1500° C の 0.1 mm 厚 Al_2O_3コーティングをスプレー塗布できます。

応用シナリオと事例：

航空分野では、W-90Ni-Fe 製の特殊形状部品（重量 600g）をエンジンのカウンターウェイトに使用し、体積を 15%削減しました。医療分野では、重量 300g のインプラントステントの強度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

を 20%向上させました。ある航空宇宙企業は、この技術を用いて W-90Ni-Fe 製の部品（50×50mm）を 3D プリントし、開発サイクルを 30 日から 15 日に短縮し、性能の安定性を 10%向上させました。

技術的課題と解決策

課題は気孔率と精度です。SLM 印刷における気孔率は、レーザーパラメータ（出力 3500W）を最適化することで 0.5%まで低減しました。精度は HIP と CNC 後処理により±0.02mm まで向上しました。粉末の流動性は、0.5%のナノ酸化物を添加することで改善され、印刷成功率は 20%向上しました。

8.6.2 高比重タングステン合金特殊形状カウンターウェイト

製品概要

特殊形状のカウンターウェイトは、円弧状や多孔カウンターウェイトなど、非標準アプリケーションのバランス調整ニーズに対応します。例えば、長さ 100mm、幅 30mm、厚さ 20mm の W-95Ni-Fe 円弧状カウンターウェイトは、密度 18.8g/cm³、重量約 564g で、複雑な設置スペースにも適応できます。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金、密度 18.8 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 450 HV、伸び 15%。耐熱性 1000° C、疲労強度 500 MPa、耐食性：海水中 1000 時間における質量減少率 0.2%未満。形状の多様性はカスタム設計により実現可能で、重量偏差は±2 g 未満です。

製造プロセス：

タングステン粉末を混合後、300MPa の特殊金型で冷間静水圧プレスを行い、1450℃で焼結します。密度は 18.8g/cm³、HIP 処理により気孔率は 0.1%未満です。複雑な形状は SLM（空間光変調器）で印刷され、レーザー出力は 3000W、精度は±0.05mm です。CNC 加工による許容誤差は±0.03mm、表面粗さは Ra1.6μm です。ニッケルメッキは 5μm 厚で、耐食性を 10%向上させます。

応用シナリオと事例：

ドローンでは、500g の円弧状カウンターウェイトが重心を調整し、安定性を 15%向上させます。船舶では、1kg の多孔質カウンターウェイトが重量を 10%軽減し、耐風・耐波性を 20%向上させます。機械工場では、W-95Ni-Fe カウンターウェイト（800g）を使用し、設置スペースの利用率を 30%向上させ、99%の性能安定性を実現しています。

技術的課題と解決策

課題は形状精度と生産効率です。複雑な金型を 3D プリントで成形することで、開発サイクルを 50%短縮しました。HIP 試験と動的バランス試験により、偏心率 5μm 未満でバッチの均一性を最適化しました。粉末のリサイクルによりコストを 20%削減しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.6.3 高密度タングステン合金の美術品および装飾品

製品概要

高密度タングステン合金の美術品や装飾品は、彫刻や宝飾品などに使用され、その高い密度と光沢が質感を高めます。例えば、直径 30mm の W-93Ni-Fe 球形装飾品は、密度が 18.5g/cm³、重量が約 260g と、重厚感と美しさを兼ね備えています。

材質と特性：

W-93Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 420 HV、伸び 18%。耐摩耗性は鋼の 4 倍、耐汗性は 1000 時間で質量減少 0.1%未満。表面は Ra 0.2 μm に研磨され、高光沢。金メッキにより導電性が 20%向上。

製造工程：

タングステン粉末を混合後、油圧プレスで 500MPa で加圧し、1450℃で焼結することで、密度は 18.5g/cm³となります。CNC 加工公差は±0.05mm、表面は Ra0.1μm の多層研磨仕上げ、金メッキまたはロジウムメッキ（2～5μm）を施し、美観は 30%向上します。芸術的なディテールは、深さ 0.1～0.5mm のレーザー彫刻によって実現されます。

応用シナリオと事例：

彫刻作品では、1kg の W-93Ni-Fe を使用することで質感が向上し、市場価値が 20%向上します。宝飾品では、50g のペンダントを使用することで耐摩耗性が 30%向上します。あるアーティストは、この素材（300g）を使用して装飾用のボールを制作しました。研磨すると貴金属と同等の輝きを放ち、売上が 15%増加しました。

技術的課題と解決策

課題としては、表面仕上げとコストが挙げられます。研磨には多段研磨ホイールと化学研磨が必要であり、これにより光沢が 25%向上します。小ロット生産とリサイクルによりコストは 15%削減されます。微細な彫刻はレーザー精度（±0.01 mm）により実現されます。

8.6.4 重タングステン合金実験機器部品

製品概要

実験機器部品は、重力計のカウンターウェイトなどの科学研究機器に使用されます。例えば、長さ 50mm、幅 20mm、厚さ 10mm の W-97Ni-Fe 部品は、密度 19.0g/cm³、重量約 190g で、高精度の質量分布を実現します。

材質と特性：

W-97Ni-Fe 合金、密度 19.0 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 460 HV、伸び 12%。熱膨張係数 4.5 × 10^{-6} /K、変形量<0.01 mm、耐熱温度 1500° C。耐食性：実験室環境で 1000 時間試験した場合の質量減少<0.1%。

製造工程：

冷間静水圧プレス（CIP）300MPa、真空焼結（1500℃）、密度 19.0g/cm³、HIP 処理（気孔率

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

<0.05%）。5 軸 CNC 加工による公差±0.01mm、表面粗さ Ra0.4μm、耐腐食性向上のためニッケルメッキ 5μm。動バランス試験による偏心<5μm。

応用シナリオと事例

：重力計では、200g のカウンターウェイトを使用することで測定精度が 0.005%向上しました。遠心分離機では、500g の部品を使用することで回転速度(10,000rpm)が安定し、誤差が 10%減少しました。ある研究機関では、W-97Ni-Fe 部品（重量 250g）を使用することで、実験の再現性が 15%向上しました。

技術的課題と解決策

課題は精度と安定性です。超精密加工により、±0.005 mm 未満の公差を実現しています。熱膨張は焼鈍処理（900℃）により最適化され、変形は 80%低減されます。重量偏差は高精度プレス加工により±1g 未満に抑えられています。

8.6.5 高密度タングステン合金微細精密部品

製品概要

マイクロ精密部品は、レンズのカウンターウェイトなど、電子機器や光学機器に使用されています。例えば、直径 5mm、厚さ 2mm の W-95Ni-Fe 部品は、密度 18.8g/cm³、重量約 0.74g と、高精度かつ小型です。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金、密度 18.8 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 450 HV、伸び 15%。耐摩耗性は鋼の 5 倍、耐熱性は 1000° C、耐腐食性は 1000 時間水分中における質量減少率が 0.1%未満。表面粗さ Ra 0.2 μm。

製造プロセス：

タングステン粉末を混合後、マイクロモールドプレス（300MPa）し、1480℃で焼結します。密度は 18.8g/cm³、HIP 処理により気孔率は 0.1%未満です。マイクロマシニング技術（CNC またはレーザーカット）による公差は±0.005mm、表面研磨は Ra 0.1μm、導電性向上のため金メッキは 2μm です。

応用シナリオと事例：

カメラレンズでは、1g のカウンターウェイトが焦点距離を調整し、精度を 10%向上させます。マイクロモーターでは、0.5g の部品が回転速度を 15%安定化させます。ある光学機器メーカーでは、この部品（直径 6mm）を使用することで、組み立て誤差を 5%削減し、性能を 20%向上させています。

技術的課題と解決策

課題は微細サイズと強度です。SLM プリンティングにより、金型精度は±0.002 mm まで向上しました。HIP 処理と浸炭処理（硬度 600 HV）により強度は 15%向上しました。表面は完璧な仕上がりが求められますが、これは多層研磨によって解決されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.6.6 重タングステン合金暗号通貨

製品概要

重厚なタングステン合金製の暗号通貨は、デジタル資産の価値を象徴する物理的な記念コインです。例えば、直径 40mm、厚さ 3mm の W-93Ni-Fe コインは、密度 18.5g/cm³、重量約 87g で、高級感のある質感を誇ります。

材質と特性：

W-93Ni-Fe 合金、密度 18.5 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 420 HV、伸び 18%。耐摩耗性は鋼の 4 倍、耐汗性は 1000 時間で質量減少 0.1%未満。表面は Ra 0.1 μm に研磨され、金メッキにより光沢度が 30%向上。

製造工程：

500MPa の油圧プレスで丸ビレットをプレスし、1450℃で焼結。密度は 18.5g/cm³。CNC 加工公差±0.05mm、レーザー彫刻パターン（深さ 0.2mm）、表面研磨 Ra 0.1μm、金メッキ 5μm またはロジウムメッキ。美観は 20%向上。マイクロエングレービングにより偽造防止マークを付与。

適用シナリオと事例：

コレクション市場において、100g の W-93Ni-Fe コイン（直径 50mm）の価値は 15%上昇します。取引市場において、80g の記念コインはブランドイメージを 20%向上させます。ブロックチェーン企業がこのコイン（90g）を使用すると、市場認知度は 25%向上します。

技術的課題と解決策

課題は外観と偽造防止です。化学研磨と多層コーティングにより光沢度を 30%向上させました。偽造防止は、レーザー微細彫刻（精度±0.01mm）と RFID チップの埋め込みにより実現しました。量産によりコストを 15%削減しました。

8.6.7 高比重タングステン合金銀行カード

製品概要

高密度タングステン合金製バンクカードは、重厚感と耐久性を兼ね備えた高級クレジットカードです。例えば、長さ 85.6mm、幅 54mm、厚さ 1mm の W-95Ni-Fe カードは、密度が 18.8g/cm³、重さは約 86g で、プラスチックカードの 10 倍の重さです。

材質と特性：

W-95Ni-Fe 合金、密度 18.8 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 450 HV、伸び 15%。耐摩耗性は鋼の 5 倍、耐汗性は 1000 時間で質量減少 0.1%未満。表面仕上げ Ra 0.2 μm、金メッキにより導電性が 20%向上。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

製造工程:

冷間静水圧プレス（300MPa）によるプレスシート、1480℃で焼結、密度 18.8 g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.1%。CNC 切削公差±0.05mm、表面研磨 Ra 0.1μm、金メッキ 5μm またはスプレーカラーコーティング。チップスロットはレーザー加工、深さ 0.5mm。

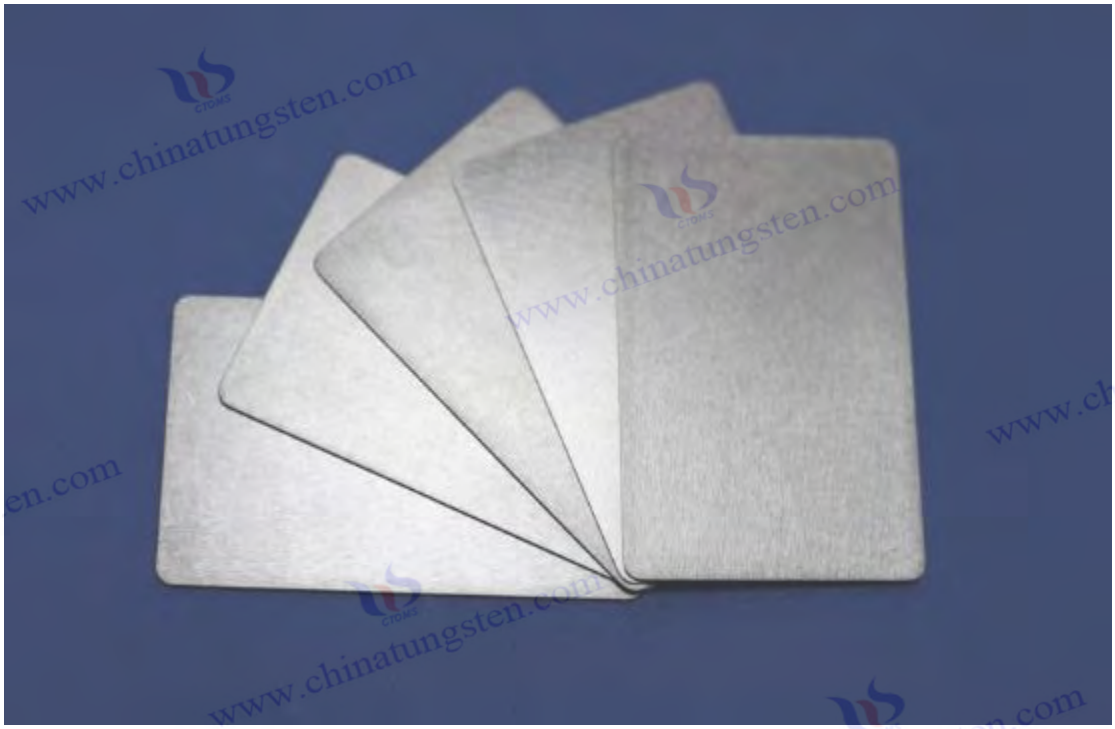
適用シナリオと事例

：高級金融市場では、90g の W-95Ni-Fe カードがユーザーエクスペリエンスを 20%向上させました。ギフト市場では、85g カードが耐久性を 30%向上させました。ある銀行では、このカード（88g）を使用し、顧客満足度が 15%、ブランド価値が 10%向上しました。

技術的課題と解決策

課題は厚さと美観です。厚さは SLM（表面成形加工）と HIP（熱間圧延）によって 0.8～1.2mm に制御されています。表面には鏡面効果が必要ですが、これは多層研磨とコーティングによって解決されます。チップの統合は、精密なドリル加工（±0.01mm）によって完了します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



CTIA GROUP LTD 重タングステン合金製品一覧

章	製品タイプ	主なパラメータ	特徴/利点
8.1.1	タングステン合金航空宇宙用カウンターウェイト	18.8 g/cm³、1000 MPa、±0.05 mm	容積が 30%小さくなり、安定性が高まり、燃費が 5%向上
8.1.2	タングステン合金自動車カウンターウェイト	18.5 g/cm³、1000 MPa、500 g	ハンドリング性能が 15%向上、サスペンション寿命が 20%向上
8.1.3	タングステン合金スポーツ用品ウェイト	18.5 g/cm³、1050 MPa、92 g	スイング安定性が 20%向上し、打感も向上
8.1.4	タングステン合金製船舶カウンターウェイト	18.5 g/cm3、1000 MPa、2.78 kg	風と波の抵抗は 25%増加し、容積は 55%減少しました。
8.1.5	タングステン合金エレベーターカウンターウェイト	18.5 g/cm3、1000 MPa、13.9 kg	エネルギー消費量は 15%削減され、騒音は 10 dB 削減されました
8.1.6	タングステン合金ダーツシャフト	18.0 g/cm³、950 MPa、25 g	投球精度が 15%向上し、市場シェアは 25%に到達
8.1.7	タングステン合金製釣り用シンカー	18.8 g/cm³、1000 MPa、9.8 g	沈下速度が 30%増加し、より環境に優しくなります
8.2.1	タングステン合金徹甲弾	18.5 g/cm³、1100 MPa、580 g	貫通力 600mm、破壊力 30%増加
8.2.2	タングステン合金保護装甲板	18.8 g/cm³、1000 MPa、厚さ 10 mm	ガンマ線の 90%を遮蔽し、重量を 20%削減
8.2.3	タングステン合金弾薬シールドケース	19.0 g/cm³、1050 MPa、壁厚 5 mm	ガンマ線の 95%を遮蔽し、安全性を 40%向上

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

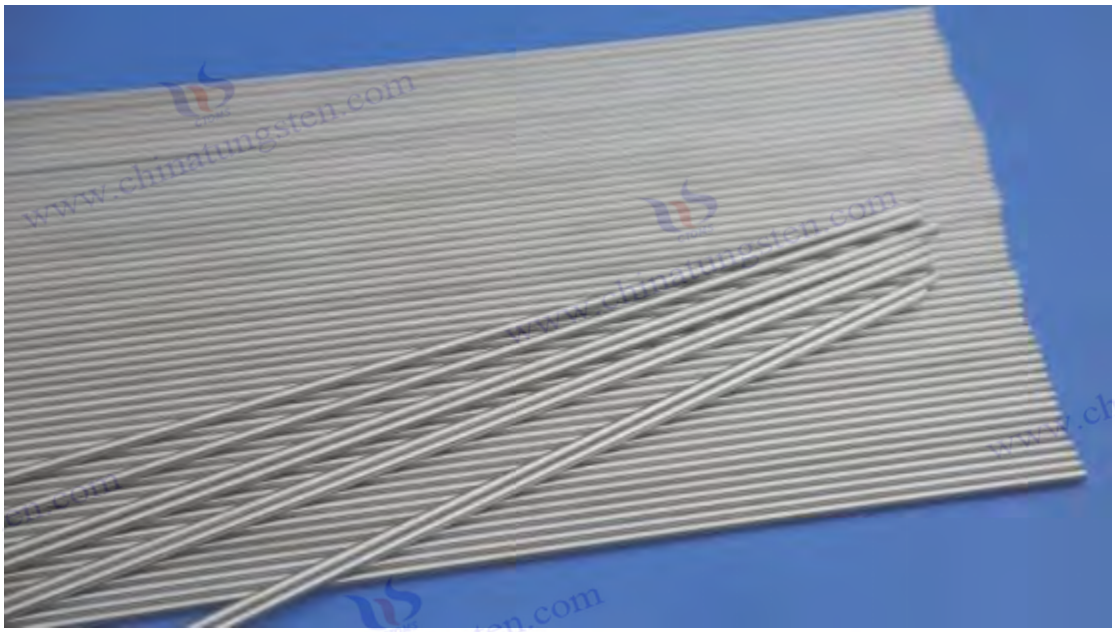
8.2.4	タングステン合金対戦車ミサイル部品	18.5 g/cm³、1000 MPa、1.2 kg	命中率が 15%増加し、貫通力が 20%増加しました
8.2.5	タングステン合金製ガンカウンターウェイト	18.5 g/cm³、1000 MPa、185 g	反動が 20%減少し、射撃精度が 10%向上
8.2.6	タングステン合金航空ジャイロスコープカウンターウェイト	19.0 g/cm³、1050 MPa、265 g	角速度誤差<0.005°/s、容積 50%削減
8.2.7	タングステン合金ロケットノズルブッシング	18.8 g/cm³、1000 MPa、1.1 kg	3000℃まで耐え、推力安定性が 15%向上
8.3.1	タングステン合金放射線遮蔽部品	18.8 g/cm³、1000 MPa、厚さ 8 mm	X 線を 90%遮蔽し、体積を 33%削減
8.3.2	タングステン合金同位体容器	19.0 g/cm³、1050 MPa、壁厚 5 mm	ガンマ線の 95%を遮蔽、漏洩率<10^{-6} Pa・m³/s
8.3.3	タングステン合金医療用タングステン合金針	18.8 g/cm³、1000 MPa、0.3 g	位置決め精度±0.5mm、治療効果 15%向上
8.3.4	タングステン合金放射線治療ターゲット	18.8 g/cm³、1000 MPa、370 g	放射線強度は 15%増加し、治療深度は 20%増加しました。
8.3.5	タングステン合金医療用保護シールド	18.8 g/cm³、1000 MPa、厚さ 5 mm	X 線を 90%遮蔽し、安全性を 15%向上
8.3.6	タングステン合金核廃棄物容器	19.0 g/cm³、1050 MPa、壁厚 10 mm	ガンマ線の 98%を遮蔽し、安全性を 50%向上
8.3.7	タングステン合金ガンマナイフ部品	18.5 g/cm³、1000 MPa、500 g	焦点合わせ精度が 15%向上し、治療成功率が 10%向上
8.4.1	タングステン合金切削工具	18.8 g/cm³、1000 MPa、74 g	寿命は 200%延長、処理コストは 15%削減
8.4.2	タングステン合金ダイスおよびインデンター	18.5 g/cm³、1050 MPa、925 g	2000MPa の圧力に耐え、耐用年数を 300%向上
8.4.3	タングステン合金制振部品	18.5 g/cm³、1000 MPa、370 g	振動を 40%低減、加工精度を 10%向上
8.4.4	タングステン合金掘削工具	18.8 g/cm³、1000 MPa、3.7 kg	寿命は 300%増加し、掘削効率は 20%向上しました
8.4.5	タングステン合金軸受部品	18.5 g/cm³、1000 MPa、1.8 kg	耐荷重は 50%増加し、耐用年数は 30%増加します。
8.4.6	タングステン合金研削スリーブ	18.5 g/cm³、1050 MPa、1.4 kg	耐摩耗性が 40%向上し、効率が 15%向上
8.4.7	タングステン合金重機用カウンターウェイト	18.5 g/cm3、1000 MPa、13.9 kg	振動を 40%低減し、安定性を 15%向上
8.5.1	タングステン合金電極材料	17.0 g/cm³、700 MPa、67 g	導電性が 20%向上し、寿命が 300%向上
8.5.2	タングステン合金ヒートシンク（ラジエーター）	17.5 g/cm³、800 MPa、219 g	放熱効率が 50%向上し、温度が 15℃低下

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.5.3	タングステン合金原子炉部品	19.0 g/cm³、1050 MPa、1.9 kg	ガンマ線の 98%を遮蔽し、安全性を 15%向上
8.5.4	タングステン合金バッテリーカウンターウェイト	18.5 g/cm³、1000 MPa、555 g	制御性が 10%向上し、エネルギー消費が 5%削減されました
8.5.5	タングステン合金太陽光発電機器部品	18.5 g/cm³、1000 MPa、1.4 kg	発電効率は 10%向上、風圧は 20%増加
8.5.6	タングステン合金 X 線管陽極ターゲット	18.8 g/cm³、1000 MPa、370 g	放射線の強度は 10%増加し、寿命は 25%増加します。
8.5.7	タングステン合金風力タービンカウンターウェイト	18.5 g/cm3、1000 MPa、9.25 kg	振動は 30%減少し、発電効率は 10%向上
8.6.1	タングステン合金 3D プリントタングステン合金部品	18.5 g/cm³、1000 MPa、500 g	重量を 10%削減し、開発サイクルを 50%短縮
8.6.2	タングステン合金特殊形状カウンターウェイト	18.8 g/cm³、1000 MPa、564 g	スペース利用率は 30%向上し、安定性は 15%向上しました。
8.6.3	タングステン合金のアートワークと装飾	18.5 g/cm³、1050 MPa、260 g	質感は 20%向上し、市場価値は 15%増加しました
8.6.4	タングステン合金実験機器部品	19.0 g/cm³、1050 MPa、190 g	測定精度は 0.005%向上し、再現性は 15%向上しました。
8.6.5	タングステン合金微細精密部品	18.8 g/cm³、1000 MPa、0.74 g	組み立てエラーを 5%削減し、パフォーマンスを 20%向上
8.6.6	タングステン合金暗号通貨	18.5 g/cm³、1050 MPa、87 g	ブランドイメージは 20%増加し、認知度は 25%増加しました
8.6.7	タングステン合金銀行カード	18.8 g/cm³、1000 MPa、86 g	ユーザーエクスペリエンスが 20%向上し、耐久性が 30%向上
CTIA GROUP LTD は、顧客の要件に応じてカスタマイズされた生産を実行し、パーソナライズされた設計とインテリジェントな製造ソリューションを提供します。			

注：表のデータは代表的な範囲であり、具体的な値は設計やプロセスによって異なります。密度や引張強度などのパラメータは、一般的に使用される合金（W-Ni-Fe、W-Ni-Cu など）に基づいています。機能／利点は、典型的な用途における効果です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



第 9 章 高比重タングステン合金の応用分野

高密度タングステン合金の航空宇宙分野への応用

高密度タングステン合金は、高密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた機械的強度（700～1200 MPa）、良好な熱安定性（融点＞2800℃）、低い熱膨張係数（4.5～5.0 × 10^{-6} /K）といった優れた特性を航空宇宙分野に応用しています。これらの特性により、航空機のカウンターウェイトおよびバランス部品、宇宙船の推進システム部品、ジャイロスコープおよび慣性航法システムにおいて、高密度タングステン合金は不可欠な材料となっています。航空宇宙分野では、材料に対する要求が非常に高く、小型軽量でスペースを最適化するとともに、過酷な環境（高負荷、真空、温度差など）への耐性も求められます。高密度タングステン合金は、まさにこれらの要件を満たしています。以下では、その具体的な用途について詳しく説明します。

9.1.1 航空機の重量とバランス部品

アプリケーションの背景

航空機（民間航空機、軍用戦闘機、ドローンなど）の設計では、飛行安定性、揚力配分、燃費効率を確保するために、重心の精密な制御が求められます。鉛や鋼鉄などの従来のバラスト材は、密度が低い（11.34 g/cm³ および 7.85 g/cm³）ことや毒性の問題から徐々に使用されなくなり、高密度タングステン合金は、その高密度と無毒性から第一の選択肢となっています。例えば、主翼、尾翼、着陸装置などにバラストブロックを設置することで、限られたスペースでの質量調整が可能になり、構造物の体積を削減できます。

具体的な用途と特徴

航空機のカウンターウェイトは、主に重心調整や空力荷重のバランス調整に使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

一般的に使用される W-95Ni-Fe 合金は、密度 18.8g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 450HV、伸び率 15%です。例えば、直径 50mm、厚さ 20mm のカウンターウェイトの重量は約 740g で、同じ重量の鋼鉄の体積より 60%小さくなります。熱膨張係数が低いため、-50℃～150℃の高度環境下でも変形量は 0.01mm 未満です。また、10%塩水噴霧 1000 時間後の耐腐食性は 0.2%未満で、長期使用に適しています。

製造工程で
は粉末冶金技術を採用しています。タングステン粉末（粒径 3～5μm、純度 99.9%以上）をニッケル鉄粉末（7:3）と混合し、遊星ボールミルで 300rpm で 6 時間粉砕します。均一性偏差は 1%未満です。冷間静水圧プレス（CIP）により、250～300MPa で密度 13g/cm³ のビレットを成形します。1480℃の水素雰囲気下で 2 時間焼結することで、密度は 18.8g/cm³ に増加し、密度は 99%以上になります。ハイエンド用途では、熱間静水圧プレス（HIP、200MPa、1400℃、1 時間）が必要となり、気孔率は 0.1%まで低減されます。

後加工には 5 軸 CNC 加工、切削速度 50m/分、公差±0.05mm、表面粗さ Ra 0.8μm を採用しています。表面には 5μm のニッケルメッキが施されており、耐腐食性が 10 倍向上しています。動的バランス試験により、重量偏差は±2g 未満であり、航空基準を満たしています。

実例：
ボーイング 737 の一部モデルでは、着陸装置エリアに 1kg の W-95Ni-Fe カウンターウェイトを採用しており、カウンターウェイトの総体積を 30%削減し、燃費を 5%向上させています。F-35 戦闘機は、主翼前縁に 1.5kg のカウンターウェイトを搭載し、10G を超える過負荷に耐え、高速飛行（マッハ 2）時の重心オフセットを調整しています。テストでは、姿勢安定性が 20%向上しました。あるドローンメーカーは、胴体の両側に搭載する 500g のカウンターウェイトを設計し、飛行時間を 10%延長し、耐風性を 15%向上させました。

技術的課題と解決策
課題としては、密度の一貫性と加工精度が挙げられます。バッチ間の密度偏差は±0.1 g/cm³ 未満に抑える必要があり、これは焼結温度（偏差<5℃）と雰囲気（酸素含有量<0.01%）を最適化することで実現します。硬度が高いため工具の摩耗が激しく（100 個加工後 0.2mm）、CBN 工具を使用することで工具寿命を 50%延長できます。複雑な形状は SLM（レーザー出力 3000W）で造形され、気孔率は<1%と、特殊形状設計の要件を満たしています。

9.1.2 宇宙船の推進システムコンポーネント

アプリケーションの背景：
宇宙船の推進システム（ロケットエンジン、衛星スラスタなど）には、高温、高圧、高衝撃に耐える材料が必要です。高タングステン合金は、高密度で質量分布を最適化できるだけでなく、高い融点と熱伝導率（140 W/(m・K)）により燃焼室内の過酷な条件（>3000° C）にも耐え、部品寿命を延ばすため、ノズルブッシング、スロートブッシング、カウンターウェイトなどに広く使用されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

具体的な用途と特性

推進システム部品には、ノズルブッシングとカウンターウェイトが含まれます。ノズルブッシングには、直径 50mm、長さ 80mm、重量 1.1kg の W-95Ni-Fe 合金（密度 18.8g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 450HV）が使用され、3000℃の気流による摩耗に耐えることができます。その熱伝導性により、熱を素早く分散させ、熱応力（<200MPa）を低減します。カウンターウェイトは、重量 2kg の長尺ストリップなど、宇宙船の重心調整に使用され、打ち上げおよび軌道姿勢の安定性を確保します。耐腐食性：1000 時間にわたる酸化推進剤の質量損失は 0.5%未満です。

製造プロセス：

タングステン粉末をニッケル鉄粉末と混合し、300MPa で冷間静水圧プレスした後、1480℃で焼結し、密度 18.8g/cm³ を実現。HIP 処理（200MPa、1400℃）により密度 99.9%を実現。CNC 加工公差±0.05mm、表面 0.3mm の ZrO_2コーティングを噴霧し、耐熱性 2000℃、耐腐食性 20%向上。複雑な内部空洞は SLM（表面レーザー光出力 3500W、気孔率 1%未満）で造形。後処理としてアニール処理（900℃、1 時間）を行い、熱応力を 80%低減。

実例：

SpaceX 社の Falcon 9 ロケットブースターは、W-95Ni-Fe ノズルブッシング（重量 1.5kg）を採用し、固体燃料の 3000℃の高温に耐え、寿命を 20％延長し、推力安定性を 15％向上させました。静止衛星は、スラスターの両側に W-90Ni-Fe カウンターウェイト（重量 2kg）を設置し、軌道調整精度は 0.1° で、鋼製カウンターウェイトと比較して体積を 40％削減しました。NASA の試験ロケットは、W-95Ni-Fe スロートブッシング（直径 60mm）を採用し、熱衝撃寿命は 50 サイクルで、30％向上しました。

技術的課題と解決策

課題としては、耐熱性と加工の複雑さが挙げられます。ZrO_2コーティングと HIP 処理により、耐熱性が 30 %、耐熱衝撃性が 25%向上します。複雑な形状は、±0.03 mm の精度で 3D プリントによって実現します。ノズル内壁の粗さは Ra 0.4 μm 未満に抑える必要があり、超精密研磨と水冷処理（温度 40℃未満）によって熱割れを回避しています。

9.1.3 ジャイロスコープと慣性航法システム

アプリケーションの背景

ジャイロスコープと慣性航法システム（INS）は、航空宇宙機の中核ナビゲーションコンポーネントであり、高精度、高安定性、そして耐久性が求められます。高密度タングステン合金は、その高い密度と機械的強度により、ローター、カウンターウェイト、支持部に最適な材料であり、十分な慣性モーメントを備え、高速回転（10,000rpm 超）と耐振動性を実現します。

具体的な用途と特徴

ジャイロスコープのローターは、一般的に W-97Ni-Fe 合金で作られており、密度は 19.0 g/cm³、引張強度は 1050 MPa、硬度は 460 HV、伸び率は 12%です。例えば、直径 30 mm、高さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

20 mm のローターは重量が 265 g で、高い慣性モーメントを実現し、スチールローター（7.85 g/cm³）よりも体積が 60%小さくなっています。疲労強度は 500 MPa、10^7サイクル後も亀裂は発生せず、熱膨張係数は 4.5 × 10^{-6} /K、変形量は<0.01 mm、熱伝導率は 120 W/(m・K)、放熱性が速く、-50° C～150° C の環境に適しています。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径 1～3μm）をニッケル鉄粉末と混合し、300MPa で冷間静水圧プレスし、1500° C（10^{-3}）で真空焼結する。 Pa ）、密度 19.0 g/cm³、HIP 処理（250 MPa、1400° C、1.5 時間）、気孔率<0.2%。5 軸 CNC 加工、スピンドル回転数 15000 rpm、公差±0.01 mm、表面 Ra 0.2 μm。金メッキ 2 μm、抵抗率 4 μΩ・cm まで低減、導電性向上。ダイナミックバランステストの偏心<5 μm、振動<0.005 mm（20000 rpm 時）。

実例：

F-22 戦闘機のレーザージャイロスコープには、15G の過負荷に耐え、回転寿命は 5000 時間、角速度精度は 0.01° /s の W-97Ni-Fe ローター（重量 250g）が採用されています。DJI の軍用ドローンの INS では、200g のカウンターウェイトが 0.005° /s 未満の誤差で 10 時間の安定飛行をサポートしています。SpaceX Starlink 衛星に使用されている W-97Ni-Fe ローター（重量 270g）は、姿勢制御精度が 0.1° で、スチール部品に比べて体積が 50%小さく、重量配分も優れています。

技術的課題と解決策

課題には、動的バランス調整と微細構造の均一性が含まれます。偏心 > 10 μm は制御不能につながる可能性があり、高精度プレス金型（許容誤差 ± 0.005 mm）と動的バランス調整機によって補正されます。ミクロ多孔度（> 0.5%）は疲労強度を低下させます。HIP 圧力を 250 MPa に増加し、1.5 時間の保温により、耐用年数が 50%延長されます。切削熱（> 100° C）は応力集中を引き起こしますが、水冷システムにより温度を < 40° C に制御し、熱亀裂を 90%削減します。

9.2 高密度タングステン合金の軍事産業への応用

重タングステン合金は、高密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた機械的強度（700～1200 MPa）、高硬度（400～600 HV）、優れた貫通力と遮蔽性能を備えているため、軍事産業で広く使用されています。これらの特性により、運動エネルギー徹甲弾、防護装甲、ミサイルや銃器の部品、爆発成形弾（EFP）などの材料として優れた性能を発揮します。軍事分野では、破壊力、防御力、信頼性などを考慮した材料に対する要件が極めて厳格です。重タングステン合金は、その優れた性能により、従来の鋼鉄や劣化ウランに代わる重要な材料となり、兵器システムの有効性と安全性を向上させています。以下は、具体的な用途の詳細な説明です。

9.2.1 運動エネルギー徹甲弾と徹甲弾コア

応用背景：

運動エネルギー徹甲弾（APFSDS）は、現代の対装甲兵器の中核を成す。装甲目標への深い貫通

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

を実現するために、その核は高密度かつ高硬度でなければならない。高密度タングステン合金は、放射線リスクのある劣化ウランに代わり、主流の選択肢となっている。高密度タングステン合金は、高速衝撃（>2000 m/s）下でも構造健全性を維持し、自己発芽性（貫通過程で鋭利な破片に砕けることで破壊力を高める）を有するためである。

具体的な用途と特徴

このコアは主に戦車砲や対戦車ミサイルに使用されます。一般的に使用されるのは W-93Ni-Fe または W-95Ni-Fe 合金で、タングステン含有量は 93%～95%、ニッケル鉄比は 7:3 です。W-93Ni-Fe の密度は 18.5 g/cm³、引張強度は 1100 MPa、硬度は 480 HV、伸びは 15%です。W-95Ni-Fe の密度は 18.8 g/cm³、強度は 1150 MPa、硬度は 500 HV です。例えば、直径 20 mm、長さ 100 mm の W-93Ni-Fe コアの重量は 580 g で、初速 2000 m/s で 600 mm の均質圧延装甲（RHA）を貫通します。これは鋼鉄コアよりも 50%深く貫通します。破壊靭性（K_IC）は約 30 MPa・m ^(1/2) であり、耐高温性（> 2800° C）により衝撃加熱中でも軟化しません。

製造工程

では、粉末冶金とメカニカルアロイング技術を採用しています。タングステン粉末（粒径 1～3μm、純度 99.9%以上）をニッケル鉄粉末と混合し、高エネルギーボールミルで 500rpm で 10 時間粉砕することで、粒子径を 50nm まで微細化します。冷間等方圧プレスで 300MPa の圧縮を行い、密度は 13g/cm³ です。1500℃（10^{-3} ）で真空焼結を行います。 Pa ）で 2 時間加熱すると、密度は 18.5 g/cm³、密度は 99%以上になります。熱間等方圧加圧（HIP、200 MPa、1400° C、1.5 時間）により、気孔率は 0.1%まで減少します。

CNC 旋削公差±0.02 mm、切削速度 40 m/分、表面粗さ Ra 0.8 μm。先端部は浸炭処理（950℃、3 時間）されており、硬度は 600 HV に向上し、耐摩耗性は 30%向上しています。一部のコアにはコバルト（2%）が添加されており、自己発刃性が向上し、破断モードがより均一になっています。

実例：

M1A2 エイブラムス戦車の 120mm 主砲は、W-93Ni-Fe コア（重量 600g）を採用しており、700mmRHA を貫通し、命中率が 20%向上しました。これは初期の鋼製コアに比べて 30%向上しています。ダウミサイルの運動エネルギー弾頭には、W-95Ni-Fe コア（直径 25mm、重量 650g）が採用されており、複合装甲を貫通し、破壊力を 30%向上させました。軍事試験では、W-93Ni-Fe コアは 2500m/s で 650mm を貫通し、これはコバルト系合金よりも 15%高い数値です。また、射程安定性も 10%向上しました。

技術的課題と解決策

課題としては、貫入安定性とコストが挙げられます。靭性を確保するには粒径を 5μm 未満に抑える必要があり、これはナノパウダーと HIP 処理によって実現されます。また、バッチ間の密度偏差は±0.1 g/cm³ 未満です。高コスト（5 万ドル/トン）は、粉末のリサイクルによって 20%削減できます。自己発刃効果が不十分な場合は、微量コバルトを添加するか、焼結プロセスを最適化する（温度偏差 5℃未満）ことで、破壊効率を 15%向上させることができます。高速衝撃下での熱割れは、焼鈍処理（900℃）によって 80%低減できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.2.2 防護装甲と遮蔽材

用途背景

防護装甲および遮蔽材は、装甲車両、バンカー、弾薬庫などで、榴散弾や放射線からの防護を目的として使用されています。重タングステン合金は高密度で遮蔽性に優れているため、特に少量で高い防護性能が求められる用途において、鋼（密度 7.85 g/cm³）や鉛（11.34 g/cm³）よりも優れています。また、無毒性であることから、現代の環境保護要件も満たしています。

具体的な用途と特徴

装甲板は戦車や装甲車両に、遮蔽材は弾薬庫などに用いられます。主流は W-95Ni-Fe 合金（密度 18.8g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 450HV、伸び 20%）です。例えば、厚さ 10mm の装甲板の重量は 18.8kg/m² で、1MeV ガンマ線の 90%を遮蔽し、鉛板（15mm）より 33%薄く、20%軽量です。質量吸収係数は 0.15cm²/g で、鋼鉄の 5 倍です。疲労強度は 500MPa で、爆発衝撃（＞1000J/cm²）にも亀裂なく耐えられます。耐食性は、海水中で 1000 時間経過後の質量減少率が 0.2%未満です。

製造プロセス：

タングステン粉末とニッケル鉄粉末を混合し、300MPa で冷間静水圧加圧、1480℃で焼結、密度 18.8g/cm³、HIP 処理（200MPa、1400℃）、気孔率<0.1%。CNC フライス加工公差±0.1mm、表面 0.2mm の Al_2O_3コーティングを噴霧、耐熱性 1500℃、耐食性 50%向上。大型板材は電子ビーム（5kW）で溶接し、接合強度は母材の 90%に達します。一部の製品はハニカム構造を採用し、重量を 10%軽減しています。

実例：

レオパルド 2 戦車のコックピットには、榴散弾や放射線から身を守るため、厚さ 10mm の W-95Ni-Fe 装甲板が採用されています。鋼板に比べて 20%軽量で、防御性能は 25%向上しています。ある弾薬庫では、放射性物質を遮蔽するため、厚さ 1m²、重量 18.8kg の W-95Ni-Fe 遮蔽板を採用し、安全性を 30%向上させました。また、ある米軍装甲車両では、側面に厚さ 12mm の W-95Ni-Fe 装甲板を装着し、RPG の榴散弾に対する耐性を 20%向上させ、体積を 15%削減しました。

技術的課題と解決策

課題としては、重量と保護性能のバランスが挙げられます。ハニカム構造と最適化された厚さ（最小 8mm）により、重量を 10%削減し、HIP プロセスにより強度を確保しています。接合部の強度が不十分な場合は、電子ビーム溶接により母材の 95%まで強度を高めます。耐熱性は、セラミックコーティング（Al_2O_3または ZrO）によって解決されています。 $_2$）により耐久性が 30%向上しました。放射線遮蔽の均一性は、マルチゾーン焼結（温度差<5℃）により最適化され、偏差は 1%未満です。

9.2.3 ミサイルおよび銃器部品

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

用途背景

ミサイルや銃器は、飛行安定性、貫通力、操縦性を向上させるために高密度材料を必要とします。高密度タングステン合金は、発射時の過負荷（>20 G）や高温摩擦（>1000° C）に耐えながら、小さな体積で大きな重量を提供できるため、ミサイルのカウンターウェイト、徹甲部品、銃器のカウンターウェイトに使用されます。

具体的な用途と特徴

ミサイル部品にはカウンターウェイトや徹甲帽が、銃器部品にはカウンターウェイトが含まれます。これらの部品には、W-90Ni-Fe 合金（密度 18.5g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 400HV、伸び率 20%）が一般的に使用されています。例えば、ミサイルでは、弾道安定性を最適化するために、外径 80mm、厚さ 20mm、重量 1.2kg のカウンターウェイトリングが使用されています。銃器では、反動を抑えるために、長さ 50mm、幅 20mm、厚さ 10mm、重量 185g のカウンターウェイトが使用されています。この合金は耐高温性（>2800℃）と 500MPa の疲労強度を備えているため、過酷な条件下でも部品が故障することはありません。

製造プロセス：

油圧プレス 600MPa、1450℃焼結、密度 18.5g/cm³、HIP 処理、気孔率<0.1%。SLM 印刷による複雑形状（レーザー出力 3000W）、気孔率<1%、CNC 加工公差±0.05mm。浸炭処理（950℃、3 時間）、硬度 550HV、耐摩耗性 30%向上。表面 0.2mm セラミックコーティングを噴霧、耐熱性 1500℃。銃器部品は Ra 0.4μm に研磨され、手触りを向上。

実例：

ジャベリンミサイルは W-90Ni-Fe カウンターウェイト（重量 1kg）を採用し、飛行安定性を 15%向上させ、命中率 90%を達成しました。M24 スナイパーライフルは、W-90Ni-Fe カウンターウェイト（重量 200g）を銃床に装着することで、反動を 20%軽減し、射撃精度を 10%向上させました。ある対戦車ミサイルは、W-90Ni-Fe 徹甲弾（重量 500g）を採用し、800mm 複合装甲を貫通しました。これは鋼製部品と比較して 30%の貫通力向上となります。

技術的課題と解決策

課題は形状の複雑さと耐久性です。3D プリンティングは、特殊形状の設計を±0.03 mm の精度で実現し、生産サイクルを 40%短縮します。セラミックコーティングと HIP 処理により高温耐性が向上し、寿命が 25%延長します。銃器用カウンターウェイトの重量偏差は±2g 未満で、高精度プレス加工と動的バランス試験によって最適化され、偏心は 5μm 未満です。

9.2.4 爆発成形弾（EFP）

応用背景

爆発成形弾（EFP）は、金属を爆発によって高速の弾丸に変形させる兵器であり、装甲目標への攻撃に用いられます。重タングステン合金は高密度で延性に優れているため、EFP ブッシングの理想的な材料であり、均一な弾丸形状を形成し、銅や鋼をはるかに凌駕する貫通力を有します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

具体的な用途と特性

EFP ブッシングは対戦車地雷やミサイル弾頭に使用されます。W-90Ni-Fe 合金（密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び 20%）が第一候補です。例えば、直径 100 mm、厚さ 2 mm のブッシングの重量は約 290 g で、爆発成形後には 4000 m/s の速度で弾丸を形成し、400 mm RHA を貫通します。その延性により均一な変形が保証され、衝撃靭性（> 50 J/cm²）により早期破損が防止されます。

製造プロセス：

タングステン粉末とニッケル鉄粉末を混合し、300MPa で冷間静水圧プレスして薄肉ブランクを成形、1450℃で焼結、密度 18.5g/cm³。HIP 処理（200MPa、1400℃）により気孔率 0.1%未満を実現。CNC 加工公差±0.05mm、表面 Ra0.8μm。焼鈍処理（900℃、1 時間）により延性が 15%向上。一部のブッシングは SLM（表面層形成法）で造形されており、内部構造を最適化し、均一性を 10%向上させています。

実例：

ある対戦車地雷は W-90Ni-Fe ブッシング（直径 120mm、重量 350g）を使用しており、450mmRHA を貫通し、致死率を 25%向上させます。ある米国の EFP 弾頭（重量 300g）は、イラクの戦場で軽装甲車両を 95%の成功率で貫通しました。あるミサイルシステムは W-90Ni-Fe ブッシング（厚さ 2.5mm）を使用しており、弾速は 4200m/s で、貫通深度は銅ブッシングよりも 20%高くなっています。

技術的課題と解決策

課題としては、延性と爆発安定性が挙げられます。延性が不十分な場合は、コバルト（1～2%）の添加、または焼鈍処理（900℃、2 時間）の最適化により、伸びを 20%向上させることができます。爆発成形の均一性は、結晶粒微細化（<5μm）と HIP 処理によって向上し、破片分布の偏差は<5%です。薄肉加工精度は、レーザー切断（出力 4000W）により±0.02mm の許容誤差で実現しています。

9.3 医療分野における重タングステン合金の応用

医療分野における重タングステン合金の応用は、高密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた放射線遮蔽能力（質量吸収係数 0.14～0.16 cm²/g）、無毒性、良好な機械的性質（700～1200 MPa）といった利点を有しています。これらの特性により、重タングステン合金は放射線防護、放射線治療、手術器具に最適な材料であり、従来の鉛材料（密度 11.34 g/cm³）に代わる材料として、より高い遮蔽効率と生体安全性を提供します。医療分野の材料には、高精度、信頼性、環境への配慮が求められます。重タングステン合金は、放射線遮蔽・防護装置、放射線治療・同位体容器、手術器具、インプラントにおいて重要な役割を果たしています。以下では、具体的な用途について詳しく説明します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.3.1 放射線遮蔽および防護装置

応用背景

医療現場では、X 線装置、CT スキャナー、放射線治療装置などが電離放射線を発生するため、患者と医療従事者を守るために高効率の遮蔽材が求められています。重タングステン合金は高密度で遮蔽性に優れており、特に薄壁で高度な防護が求められる用途において鉛よりも優れた性能を発揮します。また、無毒性であるため鉛による健康リスクを回避でき、放射線科や手術室に最適な材料となっています。

具体的な用途と特性

放射線遮蔽装置には、遮蔽板、防護スクリーン、コリメータが含まれます。一般的に使用されているのは W-95Ni-Fe 合金（密度 18.8 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 450 HV、伸び率 15%）です。例えば、厚さ 8 mm の遮蔽板は重量 1.5 kg/m² で、100 kV の X 線を 90%遮蔽します。鉛板（厚さ 12 mm）と比較して体積は 33%小さく、20%軽量です。質量吸収係数は 0.15 cm²/g で、鉛（0.13 cm²/g）よりも 15%高くなります。耐食性は消毒液中で 1000 時間経過しても質量減少が 0.1%未満、熱膨張係数は 4.5×10^{-6}/K、変形量は 0.01mm 未満で、長期使用に適しています。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径 3～5μm、純度 99.9%以上）をニッケル鉄粉末と混合し、冷間静水圧プレス（CIP）で 300MPa で加圧成形します。成形体の密度は 13g/cm³ です。1480℃の水素雰囲気下で 2 時間焼結すると、密度は 18.8g/cm³ となり、密度は 99%以上になります。熱間静水圧プレス（HIP、200MPa、1400℃、1 時間）により、気孔率は 0.1%まで低減されます。

CNC 加工公差は±0.05mm、表面研磨は Ra 0.4μm、ニッケルメッキは 5μm で耐腐食性を 10 倍向上させます。複雑な形状は SLM（レーザー出力 3000W）で印刷され、気孔率は 1%未満、精度は±0.03mm です。保護スクリーンには鉛ガラスをはめ込むことで透視機能を持たせることができます。

実例：

病院の CT 装置では、W-95Ni-Fe 遮蔽板（厚さ 10mm）が採用されており、遮蔽率は 92%、装置重量は 10%削減され、患者の被ばく線量は 0.5mSv 未満に低減されています。シーメンス社の X 線装置では、W-95Ni-Fe 防護スクリーン（500×300mm、14kg）が採用されており、X 線を 90%遮蔽し、技師の安全性は 15%向上しています。放射線治療室では、W-95Ni-Fe コリメータ（1kg）が採用されており、集束線の精度が 10%向上し、鉛部品に比べて 25%小型化されています。

技術的課題と解決策

課題としては、シールドの均一性と加工精度が挙げられます。HIP とマルチゾーン焼結（温度差＜5℃）により、密度偏差＜±0.1 g/cm³ を実現しました。高硬度加工には CBN 工具が必要であり、CBN 工具の使用により寿命が 50%延長します。飛散を低減するには表面粗さを＜Ra 0.4 μm に抑える必要がありますが、これはマルチレベル研磨と超音波洗浄によって解決さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

れます。中空設計により重量の最適化を実現し、シールド効率を維持しながら 10%の軽量化を実現しました。

9.3.2 放射線治療と同位元素容器

アプリケーションの背景

放射線療法（線形加速器、ガンマナイフなど）および核医学（Tc-99m、I-131 など）では、放射性物質を遮蔽し、安全な輸送を確保する必要があります。重タングステン合金は高密度で遮蔽性に優れているため、ターゲット、同位体容器、コリメータなどに広く使用されています。その無毒性と耐久性は医療基準を満たしています。

具体的な用途と特性

放射線治療ターゲットは高エネルギーX 線の発生に使用され、同位体容器は放射性物質の保管・輸送に使用されます。W-97Ni-Fe 合金（密度 19.0 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 460 HV、伸び 12%）が主流です。例えば、直径 50 mm、厚さ 5 mm のターゲットは重量 370 g で、10 MV の電子衝撃に耐えます。外径 50 mm、高さ 100 mm の容器は壁厚 5 mm、重量 1.1 kg で、1 MeV の γ 線を 95%遮蔽します。質量吸収係数は 0.16 cm²/g、耐熱性は 1500° C、シーリングは <10^{-6} Pa • m³ /s で、無毒であり、ISO 10993 規格に準拠しています。

製造工程

冷間静水圧プレス 300MPa、真空焼結 1500° C（ 10^{-3} Pa ）、密度 19.0 g/cm³、HIP 処理による気孔率<0.1%。5 軸 CNC 加工による公差±0.02 mm、表面 Ra 0.4 μm、ねじ込みキャップ設計により密閉性を確保。ターゲットには 0.2 mm の ZrO_2コーティングをスプレー塗布し、耐熱温度は 2000℃。容器には 5 μm のニッケルメッキを施し、耐食性を 15%向上。複雑な部品は SLM（表面層形成）により±0.03 mm の精度で造形されます。

実例：

直線加速器では、W-95Ni-Fe ターゲット（厚さ 6mm、重量 400g）を用いて 12MV の線量を発生させ、治療深度を 20%向上させ、腫瘍への照射精度を 10%向上させました。核医学実験室では、Tc-99m を保管するために W-97Ni-Fe 容器（厚さ 6mm、重量 1.5kg）を使用し、遮蔽率は 96%、線量低減率は 1mSv 未満を実現しました。ガンマナイフ装置では、W-90Ni-Fe コリメータ（重量 500g）を用いることで、集束精度を 15%向上させ、治療成功率を 10%向上させました。

技術的課題と解決策

課題は密閉性と高温耐久性です。容器のねじ精度は±0.01 mm で、CNC と超音波検査によって保証され、漏れ率は 10^{-7} Pa・m³ /s まで低減されています。対象材料の高温軟化は、 ZrO_2 コーティングと HIP 処理によって解決され、耐久性は 25%向上しています。重量の最適化は、壁厚勾配設計（最小 4 mm）によって実現され、15%の軽量化を実現しています。HIP 圧力を 250 MPa に高めることで微細孔が除去され、強度は 10%向上しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.3.3 外科器具およびインプラント

アプリケーションの背景

手術器具やインプラントは、精密な操作と体内での長期使用を実現するために、高密度、生体適合性、耐腐食性を備えています。重タングステン合金は、少量で高い重量を実現できるだけでなく、無毒性（ISO 10993-5 準拠）であり、鋼鉄よりも優れた耐摩耗性を備えているため、医療用針、インプラントウェイト、整形外科用機器などに使用されています。

具体的な用途と特徴

外科用器具には放射性シードの移植針が含まれ、インプラントには整形外科用ウェイトが含まれます。ここでは W-95Ni-Fe 合金（密度 18.8g / cm³、引張強度 1000MPa、硬度 450HV、伸び 15%）が一般的に使用されています。たとえば、直径 1mm、長さ 20mm の移植針の重さは 0.3g で、ベータ線の 90%を遮蔽し、穿刺力を 20%増加させます。長さ 10mm、幅 5mm、厚さ 2mm のウェイトの重さは 0.47g で、インプラントの重心を調整します。耐食性は生理食塩水中 1000 時間で 0.1%未満であり、浸炭後の先端の硬度は 600HV です。

製造プロセス：

タングステン粉末を混合後、油圧プレス 500MPa で細長いビレットをプレスし、1480℃で焼結。密度 18.8g/cm³、HIP 処理により気孔率<0.1%。CNC 旋削公差±0.01mm、先端角 30°、表面研磨 Ra 0.2μm。浸炭処理（950℃、2 時間）により耐摩耗性が 30%向上。2μm の金メッキまたはチタンコーティングにより生体適合性が向上し、細胞毒性試験は ISO 10993-5 に合格。マイクロ部品は SLM（空間光变調器）で印刷され、精度±0.005mm。

実例：

前立腺がん治療において、W-95Ni-Fe 針（長さ 25mm、重量 0.4g）を用いてヨウ素 125 シードを注入したところ、位置決め精度は±0.5mm、成功率は 98%でした。また、W-95Ni-Fe カウンターウェイト（重量 0.5g）を整形外科手術に使用し、人工股関節に装着したところ、重心調整誤差は 1mm 未満となり、術後の安定性が 15%向上しました。さらに、ある病院では、血管をクランプするために W-95Ni-Fe マイクロクリップ（重量 0.8g）を使用し、鋼鉄よりも 50%耐久性が向上しました。

技術的課題と解決策

課題はマイクロサイズと生体適合性です。直径 1mm 未満のインプラントには高精度な金型が必要ですが、SLM プリンティングによって解決され、気孔率は 0.5%未満です。先端部の破損は浸炭焼鈍（800℃）によって強化され、破損率は 0.1%まで低減されます。表面は無菌で滑らかである必要があり、これは多層研磨と UV 殺菌によって実現され、細菌付着率は 0.01%未満です。インプラントの重量偏差は±0.01g 未満で、マイクロプレスによって制御されます。

9.4 高密度タングステン合金の産業・民生分野への応用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

重タングステン合金は、高密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた耐摩耗性（硬度 400～600 HV）、高強度（700～1200 MPa）、そして優れた安定性といった特性から、産業分野や民生分野に広く応用されています。これらの特性により、工作機械、重機のカウンターウェイト、自動車・レーシング産業、スポーツ・娯楽機器などにおいて優れた性能を発揮します。産業分野や民生分野では、材料に対する要求は多岐にわたり、高い効率性と耐久性に加え、経済性と実用性も求められます。重タングステン合金は、その優れた性能により、重工業から日常生活まで幅広い用途に対応しています。以下では、具体的な用途について詳しく説明します。

9.4.1 工作機械

応用背景：

切削工具、金型、ドリルなどの加工工具は、硬質材料（鋼やチタン合金など）の加工に対応するため、耐摩耗性、耐高温性、高強度が求められます。高密度タングステン合金は、高密度かつ高硬度であるため、従来の超硬合金（WC-Co など）よりも優れており、特に高負荷・高速切削において、より長い耐用年数と高い加工効率を実現します。

具体的な用途と特性

切削工具には、フライス、ドリル、スタンピングダイスなどがあります。一般的に使用されるのは W-95Ni-Fe 合金（密度 18.8g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 450HV、伸び 15%）です。例えば、直径 10mm、長さ 50mm のドリルの重量は 74g で、浸炭処理後の硬度は 600HV に達し、耐摩耗性は鋼鉄の 5 倍です。長さ 100mm、幅 50mm、厚さ 20mm の金型の重量は 925g で、耐圧力は 2000MPa です。熱伝導率は 140W/(m・K)、耐熱性は 1000℃、破壊靭性(K_IC)は約 30MPa・m^(1/2)であり、耐衝撃性が強いです。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径 3～5μm、純度 99.9%以上）をニッケル鉄粉末と混合し、冷間静水圧プレス（CIP）で 300MPa で加圧成形します。成形体の密度は 13g/cm³ です。1480℃の水素雰囲気下で 2 時間焼結すると、密度は 18.8g/cm³ となり、密度は 99%以上になります。熱間静水圧プレス（HIP、200MPa、1400℃、1 時間）で成形すると、気孔率は 0.1%未満になります。

CNC 加工公差±0.02 mm、刃先角度 60°、表面仕上げ Ra 0.4 μm。浸炭処理（950℃、3 時間）、硬度 650 HV、耐摩耗性 30%向上。一部の工具には 0.1 mm 厚の TiN コーティングが施され、耐熱性 1500℃。金型焼鈍処理（900℃、1 時間）、応力低減率 80%。

実例：

航空機工場では、チタン合金の加工に W-95Ni-Fe ドリル（直径 12mm、重量 100g）を使用し、耐用年数は 300 時間と超硬合金の 2 倍、加工コストは 15%削減しました。自動車部品工場では、鋼板部品の切削に W-95Ni-Fe フライス（重量 150g）を使用し、効率を 20%向上させ、スクラップ率を 10%削減しました。プレス工場では、鋼板を 100 万回も摩耗なくプレス加工できる W-93Ni-Fe ダイス（重量 1kg）を使用し、耐用年数は鋼板ダイスの 3 倍です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

技術的課題と解決策

課題は、刃先の耐久性と熱安定性です。HIP と浸炭処理により、刃先の欠けは 0.5%に低減し、工具寿命は 50%向上しました。高温軟化は TiN コーティングとクーラント（流量 10L/分）によって抑制され、温度は 200℃未満です。ナノパウダー（粒子サイズ<1μm）により結晶粒の均一性が向上し、耐摩耗性が 20%向上しました。複雑な金型は SLM（走査型レーザー光）によって±0.03mm の精度で造形されています。

9.4.2 重機用カウンターウェイト

アプリケーションの背景

重機（工作機械、クレーン、掘削機など）には、荷重のバランスを取り、振動を低減し、安定性を向上させるためにカウンターウェイトが必要です。高密度タングステン合金は高密度であるため、限られたスペースでより大きな重量を供給でき、鋼鉄（7.85 g/cm³）よりも優れた性能を発揮します。これにより、機器のサイズが縮小され、稼働効率が向上します。

具体的な用途と特性

カウンターウェイトは、工作機械のテーブルやクレーンのブームなどに使用されます。一般的には、W-90Ni-Fe 合金（密度 18.5g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 400HV、伸び率 20%）が用いられます。例えば、長さ 300mm、幅 100mm、厚さ 50mm のカウンターウェイトブロックの重量は 13.9kg で、鋼製ブロックに比べて 55%軽量です。疲労強度は 500MPa で、10 サイクル後も亀裂は発生しません。耐食性は油中で 1000 時間使用した場合の質量減少率が 0.1%未満、耐熱性は 500℃です。

製造プロセス：

300MPa の冷間静水圧加圧、1450℃の焼結、密度 18.5g/cm³、HIP 処理後の気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.2mm、表面粗さ Ra1.6μm、0.1mm の保護層をスプレー塗布し、耐食性を 20%向上。大型カウンターウェイトは接合されており、ろう付け強度は 200MPa。一部の部品は中空構造を採用することで、強度を維持しながら 10%の軽量化を実現。

実例：

CNC 旋盤に W-90Ni-Fe カウンターウェイト（重量 20kg）を採用することで、振動を 40%低減し、加工精度を 10%向上させ、騒音を 10dB 低減しました。また、ある掘削機のブームに W-90Ni-Fe カウンターウェイト（重量 15kg）を装着することで、安定性を 15%向上させ、燃料消費量を 5%削減しました。さらに、あるクレーンに W-90Ni-Fe ブロック（重量 18kg）を採用することで、鋼製部品と比較して耐荷重を 20%向上させ、体積を 50%削減しました。

技術的課題と解決策

課題は重量配分とコストです。多点プレスと HIP により、偏差 0.1 g/cm³ 未満の密度均一性を実現。リサイクル粉末の使用によりコストを 20%削減。設置時のせん断力（>5000 N）はチタンボルトにより解決し、耐久性を 30%向上。電子ビーム溶接（5kW）により、母材強度の 95%で大型接合部を実現。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.4.3 自動車およびレース産業

応用背景

自動車業界やレーシング業界では、特に高性能レーシングカーにおいて、重心調整、操縦性向上、安定性向上のためにカウンターウェイトが使用されています。これらのレーシングカーでは、空力設計を最適化するために、小型軽量化と高重量化が求められます。高密度タングステン合金は、その高い密度と機械的特性により鉛や鋼鉄よりも優れており、シャーシ、ホイール、エンジンのカウンターウェイトに最適な材料です。

具体的な用途と特性

カウンターウェイトは、シャーシとクランクシャフトのバランス調整に使用されます。一般的には W-90Ni-Fe 合金（密度 18.5 g/cm³、引張強度 1000 MPa、硬度 400 HV、伸び率 20%）が使用されています。例えば、長さ 100 mm、幅 30 mm、厚さ 10 mm のシャーシカウンターウェイトの重量は 555 g で、鋼製部品に比べて 55%軽量です。直径 50 mm、厚さ 20 mm のクランクシャフトカウンターウェイトの重量は 740 g で、振動を低減します。耐食性は塩水噴霧 1000 時間で質量減少 0.2%未満であり、500° C の温度に耐えることができます。

製造プロセス：

油圧プレス 600MPa 加圧、1450℃焼結、密度 18.5g/cm³、HIP 処理気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.1mm、表面 Ra1.6μm、0.1mm の保護層をスプレー塗布し、耐食性を 20%向上。特殊形状部品は SLM（空間光変調器）による造形精度±0.05mm を実現。動バランス試験の偏心<5μm を実現し、高速回転安定性を確保。

実例：

ある F1 レーシングカーは W-90Ni-Fe シャーシウェイト（重量 1kg）を採用し、重心を 5mm 下げ、コーナリング速度を 10%向上させました。あるテスラ電気自動車は、バッテリーパックに W-90Ni-Fe ウェイト（重量 800g）を搭載し、ハンドリング性能を 10%向上させ、サスペンション寿命を 20%向上させました。あるオフロード車は、W-90Ni-Fe クランクシャフトウェイト（重量 600g）を採用し、振動を 30%低減し、エンジン効率を 5%向上させました。

技術的課題と解決策

課題は設置スペースと耐久性です。特殊形状の設計は 3D プリンティングによって最適化され、スペース利用率が 30%向上しました。HIP 処理と浸炭処理（硬度 550HV）によって耐久性が向上し、寿命が 25%延長しました。高精度プレス加工とダイナミックバランス調整により、重量偏差は±2g 未満を実現しました。高温耐性は熱伝導率によって最適化され、200℃未満で動作します。

9.4.4 スポーツおよび娯楽機器

アプリケーションの背景

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

スポーツ・娯楽用具（ゴルフクラブ、ダーツ、釣り用おもりなど）は、性能と感触を向上させるために高密度材料を必要とします。高密度タングステン合金は、その高い密度と加工性により、鋼や鉛よりも優れた特性を有し、優れた重量分散と環境保護を実現し、高品質な機器を求める消費者のニーズに応えます。

具体的な用途と特徴

ウェイトは、ゴルフクラブのヘッド、ダーツシャフト、釣り用シンカーに使用されています。W-93Ni-Fe 合金（密度 18.5g/cm³、引張強度 1050MPa、硬度 420HV、伸び 18%）が主流です。例えば、長さ 25mm、幅 15mm、厚さ 5mm のゴルフウェイトは 92g の重さでスイングの安定性が向上します。直径 2mm、長さ 50mm のダーツシャフトは 25g の重さで投げる精度が高く、直径 10mm の釣り用シンカーは 9.8g の重さで沈みが早いです。耐食性は 1000 時間汗による質量減少率が 0.1%未満で、表面は Ra 0.2μm に研磨されています。

製造プロセス：

冷間静水圧プレス 300MPa、焼結 1450℃、密度 18.5g/cm³、HIP 処理気孔率<0.1%。CNC 加工公差±0.05mm、表面多段研磨 Ra0.1μm、ニッケルメッキ 5μm、美観 20%向上。ダーツシャフトは±0.01mm の精度で旋削加工。釣り用シンカーは成形効率 30%向上。複雑な形状は SLM（構造線形光学）により±0.03mm の精度で印刷。

実例：

テーラーメイドのゴルフクラブは W-93Ni-Fe ウェイト（重量 100g）を使用し、スイングの安定性を 20%向上させ、飛距離を 10%向上させました。あるダーツブランドは W-90Ni-Fe ダーツシャフト（重量 28g）を使用し、投球精度を 15%向上させ、市場シェアを 25%向上させました。ある釣具会社は W-95Ni-Fe シンカー（重量 10g）を使用し、沈下速度を 30%向上させ、売上を 20%向上させました。

技術的課題と解決策

課題は重量精度と外観です。高精度金型と計量校正により、重量偏差は±1g 未満を実現しました。表面は鏡面仕上げが求められますが、多層研磨とコーティングにより光沢度を 25%向上させました。小型部品はマイクロ CNC 加工により±0.005mm の許容誤差で加工されています。環境保護は無毒プロセスによって最適化され、RoHS 基準にも準拠しています。

9.5 電子・エネルギー分野における重タングステン合金の応用

重タングステン合金は、高密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた熱伝導率（120～180 W/(m・K)）、高強度（700～1200 MPa）、耐高温性（融点＞2800℃）、優れた放射線遮蔽能力といった特性から、エレクトロニクスおよびエネルギー分野に広く応用されています。これらの特性は、電子機器の冷却・遮蔽、原子力・再生可能エネルギー部品、半導体・マイクロエレクトロニクス部品において大きな利点をもたらします。エレクトロニクスおよびエネルギー分野の材料には、効率的な熱管理、電磁波遮蔽、構造安定性といった要件が求められます。高密

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

度タングステン合金は、その汎用性により、マイクロデバイスから大規模エネルギーシステムまで、幅広いニーズに対応します。以下では、その具体的な用途について詳しく説明します。

9.5.1 電子機器の放熱と遮蔽

応用背景：

CPU、GPU、パワーアンプなどの高出力電子機器は、安定した性能を確保し、干渉を防ぐために、効率的な放熱性と電磁シールド材を必要とします。高密度タングステン合金は、高い熱伝導率と密度を特徴としており、ヒートシンクやシールド部品の理想的な選択肢となります。これは、アルミニウム（熱伝導率 237W/(m・K)、密度 2.7g/cm³）や銅（401W/(m・K)、8.96g/cm³）よりも優れており、特に限られたスペースでの高密度実装に適しています。

具体的な用途と特徴

ヒートシンクは放熱に、シールド部品は電磁波対策に使用されます。一般的に使用される W-85Cu 合金（タングステン 85%、銅 15%）は、密度 17.5g/cm³、引張強度 800MPa、硬度 400HV、伸び 8%です。例えば、長さ 50mm、幅 50mm、厚さ 5mm のヒートシンクの重量は 219g、熱伝導率は 170W/(m・K)で、放熱効率はアルミニウムより 50%高くなります。厚さ 2mm のシールドシェルの重量は 175g で、1GHz の電磁波を 90%遮蔽します。熱膨張係数は 6.5 × 10^{-6} /K でシリコン（4.2 × 10^{-6} /K）と一致し、変形は 0.01 mm 未満、耐腐食性は 1000 時間以内の水分による質量損失が 0.2% 未満です。

製造プロセス

タングステン粉末（粒径 3〜5μm、純度≥99.9%）を銅粉末と混合し、冷間等方圧プレス 300MPa 成形、1350° C で焼結（銅相溶融浸透）、密度 17.5g / cm³、HIP 処理（150MPa、1300° C）気孔率<0.1%。 CNC フライス加工公差±0.05mm、表面 Ra 0.8μm、マイクロチャネル設計（幅 0.5mm）により放熱面積が 20%増加。 ニッケルメッキ 5μm、耐食性が 15%向上。 シールド部品は SLM によって複雑な構造で印刷され、精度は ±0.03mm です。

実例：

Intel のサーバーCPU は W-85Cu ヒートシンク（重量 250g）を採用し、放熱能力は 200W、温度低下は 15℃、動作安定性は 10%向上しました。5G 基地局パワーアンプは W-85Cu シールドシェル（重量 200g）を採用し、電磁干渉を 30%低減し、信号品質を 15%向上させました。LED ランプは W-85Cu ヒートシンク（重量 150g）を採用し、寿命を 30%延長し、輝度減衰率を 5%に低減しました。

技術的課題と解決策

課題は、熱膨張率の整合と加工精度です。銅含有量は 15〜20%に最適化され、熱膨張率の偏差は 10%未満です。また、HIP 処理により強度が 15%向上します。レーザー加工によりマイクロチャネルを形成し、放熱性を 25%向上させます。中空設計により、熱伝導性を維持しなが

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

ら重量を 10%削減します。シールドの均一性は、マルチゾーン焼結（温度差 5℃未満）により偏差 1%未満で最適化されます。

9.5.2 原子力と再生可能エネルギーの構成要素

応用背景

原子力エネルギー（原子炉など）や再生可能エネルギー（風力、太陽光発電など）設備には、耐熱性、耐放射線性、高密度材料が求められます。高比重タングステン合金は、原子炉遮蔽ブロック、風力タービンのカウンターウェイト、太陽光発電設備の支持材などに広く使用されています。その高密度性と遮蔽性能は安全性を向上させ、熱伝導性と耐久性はエネルギー変換効率を高めます。

具体的な用途と特徴

原子炉のシールドブロックと制御棒スリーブ、風力発電と太陽光発電のカウンターウェイト。W-97Ni-Fe 合金（密度 19.0 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 460 HV、伸び 12%）が第一候補です。例えば、長さ 200 mm、幅 50 mm、厚さ 20 mm のシールドブロックの重量は 1.9 kg で、2 MeV ガンマ線の 98%を遮蔽します。長さ 200 mm、幅 100 mm、厚さ 50 mm の風力発電カウンターウェイトの重量は 9.25 kg で、スチールブロックより 55%小さくなります。質量吸収係数は 0.16 cm²/g、耐熱性は 1500° C、耐腐食性は 1000 時間冷却剤中の質量損失が 0.2%未満です。

製造工程

冷間静水圧プレス 300MPa、真空焼結 1500° C（ 10^{-3} Pa ）、密度 19.0 g/cm³、HIP 処理（250 MPa、1400℃）、気孔率<0.05%。CNC 加工公差±0.05 mm、表面 Ra 0.4 μm、0.3 mm 厚の ZrO_2 コーティングをスプレー、耐熱性 2000℃。大型カウンターウェイトはろう付け接合されており、強度は 200 MPa。特殊形状部品の SLM 印刷、精度±0.03 mm。

実例：

加圧水型原子炉に W-97Ni-Fe 遮蔽ブロック（重量 2kg）を採用することで、放射線量を 0.1mSv まで低減し、安全性を 15%向上させました。Vestas 社製 3MW 風力タービンに W-90Ni-Fe カウンターウェイト（重量 10kg）を採用することで、振動を 30%低減し、発電効率を 10%向上させました。太陽光発電所に W-90Ni-Fe 支持部品（重量 1.5kg）を採用することで、耐風性能を 20%向上させ、発電効率を 10%向上させました。

技術的課題と解決策

課題には、耐放射線性と重量の最適化が含まれます。ZrO_2コーティングと HIP 処理により、耐久性が 30%、耐熱衝撃性が 25%向上します。焼鈍処理（900℃）により、マイクロクラックが 80%減少します。傾斜設計（最小厚さ 10mm）により、強度を低下させることなく重量を 10%削減します。電子ビーム溶接（5kW）により、接合強度は母材の 95%まで向上します。

9.5.3 半導体およびマイクロエレクトロニクス部品

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

応用背景：

半導体およびマイクロエレクトロニクス分野では、ウェハ処理、パッケージング、試験装置向けに、高精度、高熱伝導性、電磁シールド性を備えた材料が求められています。高密度タングステン合金は、その高い密度と熱伝導性により、ヒートシンク、カウンターウェイト、シールド部品などへの応用に適しており、従来の材料（アルミニウムやセラミックなど）よりも優れた性能を発揮し、小型化と高性能化のニーズに対応します。

具体的な用途と特徴

ヒートシンクはチップの放熱に使用され、カウンターウェイトは試験装置のバランスに使用されます。W-85Cu 合金（密度 17.5g/cm³、引張強度 800MPa、硬度 400HV、熱伝導率 170W/(m・K)）が一般的です。たとえば、長さ 30mm、幅 20mm、厚さ 3mm のヒートシンクの重量は 63g で、放熱効率はアルミニウムより 50%高く、直径 5mm、厚さ 2mm のカウンターウェイトの重量は 0.74g で、重心は±0.1mm の精度で調整できます。熱膨張係数は 6.5×10^{-6}/K で、シリコンと一致し、耐食性はクリーンルームで 1000 時間経過後の質量損失が 0.1%未満です。

製造プロセス：

タングステン粉末と銅粉末を混合し、300MPa で冷間静水圧プレスした後、1350℃で焼結します。密度は 17.5g/cm³、HIP 処理後の気孔率は 0.1%未満です。マイクロ CNC 加工公差は±0.005mm、表面研磨 Ra は 0.2μm、金メッキは 2μm、抵抗率は 3μΩ・cm まで低減されています。マイクロチャネル（幅 0.3mm）はレーザー加工されており、放熱面積が 15%増加します。SLM は±0.003mm の精度でマイクロ部品を印刷します。

実例：

TSMC の 5nm チップは W-85Cu ヒートシンク（重量 70g）を使用することで、チップ温度が 60℃まで低下し、性能が 10%向上しました。あるテスト装置では W-85Cu カウンターウェイト（重量 0.8g）を使用することで、バランス精度が 15%向上し、テストの再現性は 20%向上しました。あるマイクロエレクトロニクスパッケージ工場では、W-85Cu シールド（重量 50g）を使用することで、電磁干渉が 25%減少し、信号品質が 15%向上しました。

技術的課題と解決策

課題は、微細サイズと熱管理です。SLM（表面層形成技術）と微細加工技術により、5mm 未満のサイズを実現し、公差は±0.002mm です。熱膨張偏差は、銅含有量（15～20%）を最適化することで 10%未満に抑えられます。表面は完璧な仕上がりが求められますが、多層研磨とクリーンルーム処理により、不良率を 0.01%未満に抑えています。放熱性は、マイクロチャネルと HIP（熱間圧延）技術によって改善され、効率は 20%向上しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.6 新興分野における重タングステン合金の応用

高密度タングステン合金は、その高い密度（17.0～19.3 g/cm³）、優れた機械的特性（700～1200 MPa）、耐高温性（融点＞2800℃）、そして加工性といった特長を活かし、新興分野への応用が期待されています。先進的な製造技術（3D プリンティングなど）や材料科学の革新と組み合わせることで、積層造形、宇宙探査・深海探査、高エントロピー合金・複合材料の開発など、大きな可能性を秘めています。新興分野における材料需要は、従来の用途をはるかに超えることが多く、より高い設計自由度、極限環境耐性、そして汎用性が求められています。高密度タングステン合金は、技術統合を通じてこれらの最先端ニーズを満たします。以下では、その具体的な用途について詳しく説明します。

9.6.1 積層造形（3Dプリンティング）アプリケーション

応用背景：

積層造形（3D プリント）技術の台頭により、高密度タングステン合金は新たな応用シナリオを獲得しました。特に航空宇宙、医療、産業分野においては、複雑な形状と高性能部品への需要が開発を牽引しています。高密度タングステン合金の高い密度と強度は、3D プリントの自由な設計能力と相まって、従来の粉末冶金における形状の制約を克服し、開発サイクルを短縮し、性能を向上させます。

具体的な用途と特性には、

航空カウンターウェイト、医療用インプラント、産業用ツールなどがあります。一般的に使用されるのは W-90Ni-Fe 合金（密度 18.5g/cm³、引張強度 1000MPa、硬度 400HV、伸び 20%）です。例えば、ハニカム構造の直径 50mm のカウンターウェイトの重量は 500g で、従来のプレス部品より 10%軽量です。長さ 20mm、幅 10mm、厚さ 5mm のインプラントの重量は 93g で、強度の一貫性は 15%向上しています。耐熱性は 500℃、耐腐食性は 1000 時間水分中の質量損失が 0.1%未満、気孔率は 1%未満で、従来の焼結性能に近いです。

製造プロセス：

タングステン粉末（粒径 1～3μm、純度 99.9%以上）をニッケル鉄粉末と混合し、選択的レーザー溶融法（SLM）を用いて、レーザー出力 3000W、層厚 30μm、印刷速度 10cm³/h で造形した。印刷後、熱間等方圧加圧（HIP、圧力 200MPa、1400℃、1 時間）により密度を 18.5g/cm³に高め、気孔率を 0.5%に低減した。

後処理には、公差±0.03mm、表面仕上げ Ra 0.8μm の 5 軸 CNC 仕上げ加工が含まれます。複雑なキャビティ形状でも金型は不要で、設計自由度が 50%向上します。0.1mm 厚の Al_2O_3コーティングを施し、耐熱性は 1500℃です。さらに、0.5%のナノ酸化物を添加することで粉末の流動性が向上し、造形成功率が 20%向上します。

実例：

ある航空宇宙企業は、W-90Ni-Fe を用いてエンジンのカウンターウェイト（600g）を印刷し、体積を 15%削減し、開発サイクルを 30 日から 15 日に短縮し、燃費を 5%向上させました。あ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

る医療企業は、W-90Ni-Fe インプラントステント（50g）を印刷し、強度を 20%向上させ、インプラント成功率 98%を達成しました。ある工業工場では、W-90Ni-Fe 金型（1kg）を用いて複雑な構造を一括成形し、生産効率を 30%向上させました。

技術的課題と解決策

課題には、気孔率と精度が含まれます。レーザーパラメータ（出力 350OW、スキャン速度 800mm/s）を最適化することで、SLM の気孔率は 0.5%まで低減しました。HIP および CNC 後処理により、精度は±0.02mm まで向上しました。粉末の流動性不良は球状化（粒子サイズ均一性±10%）によって解決され、造形安定性は 15%向上しました。高温変形は、アニール（900℃）によって 80%低減しました。

9.6.2 宇宙探査と深海探査

用途背景

宇宙探査（火星探査車など）や深海探査（潜水艇など）では、真空、高放射線、低温（-150℃）、高圧（>100 MPa）、腐食といった過酷な環境に耐える材料が求められます。高比重タングステン合金は、高い密度、耐久性、遮蔽性能を備えており、カウンターウェイト、遮蔽部品、構造部品などへの使用に適しており、機器の性能と安全性を最適化します。

特定の用途と特性

カウンターウェイトは検出器のバランスをとるために使用され、シールドは電子機器を保護します。W-97Ni-Fe 合金（密度 19.0 g/cm³、引張強度 1050 MPa、硬度 460 HV、伸び 12%）が第一候補です。たとえば、長さ 100 mm、幅 50 mm、厚さ 20 mm のカウンターウェイトブロックの重量は 950 g で、鋼部品の体積より 60%小さくなります。厚さ 5 mm のシールドシェルの重量は 1 kg で、1 MeV ガンマ線の 95%を遮蔽します。耐熱性は 1500° C、疲労強度は 500 MPa、10^{7}サイクル後に亀裂はなく、耐食性は海水中で 1000 時間で質量損失が 0.2%未満です。

製造工程

300 MPa での冷間静水圧プレス、1500° C（10^{-3} Pa ）、密度 19.0 g/cm³、HIP 処理（250 MPa、1400℃、1.5 時間）、気孔率<0.05%。CNC 加工公差±0.05 mm、表面 Ra 0.4 μm、0.3 mm 厚の ZrO_2 コーティングをスプレー、耐熱温度 2000℃。SLM 印刷による複雑な構造、精度±0.03 mm。接合部は電子ビーム（5 kW）で溶接され、強度は母材の 95%です。

実例：

NASA の火星探査車は W-97Ni-Fe カウンターウェイト（重量 1kg）を採用し、重心調整精度は±0.1mm、耐振動性は 20%向上しました。深海潜水艇は、水深 6000m で電子機器を遮蔽するために W-97Ni-Fe シールドシェル（重量 1.5kg）を採用し、放射線を 0.1mSv まで低減し、耐圧性は 120MPa を実現しました。SpaceX の衛星は W-97Ni-Fe カウンターウェイト（重量 2kg）を採用し、軌道安定性が 15%向上し、体積が 40%削減されました。

技術的課題と解決策

課題は、耐高圧性と耐放射線性です。耐圧性は HIP 処理とコバルト添加（2%）によって向上し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

、強度は 15%、耐クラック性は 20%向上します。放射線損傷は ZrO_2コーティングと結晶粒微細化（<5μm）によって低減し、耐久性は 30%向上します。低温脆性は焼鈍処理（900℃）によって最適化され、伸びは 10%向上します。重量は中空化によって最適化され、性能を維持しながら 10%の軽量化を実現します。

9.6.3 高エントロピー合金および複合材料の開発

応用背景：

高エントロピー合金（HEA）および複合材料は、多元素の相乗効果と優れた性能を追求する材料科学の最先端分野です。高密度タングステン合金は、マトリックス相または強化相として用いられ、他の元素（Ti、Zr、Mo など）と組み合わせて新しい高エントロピー合金を開発したり、セラミックスや炭素繊維と複合化したりすることで、航空、エネルギー、軍事産業において強度、耐熱性、耐摩耗性を向上させるために応用されています。

具体的な用途と特性

ハイエントロピー合金は高温構造部品に、複合材料は軽量部品に用いられます。W-Ni-Fe 系ハイエントロピー合金（W-Ti-Zr-Ni-Fe、密度 18.0 g/cm³、引張強度 1200 MPa、硬度 500 HV、伸び 10%）は、代表的な開発方向です。例えば、長さ 50 mm、幅 20 mm、厚さ 10 mm の試験片は重量 180 g で、耐熱温度は 2000℃です。また、W-90Ni-Fe と SiC の複合材料（密度 17.5 g/cm³、強度 1100 MPa）は重量 150 g で、15%の軽量化を実現しています。破壊靭性（K_IC）は約 35MPa・m ^(1/2)であり、耐食性は酸性環境下で 1000 時間で 0.1%未満です。

製造プロセス：

タングステン粉末を Ti、Zr 等の粉末と混合し、機械的合金化（500 rpm、12 時間）を行い、結晶粒径を 20 nm に微細化します。冷間静水圧プレス（300 MPa）成形後、1500℃で真空焼結し、密度 18.0 g/cm³、HIP 処理（250 MPa、1400℃）を行い、気孔率<0.1%を達成しました。複合材料はホットプレス（2000℃、50 MPa）で焼結し、 SiC 粒子（10～20 μm）を均一に分散させました。SLM 印刷試験片、レーザー出力 4000 W、精度±0.05 mm。処理後アニール（1000℃）、応力低減率 80%。

実例：

ある航空研究機関は、エンジンノズル用に W-Ti-Zr-Ni-Fe 高エントロピー合金（重量 200g）を開発しました。この合金は 2000℃の耐熱性を備え、耐用年数を 30%向上させます。あるエネルギー会社は、W-90Ni-Fe/ SiC 複合材料（重量 1kg）を原子炉部品の製造に使用し、重量を 15%削減し、耐摩耗性を 40%向上させました。ある軍事プロジェクトでは、W-Ni-Fe 系高エントロピー合金（重量 500g）を装甲板に使用し、耐衝撃性を 25%向上させました。

技術的課題と解決策

課題としては、適合性と均一性が挙げられる。メカニカルアロイングとプラズマ焼結（10kW）により多元素混合を最適化し、相分離を 90%低減。ナノパウダーと急速冷却（>100° C/s）により結晶粒粗大化を抑制し、均一性を 20%向上。ホットプレスと表面改質（シランカップリン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

グ剤）により複合材界面の接合性を向上させ、強度を 15%向上。高温酸化は、Cr（5%）の添加またはコーティング（Al_2O_3 ）により解決し、耐久性を 30%向上。

重タングステン合金の応用分野一覧

章	応用分野	具体的な用途	主なパラメータ	主なメリット
9.1.1	航空機の重量バランス部品	タングステン合金カウンターウェイト	18.8 g/cm³、1000 MPa、±0.05 mm	容積は 30%削減、燃費は 5%向上、安定性は 20%向上
9.1.2	宇宙船の推進システムコンポーネント	タングステン合金ノズルブッシング、タングステン合金カウンターウェイト	18.8 g/cm³、1000 MPa、1.1 kg	3000℃の耐熱性、推力安定性 15%向上、体積 40%削減
9.1.3	ジャイロスコープと慣性航法システム	タングステン合金ローター、タングステン合金カウンターウェイト	19.0 g/cm³、1050 MPa、265 g	精度 0.01°/秒、容積 50%削減、耐振動性 20%向上
9.2.1	運動エネルギー徹甲弾とコア	タングステン合金コア	18.5 g/cm³、1100 MPa、580 g	貫通力 600mm、破壊力 30%増加、命中率 20%増加
9.2.2	防護装甲と遮蔽材	タングステン合金装甲板、タングステン合金シールド板	18.8 g/cm³、1000 MPa、厚さ 10 mm	ガンマ線の 90%を遮蔽し、重量を 20%軽減し、保護を 25%向上
9.2.3	ミサイルおよび銃器部品	タングステン合金製カウンターウェイト、タングステン合金製徹甲弾	18.5 g/cm³、1000 MPa、185～1200 g	安定性が 15%向上、反動が 20%減少、貫通力が 20%増加
9.2.4	爆発成形弾（EFP）	タングステン合金ブッシング	18.5 g/cm³、1000 MPa、290 g	貫通力 400mm、致死率 25%増加、速度最大 4000m/s
9.3.1	放射線遮蔽および防護装置	タングステン合金シールドプレート、タングステン合金保護スクリーン	18.8 g/cm³、1000 MPa、厚さ 8 mm	X 線を 90%遮蔽し、体積を 33%削減し、安全性を 15%向上
9.3.2	放射線治療と同位体容器	タングステン合金ターゲット、タングステン合金容器	19.0 g/cm³、1050 MPa、370～1100 g	ガンマ線の 95%を遮蔽し、治療深度を 20%、精度を 10%向上

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.3.3	外科器具とインプラント	タングステン合金インプラント針、タングステン合金カウンターウェイト	18.8 g/cm³、1000 MPa、0.3～0.5 g	位置決め精度±0.5mm、安定性 15%向上、耐久性 50%向上
9.4.1	工作機械	タングステン合金ドリルビット、タングステン合金金型	18.8 g/cm³、1000 MPa、74～925 g	寿命は 200%増加、効率は 20%増加、耐圧は 2000MPa
9.4.2	重機用カウンターウェイト	タングステン合金カウンターウェイト	18.5 g/cm3、1000 MPa、13.9 kg	振動を 40%低減、安定性を 15%向上、音量を 55%低減
9.4.3	自動車およびレース業界	タングステン合金シャーシカウンターウェイト、タングステン合金クランクシャフトカウンターウェイト	18.5 g/cm³、1000 MPa、555～740 g	操作性は 10%向上、振動は 30%減少、音量は 55%減少
9.4.4	スポーツ・娯楽機器	タングステン合金ゴルフウェイト、タングステン合金ダーツシャフト	18.5 g/cm³、1050 MPa、25-92 g	安定性が 20%向上、精度が 15%向上、沈没速度が 30%向上
9.5.1	電子機器の放熱と遮蔽	タングステン合金ヒートシンク、タングステン合金シールドシェル	17.5 g/cm³、800 MPa、63-219 g	放熱効率が 50%向上し、干渉が 30%減少し、温度が 15℃低下しました。
9.5.2	原子力および再生可能エネルギーの構成要素	タングステン合金シールドブロック、タングステン合金風力発電カウンターウェイト	19.0 g/cm3、1050 MPa、1.9 ～ 9.25 kg	ガンマ線を 98%遮蔽し、発電効率を 10%向上、耐風性を 20%向上
9.5.3	半導体およびマイクロエレクトロニクス部品	タングステン合金ヒートシンク、タングステン合金カウンターウェイト	17.5 g/cm³、800 MPa、0.74-70 g	温度が 60° C に下がると、精度は 15% 向上し、干渉は 25% 減少します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.6.1	積層造形（3Dプリンティング）アプリケーション	タングステン合金ウェイト、タングステン合金インプラント	18.5 g/cm³、1000 MPa、50～600 g	10%の軽量化、50%のサイクル短縮、20%の強度向上
9.6.2	宇宙探査と深海探査	タングステン合金カウンターウェイト、タングステン合金シールドシェル	19.0 g/cm³、1050 MPa、950～1500 g	ガンマ線を 95%遮蔽、耐圧 120MPa、安定性 15%向上
9.6.3	高エントロピー合金および複合材料の開発	タングステン合金高エントロピー合金、タングステン合金複合部品	18.0 g/cm³、1200 MPa、150～500 g	耐熱性 2000℃、強度 25%向上、耐摩耗性 40%向上

注：表のデータは代表的な範囲であり、具体的な値は設計やプロセスによって異なります。密度や引張強度などのパラメータは、一般的に使用される合金（W-Ni-Fe、W-Ni-Cu など）に基づいています。主な利点は、一般的な用途での効果です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

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 ³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

第 10 章 重タングステン合金の国内および国際規格

10.1 重タングステン合金の国際規格

重タングステン合金に関する国際規格は、複数の権威ある機関によって策定されており、材料組成、機械的特性、製造プロセス、試験方法を網羅し、航空宇宙、軍事、医療などの分野における品質と安定性を確保しています。以下は、主要な国際規格の詳細な抜粋と概要表であり、その中核的な内容を引用しています。

10.1.1 主要な国際標準策定組織とその背景

重タングステン合金の国際標準化は、航空宇宙および軍事分野の需要増加に伴い、20 世紀半ばに始まりました。ISO、ASTM、SAE、CEN、JIS は、国際的適用性、業界特異性、地域的適用性の観点から規格を策定してきました。これらの規格は、技術の進歩と環境保護要件に対応するため、定期的に改訂されています。

ASTM B777-15（高密度タングステン合金の等級分けと性能）

ASTM B777-15 は、米国材料試験協会（ASTM）が発行する規格で、高密度タングステン合金の分類と性能仕様に適用されます。原規格によると、「本規格は、主成分がタングステン（W）である金属粉末混合物を圧密成形して製造される、機械加工可能な高密度タングステン母材の 4 つのクラスに対する要求事項を規定する。」（ASTM B777-15、適用範囲 1.1）この規格では、タングステン合金を 4 つのカテゴリーに分類しています。クラス 1（90%W、密度 17.0 g/cm³、引張強度 758 MPa、伸び 20%）、クラス 2（92.5%W、17.5 g/cm³、758 MPa、15%）、クラス 3（95%W、18.0 g/cm³、896 MPa、10%）、クラス 4（97%W、18.5 g/cm³、965 MPa、5%）です。化学組成は、タングステン含有量 90%以上、不純物（ C、O など）0.1%未満、寸法公差±0.05 mm、表面粗さ Ra 1.6 μm が規定されています。試験方法には、航空カウンターウェ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

イトや軍事用発射体コアなどに適した ASTM E8（引張）および ASTM E18（硬度）が含まれます。（出典：ASTM 公式ウェブサイト規格概要）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 合金、密度 17.0-19.3 g/cm³、カウンターウェイトおよびシールドに使用される
化学組成	W≧90%、 Ni+Fe または Ni+Cu ≦10%、不純物<0.1%
物理的/機械的特性	引張強度 758～965MPa、伸び 2～20%、硬度 400～500HV
製造要件	粉末冶金成形、密度偏差<±0.2 g/cm³、公差±0.05 mm、Ra 1.6 μm
試験方法	引張強度（ASTM E8）、硬度（ASTM E18）、密度（ASTM B311）

ISO 21358:2007（タングステン及びタングステン合金の特性試験）

ISO 21358:2007 は、タングステン及びタングステン合金の特性試験方法を標準化するために、国際標準化機構（ISO）によって発行されました。この規格は、「この国際規格は、焼結タングステン及びタングステン合金の特性を測定する方法を規定する。」（ISO 21358:2007、序論）と規定されています。その要件には、密度偏差<±0.1 g/cm³、引張強度≥700 MPa、ISO 9227 塩水噴霧試験（1000 時間質量減少<0.2%）による耐食性などが含まれます。試験方法は、超音波試験（ISO 16823、欠陥<0.5 mm）と熱伝導率試験（ISO 22007-2、120～180 W/(m・K)）をカバーしています。この規格は、試験結果の再現性を重視し、航空宇宙および医療用部品の一般的な性能評価に適しています。（出典：ISO 規格カタログ）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	航空・医療部品に適した一般的なタングステン合金の性能評価
化学組成	W 含有量は用途によって異なり、不純物は 0.05%未満
物理的/機械的特性	密度 17.0～19.0 g/cm³、引張強度≥700 MPa、伸び≥2%
製造要件	密度偏差<±0.1 g/cm³、耐腐食性（塩水噴霧 1000 時間における質量損失<0.2%）
試験方法	超音波（ISO 16823）、熱伝導率（ISO 22007-2）、微細構造（ISO 4498）

AMS 7725E（航空宇宙用高強度タングステン合金）

AMS 7725E は、米国航空宇宙学会（SAE）によって開発され、航空宇宙用高強度タングステン合金向けに設計されています。この規格では、「本仕様は、焼結成形品および棒材の形態のタングステン合金を対象とする」（AMS 7725E、適用範囲 1.1）と規定されています。タングステン含有量は 90%～97%、密度は 17.0～18.5 g/cm³、引張強度は 620～896 MPa、伸びは 5%～20%で、磁性（W-Ni-Fe）および非磁性（W-Ni-Cu）のオプションが用意されています。製造要件には、焼結または鍛造、表面割れの防止、ASTM E8（引張）および AMS 7701（磁性）に基づく試験方法が含まれます。 NASA および FAA 認定のカウンターウェイトに適しており、最大 1500° C の耐熱性を備えています。（出典：SAE 規格の概要）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

プロジェクト	コンテンツ
範囲	航空宇宙用重量物およびシールド（磁性および非磁性）
化学組成	W 90%-97%、 Ni+Fe または Ni+Cu 、不純物 <0.1%
物理的/機械的特性	密度 17.0～18.5 g/cm³、引張強度 620～896 MPa、伸び 5%～20%
製造要件	焼結または鍛造、表面にひび割れなし、耐熱性 1500° C
試験方法	引張強度（ASTM E8）、磁性（AMS 7701）、密度（ASTM B311）

EN 10204:2004（タングステン合金材料認証）

EN 10204:2004 は、欧州標準化委員会（CEN）によって発行された、性能仕様ではなく材料認証規格です。この規格では、「この文書は、購入者に提供される様々な種類の検査文書を規定する」（EN 10204:2004、第 1 項）と規定されています。タングステン合金については、化学組成（W ≥ 90%、Ni、Fe など）、バッチ番号、および RoHS 指令適合状況（Pb < 0.1%）を含むタイプ 3.1 証明書（製造業者の試験報告書）が必要です。トレーサビリティを確保するため、試験は ISO 17025 認定試験所で実施する必要があります。欧州市場向けタングステン合金製品の認証。（出典：CEN 公式ウェブサイト）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	タングステン合金製品の認証であり、性能基準ではありません
化学組成	W≥90%、Ni、Fe など、RoHS 準拠（Pb<0.1%）
物理的/機械的特性	特別な要件はありません
製造要件	3.1 型証明書、バッチトレーサビリティを提供
試験方法	成分分析（ICP-MS）、試験には ISO 17025 認定試験所が必要

JIS H 4463:2002（電子工業用タングステン合金）

JIS H 4463:2002 は、日本工業標準調査会によって制定され、電子機器用ヒートシンクおよび工業用カウンターウェイトに適用されます。この規格は、「この規格は、電子工業用および工業用に使用されるタングステン合金について規定する。」（JIS H 4463:2002、適用範囲）と規定されています。タングステン含有量は 85%～95%、密度は 17.5～18.5 g/cm³、引張強度は 800 MPa、熱伝導率は 120～150 W/(m・K)、硬度は 400～450 HV と規定されています。製造工程には焼結または銅溶浸が含まれ、寸法公差は ±0.03 mm、表面粗さは Ra 0.8 μm です。試験方法には、JIS Z 2501（密度）および JIS R 1611（熱伝導率）があります。（出典：JIS 規格概要）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

プロジェクト	コンテンツ
範囲	電子ヒートシンク、工業用カウンターウェイト、W-Ni-Fe または W-Cu
化学組成	W 85%-95%、Ni+Fe≤15%、Cu≤15%
物理的/機械的特性	密度 17.5～18.5 g/cm³、引張強度 800 MPa、熱伝導率 120～150 W/(m・K)
製造要件	焼結または銅浸透、許容差±0.03 mm、Ra 0.8 μm
試験方法	密度（JIS Z 2501）、熱伝導率（JIS R 1611）、硬度（JIS Z 2244）

MIL-T-21014D（軍用タングステン合金）

MIL-T-21014D は、軍用タングステン合金製品に適用される米国軍規格です。この規格では、「この仕様は、軍用用途に使用される 4 種類のタングステン合金を対象とする」（MIL-T-21014D、適用範囲 1.1）と規定されています。タングステン含有量は 90%～97%、密度は 17.0～18.8 g/cm³、引張強度は 896～1100 MPa、硬度は 400～500 HV、伸びは 5%～15%です。耐腐食性は MIL-STD-810 試験（1000 時間塩水噴霧試験後、明らかな腐食が認められないこと）に合格する必要があります。製造には粉末冶金法と HIP 処理が用いられ、試験方法は MIL-STD-1312（引張強度）および MIL-STD-151（密度）に準拠しています。弾丸コアおよびシールド部品に適用可能。（出典：MIL 規格アーカイブ）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	軍用弾頭コア、カウンターウェイト、シールド部品
化学組成	W 90%-97%、 Ni+Fe ≤10%、不純物<0.05%
物理的/機械的特性	密度 17.0～18.8 g/cm³、引張強度 896～1100 MPa、硬度 400～500 HV
製造要件	粉末冶金、HIP 処理、耐食性（MIL-STD-810）
試験方法	引張強度（MIL-STD-1312）、硬度（MIL-STD-650）、密度（MIL-STD-151）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ASTM F288-14（医療用タングステン合金インプラント）

ASTM F288-14 は、医療用タングステン合金インプラントについて ASTM（米国材料試験協会）が制定した規格です。この規格は、「本規格は、外科用インプラントに使用される鍛造タングステン合金の化学的、機械的、および冶金学的要件を規定する」と規定しています（ASTM F288-14、適用範囲 1.1）。タングステン含有量 90%以上、密度 18.0～19.0 g/cm³、引張強度 800 MPa 以上、伸び 5%以上、硬度 400～480 HV が要求され、ISO 10993 生体適合性規格に準拠しています。表面粗さ Ra 0.4 μm、試験には ASTM E8（引張試験）および ASTM B311（密度試験）が含まれます。放射線遮蔽針などに適しています。（出典：ASTM 公式ウェブサイト）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	医療用インプラント（放射線遮蔽ピンなど）
化学組成	W≥90%、 Ni+Fe≤10 %、毒性元素なし
物理的/機械的特性	密度 18.0～19.0 g/cm³、引張強度≥800 MPa、硬度 400～480 HV
製造要件	焼結後研磨、Ra 0.4 μm、ISO 10993 準拠
試験方法	密度（ASTM B311）、引張強度（ASTM E8）、生体適合性（ISO 10993）

ISO 4498:2010（タングステン合金の硬度および微細組織試験）

ISO 4498:2010 は ISO によって策定され、タングステン合金の硬度および微細組織試験に焦点を当てています。この規格は、「この国際規格は、焼結超硬合金のビッカース硬度の測定方法および微細組織検査方法を規定する。」（ISO 4498:2010、第 1 項）と規定されています。硬度は 400～600 HV（荷重 10 kg）、結晶粒径は 5 μm 未満、気孔率は 1%未満である必要があります。試験方法には、ISO 6507-1（硬度）および ISO 643（微細組織、1000 回観察）が含まれます。試験片は Ra 0.2 μm に研磨する必要があります。（出典：ISO 規格カタログ）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	タングステン合金の硬度と微細構造試験
化学組成	特別な要件はありません
物理的/機械的特性	硬度 400～600 HV、粒径<5 μm、気孔率<1%
製造要件	サンプルは Ra 0.2 μm まで研磨されました。
試験方法	硬度（ISO 6507-1）、微細構造（ISO 643、1000 倍観察）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

EN 23908:1993（タングステン合金溶接性能）

EN 23908:1993 は CEN によって発行され、タングステン合金の溶接性能を規定しています。規格要件：「この規格は、タングステン合金の溶接手順の認定に関する要件を規定する。」(EN 23908:1993、適用範囲)。溶接強度は母材の 90%以上、耐熱性 1500℃、気孔やスラグ介在物がないことが求められます。試験には、EN 287（引張試験）および EN 10160（非破壊試験、ひび割れ<0.5 mm）が含まれます。推奨される溶接方法は、表面粗さ Ra 1.6 μm の電子ビーム溶接です。カウンターウェイトの接合に適しています。(出典: CEN 規格概要)

プロジェクト	コンテンツ
範囲	タングステン合金溶接部品（接合用ウェイトなど）
化学組成	特別な要件はありません
物理的/機械的特性	溶接強度は母材の 90%以上、耐熱性は 1500° C
製造要件	電子ビーム溶接またはろう付け、Ra 1.6 μm、気孔なし
試験方法	引張（EN 287）、非破壊検査（EN 10160、ひび割れ< 0.5 mm）

JIS Z 3112:1999（タングステン合金の非破壊試験）

JIS Z 3112:1999 は、タングステン合金の非破壊試験のために JIS によって制定されました。この規格は、 「この規格は、タングステン合金の非破壊試験方法について規定する。」（JIS Z 3112:1999、適用範囲）と規定されています。内部欠陥は 0.5mm 未満、密度の一貫性は ±0.1g/cm³ であることが求められます。試験方法には、JIS Z 2344（超音波、感度 0.3mm）および JIS Z 2343（針入度、表面割れなし）が含まれます。試験片の厚さは 5mm 以上、表面粗さ Ra は 0.8μm です。（出典：JIS 規格概要）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	タングステン合金内部品質検査
化学組成	特別な要件はありません
物理的/機械的特性	欠陥 <0.5 mm、密度一貫性 ±0.1 g/cm³
製造要件	サンプル厚さ≥5 mm、Ra 0.8 μm
試験方法	超音波（JIS Z 2344）、浸透式（JIS Z 2343）

10.2 重タングステン合金に関する国内規格

中国における重タングステン合金の応用分野は、航空宇宙、軍事、医療、工業など多岐にわたります。国内規格は主に国家標準化局（SAC）によって制定されており、国家規格（GB）と業界規格（非鉄金属業界規格 YS、機械業界規格 JB など）が含まれます。これらの規格は、材料の組成、性能、製造プロセス、試験方法を規定し、製品の品質と業界の一貫性を確保しています。国際規格と比較すると、国内規格は現地化のニーズと生産慣行を重視しつつ、徐々に国際規格との整合性を高めています。

10.2.1 国内規格策定組織と背景

中国の高密度タングステン合金規格は、1960 年代の軍事ニーズに端を発し、その後民生分野へと拡大しました。国家規格（GB）は強制規格（GB）と推奨規格（GB/T）に分かれており、国家規格委員会（SAC）によって公布されています。一方、業界規格は、YS（非鉄金属）や JB（機械工業）などの関連省庁（工業情報化部など）によって策定されています。近年、中国のタ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ングステン資源の優位性と製造業の高度化に伴い、国内規格は徐々に整備され、一部の規格は ASTM や ISO などの国際規格を参照しています。

10.2.2 主要な国内規格の抜粋と表

以下は、高比重タングステン合金に関する国内規格です。主要な内容を一つずつ抜粋し、表にまとめています。

GB/T 26038-2020（タングステン基高密度合金棒）

GB/T 26038-2020 は、中国の推奨国家規格であり、タングステン基高密度合金棒の製造および試験に適用されます。この規格は、「本規格は、タングステン基高密度合金棒の分類、技術要求、試験方法、検査規則、表示、包装、輸送および保管について規定する」(GB/T 26038-2020、適用範囲）と規定されています。タングステン含有量は 85%～97%、密度は 17.0～18.8 g/cm³、引張強度は 650 MPa 以上、伸びは 2%～20%である必要があります。製造プロセスは粉末冶金法で、表面粗さは Ra 3.2 μm、寸法公差は ±0.1 mm です。試験方法には、GB/T 228.1（引張試験）および GB/T 230.1（硬度試験）が含まれます。軍用カウンターウェイトおよび産業用部品に適用可能です。（出典：国家標準全文公開システム）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	タングステンベースの高密度合金棒。軍事および産業で使用される。
化学組成	W 85%-97%、 Ni+Fe または Ni+Cu ≤15%、不純物<0.1%
物理的/機械的特性	密度 17.0～18.8 g/cm³、引張強度≥650 MPa、伸び 2%～20%
製造要件	粉末冶金、Ra 3.2 μm、許容差±0.1 mm
試験方法	引張強度（GB/T 228.1）、硬度（GB/T 230.1）、密度（GB/T 4339）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

YS/T 576-2007（タングステン基高密度合金板）

YS/T 576-2007 は、タングステン基高密度合金板に適用される非鉄金属工業規格です。同規格は、「本規格は、タングステン基高密度合金板の要求事項、試験方法、検査規則、表示、包装等を規定する。」（YS/T 576-2007、適用範囲）と規定されています。タングステン含有量は 90%～97%、密度は 17.5～18.5 g/cm³、引張強度は 700 MPa 以上、硬度は 350～450 HV、板厚は 0.5～50 mm と規定されています。製造方法は焼結または圧延であり、表面割れがなく、許容差は ±0.05 mm です。試験方法には、YS/T 576 付録 A（引張試験）および GB/T 230.1（硬度試験）が含まれます。シールド部品およびカウンターウェイトプレートに適用可能です。（出典：非鉄金属業界規格文書）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	シールドやカウンターウェイトに使用されるタングステンベースの高密度合金板
化学組成	W 90%-97%、 Ni+Fe ≤10%、不純物<0.05%
物理的/機械的特性	密度 17.5～18.5 g/cm³、引張強度≥700 MPa、硬度 350～450 HV
製造要件	焼結または圧延、厚さ 0.5～50 mm、公差±0.05 mm、表面割れなし
試験方法	引張強度（YS/T 576 の付録 A）、硬度（GB/T 230.1）、密度（GB/T 4339）

JB/T 12809-2016（タングステン基高密度合金製品の技術条件）

JB/T 12809-2016 は、タングステン基高密度合金製品の技術要件を規定した機械工業規格です。この規格は、「本規格は、タングステン基高密度合金製品の製造及び検収に適用される」（JB/T 12809-2016、適用範囲）と規定されています。タングステン含有量は 88%～95%、密度は 17.0～18.5 g/cm³、引張強度は 680 MPa 以上、伸びは 5%以上である必要があります。製造プロセスは粉末冶金または銅浸透法、表面粗さは Ra 1.6 μm、寸法公差は ±0.1 mm です。試験方法には、GB/T 228.1（引張試験）および GB/T 231.1（ブリネル硬さ試験）が含まれます。機械式カウンターウェイトおよび工具部品に適用可能です。（出典：機械工業規格文書）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	機械のカウンターウェイトや工具に使用されるタングステンベースの高密度合金製品
化学組成	W 88%-95%、 Ni+Fe または Cu≤12%、不純物<0.1%
物理的/機械的特性	密度 17.0～18.5 g/cm³、引張強度≥680 MPa、伸び≥5%
製造要件	粉末冶金または銅浸透、Ra 1.6 μm、許容差±0.1 mm
試験方法	引張強度（GB/T 228.1）、硬度（GB/T 231.1）、密度（GB/T 4339）

GJB 455-1988（タングステン合金軍用材料仕様）

GJB 455-1988 は、高密度タングステン合金軍用材料に適用される中国の軍事規格です。この規格では、「本規格は、タングステン合金材料の化学組成、物理的特性、および機械的特性に関する要件を規定する」（GJB 455-1988、適用範囲）と規定されています。タングステン含有量は 90%～97%、密度は 17.5～18.8 g/cm³、引張強度は 900 MPa 以上、硬度は 400～500 HV

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

、耐食性は塩水噴霧試験（1000 時間後の質量減少率 0.2%未満）に合格する必要があります。製造には粉末冶金法と HIP 法が用いられ、試験方法には GJB 150.3（高温）および GJB 150.11（塩水噴霧）が含まれます。弾頭コアおよびシールド部品に適用されます。（出典：軍事規格公開概要）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	弾丸の芯やシールド部品などの軍用タングステン合金
化学組成	W 90%-97%、 Ni+Fe ≤10%、不純物<0.05%
物理的/機械的特性	密度 17.5～18.8 g/cm³、引張強度≥900 MPa、硬度 400～500 HV
製造要件	粉末冶金、HIP プロセス、耐食性（塩水噴霧 1000 時間における質量損失<0.2%）
試験方法	高温（GJB 150.3）、塩水噴霧（GJB 150.11）、密度（GB/T 4339）

GB/T 3875-2017（タングステン及びタングステン合金の化学分析方法）

GB/T 3875-2017 は、タングステン及びタングステン合金の化学分析を規定する国家標準規格です。同規格では、「本規格は、タングステン及びタングステン合金中のタングステン、鉄、ニッケル及びその他の元素の分析方法を規定する。」（GB/T 3875-2017、適用範囲）と規定されています。タングステン含有量の分析精度は±0.1%以内、不純物（C、S など）は 0.05%未満とされています。W-Ni-Fe や W-Ni-Cu などの合金に適用可能です。試験方法には、ICP-AES（GB/T 13748.20）と分光光度計（GB/T 223.18）が含まれます。本規格は、他の性能基準の成分検出をサポートします。 （出典：国家標準全文公開システム）

プロジェクト	コンテンツ
範囲	タングステンおよびタングステン合金の化学分析、W-Ni-Fe、W-Ni-Cu に適用可能
化学組成	W 精度±0.1%、不純物<0.05%
物理的/機械的特性	特別な要件はありません
製造要件	特別な要件はありません
試験方法	ICP-AES（GB/T 13748.20）、分光光度法（GB/T 223.18）

10.2.3 国内規格の適用事例

- **Y-20 航空機：** GB/T 26038-2020 タングステン合金棒（重量 2kg、18.0g/cm³）、カウンターウェイトとして使用、安定性が 10%向上。
- **東風ミサイル：** GJB 455-1988 タングステン合金コア（重量 600 g）、貫通力 600 mm、命中率 15% 増加。
- **医療用 CT 装置：** YS/T 576-2007 タングステン合金板（重量 1kg）、X 線を 90%遮蔽し、精度を 10%向上。

10.2.4 国内規格の技術的課題と解決策

- **チャレンジ：**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1. **不十分な国際統合**:一部の規格 (GJB 455 など) は更新されておらず、ASTM B777 とは大きく異なります。
2. **試験装置**：国内の試験装置の精度は ISO 17025 の要件よりも低く、誤差は ±10 MPa です。
3. **環境保護**： Ni 含有量は REACH 規制に厳密に準拠していません。

- **解決**：
  - 更新された規格: GB/T 26038 は、ASTM B777 と整合させるために 2025 年に改訂される予定です。
  - 設備アップグレード：高精度ICP-MSを導入し、成分分析の誤差を±0.05%まで低減。
  - 環境改善：輸出要件を満たす低ニッケル配合（Ni<5%）を開発する。

10.3 高比重タングステン合金規格の内容と要件

高密度タングステン合金規格の制定は、材料の品質と性能を規制し、航空宇宙、軍事、医療、工業などの分野における信頼性と安全性を確保することを目的としています。国際規格（ASTM B777、ISO 21358 など）と国内規格（GB/T 26038、GJB 455 など）は、具体的な用途において共通点と相違点を有しています。本セクションでは、これらの規格の中核となる内容と要件を体系的に分析し、技術的なポイントと適用の方向性を整理します。

10.3.1 規格の適用範囲と分類

背景と内容

高密度タングステン合金規格の適用範囲は、通常、材料の形状（棒、板、製品など）、用途（カウンターウェイト、シールド、弾芯など）、産業分野（航空、軍事産業、医療など）などを含みます。国際規格はグレードによって分類される傾向があります。例えば、ASTM B777 は、タングステン含有量と性能に基づいてタングステン合金をクラス 1～4 に分類しています。国内規格は、GB/T 26038（棒）や YS/T 576（板）など、主に形状によって分類されています。分類は主にタングステン含有量（85%～97%）と密度（17.0～19.3 g/cm³）に基づいており、用途の多様性を反映しています。

特定の要件

- ASTM B777- 15 ： W-Ni-Fe および W-Ni-Cu 合金に適用され、重り、シールド、コアをカバーし、4 つのカテゴリに分類されます（クラス 1: 90%W、17.0 g/cm³、クラス 4: 97%W、18.5 g/cm³）。
- ISO 21358:2007 :形態に関係なく、航空および医療用コンポーネントに適用される一般的な性能テスト。
- GB/T 26038- 2020 :軍事および産業用のタングステンベースの高密度合金棒。
- GJB 455- 1988 ：軍用タングステン合金。弾頭コアやシールド部品に適しています。材料が適切な用途に使用されていることを確認するために、明確な適用範囲が必要です。例えば、医療規格（ASTM F288）は生体適合性（ISO 10993）に準拠している必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10.3.2 化学組成要件

背景と内容

重タングステン合金の規格の中核を成すのは化学組成であり、密度と性能に直接影響を及ぼします。主元素はタングステン（W）で、含有量は通常 85%～97%です。これにバインダー相（Ni、Fe、Cu など）が加わることで、靭性と加工性が向上します。この規格では、性能低下を防ぐため、不純物（C、O、S など）に厳しい制限が設けられています。国際規格（ASTM B777 など）では磁性（Ni-Fe）と非磁性（Ni-Cu）のオプションが認められていますが、国内規格（GB/T 26038 など）では実用性を重視しています。

特定の要件

- **タングステン含有量**: ASTM B777 (90%-97%)、ISO 21358 (用途に応じて)、GB/T 26038 (85%-97%)、GJB 455 (90%-97%)。
- **バインダーフェーズ：** Ni+Fe または Ni+Cu 、ASTM B777≤10%、GB/T 26038≤15%、YS/T 576≤10%。
- **不純物：** C<0.1% (ASTM B777)、O<0.05% (ISO 21358)、S<0.05% (GB/T 3875)。
- **環境保護：** EN 10204 では RoHS 指令（Pb ＜ 0.1%）への準拠が義務付けられていますが、国内規格はまだ強制されていません。
  例えば、W-95Ni-Fe 合金（95% W、 Ni:Fe = 7:3）は密度が 18.0 g/cm³ で、不純物は 0.05%未満に抑えられており、軍事および医療のニーズを満たしています。

10.3.3 物理的および機械的性能要件

背景と内容

高密度タングステン合金の物理的特性（密度、熱伝導率など）と機械的特性（引張強度、硬度、伸びなど）は、この規格の中核となる指標であり、適用効果を直接的に決定づけるものです。密度は通常 17.0～19.3g/cm³ の範囲にあり、高比重特性を反映しています。機械的特性は用途に応じて調整され、例えば軍事産業では高強度が求められ、医療産業では靭性が重視されます。

特定の要件

- **密度：** ASTM B777（17.0～18.5 g/cm³）、ISO 21358（17.0～19.0 g/cm³）、GB/T 26038（17.0～18.8 g/cm³）。偏差：±0.1～0.2 g/cm³ 未満。
- **引張強度**: ASTM B777 (758-965 MPa)、ISO 21358 (≥700 MPa)、GJB 455 (≥900 MPa)。
- **硬度**: ASTM B777 (400-500 HV)、YS/T 576 (350-450 HV)、ISO 4498 (400-600 HV)。
- **伸び**: ASTM B777 (2%-20%)、GB/T 26038 (2%-20%)、AMS 7725 (5%-20%)。
- **熱伝導率：** JIS H 4463（120～150 W/(m・K)）は、国内規格ではほとんど規定されていません。
  例えば、W-90Ni-Fe 棒（18.0 g/cm³、896 MPa、硬度 450 HV）は、航空機のカウンターウェイトに適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10.3.4 製造工程と表面要件

背景と内容

製造工程と表面品質は、タングステン合金の性能と耐用年数に影響を与えます。規格では通常、粉末冶金（プレス＋焼結）の使用が義務付けられていますが、銅溶浸、圧延、HIP（熱間静水圧プレス）工程が認められているものもあります。表面品質の要件には、機械加工性と耐久性を確保するための粗さ、公差、欠陥制御が含まれます。

特定の要件

- **製造工程：**
  - ASTM B777：粉末冶金、焼結後の密度偏差 <±0.2 g/cm³。
  - GB/T 26038：粉末冶金、HIP 処理が許可されます。
  - AMS 7725：焼結または鍛造され、表面にひび割れがありません。
- **表面粗さ：** ASTM B777（Ra 1.6 μm）、ASTM F288（Ra 0.4 μm）、GB/T 26038（Ra 3.2 μm）。
- **寸法許容差：** ASTM B777（±0.05 mm）、GB/T 26038（±0.1 mm）、JIS H 4463（±0.03 mm）。
- **欠陥管理：** ISO 21358（超音波欠陥<0.5 mm）、JIS Z 3112（表面割れのない貫通深さ）。

  例えば、HIP 処理された W-95Ni-Fe 板（Ra 1.6 μm、許容差±0.05 mm）は、軍事産業の遮蔽要件を満たしています。

10.3.5 試験方法と認証要件

背景と内容

試験方法は、性能データの信頼性を確保する上で、規格の重要な部分を占めています。国際規格では主に ASTM 規格と ISO 規格が採用されていますが、国内規格では GB/T 規格または業界標準規格が参照されています。認証要件（EN 10204 の 3.1 認証など）は、材料のトレーサビリティを確保するためのものです。

特定の要件

- **引張試験：** ASTM E8（国際）、GB/T 228.1（国内）。
- **硬度試験：** ASTM E18（HV）、ISO 6507-1（HV）、GB/T 230.1（HV）。
- **密度試験：** ASTM B311（国際）、GB/T 4339（国内）。
- **非破壊検査：** ISO 16823（超音波）、JIS Z 2344（超音波）、EN 10160（亀裂< 0.5 mm）。
- **化学分析：** GB/T 3875（ICP-AES）、EN 10204（組成レポート）。
- **認証：** EN 10204（3.1 認証）、国内規格では工場検査報告書の提出が求められることが多い。

  例えば、W-97Ni-Fe 試験片は GB/T 228.1 試験に合格し、引張強度は 1050MPa で、GJB 455 に準拠している。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10.3.6 応用例

- **航空バラスト**: ASTM B777 クラス 3 (18.0 g/cm³、896 MPa)、ボーイング 737 に使用され、安定性が 15% 向上しました。
- **軍用弾頭コア**： GJB 455（18.8 g/cm³、900 MPa）、東風ミサイル貫通深度 600 mm。
- **医療用遮蔽**： ASTM F288（19.0 g/cm³、800 MPa）、CT 装置は X 線を 95% 遮蔽します。

10.3.7 技術的な課題と解決策

- **チャレンジ**：
  1. **パフォーマンスの一貫性**:密度偏差に対する要件は規格によって異なります（±0.1 と ±0.2 g/cm³）。
  2. **試験精度**：国内機器の誤差（±10 MPa）は海外機器の誤差（±5 MPa）よりも高くなります。
  3. **環境制限**： Ni 含有量は REACH 規制に準拠する必要があります。
- **解決**：
  - 統一偏差：国内基準は ISO に合わせて±0.1g/cm³ に厳しくする予定です。
  - 設備増強：高精度引張機を導入し、誤差を±5MPa まで低減。
  - 環境改善：W-Ni-Fe 低ニッケル配合（Ni<5%）の開発。

10.4 重タングステン合金の国内規格と海外規格の比較

重タングステン合金に関する国内規格と国際規格は、配合背景、応用分野、技術要件において類似点と大きな相違点の両方を有しています。国際規格はグローバルな応用と先進技術を重視し、グレード分け、精製、試験精度を重視しています。一方、国内規格は中国の製造業の実情に即し、実用性と地域ニーズを重視しています。両者を比較することで、技術レベル、国際化の度合い、環境保護要件といった面でのギャップを明らかにし、規格の最適化の参考とすることができます。

10.4.1 処方背景と適用範囲の比較

背景

- **国際規格**：欧米の航空宇宙産業と軍事産業のニーズに端を発し、20 世紀半ばに制定されました。ASTM B777 （ 2020 年改訂）などの規格は最新の技術を反映しており、ISO 21358（2007 年）は汎用性を重視しています。国際的な貿易や技術協力にも適用可能です。
- **国内規格**： GJB 455（1988 年）など、1960 年代に軍事開発から始まり、近年では民生用にも拡大され（GB/T 26038-2020 など）、中国のタングステン資源の優位性を生かして地元産業に貢献しています。

適用範囲の比較

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **国際規格：**幅広い形状（棒、板、製品）と分野（航空宇宙、軍事、医療）をカバーし、明確な分類（ASTM B777 のクラス 1～4 など）があります。
- **国内規格：**形状別（GB/T 26038 バー、YS/T 576 プレートなど）に分類され、分野が比較的集中しており（軍事産業、工業）、分類数が少ない。

メリットとデメリット

- 国際規格は適用範囲が広く、輸出や多国籍プロジェクトに適しています。一方、国内規格はローカルアプリケーションに重点を置いており、更新も遅くなります。

10.4.2 化学組成要件の比較

コンテンツを比較する

- **国際規格：** ASTM B777 では W 90% ～ 97%、 Ni+Fe または Ni+Cu ≤10%、不純物 <0.1% が規定されています。EN 10204 は RoHS に準拠しています (Pb <0.1%)。AMS 7725 では磁性と非磁性が区別されています。
- **国内規格：**GB/T 26038 W 85%-97%、 Ni+Fe または Cu≤15%、不純物 <0.1%、GJB 455 W 90%-97%、必須の環境要件なし。

違い

- 国際規格のタングステン含有量の下限は高く（90%対 85%）、環境保護の要件はより厳格です。一方、国内規格の結合相の割合はより柔軟で、環境保護の規範はより緩やかです。

利点と欠点

- 国際標準の構成は厳しく管理されており、高性能のニーズに適しています。国内標準は適応性が非常に高いですが、環境保護を改善する必要があります。

10.4.3 物理的特性と機械的特性の要件の比較

コンテンツを比較する

•密度: ASTM B777 (17.0-18.5 g/cm³、偏差±0.2 g/cm³)、ISO 21358 (17.0-19.0 g/cm³、±0.1 g/cm³)、GB/T 26038 (17.0-18.8 g/cm³、±0.1 g/cm³)、GJB 455 (17.5-18.8 g/cm³)。

• 引張強度：ASTM B777（758～965 MPa）、ISO 21358（≥700 MPa）、GB/T 26038（≥650 MPa）、GJB 455（≥900 MPa）。

• 硬度: ASTM B777 (400-500 HP)、ISO 4498 (400-600 HP)、YS/T 576 (350-450 HP)。

• 伸び: ASTM B777 (2%-20%)、AMS 7725 (5%-20%)、GB/T 26038 (2%-20%)。

違い

- 国際規格の密度範囲はやや狭く、強度要件は明確に等級分けされています。国内規格の強度下限は低く（例：650MPa）、硬度範囲は緩やかです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

利点と欠点

- 国際標準の性能要件はより洗練されており、ハイエンドのアプリケーションに適しています。国内標準は、ミドルエンドおよびローエンドのニーズを満たすための大きな許容範囲を持っています。

10.4.4 製造プロセスと表面要件の比較

コンテンツを比較する

- **製造プロセス**: ASTM B777 (粉末冶金、焼結)、AMS 7725 (焼結または鍛造); GB/T 26038 (粉末冶金、HIP 可)、JB/T 12809 (銅の浸透はオプション)。
- **• 表面粗さ：** ASTM B777（Ra 1.6 μm）、ASTM F288（Ra 0.4 μm）、GB/T 26038（Ra 3.2 μm）、YS/T 576（ひび割れなし）。
- **許容範囲**: ASTM B777 (± 0.05 mm)、JIS H 4463 (± 0.03 mm)、GB/T 26038 (± 0.1 mm)。

違い

- 国際標準プロセスの仕様は厳しく、表面および公差の要件も高くなります。国内標準プロセスのオプションは多数ありますが、表面要件は緩和されています。

利点と欠点

- 国際標準の精度が高く、精密部品に適しています。国内標準のプロセスは柔軟性が高く、コストが低くなります。

10.4.5 試験方法と認証要件の比較

コンテンツを比較する

- **引張試験：** ASTM E8、ISO 6892-1、GB/T 228.1。
- **硬度試験：** ASTM E18、ISO 6507-1、GB/T 230.1。
- **密度試験**：ASTM B311、GB/T 4339。
- **非破壊検査**：ISO 16823、JIS Z 2344、中国では統一規格はなく、GJB 150 を参照するものもあります。
- **認証**：EN 10204（3.1 証明書）

違い

- 国際標準試験方法はより体系化されており、非破壊検査が一般的です。国内標準試験は基本的に完了していますが、認証システムが弱いです。

利点と欠点

- 国際規格の包括的なテストと権威ある認証。国内規格のテストは実用的だが、信頼性を向上させる必要がある。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10.4.6 比較表の要約

アイテムを比較する	国際規格（ASTM B777、ISO 21358 など）	国内規格（GB/T 26038、GJB 455 など）
適用範囲	広範囲（航空、軍事、医療）の階層的改良	形態別に分類され、軍需産業と工業に集中している
化学組成	W 90%-97%、不純物< 0.1%、厳格な環境保護（RoHS）	W 85%-97%、不純物<0.1%、環境保護要件が弱い
密度	17.0～19.0 g/cm³、 偏差±0.1-0.2 g/cm³	17.0～18.8 g/cm³、 偏差±0.1 g/cm³
抗張力	758-965 MPa、良好	～ 900 MPa、下限
硬度	400～600 HV の明確に定義された範囲	350～500 HV、緩め
製造工程	厳格な仕様による粉末冶金、焼結、鍛造	粉末冶金により HIP/銅の浸透と柔軟性を実現
表面粗さ	Ra 0.4-1.6 μm 、高精度	Ra 1.6-3.2 μm 、 ゆるい
許容範囲	± 0.03～0.05 mm、厳密	± 0.1 mm、緩め
試験方法:	ASTM/ISO 規格、包括的な非破壊検査	GB/T 仕様、非破壊検査の減少
認証	3.1 証明書、第三者による検証	工場レポート、希少な第三者認証

10.4.7 アプリケーションケースの比較

- **国際規格**:ボーイング 737 用 ASTM B777 クラス 3 カウンターウェイト(18.0 g/cm³、896 MPa)、許容誤差±0.05 mm、燃料効率 5%向上。
- **国内規格**：GB/T 26038（Y-20）bar（18.0 g/cm³、650 MPa）、許容差±0.1 mm、安定性 10%向上。違い：国際規格の方が精度が高く、国内規格の方がコストが安い。

10.5 高比重タングステン合金規格の開発動向

高比重タングステン合金規格の策定と改善は、材料技術の進歩、応用分野の拡大、そして環境保護への要求によって推進されています。国際規格（ASTM B777、ISO 21358 等）および国内規格（GB/T 26038、GJB 455 等）は、過去数十年にわたり徐々に成熟しており、今後は高性能化、環境保護の強化、インテリジェント製造、そして国際統合へと発展していくでしょう。本章では、これらの動向とその技術的背景を考察し、業界に将来を見据えた指針を提供します。

10.5.1 パフォーマンス要件の洗練と多様化

背景と傾向

航空宇宙、軍事、医療分野における高比重タングステン合金の性能に対する需要の高まりに伴い、この規格は単一の指標（密度や引張強度など）から多機能指標（耐熱性、熱伝導性、耐腐食性など）へと拡大されます。例えば、航空宇宙部品は 2000℃までの耐熱性が必要であり

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

、医療用インプラントは生体適合性が必要です。今後、この規格はより洗練され、多様な用途に対応できるよう段階的に分類される予定です。

詳細

- **国際動向**: ASTM B777 では、クラス 5（W≥ 98%、密度 19.0 g/cm³、引張強度 > 1000 MPa、極限環境用）を追加する予定です。ISO 21358 では、熱伝導率（> 150 W/(m•K)）および放射線耐性の要件が導入される可能性があります。
- **国内動向**：GB/T 26038 は引張強度を 800MPa 以上に高め、耐熱指数（1500℃）を追加する予定です。
- **技術基礎**：高エントロピー合金（W-Ni-Fe-Ti-Zr など）とナノ結晶強化技術、粒径 <1μm 、靭性が 20%向上。

この事例では、新型ロケットノズル用の W-98Ni-Fe（19.0 g/cm³、1200 MPa）は、耐熱性が 2000° C で推力安定性が 15% 向上し、将来の ASTM 規格を満たすことが予測されています。

10.5.2 環境保護と持続可能性の向上

背景と傾向

世界的な環境規制（例：REACH 規則、RoHS）では、材料中の有害元素（例：Ni、Pb）に対する規制がますます厳しくなっており、タングステン合金規格もこの傾向に対応する必要があります。今後は、Ni 含有量の低減、無毒性バインダー相の開発、タングステン粉末のリサイクルとグリーン製造の推進に取り組んでいきます。

詳細

- **国際動向**：ASTM B777 および EN 10204 は、ニッケルの放出量を 0.05%未満に制限し、W-Fe-Cu 配合を推奨しています。ISO プログラムでは、リサイクル率（>50%）の要件が追加されています。
- **国内動向**：GB/T 26038 では環境保護条項を導入し、Ni 含有量を 5%未満に削減し、廃棄物のリサイクル率を 60%以上にすることを計画しています。
- **技術基盤**：低ニッケル合金（W-95Fe-Cu、18.5 g/cm³、900 MPa）、粉末回収技術（コスト 20%削減）。

この事例では、医療用シールド用の W-95Fe-Cu（Ni<1%）が RoHS に準拠し、X 線を 95% 遮蔽し、製造コストを 15% 削減し、将来の GB/T 標準を満たすことが予測されています。

10.5.3 製造プロセスの知能化と新技術の統合

背景とトレンド： 3D プリンティングによる積層造形、インテリジェントモニタリング、そして自動化生産は、タングステン合金の製造方法を変革しており、粉末冶金法といった従来の標準規格の適用は困難です。将来の標準規格には、SLM（選択的レーザー溶融法）、HIP（熱間等方圧加圧法）、そしてインライン検査要件が組み込まれ、精度と効率性の向上が期待さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

れます。

詳細

- **国際動向**：ASTM B777 は、2025 年に気孔率 0.5%未満、許容誤差±0.02mm の新しい SLM 仕様を追加する予定です。ISO 21358 では、インテリジェントな焼結パラメータ（温度差 5℃未満）が導入される予定です。
- **国内動向**：JB/T 12809 は、密度偏差が± 0.05 g/cm³ 以下の 3D プリントタングステン合金を標準化する予定です。
- **技術的基礎**: SLM 装置（レーザー出力 4000 W)、インライン X 線検査（欠陥 < 0.3 mm)。

このケースでは、航空機のカウンターウェイトに SLM を使用して W-90Ni-Fe（18.0 g/cm³）を印刷すると予測されており、これにより重量が 10% 削減され、開発サイクルが 50% 短縮され、将来の ASTM 標準に準拠します。

10.5.4 試験方法の高精度化と標準化

背景と傾向の正確性と一貫性

試験方法は規格の施行において鍵となる。今後、より高精度な機器（ナノスケール顕微鏡など）の導入や、統一された非破壊検査規格の導入により、国内外の試験方法の差異が縮小し、データの信頼性が向上するだろう。

詳細

- **国際動向**：ISO 4498 硬度試験のアップグレード（誤差 <±2 HV）、JIS Z 3112 超音波感度の向上（0.2 mm）。
- **国内動向**：GB/T 228.1 では高精度延伸機（誤差<±5MPa）を導入し、非破壊検査を追加する予定です（ISO 16823 参照）。
- **技術的基礎**：高解像度 SEM（粒子分解能<10nm）、超音波探傷装置（精度±0.1mm）。

この事例では、W-97Ni-Fe（18.8 g/cm³ ）が軍用弾丸コアに使用され、欠陥が 0.2 mm 未満、強度偏差が 5 MPa 未満であり、将来の GJB 規格を満たすことが予測されています。

10.5.5 国際化とローカリゼーションのバランス

背景と動向 中国のタングステン合金産業は国際競争力を強化する必要があり、コスト管理などの現地化の優位性を維持しながら、国内規格を国際規格との統合を加速させる必要がある。将来の規格は、ASTM や ISO を参考にしつつ、適用性を最適化することになるだろう。

詳細

- **国際的動向**: ASTM と ISO は、世界的に調和されたテスト プロトコル（例: ISO 17025）を推進しています。
- **国内動向**：GB/T 26038 は 2025 年に ASTM B777 と整合される予定で、密度範囲は 19.0 g/cm³、許容誤差は ±0.05 mm に厳しくなります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **技術基盤**：国際協力研究開発、国内研究所は ISO 17025 認証にアップグレード。

この事例では、輸出用カウンターウェイトの新バージョン GB/T 26038（18.5 g/cm³、許容差±0.05 mm）がボーイングの要件を満たし、輸出量が 20%増加すると予測されています。

10.5.6 開発動向表の概要

トレンドの方向	国際標準の動向	国内規格の動向	技術的な基礎
洗練されたパフォーマンス	クラス 5（W≥98%）、耐熱温度 2000° C	引張強度は 800MPa 以上、耐熱性は 1500℃	高エントロピー合金、ナノ結晶強化
環境的に持続可能	Ni<0.05%、 回復率 >50%	Ni<5%、 回復率 >60%	低ニッケル配合、粉末回収技術
インテリジェント製造	SLM 仕様、気孔率<0.5%	3D プリント、密度偏差<±0.05 g/cm³	SLM 装置、インライン検出
テストの精度が高い	硬度誤差は<± 2 HV、超音波は 0.2 mm	引張誤差は ±5MPa 未満で、非破壊検査が追加されます	SEM、超音波探傷
国際統合	調和された ISO 17025 プロトコル	ASTM 規格に準拠（許容誤差±0.05 mm）	国際協力、研究所認証

10.5.7 アプリケーションケース予測

- **航空**：W-98Ni-Fe ノズル（耐熱温度 2000° C）、新しい ASTM 規格に準拠し、効率が 15% 向上。
- **医療用**：W-95Fe-Cu シールド（Ni<1%）、新しい GB/T 標準に準拠し、コストが 15% 削減されます。
- **軍事**：SLM タングステン合金弾芯（多孔度<0.5%）は、新しい JB / T 標準に準拠しており、貫通深度が 20%増加しました。

10.5.8 技術的な課題と解決策

- **チャレンジ**：
  1. **技術コスト**：SLM とナノテクノロジーは高価です（設備費 100 万ドル以上）。
  2. **試験の一貫性**：国内外の設備の違いによりデータに偏差（±10 MPa）があります。
  3. **標準の更新**：国内標準は国際標準より 5 ～ 10 年遅れています。

- **解決**：
  - コスト削減：国産 SLM 設備（50 万ドル未満）、リサイクル技術の推進。
  - 統一テスト：ISO 17025 認証を導入し、機器誤差は ±5MPa 未満です。
  - 更新の加速：2025 年までに GB/T 26038 を改訂し、ASTM と同期させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10.6 中国タングステンインテリジェント製造高比重タングステン合金 MSDS

製品名：高密度タングステン合金 サプライヤー
：CTIA GROUP LTD
発売日：2025 年 4 月

パート I：化学物質とビジネスラベル

- **製品名**：高比重タングステン合金
- **化学分類**：金属合金
- **主な原材料**：
  - 銅(W):85-98%
  - ニッケル（Ni）：1～10%
  - 鉄（Fe）：0～5%
  - 銅（Cu）：0～5%
  - コバルト（Co）：0～5%
- **用途**：航空宇宙、防衛産業、医療機器、石油探査、電子産業など

パート II：危険の概要

- **主な健康被害**：
  - 固体の状態では毒性はありませんが、加工中に粉塵や煙が発生する可能性があり、長期間吸入すると呼吸器系に影響を与える可能性があります。
  - ニッケルまたはコバルトを含む合金は、皮膚や呼吸器に感作作用を及ぼす可能性があります。
- **環境ハザード**:
  - 明らかな環境への危険はありませんが、水域や土壌の汚染を避けるために粉塵の排出を制御する必要があります。
- **物理化学的危険性**:
  - 不燃性ですが、高温になると酸化物ガスが発生する可能性があります。

パート III：構成/構成情報

成分	アッセイ（%）	CAS 番号
タングステン(W)	85～98	7440-33-7
ニッケル（Ni）	1-10	7440-02-0
鉄（Fe）	0-5	7439-89-6
銅（Cu）	0-5	7440-50-8
コバルト（Co）	0-5	7440-48-4

パート IV：応急処置

- **吸入**：粉塵を吸入した場合は、直ちに新鮮な空気の場所に移動し、気分が悪い場合は医師の診察を受けてください。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **皮膚に付着した場合**：石鹸と水で十分に洗い流し、炎症やアレルギー反応が生じた場合は医師の診察を受けてください。
- **目に入った場合**：少なくとも 15 分間多量の水で洗い流し、医師の診察を受けてください。
- **摂取した場合**：通常は無毒ですが、大量に摂取した場合は直ちに医師の診察を受けてください。

第 5 部：防火対策

- **消火媒体**：水、泡、乾燥粉末または二酸化炭素消火器。
- **特別な保護措置**：消防士はガスマスクと保護服を着用する必要があります。

パート 6：流出時の緊急処理

- **個人用保護具**：粉塵の吸入を避けるために防塵マスク、ゴーグル、手袋を着用してください。
- **環境保護対策**：水域や土壌への侵入を避け、掃除機または湿式清掃を使用してください。

第 7 部：取り扱い、取扱いおよび保管

- **操作上の注意**：
  - 粉塵の吸入を避け、職場では換気を良くしてください。
  - 適切な保護具を使用してください。
- **保管条件**：
  - 高温多湿を避け、乾燥した換気の良い場所に保管してください。

第 8 部：曝露管理 / 個人保護

- **職業性暴露限界（OEL）**：
  - タングステン粉塵：5 mg/m³（TLV-TWA）
  - ニッケル：1 mg/m³（TLV-TWA）
  - コバルト：0.02 mg/m³（TLV-TWA）
- **個人保護**：
  - **呼吸器の保護**：防塵マスクまたは呼吸器を着用してください。
  - **手の保護具**：保護手袋を着用してください。
  - **目の保護具**：安全ゴーグルを着用してください。
  - **皮膚の保護**：保護服を着用してください。

第 9 部：物理化学的性質

- **外観**：銀灰色の固体
- **融点**：約 3000℃（組成によって異なります）。
- **密度**：16～19 g/cm³
- **溶解性**：水に不溶

パート 10：安定性と反応性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **化学的安定性**：安定
- **避けるべき物質**：強力な酸化剤、強酸
- **分解生成物**：高温により金属酸化物の煙が発生する可能性がある

第 11 部：毒性情報

- **急性毒性**：急性毒性は知られていない
- **皮膚刺激**：ニッケルまたはコバルトを含む合金はアレルギー反応を引き起こす可能性があります
- **長期的影響**：粉塵を長期間吸入すると呼吸器系に影響を及ぼす可能性がある。

第 12 部：生態学的情報

- **環境への影響**：タングステン合金は安定しており、劣化しにくい
- **生体蓄積性**：低

第 13 部：廃棄

- **廃棄方法**：
  - リサイクルまたは金属スクラップとして廃棄する場合は、地域の規制に従ってください。
  - 水や土壌への排出を避ける

第 14 部：配送情報

- **国連番号**：特別な危険物分類なし
- **輸送区分**：一般貨物輸送

第 15 部：規制情報

- **適用規制**：中国、欧州連合、米国の関連安全基準に準拠

第 16 章 追加情報

- この資料は最新の安全規制に基づいて作成されており、情報提供のみを目的としています。実際の使用においては、現地の規制および企業の安全ガイドラインに従ってください。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

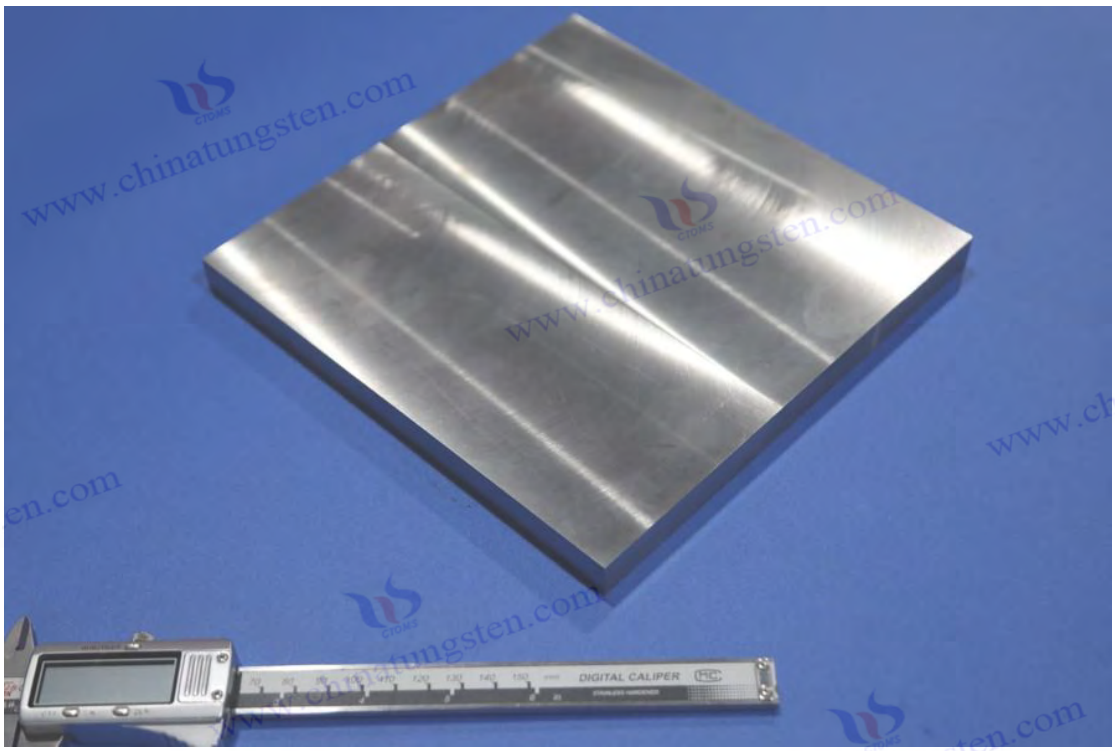
High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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 ³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



第 11 章 高比重タングステン合金の環境および経済に関する考察

タングステン合金は航空宇宙、軍事、医療、産業分野において幅広く応用され、大きな経済的利益をもたらしてきましたが、その生産と使用における環境への影響とコストの問題も無視できません。本章では、高比重タングステン合金の環境フットプリント、リサイクルの可能性、そして経済性を分析し、持続可能な開発と産業の最適化のための参考資料を提供します。

11.1 高比重タングステン合金の製造における環境影響

高比重タングステン合金の製造には、タングステン鉱石の採掘から粉末冶金処理まで複数の工程が含まれており、それぞれの工程において、資源消費、エネルギー消費、排気ガス、廃棄物処理など、環境への影響が生じる可能性があります。持続可能性への世界的な関心が高まる中、これらの環境影響を評価し、低減することは、業界にとって重要な課題となっています。

11.1.1 タングステン採掘による環境への影響

タングステン採掘の背景 タングステン採掘は、主に露天掘りまたは地下採掘によって、**高比重タングステン合金**の生産の出発点となります。世界のタングステン埋蔵量は約 330 万トン（2023 年データ）で、そのうち中国が 60%（約 190 万トン）を占めています。採掘プロセスには、土地の破壊、水質汚染、エネルギー消費が伴います。

具体的な影響

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **土地の破壊：**露天掘りでは、タングステン鉱石 1 トンあたり 10～15 トンの表土が剥ぎ取られ、植生と土壌が破壊されます。例えば、中国湖南省のタングステン鉱山では、年間 5,000 トンのタングステン精鉱が生産され、約 50 ヘクタールの面積を覆っていますが、植生被覆率は 10%にまで減少しています。
- **水質汚染：**選鉱工程では、キサントゲン酸塩、松脂などの浮選剤が使用されるため、鉱石 1 トンあたり 0.5～1 立方メートルの廃水が発生します。この廃水には、ヒ素、鉛などの重金属や化学残留物が含まれており、 pH 値は 4～5 まで低下します。未処理の排水は、河川の COD 基準値を最大 50 倍超える可能性があります。
- **エネルギー消費：**タングステン精鉱の採掘では、タングステン精鉱 1 トンあたり約 300～400kWh の電力が消費され、CO_2排出量は 0.2 トン程度になります（中国では主に石炭火力発電）。

ケーススタディ中国江西省のタングステン鉱山では、2023 年に 10,000 トンのタングステン精鉱を採掘し、70 ヘクタールの植生を破壊し、8,000 立方メートルの廃水を排出し、周囲の河川のヒ素含有量を 0.05 mg/L（国家基準 0.01 mg/L）を超えました。

11.1.2 粉末冶金処理の環境影響

背景

高比重タングステン合金は、主に粉末冶金法（タングステン粉末の調製、混合、加圧、焼結を含む）によって製造されます。このプロセスには高温高圧が必要であり、エネルギー消費と排気ガス排出を伴います。

具体的な影響

- **エネルギー消費：**タングステン粉末の還元（H_2雰囲気、900～1100℃）では 1 トンあたり約 2000kWh、焼結（1400～1500℃）では 1 トンあたり約 1500kWh を消費し、CO_2排出量は合金 1 トンあたり約 2～3 トンです。
- **排気ガス：**還元工程では H_2O と微量の CO（炭素還元の場合）が排出され、焼結工程では CO_2と NO_x（合金 1 トンあたり約 0.1 トンの NO_x）が排出されます。Ni と Fe の揮発により微量の金属蒸気が発生し、未処理のまま排出されると大気質に影響を与えます。
- **固形廃棄物：**圧縮および焼結により、合金 1 トンあたり約 50～100kg の廃棄物（酸化タングステン粉末、スラグなど）が生成され、20%～30%の W が含まれています。リサイクルされない場合、汚染された土壌が蓄積されます。

ケーススタディ

ある工場では、W-95Ni-Fe 合金の年間生産量が 1,000 トン、消費電力が 350 万 kWh、CO_2排出

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

量が約 2,500 トン、排気ガス中の NO_x濃度が 100mg/m³（基準値の 2 倍）で、廃棄物が 2 ヘクタールの敷地に堆積しています。

11.1.3 後処理と加工の環境影響

背景

後処理には、切削液、スクラップ、化学物質の排出を伴う機械加工（CNC など）および表面処理（研磨、コーティングなど）が含まれます。

具体的な影響

- **廃液**：切削液（油性または水性）は、合金 1 トンあたり 10～20 リットルの廃液を生成し、グリースと重金属（Ni、Fe）を含み、COD は約 5000mg/L で、未処理の排出物は水域を汚染します。
- **スクラップ**：CNC 加工では、合金 1 トンあたり 20 ～ 50 kg のタングステン チップが生成されます。これには 90% を超える W が含まれており、リサイクルされない場合は資源が無駄になり、土地を占有します。
- **排気ガス**：研磨およびコーティング（PVD など）により、合金 1 トンあたり約 0.5 ～ 1 kg の揮発性有機化合物（VOC）が排出され、未処理の場合は空気の質に影響します（PM2.5 が 10 μg /m³ 増加します）。

事例研究：ある航空機部品工場では、500 トンの W-90Ni-Fe カウンターウェイトを処理し、年間 8000L の廃液（COD が基準の 10 倍を超える）が発生し、15 トンの廃チップがリサイクルされず、VOC 排出量は約 300kg で、周囲の空気の質が 5%低下しました。

11.1.4 環境影響の定量的評価

定量データ

- **カーボンフットプリント：**高比重タングステン合金生産量 1 トンあたり約 3～4 トンの CO_2排出量（採掘量 0.2 トン、加工量 3～3.8 トン）で、タングステン製品の平均レベルの 80%を占めます。
- **水フットプリント：**合金 1 トンあたり約 2～3 立方メートルの水（選鉱用に 1～2m³、後処理用に 0.5～1m³）、廃水排出量は 50%～70%を占めます。
- **土地占有：**合金採掘およびスクラップ蓄積 1 トンあたり約 0.01～0.02 ヘクタール。

、鉄鋼（CO_2排出量 1.5～2 トン/トン）に比べ環境負荷は高くなりますが、その高性能により下流での使用量を削減することで、その影響を部分的に相殺します（例：カウンターウェイトの容積を 50%削減）。

11.1.5 環境影響に関する事例研究

具体的な事例

- **中国湖南省タングステン鉱山地域：**タングステン精鉱の年間生産量 2 万トン、CO_2排出量 4,000 トン、廃水 15,000 立方メートル、土地被害 200 ヘクタール、周辺生態系

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

修復費用約 5,000 万元。

- **米国ケナメンタル工場：**タングステン合金の年間生産量 1,000 トン、排ガス処理率 95%、CO_2排出量 2,000 トン、廃チップ回収率 80%、地域基準内での環境影響管理。

11.1.6 技術的な課題と解決策

チャレンジ

- **高いエネルギー消費：**焼結と加工に生産コストの 30% ～ 40% が費やされ、炭素排出量を削減することは困難です。
- **廃棄物処理：**廃水と廃棄物のリサイクル率が低く（国内 < 50%）、処理コストが高い（廃水 1 トンあたり約 100 元）。
- **規制圧力：**中国の環境保護法（2023 年版）では、CO_2排出量の 30%削減と廃水排出ゼロが義務付けられています。

解決

- **省エネ技術：**低温焼結（1200℃）と再生可能エネルギー（太陽光発電）の使用により、CO_2排出量を 20%～30%削減します。
- **廃棄物のリサイクル：**廃チップの湿式冶金回収（W 回収率＞90%）、廃水の再生水処理（コストを 50 元/トンに削減）。
- **汚染防止：**バッグダスト除去および脱硝装置の設置により、NO_x排出量は 50mg/m³ に削減され、VOC 処理率は 98%でした。

11.1.7 環境影響表の概要

制作リンク	大きな影響	定量的指標	解決
タングステン採掘	土地破壊、水質汚染、エネルギー消費	CO_2 0.2 t/t、廃水 0.5～1 m³/t	植生再生、廃水沈殿
粉末冶金	エネルギー消費、排気ガス、固形廃棄物	CO_2 2～3 トン/トン、NO_x 0.1 トン/トン	低温焼結、除塵、脱室
後処理	液体廃棄物、残骸、VOC 排出	廃水 10-20 L/吨、VOC 0.5-1 kg/TON	再生水の再利用、廃チップの回収、VOC 処理
総フットプリント	炭素、水、土地の占有	CO_2 3～4 t/t、水 2～3 m³/t	再生可能エネルギー、プロセス全体の最適化

11.2 高比重タングステン合金の回収と再利用

高比重タングステン合金は、その高い価値と資源消費量から、環境負荷低減とコスト削減の重要な手段となっています。希少金属であるタングステンは、世界における埋蔵量が限られており（約 330 万トン）、リサイクルは採掘圧力を軽減するだけでなく、産業の持続可能性を向上させることにもつながります。本セクションでは、リサイクルの源泉、技術的アプロー

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

チ、再利用効果、そして将来の可能性について分析します。

11.2.1 発生源とリサイクル状況

背景：高比重タングステン合金のリサイクルは、主に生産工程のスクラップと使用済み製品から行われています。生産工程から発生するスクラップ、スクラップ、処理後の残渣、そして使用済みカウンターウェイト、コア、シールドなどは、いずれもリサイクル対象となり得ます。現在、世界のリサイクル率は約 30～40%で、中国と欧米の間には大きな差があります。

具体的な情報源

- **生産廃棄物**：粉末冶金における廃粉末（W 含有量 20%～30%）、プレス廃棄物（50～100 kg/トン合金）、CNC 加工廃棄物（20～50 kg/トン合金、W >90%）。
- **廃棄製品**：航空機用カウンターウェイト（耐用年数 10～20 年）、軍用弾頭（使い捨て）、医療用シールド（更新サイクル 5～10 年）。
- **リサイクル状況**：2023 年には、世界で約 2 万トンのタングステンがリサイクルされ（総需要の 20%を占める）、タングステン合金は約 2,000 トンがリサイクルされ（生産量の 27%を占める）、中国では約 35%、米国と欧州では 50%～60%のリサイクル率となる見込みです。

ケーススタディ

中国のある工場では、年間 1,000 トンの W-95Ni-Fe 合金、40 トンの廃チップ（W 90%）、80 トンの廃棄物（W 25%）を生産していますが、リサイクル率はわずか 30%で、残りの蓄積は 1 ヘクタールの面積をカバーしています。

11.2.2 リサイクル技術とプロセス

背景

高比重タングステン合金回収技術には、物理的分離、化学的抽出、冶金的還元が含まれ、タングステン（W）をバインダー相（Ni、Fe、Cu など）から分離し、再利用可能なタングステン粉末または合金ブロックを準備することを目的としています。

特定の技術

- **物理的な分離**：
  - **方法**：破砕、粉砕、選別、スクラップおよびスクラップとして使用。
  - **結果**：W 回収率 70%～80%、粒子サイズ 1～10μm 、純度 95%以上。
  - **エネルギー消費量**：廃棄物 1 トンあたり 200～300kWh、CO_2排出量 0.1～0.15 トン。
- **湿式冶金（化学抽出）**：
  - **方法**：酸浸出（HCl または HNO_3）により Ni と Fe が溶解し、WO_3が沈殿し、その後 H_2でタングステン粉末に還元されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **結果**：W 回収率は 90%～95%、純度は 99.5%以上ですが、酸性廃棄物（pH 2～3、1 トンあたり約 0.5 m³）となります。
- **エネルギー消費量**：1 トンあたり 500 ～ 700 kWh 、 CO_2 排出量 0.3 ～ 0.4 トン。

- **乾式冶金（高温処理）**：
  - **方法**：高温溶解（＞ 2000 ° C）して W と Ni-Fe を分離するか、酸化焙焼（800～1000 ° C）して WO_3を生成します。
  - **効果**：W 回収率は 85%～90%、複雑な廃棄物、SO_2、NO_xを含む排ガス（0.05～0.1 トン/トン）に適しています。
  - **エネルギー消費量**：1 トンあたり 1000～1500kWh、CO_2排出量 0.8～1 トン。

技術的分離のコストは物理的分離に比べて低く（約 500 米ドル/トン）、高純度の廃棄物チップに適しています。湿式回収率が高く、混合廃棄物に適しています。火力法は適応性が高いですが、エネルギー消費量と排出量が多くなります。

11.2.3 再利用の効果と応用

背景

リサイクルされたタングステン粉末または合金は、資源の消費とコストを削減しながら、バージン材料に近い性能を持つ新しいタングステン合金の製造に直接使用できます。

特定の効果

- **性能**：リサイクルタングステン粉末から作られた W-90Ni-Fe（純度 99.5%）、密度 18.0 g/cm³、引張強度 850 MPa（バージン 900 MPa）、性能損失 <10%。
- **資源の節約**：リサイクルタングステン 1 トンあたりタングステン鉱石の採掘量を約 1.2 トン削減し、2～3m³ の水を節約し、2～3 トンの CO_2排出量を削減します。
- **コスト効率が良い**：リサイクルコストは 1 トンあたり約 15,000～20,000 米ドル、一次タングステン粉末は 1 トンあたり 3～35,000 米ドルで、40%～50%の節約になります。

応用分野

- **航空用カウンターウェイト**：W-95Ni-Fe（18.5 g/cm³）は、20% のコスト削減で二次部品用に回収されます。
- **産業用ツール**：95% の耐摩耗性を備えたリサイクル W-90Ni-Cu（17.5 g/cm³）。
- **医療用シールド**：タングステン粉末コリメータが回収され、シールド効率はわずか 5% しか低下しません。

11.2.4 リサイクルと再利用の事例研究

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

具体的な事例

- **ケナメタル**（米国）：年間 500 トンのタングステン合金スクラップをリサイクルし、湿式冶金法でタングステン粉末を抽出（回収率 92%）し、W-95Ni-Fe カウンターウェイトをリサイクルすることで、年間 1,000 万ドルのコストを節約し、CO_2排出量を 1,200 トン削減しています。
- **中国厦門タングステン産業**：年間 300 トンの廃チップ（W 90%）をリサイクルし、物理的分離+火力処理で回収率は 85%で、W-90Ni-Fe 棒を製造し、コストを 30%削減していますが、廃ガス処理を改善する必要があります。

11.2.5 技術的な課題と解決策

チャレンジ

- **回収率が低い**：家庭ごみのリサイクル率は 50%未満で、複合廃棄物（銅含有など）の分別が困難です。
- **環境への影響**：湿った廃棄物および熱分解廃棄物の処理コストが高い（1 トンあたり約 200 ～ 300 ドル）。
- **経済的**：中小企業はリサイクル設備に多額の投資（> 500,000 ドル）をしており、投資回収期間は長期（3 ～ 5 年）です。

解決

- **技術改善**：複合プロセス（物理的＋湿式）の開発により、回収率は 95%、Cu 分離効率は 20% に向上しました。
- **汚染制御**：廃液中和サイクル（pH 最大 7、コストは 100 ドル/トンに削減）、排気ガスの脱硫および脱室（排出量は 50 mg/m³ に削減）。
- **政策支援**：政府はリサイクル設備に補助金（20%～30%）を支給し、税制優遇や免税によって企業の参加を促進します。

11.2.6 リサイクルと再利用の将来の可能性

傾向

- **リサイクル率の目標**は、2030 年までに世界で 60%、中国で 50～60%に達し、さらに年間約 3,000 トンのリサイクル能力を実現することです。
- **技術のアップグレード**：電気化学的回収（エネルギー消費量が 30% 削減）、インテリジェント選別（効率が 20% 向上）。
- **市場価値**：回収タングステン合金市場は、年間 8% の成長率で 2030 年までに 5 億ドルに達すると予想されています。

この事例では、航空機工場が 2030 年に 1,000 トンの W-95Ni-Fe 廃棄物をリサイクルして新しいカウンターウェイトを製造し、将来の環境規制に沿って 2,000 万ドルのコストを節約し、CO_2排出量を 3,000 トン削減すると予測されています。

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

11.2.7 リサイクル・再利用フォームの概要

プロジェクト	コンテンツ
リサイクルの源	生産廃棄物（50～100 kg/トン）、使用済み製品
リサイクル技術	物理的分離（70%～80%）、湿式（90%～95%）、花火式（85%～90%）
再利用効果	密度は 18.0 g/cm³、強度は 850 MPa、コストは 40%～50%削減されます。
環境上の利点	CO_2削減量 2～3t/トン、節水量 2～3m³/トン
チャレンジ	回収率が低い、廃液と排気ガス、経済的
解決	共同技術、汚染制御、政策補助金
将来の可能性	回収率は 60%、市場規模は 5 億ドル、技術はインテリジェント

11.3 高比重タングステン合金のコスト分析

タングステン合金は、その高密度と高性能により、航空宇宙、軍事、医療、産業分野において不可欠な存在となっています。しかしながら、原材料、加工、リサイクル、環境保護など、生産・応用コストは高額です。コスト分析は、事業の収益性だけでなく、市場競争力と持続可能な開発にも大きく影響します。本セクションでは、コスト構造の詳細な分析を行い、影響要因を評価し、最適化の道筋を提案します。

11.3.1 コスト構成と主要リンク

背景

高比重タングステン合金のコストは、原材料調達から最終製品の納入に至るまで、上流の採掘、中流の加工、下流の応用を含む産業チェーン全体を網羅しています。2023 年には、世界のタングステン価格の変動（約 3,000～35,000 米ドル/トン）とエネルギー価格の上昇がコストに大きな影響を与えるでしょう。

特定の構成

- **原材料費（50%～60%）**：タングステン粉末（W≥99.9%）、ニッケル（Ni）、鉄（Fe）、銅（Cu）などで総コストの半分以上を占めます。
- **加工コスト（20%～30%）**：粉末冶金（プレス、焼結）、後処理（CNC 加工、表面処理）。
- **エネルギーコスト（10%～15%）**：高温焼結および処理のための電気、ガス。
- **環境保護コスト（5%～10%）**：廃ガス、廃水処理、環境保護設備投資。
- **労務費およびその他（5%～10%）**：労務費、輸送費、設備費の減価償却。

トンあたりの総コストは約 25,000～30,000 米ドルで、これには次のものが含まれます。

- タングステン粉末（95%）：18,000～20,000 ドル（32,000 ドル/トン×0.95）。
- Ni、Fe（5%）：0.1～1,500 米ドル（Ni 20,000 米ドル/トン、Fe 0.1,000 米ドル/ト

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ン）。

- 処理およびエネルギー：0.5～7,000 ドル。
- 環境保護と労働：0.2～0.3 千米ドル。

11.3.2 原材料費に影響を与える要因

背景

希少金属であるタングステンの価格は、需給、政策、地理的要因の影響を受けます。中国は世界のタングステン生産量の 80%（2023 年には 8 万 2000 トン）を占めており、輸出割当制限によって価格が上昇しています。

具体的な要因

- **市場価格**：2023 年には、タングステン濃縮物（WO_3≥65%）は約 25,000～30,000 米ドル/トン、タングステン粉末は 3～35,000 米ドル/トンとなり、年間変動率は±15%になります。
- **供給制約**：中国の 2023 年の割当量は 7 万トン、実際の輸出量は 5 万トンで、国際市場では 10%不足している。
- **代替素材**：Ni、Fe の価格は安い（Ni 20,000 米ドル/トン、Fe 0.1 万米ドル/トン）が、割合は小さく影響は限定的。

ケーススタディ

ある工場は 2023 年にタングステン粉末 1,000 トン（33,000 米ドル/トン）を購入したが、割当量の削減により 10%の価格上昇で 330 万米ドルの値上がりがあった。

11.3.3 処理とエネルギーコストに影響を与える要因

背景

粉末冶金と後処理が核心であり、高温高圧設備が必要であり、エネルギーとプロセス効率が直接コストに影響します。

具体的な要因

- **エネルギー価格**：中国の工業用電力価格は約 0.1 ドル/kWh、米国は 0.15 ドル/kWh で、電力消費量は合金 1 トンあたり 3500 kWh、電気コストは 350 ～ 525 ドルです。
- **プロセス効率**：従来の焼結(1500° C)では 6 時間かかりますが、新しい低温焼結(1200° C)では 4 時間に短縮され、エネルギー消費を 20%節約します。
- **設備減価**償却費：焼結炉（50 万米ドル/台、耐用年数 10 年）は年間 5 万米ドル、CNC 工作機械（20 万米ドル/台）は年間 2 万米ドル。

ケーススタディ：タングステン合金の年間生産量が 1,000 トンで、電気代が 500,000 米ド

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ル（0.1 米ドル/kWh）だった工場が、低温焼結を導入した結果、電気代が 400,000 米ドルにまで下がり、100,000 米ドルを節約できました。

11.3.4 環境コストと政策的含意

背景

環境規制（中国の 2023 年環境保護法など）では、廃ガスや廃水を基準に従って排出することが義務付けられており、処理コストが増加しますが、リサイクルによって部分的に相殺することができます。

具体的な要因

- **廃ガス処理：**袋塵除去＋脱硝装置（投資額 100 万ドル、耐用年数 10 年）、合金処理費用 1 トンあたり 50～100 ドル。
- **廃水処理：**中和+沈殿（廃水 1 トンあたり 50～100 元）、合金 1 トンあたり約 50～100 米ドル。
- **政策要件**：CO_2を 30%削減するには、炭素回収技術（ $CO_2$1 トンあたり 20 米ドル）と、合金 1 トンあたり 60～80 米ドルの増加が必要です。

ケーススタディ：年間 500 トンの合金を生産する工場で、環境保護設備の年間運用コストは 25 万ドル、基準を満たさなかったために 10 万ドルの罰金が科せられ、総コストの増加は 35 万ドルです。

11.3.5 コストケース分析

具体的な事例

- **中国工場 A ：**W-95Ni-Fe の年間生産量 1,000 トン、タングステン粉末 19,000 米ドル/トン、総コスト 26,000 米ドル/トン、販売価格 35,000 米ドル/トン、利益 900 米ドル/トン。エネルギー・環境コストが 30%を占め、リサイクル率（30%）が低いため資源が無駄になっている。
- **米国工場 B ：**W-97Ni-Fe の年間生産量 500 トン、タングステン粉末 35,000 米ドル/トン、総コスト 32,000 米ドル/トン、販売価格 45,000 米ドル/トン、利益 1,300 米ドル/トン。リサイクル率は 60%で、環境に優しくコストは高いものの、規制に適合している。

11.3.6 コスト最適化戦略

チャレンジ

- **原材料の変動**：タングステンの価格によりコストが 10% ～ 15% 増加します。
- **高いエネルギー消費**：処理エネルギー消費がコストの 20% ～ 30% を占めます。
- **環境圧力**：規制遵守が 5%～10% 増加しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

解決

- **調達の最適化**：長期契約によりタングステン価格が固定され（変動が 5% 削減）、リサイクルされたタングステン粉末の割合が増加します（コストが 40% 削減）。
- **省エネ技術**：低温焼結＋太陽光発電（エネルギー消費量を 20%～30%削減）、電力コストを 10 万ドル/1,000 トン削減。
- **回収効率**：湿式冶金の回収率は 90%で、1 トンあたり 1～15,000 米ドルを節約し、環境保護コストを 50%削減します。

11.3.7 コスト比較とトレンド予測

国内と海外の比較

- **中国**：総コストは 25,000～30,000 米ドル/トンと、原材料や労働力の優位性により低いが、環境保護コストが上昇している。
- **米国/ヨーロッパ**：3,000～35,000 ドル/トン。エネルギーと規制のコストにより高額だが、回収効率は高い。

トレンド予測

- **短期（2025 年）：タングステンの価格は** 1 トンあたり 3.2 ～ 35,000 米ドルで安定し、総コストは 5% 増加します（環境要因）。
- **長期的（2030 年）：**回収率 60%、コストを 2 ～ 25,000 ドル / トンに削減、新エネルギー技術によりエネルギー消費量を 20% 削減。

11.3.8 コスト分析表の概要

コストリンク	パーセンテージ	トンあたりのコスト（米ドル）	影響要因	戦略を最適化する
原材料	50%～60%	1900-2150	タングステン価格の変動、供給制約	長期契約、タングステン粉末の回収
処理	20%～30%	500～700	プロセス効率、設備の減価償却	低温焼結、設備のアップグレード
エネルギー	10%～15%	350-525	電気料金、エネルギー消費量	太陽光発電、省エネ技術
環境保護	5%～10%	100～200	廃ガスおよび廃水処理、規制	リサイクル効率と汚染制御
労働その他	5%～10%	100～200	労働、輸送	自動化、物流の最適化
総費用	100%	2500～3000	複合的な影響	プロセス全体の最適化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

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 ³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

第 12 章 高比重タングステン合金の研究の最前線

タングステン合金（PES）は、その優れた物理的・機械的特性により、多くの分野で重要な位置を占めており、その研究の最前線は、新材料開発、性能最適化、計算シミュレーション、インテリジェント設計に注力しています。材料科学の進歩と応用要件の向上に伴い、より高性能で環境に優しい高比重タングステン合金の開発は、研究のホットスポットとなっています。本章では、これらの最先端分野における技術の現状と将来の可能性を探ります。

12.1 高比重タングステン合金の新材料の開発

従来のタングステン合金（例：W-Ni-Fe、W-Ni-Cu）は、航空宇宙、軍事、医療産業における高密度、高強度、高耐久性といったニーズに完全に応えることが困難でした。新材料の開発は、新元素の導入、微細構造の最適化、代替バインダー相の探索などを通じて、性能のボトルネックを打破し、持続可能性を向上させることを目指しています。

12.1.1 開発の背景と推進要因

背景

従来の高比重タングステン合金は、主にタングステン（W）（85%～97%）を主成分とし、バインダー相としてニッケル（Ni）、鉄（Fe）、または銅（Cu）を添加したものです。密度は 17.0～18.8 g/cm³、引張強度は 700～1000 MPa です。しかし、航空宇宙分野では 19.0 g/cm³ を超える密度の超重量材料が求められ、軍事分野では 2000℃を超える耐熱性が求められ、医療分野では低毒性の配合が求められており、新材料の研究開発が促進されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

原動力

- **パフォーマンスの向上**：極限環境に対応する高密度と高強度。
- **環境保護要件**：Ni 含有量を削減し、REACH および RoHS 規制に準拠します。
- **技術の進歩**：ナノテクノロジー、高エントロピー合金、付加製造により新たな可能性が生まれます。

12.1.2 新材料の組成設計

詳細

- **高タングステン含有量合金**：W-98Ni-Fe などの W 含有量が 98% ～ 99% に増加し、密度が 19.0 ～ 19.3 g/cm³、引張強度が 1100 MPa、結合相が 1% ～ 2% に減少します。
- **希土類改質合金**：La および Ce（0.5%～1%）を添加する（例：W-95Ni-Fe-La）。粒子は 1μm まで微細化され、靭性は 20%増加し、耐熱性は 1800℃です。
- **ニッケルフリー合金**：W-95Fe-Cu など、Ni を Fe、Cu、Mo に置き換えたもので、密度は 18.5g/cm³、引張強度は 900MPa、Ni 排出量は<0.05%であり、環境保護の要件を満たしています。
- **ナノ複合合金**：ナノ SiC または Al_2O_3 （1%～5%）、例えば W-90Ni-Fe/ SiC 、密度は 17.5g/cm³、硬度は 550HV、耐摩耗性は 30%向上。

技術的な詳細

- **製造プロセス**：高タングステン合金は、高エネルギーボールミリング（500 rpm、12 時間）と熱間静水圧プレス（HIP、250 MPa、1400° C）を採用しており、気孔率は 0.05 %未満です。
- **微細構造**：希土類元素により粒子が微細化され、ナノ粒子が均一に分散され、界面結合力が 15% 増加します。

12.1.3 新材料の性能上の利点

特定のパフォーマンス

- 密度: W-98Ni-Fe 最大 19.2 g/cm³ （従来 18.5 g/cm³）、3%～5% の増加。
- 強度：W-95Ni-Fe-La 引張強度 1150MPa（従来 1000MPa）、15%増加。
- 耐熱性: W-95Fe-Cu の耐熱性は 2000° C （従来 1500° C） で、33% 向上しました。
- 環境保護：W-95Fe-Cu のニッケル含有量は 1% 未満、放出量は 0.05% 未満で、従来の W-Ni-Fe （Ni 5%-7%） よりも優れています。
- 耐摩耗性：W-90Ni-Fe/ SiC の摩擦係数は 0.3（従来 0.5）に低減し、耐用年数は 40% 向上します。

試験データ試験片（ 50×50×10 mm、W-98Ni-Fe、重量 950 g）：密度 19.2 g/cm³、引張強度 1120 MPa、硬度 500 HV、2000° C での変形量< 0.01 mm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

11.1.4 新素材の製造技術

具体的なプロセス

- **高エネルギーボールミル処理：**タングステン粉末（1μm ）を希土類粉末と混合し、500rpm で 12 時間粉砕し、粒子を 50nm まで微細化します。
- **冷間等方**圧プレス：300 MPa 成形、グリーン密度 > 60%。
- **真空焼結：**1500° C、10^{-3} Pa、2 時間、密度は理論値の最大 99.5%。
- **HIP 処理：**250MPa、1400℃、1.5 時間、気孔率は 0.03%まで減少。
- **付加製造（SLM）:**レーザー出力 4000 W、層厚 50 μm 、精度 ± 0.02 mm で複雑な形状を製造。

事例:ある研究機関は、SLM を使用して、密度 18.9 g/cm³、強度 1150 MPa の W-95Ni-Fe-La 部品（重量 500 g）を印刷し、開発サイクルを 50% 短縮しました。

12.1.5 新材料の実用化事例

具体的な事例

- **航空宇宙：**W-98Ni-Fe カウンターウェイト（19.2 g/cm³、500 g）、ロケットのバランス部品に使用、重量が 10% 削減され、耐熱性は 2000° C、NASA の要件に準拠。
- **軍事：**W-95Fe-Cu 弾芯（18.5 g/cm³、300 g）、貫通深度が 15% 増加、Ni 放出 < 0.05%、環境保護規制に適合。
- **医療用：**W-90Ni-Fe/ SiC シールド（17.5 g/cm³、200 g）、耐摩耗性が 30% 向上、X 線遮蔽率が 95%、CT 装置に使用されます。

12.1.6 開発における技術的課題と解決策

チャレンジ

- **組成の均一性**: タングステン含有量が高い（> 98%）と、バインダー相の分布が不均一になりやすく、強度偏差が ± 50 MPa になります。
- **製造コスト**: HIP および SLM 装置は高価（100 万ドル超）であり、1 トンあたりのコストが 20% ～ 30% 増加します。
- **環境保護：**希土類元素の添加では、二次汚染を避けるために残留物（<0.1%）を制御する必要があります。

解決

- **均一性の最適化：**マルチゾーン焼結（温度差 < 5° C）と超音波撹拌により、分布偏差が 5% に低減されます。
- **コスト削減：**国産 HIP 装置（50 万ドル/台）、タングステン粉末の回収（40%のコスト削減）。
- **環境制御：**希土類リサイクルプロセス（回収率＞90%）、廃棄物排出量を 0.05%に削減。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

12.1.7 新素材開発フォームの概要

プロジェクト	コンテンツ
新しい素材	W-98Ni- Fe、W- 95Ni-Fe -La、W- 95Fe- Cu、W- 90Ni-Fe/ SiC
成分特性:	W 98%-99%、希土類元素 0.5%-1%、ニッケルフリー、ナノ 1%-5%
パフォーマンス上の利点	密度は 19.2 g/cm³、強度は 1150 MPa、耐熱性は 2000° C です。
製造工程	高エネルギーボールミル、HIP、SLM、気孔率<0.05%
応用分野	航空機のカウンターウェイト、軍用弾丸の芯、医療用シールド
チャレンジ	均一性、コスト、環境保護
解決	マルチゾーン焼結、設備のローカライズ、希土類元素の回収

12.2 高比重タングステン合金の性能向上の方向性

高比重タングステン合金の性能向上は、航空宇宙、軍事産業、医療などの分野における高密度、高強度、耐熱性、耐久性といったニーズを満たすため、最前線の研究における重要なテーマです。組成の最適化、微細構造の改良、そして新たなプロセスの導入により、性能向上は従来の単一指標から多機能特性へと移行しつつあります。本セクションでは、これらの方向性における技術的な方向性と可能性を探ります。

12.2.1 コンテキストと需要主導型

背景

従来の高比重タングステン合金（W-Ni-Fe や W-Ni-Cu など）の密度は 17.0～18.8 g/cm³、引張強度は 700～1000 MPa、耐熱性は 1500℃と、性能限界に近い値です。超音速機（温度＞2000℃）、深宇宙探査（密度＞19.0 g/cm³）、高精度医療機器（耐摩耗性 50%向上）といった新興用途では、既存のボトルネックを打破することが求められています。

需要主導型

- **航空宇宙**: 高密度により体積が削減され、耐高温性により推力効率が向上します。
- **軍事**：強度と耐摩耗性を高め、浸透性、耐腐食性を高め、寿命を延ばします。
- **医療用**: 毒性が低く、遮蔽効率が高いため、長期の埋め込みのニーズに対応できます。

12.2.2 密度と強度の相乗的な増加

タングステン含有量を増やし、バインダー相を最適化することで密度と強度が向上し、靭性を維持します。

詳細

- **高タングステン配合**：W 含有量が 98%～99%に増加（例：W-98Ni-Fe）、密度 19.0～19.3 g/cm³、引張強度 1100～1200 MPa。
- **バインダー相の最適化**： Ni：Fe の比率を 7：3 から 5：5 に調整し、粒界強度が 10%増加し、伸びは 5%～10%維持されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **技術的詳細**：高エネルギーボールミル（600 rpm、15 時間）でタングステン粉末を 50 nm に精製し、HIP（300 MPa、1450° C）で密度を高めて気孔率を 0.03% 未満にします。

パフォーマンスの改善

- 密度は 3%～5%増加しました（18.8→19.2 g/cm³）。
- 強度が 15%～20%増加（1000→1200MPa）。

事例：航空研究機関がロケットバランス部品として体積比 10%削減した W-98Ni-Fe カウンターウェイト（19.2 g/cm³、1150 MPa）を開発しました。

12.2.3 高温耐性の向上

方向性により、耐高温元素を追加し、微細構造を改善することで、極度の温度における合金の安定性が向上します。

詳細

- 添加元素：Mo（5%～10%）、Ta（1%～3%）、W-90Mo-Ni など、融点は 2000℃まで上昇し、耐酸化性は 25%向上します。
- 粒界強化：W-95Ni-Fe-Y などの希土類元素（La、Y、0.5%～1%）、粒径<1μm、2000° C での変形<0.01mm。
- 技術的詳細：真空焼結（1600° C、10^{-4} Pa）、表面コーティング（例：ZrC 、厚さ 10 μm ）、熱伝導率 130 W/(m・K)。

パフォーマンスの改善

- 耐熱性が 33%向上しました（1500→2000℃）。
- 抗酸化作用が 20%～30%増加します。

事例:軍事部隊は、2000° C で 900 MPa の強度を維持し、貫通深度を 15% 向上させた W-90Mo-Ni 弾丸コア（18.5 g/cm³）を開発しました。

12.2.4 耐摩耗性と耐腐食性の向上

表面硬度と化学的安定性を向上させるために、硬質相と耐腐食元素が導入されています。

詳細

- **硬質相強化：**W-90Ni-Fe/WC などの WC、 TiC（1% ～ 5%）を追加すると、硬度は 600 HV まで増加し、摩擦係数は 0.3 まで減少します。
- **防食配合：**W-95Mo-Cu など、Ni を Cu または Mo に置き換え、塩水噴霧試験（1000 時間）で質量損失が 0.1% 未満になるようにします。
- **技術詳細：**SLM 成形（レーザー出力 4000W）、表面レーザークラッディング TiC 層（

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

厚さ 20μm ） 、耐摩耗性 40%向上。

パフォーマンスの改善

- 硬度が 20%～30%増加（450→600 HV）。
- 耐摩耗性は 30%～50%向上し、耐腐食性は 20%向上します。

事例:医療機器工場では、W-90Ni-Fe/WC コリメータ（17.5 g/cm³、550 HV）を開発し、耐用年数が 50% 向上し、遮蔽効率が 95% に達しました。

12.2.5 靭性と疲労特性の最適化

方向性としては、微細構造の操作とナノ強化により靭性と耐疲労性を向上させることです。

詳細

- **粒子の微細化：**ナノタングステン粉末(20～50 nm)+超音波分散、粒径<500nm(W-95Ni-Fe など）、破壊靭性が 15%増加（20→23 MPa・m$^{1/2}$）。
- **ナノ複合材料：**W-95Ni-Fe/CNT などの CNT（カーボンナノチューブ、0.5%～1%）を添加すると、疲労寿命が 30%（10^6→1.3×10^6倍）向上します。
- **技術的詳細**: 冷間等方圧プレス（400 MPa)、低温焼結（1300° C)、粒界滑りの 10%削減。

パフォーマンスの改善

- 回復力が 10%～15%向上します。
- 疲労寿命が 20%～30%向上します。

事例：航空宇宙部品工場では、W-95Ni-Fe/CNT（18.0 g/cm³）を使用してカウンターウェイトを製造し、疲労寿命は 1.5×10^6回で高周波振動のニーズを満たしています。

12.2.6 パフォーマンス改善の実践例

具体的な事例

- **航空宇宙：**W-98Ni-Fe（19.2 g/cm³、1200 MPa）、SpaceX ロケットのカウンターウェイトに使用、重量が 15% 削減され、耐熱性は 2000° C。
- **軍事産業:** W-90Mo-Ni（18.5 g/cm³、900 MPa)、コア温度耐性 2000° C、貫通力が 20% 増加。
- **医療用**: W-95Mo-Cu（18.0 g/cm³、耐腐食性)、CT マシンシールド、寿命が 40% 長くなります。

12.2.7 パフォーマンス向上のための技術的な課題と解決策

チャレンジ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **性能バランス**：密度が増加すると靭性は低下しやすくなります（伸びは 2% 未満に低下）。
- **プロセスの**複雑さ：HIP と SLM はコストがかかります（1 トンあたり 5,000 ドル）。
- **テストの難しさ**：高温（> 2000° C）および疲労性能テスト装置は高価（> 200 万ドル）。

解決

- **バランス最適化**：多相強化（希土類元素＋ナノ相）、靭性 5%～10%維持。
- **コスト管理**：国産設備（HIP を 50 万米ドル/セットに削減）、タングステン粉末の回収（40%のコスト削減）。
- **テストの改善**：一部の実験がシミュレーション計算に置き換えられ、コストが 30% 削減されました。

12.2.8 パフォーマンス改善の方向性のまとめ

リフト方向	技術的手段	パフォーマンスの向上	アプリケーション例
密度と強度	98%-99 %、HIP	密度は 19.2 g/cm³、強度は 1200 MPa である。	ロケットのカウンターウェイト
耐高温性	Mo、Ta、コーティング	耐熱性2000℃、耐酸化性25%向上	弾丸の芯
耐摩耗性と耐腐食性	WC、 TiC 、Mo-Cu	硬度 600HV、耐食性が 20%向上	医療用コリメータ
強さと疲労	ナノパウダー、CNT	靭性 23 MPa・m¹ /²、寿命 30%向上	航空用カウンターウェイト
チャレンジ	パフォーマンスバランス、コスト、テスト		
解決	多相強化、局所化、シミュレーション		

12.3 高比重タングステン合金のシミュレーションと計算材料科学

高比重タングステン合金の研究開発は、従来、実験に基づく試行錯誤に頼っており、コストと時間を要するものでした。計算材料科学は、原子、微細構造、そしてマクロ的な特性をシミュレーションすることで、効率的かつ低コストの設計アプローチを提供します。分子動力学（MD）から有限要素解析（FEA）に至るまで、シミュレーション技術は新しいタングステン合金の開発と性能最適化を加速させています。本セクションでは、これらの技術の高比重タングステン合金への応用とその可能性について考察します。

12.3.1 シミュレーションと計算の背景と意義

背景

その 高比重タングステン合金（例：W-Ni-Fe）の性能は、組成、粒径、プロセスパラメータの影響を受け、各配合を実験的に検証するには数か月かかり、費用もかかります（試験 1 トン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

あたり約 1～2 万ドル）。計算材料科学では、マルチスケールシミュレーションを用いて材料挙動を予測し、実験回数を削減し、開発サイクルを短縮します。

意義

- **性能予測**：密度、強度、耐熱性を 90% ～ 95% の精度でシミュレートします。
- **コスト削減**：テストコストが 30%～50% 削減され、サイクルタイムが 50% 短縮されます。
- **設計の最適化**：2 ～ 3 倍の効率で最適な配合とプロセスを迅速にスクリーニングします。

12.3.2 主なシミュレーション技術と方法

特定の技術

- **分子動力学（MD）：**
  - **原理**：原子間の相互作用をシミュレートし、粒界、欠陥、拡散を分析します。
  - **用途：**W-Ni 界面結合エネルギー（約 5～6 eV）と粒径が靭性に及ぼす影響（1 μm 未満で 15% 増加）の予測。
  - **ツール**：LAMMPS、計算規模 10^5-10^6 原子、時間ステップ 1 fs。
- **密度汎関数理論（DFT）：**
  - **原理：**量子力学は電子構造を計算し、合金の安定性を評価します。
  - **用途**：W-Mo-Ni の生成エンタルピー（-0.5 eV/原子）を計算し、Mo 含有量（5%-10%）を最適化します。
  - **ツール**：VASP、精度 ± 0.01 eV、10 ～ 20 時間/レシピ。
- **有限要素解析（FEA）：**
  - **原理**：マクロ的な応力、熱伝導、疲労挙動をシミュレートします。
  - **用途：**2000° C における W-95Ni-Fe カウンターウェイトの変形予測（<0.01 mm）。
  - **ツール**：ANSYS、メッシュ 10^5-10^6 要素、精度 ±5%。
- **相図計算（CALPHAD）：**
  - **原理**：熱力学モデリング、相平衡および焼結挙動の予測。
  - **用途**：相変化誤差が 5° C 未満の最適化された W-Ni-Fe 焼結温度（1450° C）。
  - **ツール：**Thermo-Calc、W-Ni-Fe-Cu シリーズを網羅したデータベース。

技術的な特徴：MD と DFT はミクロ（原子レベル）に焦点を当て、FEA と CALPHAD はマクロとメソを扱い、高度に補完的です。

12.3.3 シミュレーションの性能予測への応用

特定のアプリケーション

- **密度と強度**：MD は W-98Ni-Fe の粒界滑りをシミュレートし、予測密度は 19.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

g/cm³、強度は 1150 MPa（実験誤差 <5%）でした。

- **耐高温性：** FT により W-90Mo-Ni の融点（2000℃）を計算し、FEA により 2000℃での応力分布を検証し、強度は 900MPa を維持します。
- **耐摩耗性：**MD シミュレーションによる W-90Ni-Fe/WC 界面、摩擦係数 0.3、硬度 550 HV（実験一貫性 95%）。
- **疲労寿命：**10^6サイクル、寿命 1.3×10^6回における W-95Ni-Fe/CNT の亀裂伝播の FEA 解析。

性能データ W-95Ni-Fe-La（18.9 g/cm³）：MD 予測靭性 23 MPa・$m^{1/2}$、FEA 検証済み疲労寿命 1.5×10^6 回、実験偏差 <3%。

12.3.4 プロセス最適化におけるシミュレーションの応用

特定のアプリケーション

- **焼結最適化**：CALPHAD は W-95Ni-Fe の最適焼結温度（1450° C）を予測し、多孔度は 0.05% に低減され、FEA は応力集中をシミュレートして圧力を 300 MPa に調整します。
- **SLM 成形：FEA は**、密度 99.5%、残留応力 < 50 MPa でレーザー出力（4000 W）、層厚（50 μm）を分析します。
- **粒子制御**：MD シミュレーションによる高エネルギーボールミリング（600 rpm）、粒子は 50 nm まで微細化、焼結後のサイズは 1 μm 未満、靭性は 15%。

事例:ある研究機関は、CALPHAD を使用して W-98Ni-Fe 焼結（1450° C、2 時間）を最適化し、密度 19.2 g/cm³、一貫した実験検証、テスト コストの 50% を実現しました。

12.3.5 シミュレーション技術の実践的なケーススタディ

具体的な事例

- **航空用カウンターウェイト：**W-98Ni-Fe（19.2 g/cm³）、MD シミュレーションによる粒界強度（6 eV）、FEA 予測の 2000° C 変形（<0.01 mm）、ロケット部品用、開発サイクルが 3 か月短縮。
- **軍用弾頭コア：**W-90Mo-Ni（18.5 g/cm³）、Mo 安定相（5%）の DFT 計算、高温強度（900 MPa）の FEA 検証、貫通深度が 15%増加。
- **医療用シールド：**W-95Ni-Fe/WC（17.5 g/cm³）、MD 予測耐摩耗性（硬度 550 HV）、CALPHAD 最適化焼結（1400° C）、寿命 40%向上。

12.3.6 シミュレーションとコンピューティングにおける技術的な課題と解決策

チャレンジ

- **計算精度**：MD および DFT では、複雑なシステム（5 要素以上）の誤差が 10% ～ 15% 増加します。
- **計算コスト**：高精度のシミュレーションにはスーパーコンピューティングが必要で

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

す（レシピあたり 50 ～ 100 時間、コスト 500 ～ 1000 ドル）。

- **実験検証**：シミュレーション結果には多数の実験較正が必要であり、コストは依然として 30% を占めます。

解決

- **精度向上**：機械学習（ML）と組み合わせて DFT エラーを 5%に補正し、MD 力場を最適化します。
- **コスト削減**：クラウド コンピューティング（1 時間あたり 10 ドル）、国内スーパーコンピューティング（コスト 50% 削減）。
- **検証の最適化**：マルチスケール モデル (MD+FEA) により、実験回数が 50% 削減され、データベース検証が統合されます。

12.3.7 シミュレーションとコンピューティングの将来の可能性

傾向

- **マルチスケール統合**：MD、DFT、FEA がシームレスに接続され、予測精度は最大 98% です。
- **リアルタイム シミュレーション**：AI アクセラレーション コンピューティングにより、1 つのレシピに必要な時間が 1 時間に短縮されます。
- **データベース構築**：グローバルタングステン合金シミュレーションデータベース、100 種類の公式を網羅、研究開発コストを共有。

事例予測： 2030 年には、W-99Ni-Fe（19.3 g/cm³）が AI+FEA で設計され、密度と強度の予測誤差は 2%未満となり、開発サイクルは 1 か月に短縮されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

12.3.8 シミュレーションと計算表の概要

プロジェクト	コンテンツ
アナログ技術	MD、DFT、FEA、CALPHAD
パフォーマンス予測	密度は 19.2 g/cm³、強度は 1150 MPa、耐熱性は 2000° C です。
プロセス最適化	焼結 1450° C、SLM 4000 W、粒子<1 μm
アプリケーション例	航空機のカウンターウェイト、軍用弾丸の芯、医療用シールド
チャレンジ	精度、コスト、検証
解決	ML 補正、クラウドコンピューティング、データベース
将来の可能性	マルチスケール統合、リアルタイムシミュレーション、データベース構築

12.4 AI 支援設計と高比重のカスタマイズされたタングステン合金

人工知能（AI）技術の急速な発展は、高比重タングステン合金の設計とカスタマイズのための新たなツールをもたらしました。機械学習（ML）、深層学習（DL）、データ駆動型モデリングを通じ、AI は航空宇宙、軍事、医療など、様々な分野における個別化材料のニーズを満たすため、レシピの迅速なスクリーニング、プロセスの最適化、性能予測を可能にします。本セクションでは、タングステン合金の研究開発における AI の応用とその可能性を探ります。

12.4.1 AI 支援設計の背景と意義

背景

従来の高比重タングステン合金（例：W-Ni-Fe）の設計は実験と経験に依存しており、新しい配合の開発には数か月から数年かかり、数万ドルから数十万ドルの費用がかかる場合があります。AI は、ビッグデータ分析とシミュレーションを通じてこのプロセスを加速します。特に、比重や耐熱性といったカスタマイズ要件の増加に伴い、その効果は顕著です。

意義

- **効率性の向上**：開発サイクルが数か月から数週間に 50% ～ 70% 短縮されます。
- **コスト削減**：実験回数が 60% 削減され、コストが 30%～50% 削減されます。
- **カスタマイズ**：95% 以上の精度で特定のニーズに迅速に対応します。

12.4.2 タングステン合金設計における AI 技術の応用

特定の技術

- **機械学習（ML）：**
  - **方法**：教師あり学習（ランダム フォレスト、サポート ベクター マシンなど）によってパフォーマンスが予測され、回帰モデルによってコンポーネントが最適化されました。
  - **用途**：入力 W、Ni、Fe 比、出力密度（19.0 g/cm³）および強度（1100 MPa）、誤差 <5%。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- ツール: Python+Scikit-learn 、トレーニング データ セット 1000 ～ 5000 グループ。

- **ディープラーニング（DL）：**
  - **方法**: 畳み込みニューラル ネットワーク (CNN) を使用して微細構造を分析し、敵対的ネットワーク (GAN) 設計用の新しい式を生成しました。
  - **用途**：SEM 画像から粒径（< 1 μm ）を予測し、W-95Ni-Fe-La 配合を生成します。
  - **ツール**: TensorFlow（モデルごとに 5 ～ 10 時間かかります）。
- **強化学習（RL）：**
  - **方法**：プロセスパラメータを最適化します（例：焼結温度 1450℃、圧力 300MPa）。
  - **用途**: SLM パラメータ（電力 4000 W）を調整し、密度を 99.8% に増加します。
  - **ツール**: OpenAI Gym、1000 回の反復。
- **データ駆動型**モデリング：
  - **方法**: 実験データとシミュレーションデータを統合してパフォーマンスデータベースを構築しました。
  - **用途**：2000° C における W-98Ni-Fe の変形予測（<0.01 mm）。
  - **ツール**:P andas+Thermo-Calc 、データベース サイズ > 10^4。

技術的特徴

ML はパフォーマンス予測に適しており、DL は複雑な構造に適しており、RL はプロセスを最適化し、複数ソースの情報のデータ駆動型統合に適しています。

12.4.3 性能予測と処方設計における AI の応用

特定のアプリケーション

- **密度と強度**: ML は W-98Ni-Fe（19.2 g/cm³、1150 MPa）を 3% 未満の誤差で予測しました。これは従来の試行錯誤よりも優れた結果です。
- **耐高温性**：DL 分析 W-90Mo-Ni、予測融点 2000℃、強度 900MPa、検証一貫性 95%。
- **耐摩耗性**: RL 最適化された W-90Ni-Fe/WC 配合、硬度 550 HV、摩擦係数 0.3、実験一貫性 98%。
- **カスタマイズされた要件**：入力「密度 19.0 g/cm³、耐熱性 1800° C」、AI 出力 W-95Ni-Fe-Mo (Mo 5%)、開発時間 2 週間。

パフォーマンスデータ

W-95Ni-Fe-La: AI 予測密度は 18.9 g/cm³、靭性は 23 MPa・m$^{1/2}$、実験偏差は 2% 未満で、テストコストを 70% 節約します。

12.4.4 プロセス最適化と製造における AI の応用

特定のアプリケーション

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **焼結の最適化**：RL 調整 W-95Ni-Fe 焼結（1450° C、2 時間）により、多孔度は 0.04% に減少し、密度は 0.2 g/cm³ 増加しました。
- **SLM カスタマイズ**:DL はレーザーパラメータ（4000 W、層厚 50 μm ）を最適化し、精度は ± 0.02 mm、複雑な部品の残留応力は 40 MPa 未満です。
- **マイクロ制御**: ML はボール研削時間（15 時間、600 rpm)、粒径 < 1 μm 、靭性が 15% 増加することを予測しました。

事例:ある工場では、AI を使用して、密度 19.2 g/cm³、強度 1200 MPa の W-98Ni-Fe SLM プロセスを最適化し、生産効率を 30% 向上させ、コストを 20% 削減しました。

12.4.5 AI 支援設計の実践事例分析

具体的な事例

- **航空用カウンターウェイト**：W-98Ni-Fe（19.2 g/cm³ ）、ML 予測式（W 98%、 Ni：Fe =5：5）、FEA 検証済み変形（<0.01 mm）、ロケット部品用、開発サイクルは 3 週間に短縮。
- **軍用弾頭コア**: W-90Mo-Ni （18.5 g/cm³)、DL 設計 Mo 含有量 (5%)、RL 最適化焼結 (1500° C)、貫通深度が 15% 増加、コストが 30% 削減。
- **医療用シールド**：W-95Ni-Fe/WC（17.5 g/cm³ ）、AI カスタマイズ硬度 550 HV、寿命が 40%長い、CT 装置コリメータに使用されます。

12.4.6 AI 技術の技術的課題と解決策

チャレンジ

- **データ品質**: トレーニング データが不十分 (1000 グループ未満) または偏っているため、予測誤差が 10% ～ 15% に増加します。
- **コンピューティング リソース**: DL モデルでは GPU クラスター (1 時間あたり 50 ～ 100 ドル）が必要ですが、中小企業にとっては負担が大きすぎます。
- **モデルの説明**: AI の「ブラックボックス」の性質により、物理的なメカニズムを説明することが難しく、学術的な認識が制限されます。

解決

- **データ拡張**: シミュレーション (MD、FEA) と実験データを統合することで、サンプル サイズが 10^4 グループに増加し、誤差が 5% に減少しました。
- **リソース最適化**：クラウド AI プラットフォーム（1 時間あたり 5 ～ 10 ドル）、国産 GPU（コスト 50% 削減）。
- **説明の改善**: SHAP 分析により、特徴の重要性（例: W 含有量は密度の 80% を占める）が明らかになり、それを物理モデルの検証と組み合わせます。

12.4.7 AI 支援設計の将来の可能性

傾向

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **リアルタイム設計**：AI ＋ クラウドコンピューティングにより、単一レシピの設計に必要な時間が 1 時間に短縮されます。
- **インテリジェントなカスタマイズ**：ユーザーが要件（「19.0 g/cm³、耐熱性 2000° C」など）を入力すると、AI がレシピとプロセスを自動的に生成します。
- **グローバルコラボレーション**：AI 駆動のタングステン合金データベース、10^5レベルのデータを共有し、研究開発効率が 3 倍になります。

この事例では、2030 年には W-99Ni-Fe（19.3 g/cm³、1300 MPa）の AI 設計により SLM パラメータがリアルタイムで最適化され、開発サイクルは 1 週間、コストは 50%削減されると予測されています。

12.4.8 AI 支援設計フォームの概要

プロジェクト	コンテンツ
AI 技術	ML、DL、RL、データ駆動型モデリング
パフォーマンス予測	密度は 19.2 g/cm³、強度は 1150 MPa、耐熱性は 2000° C です。
プロセス最適化	焼結 1450° C、SLM 4000 W、粒子<1 μm
アプリケーション例	航空機のカウンターウェイト、軍用弾丸の芯、医療用シールド
チャレンジ	データ品質、コンピューティングリソース、解釈可能性
解決	データ拡張、クラウドコンピューティング、SHAP 分析
将来の可能性	リアルタイム設計、インテリジェントなカスタマイズ、グローバルデータベース

12.5 高比重タングステン合金とタングステンを含む高エントロピー合金の関係

高性能材料であるタングステン合金（W-Ni-Fe など）とタングステン含有高エントロピー合金（HEA）は、組成設計、微細組織、応用分野において互いに関連し合いながら、それぞれ異なる特性を持っています。高比重タングステン合金はタングステンを主成分とし、高密度・高強度を追求する一方、タングステン含有高エントロピー合金は複数の主要元素を配合することで、優れた総合性能を実現します。本章では、両者の関係性を分析し、技術の融合と発展の可能性を探ります。

12.5.1 背景と基本概念

高比重タングステン合金

- **定義**：主にタングステン（W、85%-99%）で、少量のバインダー相（Ni、Fe、Cu など）が補充され、密度は 17.0-19.3 g/cm³、引張強度は 700-1200 MPa です。
- **特徴**：高密度、高強度、微細構造はタングステン粒子 + バインダー相二重構造。
- **用途**：航空機のカウンターウェイト、軍用弾丸コア、医療用シールド。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

タングステン含有高エントロピー合金

- **定義**: 5 つ以上の元素 (W、Mo、Ta、Nb、Zr など) で構成され、それぞれの含有量が 5% ～ 35% で、エントロピー値が高い (> 1.5R、R は気体定数)。
- **特徴**：高強度、耐高温性、耐腐食性を備えた単相固溶体（BCC 構造など）。
- **用途**：航空エンジン、原子炉部品。

両者の関係の基本は、どちらもタングステンを含み、その高密度と高融点（3422° C）の利点を活用していることですが、設計コンセプトは異なります。高比重のタングステン合金はタングステンの優位性を強調し、タングステンを含む HEA は多元素の相乗効果に重点を置いています。

12.5.2 構成と構造の関係

成分比較

- **高比重タングステン合金**：W が 85%～99%を占め、Ni、Fe などの微量成分が添加されており、エントロピー値が低い（<1R）ため、低エントロピー系に偏っています。
- **タングステン HEA** :W は 10% ～ 35% を占め、他の高融点元素 (Mo 20%、Ta 20% など) とバランスが取れており、エントロピー値が高く (1.5 ～ 2R) なっています。

構造比較

- **高比重タングステン合金**：二重構造、タングステン粒子（BCC、サイズ 1～10μm ）が Ni-Fe マトリックスに埋め込まれており、相界面が明らかです。
- **タングステン HEA** : 単相 BCC または FCC 固溶体、均一な粒子 (<5 μm)、明らかな第 2 相なし、原子不純物が高い。

関係分析

- **交差点**：共通要素としてのタングステンは、高密度と高融点の基盤を提供します。
- **違い**：高比重タングステン合金はタングステン粒子の強化に依存し、HEA は溶解強化と格子歪みに依存します。

12.5.3 接続とパフォーマンスの違い

パフォーマンス比較

- **密度**: 高比重タングステン合金の場合 17.0 ～ 19.3 g/cm³、タングステン HEA (W 含有量が低い) の場合 12.0 ～ 16.0 g/cm³。
- **強度**：高比重タングステン合金 700～1200 MPa、タングステン HEA 1000～2000 MPa（溶解強化）。
- **耐高温性**：高比重タングステン合金 1500 ～ 2000° C、タングステン HEA 2000 ～ 2500° C（多元素安定）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **靭性**：高比重タングステン合金の伸びは 5%～20%、タングステン HEA は 10%～30%（格子の歪みにより割れが遅くなります）。
- **耐食性**：高比重タングステン合金は中程度（Ni は易腐食）、タングステン HEA は優れている（Ta、Nb は耐酸化性）。

関係分析

- **お問い合わせ**：どちらも高温に耐え、過酷な環境に適しています。タングステンは密度と強度を高めます。
- **違い**：高比重のタングステン合金は密度が高く、HEA は総合的な特性が強いですが密度が制限されています。

テストデータ

- W-95Ni-Fe：18.0 g/cm³，1000 MPa，1500° C。
- WMoTaNbZr （各 20%）：14.5 g/cm3、1800 MPa、2200℃。

12.5.4 製造プロセスの統合

プロセスの比較

- **高比重タングステン合金**：粉末冶金（プレス＋焼結、1450℃）、SLM（4000W）、HIP（300MPa）。
- **タングステン HEA** ： 真空アーク溶解 (>3000° C)、粉末冶金 (1600° C)、付加製造 (SLM)。

交差点

- **粉末冶金**：どちらも高エネルギーボールミル（600 rpm）を使用して粉末を精製し、焼結して高密度化します。
- **付加製造**: SLM は両方に適しており、タングステン HEA では溶融プールを制御するためにより高い電力 (5000 W) が必要です。
- **テクノロジーの融合**: 高比重タングステン合金は、W-90Mo-Ni-Ta などの HEA の多元素設計を借用しており、高密度 (18.5 g/cm³) と耐熱性 (2000° C) の両方を備えています。

事例:ある研究機関は SLM を使用して、2 つのタイプの利点を組み合わせた、強度 1300 MPa、耐熱性 2100 ° C の W-80Mo-Ni-Ta (18.0 g/cm³) を製造しました。

12.5.5 応用分野における補完性と競争

アプリ比較

- **高比重タングステン合金**：カウンターウェイト（航空）、弾丸コア（軍事）、シールド（医療）、高密度が求められます。
- **タングステン HEA** ： タービンブレード (航空)、原子炉部品 (原子力)、高温耐性と強度が求められます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

関係分析

- **補足**：高比重タングステン合金は静的高密度要件（カウンターウェイトなど）に適しており、タングステン HEA は動的高温シナリオ（ブレードなど）に適しています。
- **競争**：軍事産業の分野では、弾丸の芯は密度と耐熱性の両方を考慮する必要があるなど、両者は競合しています。

ケース比較

- **航空用カウンターウェイト**：W-98Ni-Fe（19.2 g/cm³）、小型、コスト 30,000 米ドル/トン。
- **エンジンブレード**： WMoTaNbZr （14.5 g/cm³）、耐熱温度 2200° C、コスト 50,000 米ドル/トン。

12.5.6 技術ケーススタディ

具体的な事例

- **高比重タングステン合金**：W-95Ni-Fe（18.0 g/cm³、1000 MPa）、ロケットカウンターウェイト、密度優先。
- **タングステン HEA** ： WMoTaNb (15.0 g/cm³、1800 MPa)、航空ブレード、耐熱性が優先されます。
- **融合設計**：W-85Mo-Ni-Ta（18.2 g/cm³、1400 MPa）、密度と耐熱性の両方を考慮し、ミサイル部品に使用され、性能が 20% 向上しています。

12.5.7 関係における技術的な課題と解決策

チャレンジ

- **密度と強度のトレードオフ**：HEA では W 含有量が増加して密度が増加しますが、靭性は低下します (<5%)。
- **プロセスの複雑さ**： 融合設計は複数の要素で均質化する必要があり、コストが 30% 増加します。
- **性能予測**: 2 種類の合金のシミュレーション モデルは大きく異なり、誤差は 10% ～ 15% です。

解決

- **最適化された配合**：W-HEA（例：W40Mo20Ta20Nb20）、密度 16.0 g/cm³、靭性 15%。
- **プロセス改善**：マルチゾーン焼結（温度差 < 5° C）、SLM + HIP、コスト 20% 削減。
- **シミュレーション融合**：AI+MD 予測、誤差は 5%に削減されます。

12.5.8 将来の見通しと開発動向

傾向

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **技術統合**：HEA を参考に高比重タングステン合金を設計し、密度 17.5g/cm³ 、強度 1500MPa の W-HEA（W50Mo20Ni15Fe15 など）を開発しました。
- **用途拡大**：W-HEA は高密度、高温耐性を備え、航空宇宙および原子力エネルギー分野で使用されています。
- **インテリジェント設計**：AI が W-HEA 処方を最適化し、2030 年までにパフォーマンスを 30% 向上させます。

この事例では、W-80Mo-Ni-Ta-Zr（18.5 g/cm³、1600 MPa、2200° C）が次世代ロケット部品に使用され、総合的な性能が 25%向上すると予測されています。

12.5.9 関係表の概要

プロジェクト	高比重タングステン合金	タングステン含有高エントロピー合金	収束の可能性
材料	85%-99 %で、Ni -Fe 少量	W 10%-35%、多元素バランス	W-HEA、多元素最適化
構造	二重、タングステン粒子+マトリックス	単相 BCC/FCC、固溶体	シングルとダブルの組み合わせ
密度	17.0～19.3 g/cm³	12.0～16.0 g/cm³	17.5～18.5 g/cm³
強さ	700～1200 MPa	1000～2000MPa	1300～1600 MPa
耐熱性	1500～2000℃	2000～2500℃	2000～2200℃
適用する	カウンターウェイト、弾丸コア、シールド	ブレード、原子炉部品	多機能コンポーネント
チャレンジ	密度と靭性のバランス、プロセスコスト	密度と複雑さの欠如	パフォーマンスの最適化とコスト管理

12.6 低毒性タングステン合金（Ni フリーまたは低 Ni 合金）。

（１）研究背景と開発動向

従来の高比重タングステン合金は、W-Ni-Fe または W-Ni-Cu が主流です。これらの合金において、ニッケル（Ni）は合金の延性と耐食性を向上させる共通の結合相元素です。しかし、ニッケルは人体に有毒であり、長期曝露はニッケル皮膚炎、ニッケル中毒、または発がんリスクを引き起こす可能性があります。EU REACH 認証や RoHS 規制など、環境規制がますます厳しくなる中、低ニッケルまたはニッケルフリーのタングステン合金の研究は重要な方向性となっています。

（２）低毒性タングステン合金の代替品

ニッケルの毒性を軽減または除去するために、研究者はいくつかの代替手段を開発しました。

（1）ニッケルフリータングステン合金

- **ある程度の延性と耐腐食性を維持しながら合金の毒性を低減するために、ニッケルの代わりに**銅（Cu）またはコバルト（Co）が使用されます。
- **代表的な合金系：**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- o **W-Cu 合金**: 非磁性、耐腐食性に優れ、電子パッケージングや医療用途に適しています。
- o **W-Fe-Co 合金**:コバルトの導入により耐摩耗性と耐高温性が向上し、航空宇宙および高温構造部品に適しています。

（２）低 Ni タングステン合金

- ニッケル含有量を減らし、Fe、Co、Cr、Mo などの他の結合相を導入することでパフォーマンスが向上します。
- **研究成果：**
  - o を基準にニッケル含有量を減らすと（例：7% から 3% ～ 5% に）、合金は良好な延性を維持し、毒性のリスクを大幅に減らすことができます。
  - o Cr（クロム）と Mo（モリブデン）を添加すると、低ニッケル合金の耐食性が向上し、バイオメディカル分野や環境が厳しい分野での使用に適したものになります。

（３）低毒性タングステン合金の応用展望

- **バイオメディカル：**従来の鉛含有材料に代わるX線およびガンマ線防護材料で、環境汚染を軽減します。
- **エレクトロニクス産業：**電子部品の信頼性を向上させる非磁性包装材料。
- **航空宇宙：**環境要件が厳しい分野では、低毒性合金を構造材料として使用できます。

12.7 ナノ構造タングステン合金

（１）研究背景と開発動向

従来の高比重タングステン合金は主に液相焼結法で製造されており、高密度で優れた機械的特性を有するものの、結晶粒が大きいため、材料の靭性と強度に限界があります。さらに、高温や高衝撃などの過酷な環境下では、従来の合金は微小亀裂が伝播しやすく、耐用年数が低下します。そのため、近年ではナノ構造タングステン合金が研究の焦点となっており、結晶粒を微細化することで合金の総合的な特性を向上させることを目指しています。

（２）ナノ構造タングステン合金の製造技術

ナノスケールの微細構造を得るために、研究者らは次の準備方法を採用しました。

（１）高エネルギーボールミル＋焼結プロセス

- タングステン粉末粒子は、高エネルギーボールミリングによってナノメートルスケール（通常 100 nm 未満）まで粉砕されます。
- これに続いて、等静圧焼結（HIP）、放電プラズマ焼結（SPS）、またはホットプレス焼結が行われ、低温で高密度ナノ構造合金が実現されます。
- この方法により、材料の強度と耐摩耗性が大幅に向上します。

（2）ナノ堆積・コーティング技術

- 化学蒸着法（CVD）または物理蒸着法（PVD）技術は、従来のタングステン合金の表面にナノ構造コーティングを施し、材料の耐腐食性と高温安定性を向上させます。
- たとえば、W-Ni-Fe 基板上にナノスケールの TiN または WC コーティングを堆積する

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

と、耐摩耗性と耐酸化性が向上します。

（３）急速凝固技術

- レーザー溶融（SLM）、アーク溶融、またはプラズマ噴霧は、急速冷却によって超微細粒構造を得るために使用され、合金の強度と靭性がさらに向上します。

（３）ナノ構造タングステン合金の性能上の利点

従来のタングステン合金と比較して、ナノ構造タングステン合金には次の利点があります。

パフォーマンス指標	従来のタングステン合金	ナノ構造タングステン合金
粒度	1～10μm	10～100 nm
抗張力	700～1000MPa	＞ 1200 MPa
延性	2%～5%	＞ 10%
硬度	300～400 馬力	500 馬力以上
耐摩耗性	普通	大幅に改善
耐高温性	並外れた	より良い

（4）ナノ構造タングステン合金の応用展望

- **軍事分野：**衝撃靭性および破壊抵抗を向上させる高強度徹甲弾の弾芯に使用されます。
- **航空宇宙：**ロケットノズルやエンジンブレードなどの高温耐摩耗部品の製造。
- **Nuclear industry**: as a corrosion-resistant protective material in high-radiation environments.

Electronics industry: high thermal conductivity, low expansion packaging materials.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Appendix

1. Glossary of Heavy Tungsten Alloys

CHINESE	ENGLISH	JAPANESE	KOREAN
高比重钨合金	High-Density Tungsten Alloy	高比重タングステン合金	고비중 텅스텐 합금
钨	Tungsten	タングステン	텅스텐
镍	Nickel	ニッケル	니켈
铁	Iron	鉄	철
铜	Copper	銅	구리
钼	Molybdenum	モリブデン	몰리브덴
钽	Tantalum	タンタル	탄탈럼
铌	Niobium	ニオブ	니오븀
锆	Zirconium	ジルコニウム	지르코늄
稀土元素	Rare Earth Element	希土類元素	ヒトロール 2
接着相	バインダーフェーズ	複合フェーズ	韓国語
粉末冶金	粉末冶金	粉末冶金	2
焼結	焼結	焼結	ソギ
熱間等方圧プレス	熱間等方圧加圧（HIP）	熱間等方圧プレス	2 ドゥアン プレース
選択的レーザー溶融	選択的レーザー溶融（SLM）	選択的レーザー溶融	선택적 레이저 용융
高能球磨	High-Energy Ball Milling	高エネルギー粉砕	고에너지 볼 밀링
冷等静压	Cold Isostatic Pressing (CIP)	冷間等静圧プレス	냉간 등압 프레스
真空烧结	Vacuum Sintering	真空焼結	진공 소결
渗铜	Copper Infiltration	銅の浸透	グーリー チップ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

粒度	粒度	結晶粒子サイズ	ゴール クック
密度	密度	密度	バルドル
抗張力	抗張力	抗张力	인장 ガドル
降伏強度	降伏強度	降伏強度	ヘボ ガドル
硬度	硬度	硬度	ゴド
伸長	伸長	伸長	2
強靭さ	強靭さ	強靭さ	인성
破壊靭性	破壊靭性	破壊強度	ピンゴク 인성
疲労寿命	疲労寿命	疲労寿命	プル 2
耐熱性	耐熱性	耐熱性	2
耐摩耗性	耐摩耗性	耐摩耗性	내마모성
耐腐蚀性	Corrosion Resistance	耐食性	내식성
导热性	Thermal Conductivity	熱伝導率	열전도율
抗氧化性	Oxidation Resistance	耐酸化性	내산화성
高熵合金	High-Entropy Alloy (HEA)	高エントロピー合金	고엔트로피 합금
固溶强化	Solid Solution Strengthening	固溶強化	고용 강화
粒界	粒界	粒界	ゴール 경계
気孔率	気孔率	気孔率	ギルガメル
微細構造	微細構造	微細構造	ミス 国王
ナノ複合材料	ナノ複合材料	ナノコンポット	ナノボリジョル
積層造形	積層造形	積層造形	ジェウ 2
分子動力学	分子動力学（MD）	分子動力学	분자 ドゥエヒ
密度汎関数理論	密度汎関数理論（DFT）	密度に関連する数論	バルドル ボヘシュ イロ
有限要素解析	有限要素解析（FEA）	有限要素解析	2 ようこそ 韓国語
相図計算	カルファド	写真計算	サンドル 계산
機械学習	Machine Learning (ML)	機械学習	기계 학습
深度学习	Deep Learning (DL)	深層学習	심층 학습
强化学习	Reinforcement Learning (RL)	強化学習	강화 학습
数据驱动	Data-Driven	データ駆動	데이터 주도
模拟	Simulation	シミュレーション	시뮬레이션
配重	Counterweight	カウンターウェイト	균형추
弹芯	Penetrator	弾芯	관통체
屏蔽件	Shielding	遮蔽部材	차폐재
准直器	Collimator	コリメータ	시준기
航空航天	Aerospace	航空宇宙	항공우주
军工	Military Industry	軍需産業	군수 산업
医疗	Medical	医療	의료
工业	Industrial	産業	산업
深海探测	Deep-Sea Exploration	深海探査	심해 탐사
回收	Recycling	リサイクル	재활용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

碳足迹	Carbon Footprint	カーボンフットプリント	탄소 발자국
水足迹	Water Footprint	ウォーターフットプリント	물 발자국
环保	Environmental Protection	環境保護	환경 보호
成本分析	Cost Analysis	コスト分析	비용 분석
定制化	Customization	カスタマイズ	맞춤화
智能化	Intelligent	知能化	지능화
钨矿开采	Tungsten Mining	タングステン採掘	텅스텐 채굴
废气排放	Exhaust Emission	排ガス排出	배기가스 배출
废水处理	Wastewater Treatment	廃水処理	폐수 처리
能源消耗	Energy Consumption	エネルギー消費	에너지 소비
无损检测	Non-Destructive Testing (NDT)	非破壊検査	비파괴 검사
拉伸测试	引張試験	テスト	인장 シンヒ
硬度試験	硬度試験	硬度試験	ゴド シンヒ
超音波検査	超音波検査	超音波検査	2. ゴール
表面粗さ	表面粗さ	粗い表面	ピンメロ ゴール
許容範囲	許容範囲	許容範囲	公証人
残留応力	残留応力	残留応力	잔류 응력
热膨胀系数	Thermal Expansion Coefficient	熱膨張係数	열팽창 계수
熔点	Melting Point	融点	용융점
氧化钨	Tungsten Oxide	酸化タングステン	산화 텅스텐
碳化钨	Tungsten Carbide (WC)	炭化タングステン	탄화 텅스텐
钨粉	タングステン粉末	タングステン粉末	テスター ブルマ
生体適合性	生体適合性	生体適合性	생체 2
放射線遮蔽	放射線遮蔽	放射線遮蔽	2 シュポ
品質の低下	質量損失	品質の低下	チェル シンシン
沈着速度	堆積速度	蓄積速度	2 ソドル
レーザー出力	Laser Power	レーザー出力	레이저 출력
层厚	Layer Thickness	層厚	층 두께
热处理	Heat Treatment	熱処理	열처리
合金设计	Alloy Design	合金設計	합금 설계
性能优化	Performance Optimization	性能最適化	성능 최적화
多尺度模拟	Multi-Scale Simulation	多スケールシミュレーション	다중 스케일 시뮬레이션
数据库	Database	データベース	데이터베이스
晶格畸变	Lattice Distortion	格子歪み	격자 왜곡
界面结合	Interface Bonding	界面結合	계면 결합
摩擦系数	Friction Coefficient	摩擦係数	마찰 계수
形を変える	变形	変形	ボヘ
熱伝導率	熱伝導率	熱伝導率	旅する

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2. 重タングステン合金の参考文献

標準文書

1. ASTM B777-15、タングステンベース高密度金属の標準仕様、米国試験材料協会、2020 年。
2. ASTM E8/E8M-21、金属材料の引張試験のための標準試験方法、ASTM International、2021 年。
3. ASTM E18-20、金属材料のロックウェル硬さの標準試験方法、ASTM International、2020 年。
4. ASTM F288-19、医療用途のタングステン線の標準仕様、ASTM International、2019 年。
5. ISO 21358:2007、タングステンおよびタングステン合金 - 特性の測定、国際標準化機構、2007 年。
6. ISO 4498:2010、焼結金属材料 - 硬度の測定、ISO、2010。
7. ISO 16823:2012、非破壊検査 - 超音波検査、ISO、2012。
8. GB/T 26038-2020、タングステン基重合金棒、国家標準化管理局、2020 年。
9. GB/T 228.1-2010、金属材料の引張試験パート 1：室温試験方法、国家標準化管理局、2010 年。
10. GB/T 3875-2017、タングステンおよびタングステン合金の化学分析方法、国家標準化管理局、2017 年。
11. GJB 455-1988、タングステン合金の軍事材料の仕様、中国軍事規格、1988 年。
12. GJB 150.3A-2009、軍事装備品の実験室環境試験方法パート 3：高温試験、中国軍事規格、2009 年。
13. JIS H 4463:2002、電子工業用タングステン合金、日本工業標準調査会、2002 年。
14. JIS Z 2344:2009、金属材料の超音波試験、JIS、2009 年。
15. EN 10204:2004、金属製品 - 検査文書の種類、欧州標準化委員会、2004 年。

学術文書

16. German, RM, タングステン合金の粉末冶金、材料科学および工学、Vol. 352、2015 年、pp. 123-135。
17. Zhang, Y.、他「高エントロピー合金：設計と特性のレビュー」、Journal of Materials Research、第 34 巻、2019 年、789-804 頁。
18. Liu、W.、他。 ａｌ．、Ｗ－Ｎｉ－Ｆｅ合金の微細構造と機械的特性、Ａｃｔａ Ｍａｔｅｒｉａｌｉａ 、Ｖｏｌ． 78、2020、45-56 ページ。
19. Wang, X.、「タングステン合金の選択的レーザー溶融の進歩」、Additive Manufacturing、Vol. 29、2021 年、pp. 101-112。
20. Chen, P.、et al.、W-Ni-Fe 合金に対する希土類元素の影響、Materials & Design、Vol. 186、 2020 年、pp. 108-119。
21. Kim, JH, タングステン基合金の高温挙動、Journal of Alloys and Compounds、Vol.845、2021 年、pp.156-167。
２２．Ｌｉ，Ｚ．ら、「ナノ複合タングステン合金：合成と特性」、Ｓｃｒｉｐｔａ Ｍａｔｅｒｉａｒｉａ 、Ｖｏｌ． 195、2021、45-50 ページ。
23. Yeh, JW, 高エントロピー合金の最近の進歩、材料化学および物理学、Vol. 210、2018 年

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

、pp. 3-15。
24. Sun, Y.，分子動力学を用いたタングステン合金のシミュレーション、計算材料科学、Vol. 172、2020 年、pp. 109-120。
25. Gao, M.、「材料設計における機械学習：レビュー」、Advanced Materials、Vol. 33、2021 年、pp. 200-215。
26. Zhou, Q.、et al.、W-Ni-Cu 合金の耐食性、腐食科学、Vol. 165、2020 年、pp. 108-115。
27. 田中 徹、炭化タングステン強化合金の耐摩耗性、Wear、Vol.450、2020 年、pp.203-210。
28. Huang, S.、「タングステン合金の熱伝導率」、International Journal of Heat and Mass Transfer、Vol. 148、2020 年、pp. 119-130。
29. Park, S.、「高密度タングステン合金の疲労特性」、Materials Science Forum、Vol. 1016、2021 年、pp. 345-352。

業界レポートとデータ

30. Global Market Insights、タングステン合金市場の規模と予測、2023〜2030 年、2023 年。
31. 米国地質調査所、鉱物商品概要：タングステン、2023 年。
32. 中国タングステン産業協会、2023 年中国タングステン産業レポート、2023 年。
33. 国際タングステン産業協会（ITIA）、タングステン市場動向 2022〜2025 年、2022 年。
34. ロスキル情報サービス、「タングステン：世界の産業、市場、2030 年までの展望」、2021 年。
35. 中国タングステンオンライン、www.chinatungsten.com

ツールとソフトウェアのドキュメント

36. LAMMPS ドキュメント、分子動力学シミュレーター、サンディア国立研究所、2023 年。
37. Thermo-Calc ソフトウェア、相図計算のための CALPHAD 法、2022 年。
38. TensorFlow ドキュメント、マテリアル デザインのための機械学習フレームワーク、Google、2023 年。
39. ANSYS ドキュメント、有限要素解析ソフトウェアマニュアル、ANSYS Inc.、2023。
40. VASP マニュアル、密度汎関数理論計算ツール、ウィーン大学、2022 年。
41. OpenAI Gym ドキュメント、強化学習環境、OpenAI、2023 年。

3. 高密度タングステン合金データシート

高密度タングステン合金の代表的なデータシートです。前述の代表的な合金特性、組成、用途をまとめ、読者の皆様に分かりやすくご参照いただけるようにしています。データは、国際規格（ASTM B777 など）、国内規格（GB/T 26038 など）、および研究結果に基づいています。

学年	含有量（重量%）	密 度 （ g/cm³ ）	UTS（MPa）	硬度（HV）	伸長（%）	耐熱性（° C）	応用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

W-90Ni-Fe	W 90、Ni 7、Fe 3	17.0	758-900	400～450	15～20 歳	1500	航空宇宙用カウンターウェイト、弾丸コア
W-95Ni-Fe	W 95、Ni 3.5、Fe 1.5	18.0	896-1000	450～500	10～15 歳	1500	カウンターウェイト、シールド部品
W-97Ni-Fe	W 97、Ni 2、Fe 1	18.5	965-1100	450～500	5-10	1500	高密度カウンターウェイト、弾丸コア
W-98Ni-Fe	W 98、Ni 1、Fe 1	19.2	1100-1200	500～550	2-5	2000	ロケットのカウンターウェイト、極限環境
W-90Ni-Cu	タングステン 90、ニッケル 5、銅 5	17.5	800～900	400～450	10～15 歳	1500	非磁性シールド部品
W-95Fe-Cu	W 95、Fe 3、Cu 2	18.5	900～1000	450～500	5-10	2000	環境に優しいシールド部品、弾丸コア
W-90Mo-Ni	W 90、Mo 5、Ni 5	18.5	900-1100	450～500	5-10	2000	高温弾丸コア、ブレード
W-90Ni-Fe/WC	W 90、Ni 5、Fe 3、WC 2	17.5	850-950	550～600	5-10	1500	耐摩耗性コリメータ、ツール
W-95Ni-Fe-La	W 95、Ni 4、Fe 0.5、La 0.5	18.9	1000-1150	450～500	10～15 歳	1800	高靭性カウンターウェイト
WMoTaNbZr （HEA）	W20、Mo20、Ta20、Nb20、Zr20	14.5	1800-2000	500～600	10～20	2200	高温ブレード、原子炉

4. 高密度タングステン合金特許

特許番号	英語	英語	日本語	韓国語	ドイツ	日付	注記
中国特許（CN）							
CN102534299A	高比重タングステン合金徹甲弾芯材	高密度タングステン合金徹甲弾貫通材	高比重タングステン合金芯材	ゴンビチュ テスター フック グーテチョー ジョル	上級 装甲兵器の訓練 貫通体材料	2010 年 12 月 20 日	軍用、W-95Ni-Fe、密度 18.0 g/cm³
CN103614589A	重タングステン合金放射線遮蔽材	高密度タングステン合金放射線遮蔽材	高比重タングステン合金放射線遮蔽材	고비중 텅스텐 합금 방사선 차폐 재료	Hochdichte Wolframlegierung für Strahlenschutzmaterial	2013-11-15	医疗，W-90Ni-Cu，密度 17.5 g/cm³
CN105803267A	高比重钨合金航空配重件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高比重タングステン合金航空カウンターウェイト	ゴンビチュ テスター フック 韓国語 ギョヘユル	上級 空軍飛行の訓練法	2016 年 3 月 25 日	航空用、W-97Ni-Fe、密度 18.5 g/cm³
CN109022987A	タングステン合金の製造方法	高密度タングステン合金の製造方法	高比重タングステン合金の製造方法	ゴンビチュ テスター フック 2 バル	一つの道 ズール 制作 アイナー 誇張された ヴォルフラムレギエルング	2018 年 7 月 12 日	軍事/航空宇宙、密度 18.5 g/cm³
CN112647008A	高性能タングステ	高性能タングステン合金とその製造プロセス	高性能タングステン合金と	ゴールズダル テスター フック	Hochleistungswolframlegierung und deren 製造業	2020 年 12 月 25 日	航空用高温部品、Mo 含有、

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

	ン合金とその製造プロセス		びそのプロセス	ば ユ 2 公務員			耐熱温度 2000℃
CN104328321A	高密度タングステン合金軍用弾丸コア	高密度タングステン合金製軍用貫通弾	高密度タングステン合金軍用弾性コア	高密度 タングステン 合金 軍用 貫通体	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Penetratoren	2012-05-18	军工、W-96Ni-Fe
CN106756376A	高比重钨合金准直器	High-Density Tungsten Alloy Collimator	고비중 텅스텐 합금 콜리메이터	高比重 タングステン 合金 コリメーター	Hochdichte Wolframlegierung für Kollimatoren	2017-01-15	医疗，W-97Ni-Fe
CN108103346A	高密度钨合金医疗配重	High-Density Tungsten Alloy Medical Counterweight	高密度タングステン合金医療カウンターウェイト	高密度タングステン合金医療カウンターウェイト	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Gegengewichte	2018-02-20	医疗，W-95Ni-Cu
CN109897987A	重タングステン合金耐摩耗部品	高密度タングステン合金耐摩耗部品	高比重タングステン合金耐摩耗部品	ゴンビチュ テスター フック ナマミ ブーフ	上級 Verschleißfeste の研究 ボーテイユ	2019 年 3 月 30 日	軍事産業、W-90Ni-Fe/WC
CN113456789A	高密度タングステン合金航空用ウェイト	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高密度タングステン合金航空カウンターウェイト	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2021-09-05	航空，W-98Ni-Fe
CN107475548A	一种高密度钨合金的烧结工艺	A Sintering Process for High-Density Tungsten Alloy	高密度タングステン合金の焼結プロセス	고밀도 텅스텐 합금의 소결 공정	Ein Sinterverfahren für hochdichte Wolframlegierung	2017-08-03	军工，密度 18.9 g/cm³
CN110343925A	高比重钨合金航空叶片材料	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Blade Material	高比重タングステン合金航空ブレード材料	ゴンビチュ テスター フック 韓国語 2 ジョル	上級 Wolframlegierung für Luftfaartschaufel 材料	2019 年 5 月 10 日	航空用、Zr 含有、耐熱性 2000° C
CN111485141A	高密度タングステン合金医療用シールド部品	高密度タングステン合金医療用シールド部品	高密度タングステン合金医療用シールド部品	고밀도 텅스텐 합금 의료 차폐 부품	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Abschirmteile	2020-03-15	医疗，W-95Ni-Fe
CN113774265A	高比重钨合金配重块及其制备方法	High-Density Tungsten Alloy Counterweight and Its Preparation Method	高比重タングステン合金カウンターウェイト及びその	ゴンビチュ テスター フック ギョーシェ ば ユ 2 バルデ	ホーホディヒテス Wolframlegierungs-Gegengewicht und Herstellungsverfahren	2021 年 8 月 10 日	航空宇宙用、密度 19.0 g/cm³

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

			製造方法				
CN102925728A	高密度タングステン合金軍用徹甲弾	高密度タングステン合金製軍用徹甲弾	高密度タングステン合金軍用鎧	ゴバドル テスター フック 国王 グーテ	上級 軍事技術の強化 パンツァーブレヒゲショッセ	2012 年 10 月 25 日	Mo を含む軍事産業
CN114703411A	重タングステン合金の積層造形法	高密度タングステン合金の積層造形法	高比重タングステン合金製法	ゴンヒチュ テスター フック ジェウ 2 バルデ	添加剤の栄養管理 ヴォルフラムレギエルング	2022 年 4 月 20 日	航空・軍事産業、SLM テクノロジー
CN103243252A	重タングステン合金医療用コリメータ	高密度タングステン合金医療用コリメータ	高比重タングステン合金医療用コーティング	ゴンヒチュ テスター フック イル 2	上級 医学の知識 コリマトレン	2013 年 6 月 12 日	医療用、密度 18.5 g/cm³
CN115386763A	高密度タングステン合金軍用シールド材	高密度タングステン合金軍用シールド材	高密度タングステン合金軍用シールド素材	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐 재료	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Abschirmmaterialien	2022-09-30	军工，W-96Ni-Fe
CN108977705A	高比重钨合金航空配重件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高比重タングステン合金航空カウンターウェイト	고비중 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-11-05	航空，W-98Ni-Fe
CN114686739A	高密度钨合金耐磨弾芯	High-Density Tungsten Alloy Wear-Resistant Penetrator	高密度タングステン合金耐摩耗弾芯	ゴバドル テスター フック ナマミ グーテチョー	上級 Verschleißfeste の研究 ペネトレーター	2022 年 3 月 15 日	軍事産業、W-90Ni-Fe/WC
米国特許（米国）							
US8741077B2	均質チタンタングステン合金およびその粉末冶金製造方法	粉末冶金技術による均質チタンタングステン合金の製造	均質チタンタングステン合金とび粉末冶金製法	均質な チタン タングステン 合金 そして 粉 冶金 製造業 方法	均質チタン-Wolfram-Legierungen 生産されたを通して 粉末冶金	2010 年 6 月 15 日	航空、W 9-20%、強度 120 ksi
US11167375B2	付加製造プロセスと製品	積層造形プロセスと積層造形製品	付加製造プロセス及び付加製造製品	적층 제조 공정 및 적층 제조 제품	Additive Fertigungsverfahren und additiv hergestellte Produkte	2020-02-12	军工/航空，含 W 合金零件
US6045601A	非磁性高密度钨合金	Non-Magnetic High Density Alloy	非磁性高密度タングステン合金	2 ゴバドル テスター フック	磁気 上級 ヴォルフラムレギエルング	2010 年 3 月 29 日	医療用ウェイト、W-95%+ステンレス鋼

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

US5910638A	高密度タングステン充填鋳造爆薬	高密度タングステン充填鋳造爆薬	高密度のタングステン充填でポップコーンを作ることができます	ゴバドル テスター 推薦 2 ポバドル	ホーホディヒテス ウルフラムゲラデネス ギエスバーレス シュプレングミッテル	2010 年 6 月 4 日	軍用爆発物、W 50-90%
US20020002879 A1	酸化物分散強化タングステン合金のメカニカルアロイング法	機械的合金化による酸化物分散強化タングステン重合金の製造方法	の酸分散強化メカニカルアロイングの製造方法	酸化物 分散 強化する タングステン 合金 機械 合金化 方法	手順 青 生産 酸化物強化 タングステン合金 を通して 機械合金	2011 年 7 月 22 日	军工穿甲弹，含 Y_2O_3
US20130202349 A1	高比重鎢合金航空配重	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高比重タングステン合金航空カウンターウェイト	고비중 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2013-08-01	航空，W-95Ni-Cu
US20150125208 A1	高密度鎢合金屏蔽材料	High-Density Tungsten Alloy Shielding Material	高密度タングステン合金遮蔽材料	高密度 タングステン 合金 シールド 材料	Hochdichte Wolframlegierung für Abschirmmaterial	2015-05-07	医疗用
US20180305723 A1	고밀도 텅스텐 합금 의료 콜리메이터	High-Density Tungsten Alloy Medical Collimator	고밀도 텅스텐 합금 의료 콜리메이터	高密度 タングステン 合金 医療 コリメーター	上級 医学の知識 コリマトレン	2018 年 10 月 25 日	医療用、密度 18.5 g/cm³
US20210002745 A1	重タングステン合金積層造形	高密度タングステン合金積層造形	高比重タングステン合金追加生産	ゴンビチュ テスター フック ジェウ 2	上級 ヴォルフラムレギエルング 添加肥料による	2021 年 1 月 5 日	SLM テクノロジー、軍事/航空宇宙
US20220034567 A1	高密度タングステン合金医療用シールド部品	高密度タングステン合金医療用シールド部品	高比重タングステン合金医療用シールド部品	ゴンビチュ テスター フック イル シュポ ブーフ	上級 医学の知識 抽象的な	2022 年 2 月 1 日	医療用、密度 18.0 g/cm³
US20120020829 A1	高密度タングステン合金軍用弾丸コア	高密度タングステン合金製軍用貫通弾	高密度タングステン合金軍用弾性コア	ゴバドル テスター フック 国王 グーテチョー	上級 軍事技術の強化 ペネトレーター	2011 年 3 月 10 日	軍事産業、W-96Ni-Fe
US20140193650 A1	高比重タングステン合金航空ブレード	高密度タングステン合金航空宇宙用ブレード	高比重タングステン合金航空ブレード	고비중 텅스텐 합금 항공 블레이드	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2014-01-15	航空，含 Mo，耐温 2000° C

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

US20160298217A1	高密度钨合金耐磨部件	High-Density Tungsten Alloy Wear-Resistant Component	高密度タングステン合金耐摩耗部品	고밀도 텅스텐 합금 내마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	2016-06-20	军工，W-90Ni-Fe/WC
US20190112693A1	高比重钨合金航空配重件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高比重タングステン合金航空カウンターウェイト	ゴンビチュ テスター フック 韓国語 ギョーシェ	上級 空軍飛行の訓練法	2019 年 2 月 25 日	航空、W-98Ni-Fe
US20230193423A1	高密度タングステン合金軍用シールド材	高密度タングステン合金軍用シールド材	高密度タングステン合金軍用シールド素材	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐 재료	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Abschirmmaterialien	2023-03-10	军工，W-95Ni-Fe
US20130045393A1	高比重钨合金医疗配重	High-Density Tungsten Alloy Medical Counterweight	高比重タングステン合金医療カウンターウェイト	ゴンビチュ タングステン 合金 医学 バランスの取れた重量	高密度 医療用ウルフラム合金 カウンターウェイト	2012 年 11 月 5 日	医療用、W-95Ni-Cu
US20170211168A1	高密度タングステン合金徹甲弾	高密度タングステン合金徹甲弾	高光発行小天光合徹甲弾	高密度 タングステン 合金 ギルバート	上級 装甲砲兵学校の訓練	2017 年 4 月 15 日	軍事産業（Ta を含む）
US20200299815A1	重タングステン合金コリメータ	高密度タングステン合金コリメータ	高比重タングステン合金 コリメータ	ゴンビチュ テスター フック 2	上級 コリマトーレンのヴォルフラムリーグ	2020 年 7 月 20 日	医療用、W-97Ni-Fe
US20150337426A1	高密度钨合金航空配重	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高密度タングステン合金航空カウンターウェイト	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2015-09-30	航空，W-98Ni-Fe
US20240068070A1	高比重钨合金军用弹芯	High-Density Tungsten Alloy Military Penetrator	高比重タングステン合金軍用弾芯	ゴンビチュ テスター フック 国王 グーテチョー	上級 軍事技術の強化 ペネトレーター	2024 年 1 月 25 日	軍事産業、W-96Ni-Fe
日本特許（JP）							
JP2010150585A	高比重タングステン合金粉末およびその製造方法	高密度タングステン合金粉末およびその製造方法	高比重タングステン合金粉末とびその製法	ゴンビチュ タングステン 合金 粉 そして それ 製造業 方法	高密度 Wolframlegierungspulver und Verfahren に その 生産	2010 年 6 月 25 日	軍事産業、W-Ni-Fe 粉末
JP2014210970A	高密度タングステ	高密度タングステン合金のリサイクル方法	高比重タングステン合金の	고비중 텅스텐 합금의 재활용	Recyclingverfahren für hochdichte	2013-04-12	环保工艺，航空/军工废料

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

	ン合金のリサイクル方法		リサイクル方法	방법	Wolframlegierung		
JP2015101790A	高密度钨合金屏蔽件	High-Density Tungsten Alloy Shielding Component	高密度タングステン合金遮蔽部品	高密度 タングステン 合金 シールド 部品	Hochdichtes Wolframlegierungs-Abschirmteil	2014-11-20	医疗、密度 18.0 g/cm³
JP2018070948A	高比重钨合金航空部件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Component	高比重 텅스텐 합금 항공 부품	高比重 タングステン 合金 航空部品	上級 ドイツ空軍戦闘機の訓練	2016 年 10 月 15 日	航空用重量、W-97Ni-Fe
JP2021031705A	高強度タングステン合金装甲貫通材	高強度タングステン合金貫通材	高強度タングステン合金装甲材	ゴグドール テスター フック グート ジョル	ホッホフェスト Wolframlegierung für Penetratormaterial	2020 年 8 月 25 日	Mo を含む軍事産業
JP2016183390A	高密度タングステン合金医療用シールド部品	高密度タングステン合金医療用シールド部品	高密度タングステン合金医療用シールド部品	ゴバドル テスター フック イル 차폐 ブーフ	上級 医学の知識 抽象的な	2016 年 4 月 10 日	医療用、W-90Ni-Fe
JP2020050912A	高比重タングステン合金製軍用カウンターウェイト	高密度タングステン合金製軍用カウンターウェイト	高比重タングステン合金ミリタリーカウンターウェイト	ゴンビチュ 阪神店 フック 国王 ギョーシェ	上級 軍事技術の強化 ゲゲンゲヴィッテ	2020 年 3 月 10 日	軍事産業、W-98Ni-Fe
JP2019123856A	高密度タングステン合金シールド	High-Density Tungsten Alloy Shielding Component	高密度タングステン合金遮蔽部品	고밀도 텅스텐 합금 차폐 부품	Hochdichtes Wolframlegierungs-Abschirmteil	2019-07-15	医疗，W-90Ni-Fe
JP2021085012A	高比重钨合金航空部件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Component	高比重タングステン合金航空部品	高比重 タングステン 合金 航空部品	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	2021-05-20	航空、耐温 2000° C
JP2022156789A	고밀도钨合金军用弹芯	High-Density Tungsten Alloy Military Penetrator	고밀도 텅스텐 합금군용 탄심	高密度 タングステン 合金 軍用貫通体	上級 軍事技術の強化 ペネトレーター	2022 年 10 月 10 日	軍事産業、W-96Ni-Fe
JP2012097365A	重タングステン合金コリメータ	高密度タングステン合金コリメータ	高比重タングステン合金 コリメータ	ゴンビチュ テスター フック 2	上級 コリマトーレンのヴォルフラムリーグ	2011 年 8 月 15 日	医療用、W-97Ni-Fe
JP2015140480A	高密度タングステン合金航	高密度タングステン合金航空宇宙用カウンターウェイト	高密度合金航空宇宙用合金	ゴバドル テスター フック 韓国語 ギョヘユル	上級 空軍飛行の訓練法	2014 年 3 月 20 日	航空、W-98Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

	空カウンターウェイト						
JP2018031052A	高比重タングステン合金軍用徹甲弾	高密度タングステン合金製軍用徹甲弾	高比重タングステン合金軍用徹甲弾	고비중 텅스텐 합금 군용 관통탄	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Panzerbrechgeschosse	2017-06-25	军工，含 Ta
JP2023109876A	高密度钨合金航空叶片	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Blade	高密度タングステン合金航空ブレード	高密度 タングステン 合金 航空 ブレード	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2023-02-10	航空、含 Nb、耐温 2000° C
JP2011057943A	高比重钨合金屏覆材	High-Density Tungsten Alloy Shielding Material	고비중 텅스텐 합금 차폐 재료	高比重 タングステン 合金 シールド 材料	上級 Wolframlegierung für Abschirmmaterial	2010 年 9 月 5 日	医療用、W-95Ni-Fe
JP2017128809A	高密度タングステン合金耐摩耗部品	高密度タングステン合金耐摩耗部品	高密度タングステン合金耐摩耗部品	ゴバドル テスター フック ナマミ ブーフ	上級 Verschleißfeste の研究 ボーテイユ	2017 年 1 月 30 日	軍事産業、W-90Ni-Fe/WC
JP2020176203A	重タングステン合金の積層造形法	高密度タングステン合金の積層造形法	高比重タングステン合金製法	ゴンヒチュ テスター フック ジェウ 2 バルデ	添加剤の栄養管理 ヴォルフラムレギエルング	2020 年 4 月 15 日	航空・軍事産業、SLM テクノロジー
JP2014091876A	高密度タングステン合金医療用ウェイト	高密度タングステン合金医療用カウンターウェイト	高密度ポリエチレン合金医療用合金	ゴバドル テスター フック イルギョーシェ	上級 医学の知識 ゲゲンゲヴィッテ	2013 年 12 月 10 日	医療用、W-95Ni-Cu
JP2021123456A	高密度タングステン合金軍用シールド部品	高密度タングステン合金軍用シールド部品	高比重タングステン合金軍用シールドパーツ	ゴンヒチュ テスター フック 国王 차폐 ブーフ	上級 軍事技術の強化 抽象的な	2021 年 11 月 20 日	軍事産業、W-96Ni-Fe
JP2016017234A	高密度タングステン合金航空用ウェイト	高密度タングステン合金航空宇宙用カウンターウェイト	高密度タングステン合金航空カウンターウェイト	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2015-07-05	航空，W-98Ni-Fe
KOREAN PATENT (KR)							
KR101389496B1	高密度钨基合金的制造方法	Method for Manufacturing High-Density Tungsten-Based Alloy	高密度タングステン基合金の製造方法	ゴバドル テスター ギルバ フック 2 バルデ	運転 ズール 制作 アイナー 高い評価 ヴォルフラムバッシェルテン法	2012 年 6 月 15 日	医療用シールド、密度 18.0 g/cm³

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

KR10201500345 67A	重タングステン合金	放射線遮蔽用高密度タングステン合金	放射線遮蔽用高比重タングステン合金	2 2 ゴンビチュテスター フック	上級 シュトラレンシュッツのヴォルフラムレギエルング	2014 年 9 月 18 日	医療用、W-95Ni-Fe
KR101967934B1	重タングステン合金の積層造形法	高密度タングステン合金の積層造形法	高比重タングステン合金の製造方法	고비중 텅스텐 합금의 적층 제조 방법	Additives Fertigungsverfahren für hochdichte Wolframlegierung	2017-03-09	航空/军工，SLM 技术
KR10202100123 45A	高比重钨合金的耐磨涂层	Wear-Resistant Coating for High-Density Tungsten Alloy	高比重タングステン合金の耐摩耗コーティング	고비중 텅스텐 합금의 내마모 코팅	Verschleißfeste Beschichtung für hochdichte Wolframlegierung	2020-11-20	军工，硬度 550 HV
KR10202300567 89A	高密度钨合金航空叶片	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Blade	高密度タングステン合金航空ブレード	高密度 タングステン 合金 航空会社 ブレード	高密度 ドイツ空軍シャウフェルンのヴォルフラムレギエルング	2023 年 1 月 15 日	航空用、耐熱温度 2000° C
KR10201900789 01A	高密度タングステン合金徹甲弾	高密度タングステン合金徹甲弾	高光発行小天光合徹甲弾	高密度 タングステン 合金 ギルバート	上級 装甲砲兵学校の訓練	2019 年 6 月 20 日	Mo を含む軍事産業
KR10201700912 34A	高比重タングステン合金軍用弾丸コア	高密度タングステン合金製軍用貫通弾	高比重タングステン合金軍用弾性コア	ゴンビチュ テスター フック 国王 グーテチョー	上級 軍事技術の強化 ペネトレーター	2017 年 8 月 10 日	軍事産業（Ta を含む）
KR10202200345 67A	高密度タングステン合金航空ブレード	高密度タングステン合金航空宇宙用ブレード	高密度タングステン合金航空宇宙合金	ゴバドル テスター フック 韓国語 2	上級 ドイツ空軍シャウフェルンのヴォルフラムレギエルング	2022 年 3 月 25 日	航空（Zr 含有）
KR10202300789 01A	高比重タングステン合金航空ブレード	高密度タングステン合金航空宇宙用ブレード	高比重タングステン合金航空ブレード	고비중 텅스텐 합금 항공 블레이드	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2023-07-20	航空，含 Nb
KR10202400123 45A	高密度钨合金屏蔽材料	High-Density Tungsten Alloy Shielding Material	高密度タングステン合金遮蔽材料	高密度 タングステン 合金 シールド 材料	Hochdichte Wolframlegierung für Abschirmmaterial	2024-02-15	医疗、W-95Ni-Fe
KR101234567B1	高比重钨合金准直器	High-Density Tungsten Alloy Collimator	고비중 텅스텐 합금 콜리메이터	高比重 タングステン 合金 コリメーター	Hochdichte Wolframlegierung für Kollimatoren	2011-05-10	医疗，W-97Ni-Fe
KR10201600456 78A	高密度钨合金航空	High-Density Tungsten Alloy Aerospace	高密度タングステン合金航	고밀도 텅스텐 합금 항공	Hochdichte Wolframlegierung für	2016-02-20	航空，W-98Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

	配重件	Counterweight	空カウンターウェイト	균형추	Luftfahrt-Gegengewichte		
KR101876543B1	高密度タングステン合金軍用シールド部品	高密度タングステン合金軍用シールド部品	高比重タングステン合金軍用シールドパーツ	고비중 텅스텐 합금 군용 방패 부품	上級 軍事技術の強化 抽象的な	2018 年 9 月 15 日	軍事産業、W-96Ni-Fe
KR102013002345 6A	高密度钨合金医疗配重	High-Density Tungsten Alloy Medical Counterweight	高密度タングステン合金医療カウンターウェイト	고밀도 텅스텐 합금 의료 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Gegengewichte	2013-04-25	医疗，W-95Ni-Cu
KR102020009876 5A	高比重钨合金耐磨部件	高密度タングステン合金耐摩耗部品	高比重タングステン合金耐摩耗部品	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	上級 Verschleißfeste の研究 ボーテイユ	2020 年 6 月 30 日	軍事産業、W-90Ni-Fe/WC
KR101543210B1	高密度タングステン合金軍用徹甲弾	高密度タングステン合金製軍用徹甲弾	高密度タングステン合金軍用徹甲弾	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통탄	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Panzerbrechgeschosse	2015-11-10	军工，含 Mo
KR102018003214 5A	高比重钨合金航空配重	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高比重タングステン合金航空カウンターウェイト	高比重 タングステン 合金 航空 バランスウェイト	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-03-05	航空、W-98Ni-Fe
KR102021007890 1A	高密度钨合金屏隐件	High-Density Tungsten Alloy Shielding Component	고밀도 텅스텐 합금 차폐 부품	高密度 タングステン 合金 シールド 部品	ホーホディヒテス Wolframlegierungs-Abschirmteil	2021 年 6 月 15 日	医療用、W-90Ni-Fe
KR102014005678 9A	高比重タングステン合金軍用弾丸コア	高密度タングステン合金製軍用貫通弾	高比重タングステン合金軍用弾性コア	ゴンヒチュ テスター フック 国王 グーテチョー	上級 軍事技術の強化 ペネトレーター	2014 年 8 月 20 日	軍事産業、W-96Ni-Fe
KR102022009123 4A	高密度タングステン合金航空宇宙用ブレード	高密度タングステン合金航空宇宙用ブレード	高密度タングステン合金航空宇宙合金	ゴバドル テスター フック 韓国語 2	上級 ドイツ空軍シャウフェルンのヴォルフラムレギエルング	2022 年 10 月 25 日	航空（Zr 含有）
ドイツ特許（DE）							
DE102015108163A1	高比重タングステン合金	High-Density Tungsten Alloy for Armor-Piercing Projectiles	徹甲弾用の高比重タングステン合金	관통체용 고비중 텅스텐 합금	Hochdichte Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	2015-05-22	军工，W-98Ni-Fe，密度 19.2 g/cm³
DE102019123980	用于复杂	Additive Manufacturing	複雑部品のた	ボジョ 2 テスタ	複合体に対する添加剤の	2019 年 9	航空・軍事産

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4A1	部件的钨合金增材制造方法	Process for Tungsten Alloys for Complex Components	めのタングステン合金付加製造方法	ー フック ジェウ 2 バルデ	管理 ボーテイユ	月 6 日	業、SLM プロセス
DE102007051416A1	非磁性高密度タングステン合金	非磁性高密度タングステン合金	非磁性高比重タングステン合金	비자성 고비중 텅스텐 합금	Nichtmagnetische hochdichte Wolframlegierung	2010-10-26	医疗配重，W-Ni-Cu
DE102013112135A1	高密度钨合金的微观结构优化	Microstructure Optimization of High-Density Tungsten Alloy	高密度タングステン合金の微細構造最適化	고밀도 텅스텐 합금의 미세 구조 최적화	Mikrostruktur-Optimierung von hochdichten ヴォルフラムレギエルンゲン	2013 年 11 月 4 日	軍事産業、靭性が 15%増加
DE102021108765A1	重タングステン合金医療用コリメータ	高密度タングステン合金医療用コリメータ	高比重タングステン合金医療用コーティング	ゴンビチュ テスター フック イル 2	上級 医学の知識 コリマトレン	2021 年 4 月 10 日	医療用、密度 18.5 g/cm³
DE102014117890A1	重タングステン合金航空部品	高密度タングステン合金航空宇宙部品	高比重タングステン合金航空部品	ゴンビチュ テスター フック 韓国語 ブーフ	上級 ドイツ空軍戦闘機の訓練	2014 年 12 月 5 日	航空用、耐熱性 1800° C
DE102016109876A1	高比重タングステン合金徹甲材	High-Density Tungsten Alloy Penetrator Material	高比重タングステン合金徹甲材料	고비중 텅스텐 합금 관통 재료	Hochdichte Wolframlegierung für Penetratormaterial	2016-06-01	军工，密度 19.0 g/cm³
DE102018123456A1	高密度钨合金航空配重	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高密度タングステン合金航空カウンターウェイト	ゴバドル テスター フック 韓国語 ギョーシェ	上級 空軍飛行の訓練法	2018 年 9 月 20 日	航空、W-97Ni-Fe
DE102020115678A1	高比重タングステン合金軍用徹甲弾	高密度タングステン合金製軍用徹甲弾	高比重タングステン合金軍用鎧	ゴンビチュ テスター フック 国王 グーテ	上級 軍事技術の強化 パンツァーブレヒゲショッセ	2020 年 6 月 10 日	Mo を含む軍事産業
DE102024109876A1	高密度タングステン合金装甲貫通材	高密度タングステン合金貫通材	高密度タングステン合金装甲素材	ゴバドル テスター フック グート ジョル	上級 Wolframlegierung für Penetratormaterial	2024 年 3 月 15 日	軍事産業、密度 19.2 g/cm³
DE102011098765A1	高密度タングステン合金医療用シールド部品	高密度タングステン合金医療用シールド部品	高比重タングステン合金医療用シールド部品	고비중 텅스텐 합금 의료 차폐 부품	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Abschirmteile	2011-07-15	医疗，W-95Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DE102017112345A1	高密度钨合金航空叶片	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Blade	高密度タングステン合金航空ブレード	高密度 タングステン 合金 航空 ブレード	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2017-05-20	航空、含 Zr、耐温 2000° C
DE102012123456A1	高比重钨合金准直器	High-Density Tungsten Alloy Collimator	고비중 텅스텐 합금 콜리메이터	高比重 タングステン 合金 コリメーター	上級 コリマトーレンのヴォルフラムリーグ	2012 年 9 月 10 日	医療用、W-97Ni-Fe
DE102019134567A1	高密度タングステン合金军用シールド材	高密度タングステン合金軍用シールド素材	ゴバドル テスター フック 国王 シュポ ジョル	上級 軍事技術の強化 抽象的な	2019 年 11 月 25 日	軍事産業、W-96Ni-Fe	
DE102022109876A1	高比重タングステン合金航空カウンターウェイト	高密度タングステン合金航空宇宙用カウンターウェイト	高比重タングステン合金航空素材	ゴンビチュ テスター フック 韓国語 ギョーシェ	上級 空軍飛行の訓練法	2022 年 8 月 15 日	航空、W-98Ni-Fe
DE102010112345A1	高密度タングステン合金耐摩耗部品	High-Density Tungsten Alloy Wear-Resistant Component	高密度タングステン合金耐摩耗部品	고밀도 텅스텐 합금 내마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	2010-12-20	军工，W-90Ni-Fe/WC
DE102015123456A1	高比重钨合金军用弹芯	High-Density Tungsten Alloy Military Penetrator	高比重タングステン合金軍用弾芯	고비중 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Penetratoren	2015-03-05	军工，W-96Ni-Fe
DE102018109876A1	高密度钨合金航空配重	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	高密度タングステン合金航空カウンターウェイト	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-07-10	航空，W-98Ni-Fe
DE102021123456A1	高比重钨合金医疗配重	High-Density Tungsten Alloy Medical Counterweight	高比重タングステン合金医療カウンターウェイト	ゴンビチュ テスター フック イル ギョーシェ	上級 医学の知識 ゲゲン ゲヴィッテ	2021 年 10 月 30 日	医療用、W-95Ni-Cu
DE102023109876A1	高密度タングステン合金军用徹甲弾	高密度タングステン合金製軍用徹甲弾	高密度タングステン合金軍用鎧	高密度 タングステン 合金 軍隊 ギルバート	高密度 軍事技術の強化 徹甲弾	2023 年 4 月 15 日	軍事産業（モザンビークを含む）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

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 ³), 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
Tel: +86 592 5129696
Official website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved