

タングステン合金板とは

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD は、インダストリアルインターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造の促進に尽力しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、1997 年に www.chinatungsten.com（中国初のトップクラスの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。ハンス博士は、1990 年代からタングステンおよびモリブデン製品の電子商取引および国際貿易、超硬合金および高密度合金の設計・製造において 30 年以上の経験を持ち、国内外でタングステンおよびモリブデン製品の専門家として知られています。CTIA GROUP のチームは、業界に専門的で高品質な情報を提供するという原則を堅持し、生産の実践と市場の顧客ニーズに基づいた技術研究論文、記事、業界レポートを継続的に執筆しており、業界で広く評価されています。これらの成果は、CTIA GROUP の技術革新、製品のプロモーション、業界交流に強力なサポートを提供し、同社が世界的なタングステンおよびモリブデン製品の製造と情報サービスのリーダーとなることを推進しています。



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

目次

第1章 タングステン合金板の基礎知識

- 1.1 タングステン合金板の概念
 - 1.1.1 タングステン合金板の定義
 - 1.1.2 関連資料との差別化
- 1.2 タングステン合金板の開発と研究の意義
 - 1.2.1 タングステン資源利用に基づく開発状況
 - 1.2.2 化学工学の観点からタングステン合金板を研究することの価値
 - 1.2.3 タングステン合金板の応用分野における現状

第2章 タングステン合金板の分類体系

- 2.1 タングステン合金板の材料組成による分類
 - 2.1.1 ニッケル-鉄系タングステン合金板
 - 2.1.2 ニッケル銅系タングステン合金板
 - 2.1.3 タングステン銅合金板
 - 2.1.4 タングステン-銀合金板
 - 2.1.5 その他のバインダー相タングステン合金板
- 2.2 タングステン合金板のコア特性による分類
 - 2.2.1 高密度タングステン合金板
 - 2.2.2 高硬度タングステン合金板
 - 2.2.3 耐腐食性および耐摩耗性タングステン合金板
- 2.3 タングステン合金板のサイズ規格による分類
 - 2.3.1 超薄タングステン合金板（厚さ<0.1mm）
 - 2.3.2 従来厚さのタングステン合金板（0.1~10mm）
 - 2.3.3 厚肉タングステン合金板（厚さ>10mm）
 - 2.3.4 特殊形状サイズのタングステン合金板（カスタマイズ）
- 2.4 用途シナリオによるタングステン合金板の分類
 - 2.4.1 国防・軍事産業向けタングステン合金板
 - 2.4.2 工業製造用タングステン合金板
 - 2.4.3 原子力および医療用途向けタングステン合金板
 - 2.4.4 電子情報用タングステン合金板
 - 2.4.5 その他の特殊タングステン合金板

第3章 タングステン合金板の合金原理と組成システム

- 3.1 タングステン合金板の合金化の化学的原理
 - 3.1.1 タングステンと他の金属元素の相図分析
 - 3.1.2 固溶強化と分散強化の化学的メカニズム
 - 3.1.3 合金相の形成条件と安定性
- 3.2 タングステン合金板における構成元素の役割と割合
 - 3.2.1 タングステン合金板におけるニッケル-鉄系の相乗効果メカニズム

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.2.2 タングステン合金板におけるニッケル-銅系の相乗効果
- 3.2.3 タングステン合金板における微量元素のドーピング効果
- 3.3 タングステン合金板の組成設計における化学規則
- 3.3.1 タングステン合金板の性能指向組成最適化ロジック
- 3.3.2 タングステン合金板の組成均一性のための化学的制御方法
- 3.3.3 タングステン合金板の特性に対する不純物元素の影響
- 3.3.4 タングステン合金板中の不純物元素の除去方法

第4章 タングステン合金板の構造と特性の関係

- 4.1 タングステン合金板の微細構造
- 4.1.1 粒構造と粒界化学組成
- 4.1.2 合金相の分布と化学状態
- 4.1.3 欠陥構造の化学的原因
- 4.2 タングステン合金板の特性とメカニズム
- 4.2.1 タングステン合金板における高密度化の化学的原子充填原理
- 4.2.2 タングステン合金板の熱伝導性と電気伝導性の化学的キャリア機構
- 4.2.3 タングステン合金板の熱安定性を支える化学構造
- 4.3 タングステン合金板の機械的性質と化学的性質の相関関係
- 4.3.1 タングステン合金板の硬度と化学結合強度の関係
- 4.3.2 タングステン合金板の耐摩耗性メカニズム
- 4.3.3 タングステン合金板の耐食性における表面化学バリアの役割
- 4.4 タングステン合金板におけるプロセス・構造・特性相関の解析
- 4.4.1 タングステン合金板の微細構造に対する焼結プロセスの制御的役割
- 4.4.2 タングステン合金板の機械的性質に対する圧延プロセスの影響メカニズム
- 4.4.3 タングステン合金板の化学的性質を考慮した表面処理の最適化パス
- 4.5 特殊環境下におけるタングステン合金板の構造と特性
- 4.5.1 高温環境下におけるタングステン合金板の構造安定性の変化
- 4.5.2 放射線環境下におけるタングステン合金板の化学構造許容度
- 4.5.3 極圧下におけるタングステン合金板の特性変化の法則
- 4.6 CTIA GROUP LTD タングステン合金シートの MSDS

第5章 タングステン合金板の性能試験および特性評価方法

- 5.1 タングステン合金板の化学組成分析技術
- 5.1.1 タングステン合金板の原子吸光分光法と発光分光法による分析
- 5.1.2 タングステン合金板の組成のX線蛍光分光法による定量分析法
- 5.1.3 タングステン合金板中の微量元素の化学滴定分析
- 5.2 タングステン合金板の微細組織評価方法
- 5.2.1 走査型電子顕微鏡によるタングステン合金板の形態と組成マッピング
- 5.2.2 タングステン合金板のX線回折相と結晶構造解析
- 5.2.3 タングステン合金板の微細欠陥の透過型電子顕微鏡観察
- 5.3 タングステン合金板の性能指標試験基準

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.3.1 タングステン合金板の密度と緻密性の試験方法
- 5.3.2 タングステン合金板の硬度試験方法
- 5.3.3 タングステン合金板の耐食性試験方法
- 5.3.4 タングステン合金板の耐摩耗性試験方法
- 5.3.5 タングステン合金板の強度試験方法

第6章 タングステン合金板の製造工程

- 6.1 タングステン合金板の製造工程と分類
 - 6.1.1 タングステン合金板の主な製造方法
 - 6.1.2 高密度タングステン合金板と非高密度板のプロセスの違い
 - 6.1.3 標準的な厚さの範囲とそれに応じたプロセスの選択（0.05 mm～50 mm）
- 6.2 原料粉末の調製
 - 6.2.1 高純度タングステン粉末の製造と品質要件
 - 6.2.2 合金元素粉末（Ni、Fe、Cu、Co、Mo など）の選択と前処理
 - 6.2.3 粉末粒度分布制御とフィッシャー粒度試験
 - 6.2.4 粉末の混合と合金化方法
- 6.3 粉末成形プロセス
 - 6.3.1 冷間等方圧プレス
 - 6.3.2 金型プレスと圧力パラメータの最適化
 - 6.3.3 薄板ブランクへの射出成形の応用
 - 6.3.4 グリーン強度向上と脱脂プロセス
- 6.4 焼結プロセス
 - 6.4.1 水素雰囲気垂直焼結技術
 - 6.4.2 液相焼結温度範囲と保持時間制御
 - 6.4.3 真空焼結と焼結・熱間等方圧プレス統合プロセス
 - 6.4.4 焼結変形制御とサポートツール設計
 - 6.4.5 大型板状ブランク焼結における温度場均一性保証
- 6.5 熱間加工と熱処理
 - 6.5.1 ブルーミング鍛造と熱間圧延プロセス
 - 6.5.2 組織の均一性を向上させる多方向鍛造
 - 6.5.3 中間焼鈍と応力除去熱処理
 - 6.5.4 高温溶体化処理と急速冷却
- 6.6 薄板製造のための冷間圧延と温間圧延
 - 6.6.1 冷間圧延における総変形分布とパス圧下スケジュール
 - 6.6.2 高タングステン合金における温間圧延の応用
 - 6.6.3 圧延方向制御とテクスチャ最適化
 - 6.6.4 エッジクラック防止とトリミング工程
- 6.7 表面処理と仕上げ
 - 6.7.1 酸化膜を除去するための化学洗浄と酸洗い
 - 6.7.2 アルカリ洗浄によるバインダー相表面の濃縮の除去
 - 6.7.3 機械研削と研磨

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.7.4 真空/水素保護ホットレベリングプロセス
- 6.7.5 精密せん断、レーザー切断、ウォータージェット切断

第7章 タングステン合金板の用途

- 7.1 国防・軍事分野におけるタングステン合金板の応用
 - 7.1.1 徹甲弾用タングステン合金板
 - 7.1.2 カウンターウェイト用タングステン合金板
 - 7.1.3 保護用タングステン合金板
- 7.2 ハイエンド製造分野におけるタングステン合金板の応用
 - 7.2.1 金型インサート用タングステン合金板
 - 7.2.2 切削工具用タングステン合金板
 - 7.2.3 機械式カウンターウェイト用タングステン合金板
- 7.3 原子力・医療分野におけるタングステン合金板の応用
 - 7.3.1 核遮蔽用タングステン合金板
 - 7.3.2 医療用遮蔽材としてのタングステン合金板
 - 7.3.3 原子力環境用タングステン合金板
- 7.4 エレクトロニクスおよび新エネルギー分野におけるタングステン合金板の応用
 - 7.4.1 放熱基板用タングステン合金板
 - 7.4.2 電子パッケージ用タングステン合金板
 - 7.4.3 電極用タングステン合金板
- 7.5 カードにおけるタングステン合金板の用途
 - 7.5.1 タングステン合金銀行カードおよび決済カード
 - 7.5.2 タングステン合金ペット識別タグ
 - 7.5.3 タングステン合金フェスティバルと記念カスタムカード
 - 7.5.4 タングステン合金産業および資産管理タグ
 - 7.5.5 タングステン合金製衣料品および高級品ハングタグ
 - 7.5.6 タングステン合金高級名刺と社交エチケットカード

第8章 タングステン合金板の一般的な問題と解決策

- 8.1 タングステン合金板の材料基礎問題と解決策
 - 8.1.1 構成と構造に関する問題
 - 8.1.1.1 タングステン合金の不均一組成の問題と均質化方法
 - 8.1.1.2 結晶構造欠陥の種類と修復戦略
 - 8.1.2 タングステン合金板における物理的特性の偏差問題
 - 8.1.2.1 異常な密度と硬度の原因と調整方法
 - 8.1.2.2 熱伝導率と熱膨張率の不一致の問題と最適化ソリューション
- 8.2 タングステン合金板の製造における問題と解決策
 - 8.2.1 粉末冶金プロセスの問題
 - 8.2.1.1 粉末調製欠陥の特定と管理対策
 - 8.2.1.2 焼結プロセス障害の診断とプロセス改善

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.2 圧延と成形の問題

8.2.2.1 熱間圧延割れの原因と防止方法

8.2.2.2 冷間加工変形問題の解析と変形制御

8.2.3 品質検査と管理の問題

8.2.3.1 非破壊検査技術の適用上の難しさと代替ソリューション

8.2.3.2 寸法公差の偏差と精度向上への対応

8.3 タングステン合金板の応用と性能に関する問題と解決策

8.3.1 航空宇宙分野におけるタングステン合金板の応用上の問題

8.3.1.1 高温疲労破壊のメカニズムと強化処理

8.3.1.2 振動・衝撃荷重と耐衝撃設計の問題

8.3.2 放射線遮蔽におけるタングステン合金板の応用上の問題

8.3.2.1 シールド効率の減衰と効率回復の原因

8.3.2.2 生体適合性リスクと安全性の改善の評価

8.3.3 電子機器および医療機器におけるタングステン合金板の応用上の問題

8.3.3.1 異常な導電性と磁性および材料改質のトラブルシューティング

8.3.3.2 腐食と酸化の問題に対する保護とコーティング技術

付録:

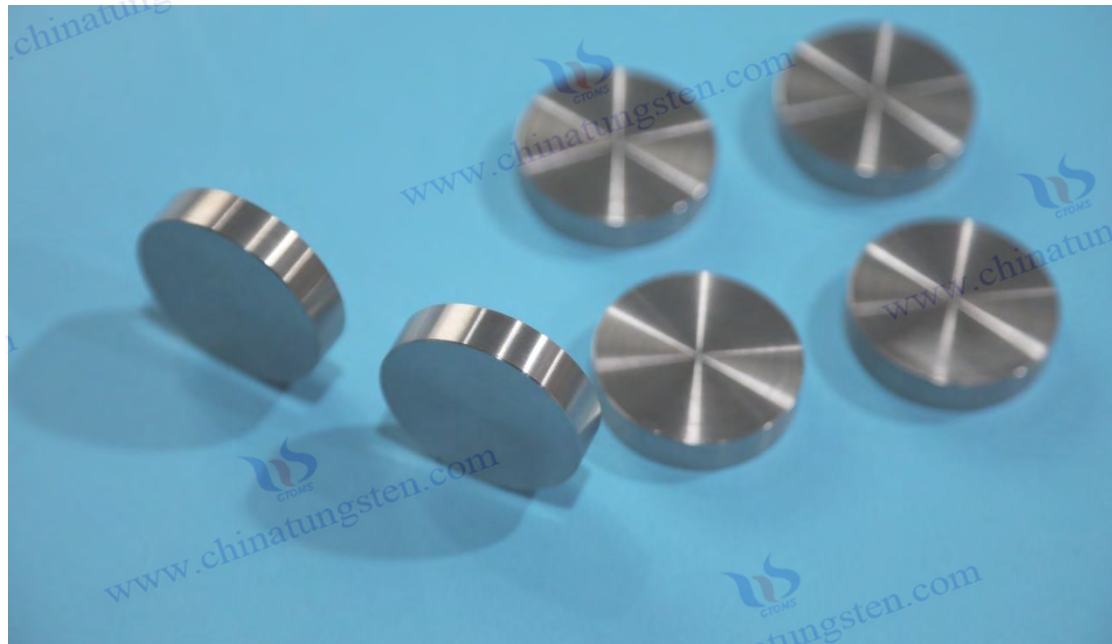
付録 A タングステン合金板の中国規格

付録 B タングステン合金板の国際規格

付録 C 欧州、米国、日本、韓国およびその他の国におけるタングステン合金板の規格

付録 D タングステン合金板の用語表

参考文献。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

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

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

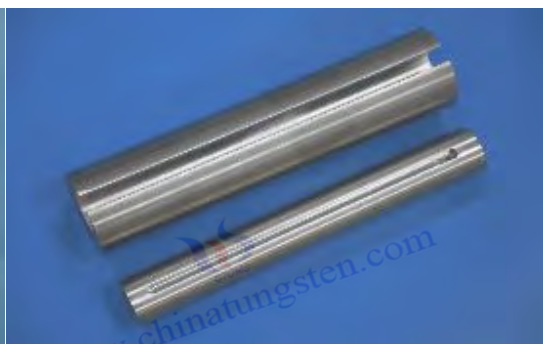
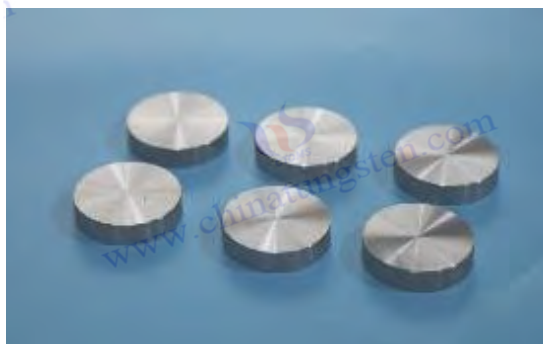
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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
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

第1章 タングステン合金板の基礎知識

1.1 タングステン合金板の概念

タングステン合金板は、タングステンを主成分とし、合金化して薄い板状に加工された材料です。この材料は、タングステンの高密度・高融点特性に加え、他の元素の添加による加工性および機械的性質の向上を併せ持つため、産業用途において重要な役割を果たしています。タングステン合金板の登場により、これまで加工が困難であった金属であるタングステンが、板状の材料として様々な工学用途に利用できるようになりました。

タングステン合金板は、一般的にタングステン含有量を高くすることを基本とし、その他の元素は全体的な性能を最適化するために選ばれます。一般的な合金系には、タングステンとニッケル、鉄、銅の組み合わせがあり、これらは焼結中にバインダー相を形成し、タングステン粒子の結合を強化します。板厚は、具体的な製造工程や用途要件に応じて、数ミリメートル単位あるいはマイクロメートル単位まで精密に制御されることがよくあります。製造工程は粉末の混合から始まり、プレス、焼結、熱間加工、冷間加工を経て、最終的に滑らかな表面と整然としたエッジを持つ板が完成します。

性能面では、タングステン合金板は良好な密度分布を示すため、集中荷重を必要とする用途に最適です。また、ある程度の延性も備えているため、曲げ加工、打ち抜き加工、切断加工が容易です。熱処理工程は非常に重要です。温度と冷却速度を制御することで、材料の結晶粒径と相分布を調整し、硬度と靱性のバランスに影響を与えることができます。

タングステン合金板は、材料工学の包括的な応用を重視しています。単にタングステンを薄く圧延するだけでなく、合金化によって脆さを機械加工性へと変換します。この材料は、寸法安定性と環境適応性の要件を満たすため、電子機器、医療機器、精密機器の分野で採用が進んでいます。レーザー切断や精密圧延などの製造技術の進歩により、タングステン合金板の仕様範囲は拡大し続け、多様な設計ニーズに対応しています。

1.1.1 タングステン合金板の定義

タングステン合金板は、タングステンを母材とし、少量のニッケル、鉄、銅などの金属元素を添加した薄い板状の合金材料で、粉末冶金法によって製造され、圧延されて成形されます。通常、タングステンが主成分であり、高密度と高硬度という基本的な特性を有します。また、合金元素を添加することで、材料の可塑性と加工適応性が大幅に向上します。

定義上、タングステン合金板と他のタングステン製品の主な違いは、板状の形状と合金組成にあります。製造工程では、タングステン粉末を他の金属粉末と均一に混合し、高温で液相焼結することで緻密な微細組織を形成します。その後、複数回の圧延と焼鈍処理によって所望の厚さまで徐々に薄くし、内部応力を解放します。この定義は、粉末から最終製品に至るまでの材料の完全な変換連鎖を反映しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実用的な定義においては、合金系列の分類も考慮する必要があります。例えば、タングステン-ニッケル-鉄系列は機械的特性のバランスを重視し、タングステン-ニッケル-銅系列は導電性を重視します。これらの系列の定義はすべて、タングステンの高融点に基づいており、高温下でも材料の形状安定性を維持します。

タングステン合金板は、その機能的な位置づけにも広がりを見せています。高密度と優れた成形性の両方が求められる用途に適した高性能エンジニアリング材料です。この定義は固定的なものではなく、モリブデンやレニウムの添加といった新たな合金元素の探索により、新たな用途に適応するために常に拡充され続けています。

1.1.2 定義および関連資料との区別

タングステン合金シートは、材料を選択する際に混乱を避けるために、組成、処理方法、性能特性、およびアプリケーションの位置付けなど、複数の側面からの分析が必要です。

主な考慮事項は、純タングステン板との比較です。純タングステン板には合金元素がほとんど含まれておらず、高純度タングステン粉末の圧延によって製造されます。しかし、タングステンは室温で脆いため、高温で加工する必要があります、完成品に割れが生じやすくなります。一方、タングステン合金板は、合金化によってバインダー相が導入されているため、より低温での圧延が可能になり、優れた表面品質と幅広い成形加工への適合性が得られます。

タングステン銅複合板についても区別が必要です。この材料は主にタングステン粒子と銅相の機械的混合物であり、銅含有量が高く、合金焼結ではなく熔融浸透法で製造されます。一方、タングステン合金板は固溶体構造を形成し、銅または鉄とニッケルの混和性がより均一であるため、熱膨張係数と熱伝導率に違いが生じます。モリブデン合金板もよく比較されます。モリブデンはタングステンよりも密度と融点が低く、真空環境下での性能は優れていますが、高温強度はタングステン合金板ほど優れていません。モリブデン板は電子真空デバイスに適しており、タングステン合金板はより高い慣性質量を必要とする用途に適しています。

超硬合金板と比較すると、タングステン合金板には炭化物相が含まれていません。超硬合金板は主に炭化タングステン粒子とコバルトバインダーで構成されており、非常に高い硬度を示しますが、靱性は限られており、主に切削工具に使用されます。一方、タングステン合金板は密度と延性のバランスを重視しているため、バランス調整部品やシールド部品に適しています。これらの定義は、タングステン合金板の位置づけを明確に定義しています。すなわち、密度、加工性、安定性のバランスを取り、民生産業における特定の性能ギャップを埋める板です。この区別は、エンジニアが特定のニーズに合わせて材料を選定するのに役立ちます。

1.2 タングステン合金板の開発と研究の意義

タングステン合金板は、単一性能の追求から総合性能の最適化へと、大きく進化を遂げてきました。その発展は、タングステン資源の特性と加工技術の進歩、そして高密度・高安定性材料

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に対する産業界の継続的な需要によって推進されています。初期のタングステン材料は、主にフィラメントやスバタリングターゲットなどの単純な形状でした。粉末冶金プロセスの改良と高密度材料の加工性に対する需要の高まりに伴い、タングステン合金板は徐々に独立した研究・生産方向へと発展しました。20 世紀中期から後半にかけて、液相焼結技術の成熟により、タングステン合金の高密度化を実現する信頼性の高い手段が提供され、その後、マルチパス圧延と制御された焼鈍プロセスの導入により、バルクから薄板への形態の転換が真に実現されました。このプロセスは、タングステンの応用範囲を拡大しただけでなく、その後の機能化と軽量設計の基礎を築きました。現在、タングステン合金板の研究は、従来のタングステン-ニッケル-鉄系やタングステン-ニッケル-銅系から、希土類ドーピング、ナノ結晶強化、傾斜構造設計などの複数の最先端分野にまで拡大しており、材料科学と工学ニーズの深い統合の傾向を反映しています。

1.2.1 タングステン資源利用に基づく開発状況

タングstenは埋蔵量が比較的限られているものの、広く分布する戦略金属であり、その効率的な利用は材料開発において常に重要な側面でした。初期のタングsten資源は主に超硬合金の製造に使用され、残りの低品位鉱石やリサイクル材は更なる加工が困難でした。タングsten合金板の登場により、中低品位タングsten資源の新たな転換経路が開かれ、これまで無駄になる可能性があったタングsten粉末を高付加価値分野に投入することが可能になりました。

1950 年代頃、研究者たちはフェロニッケルまたは銅ニッケルを添加することでタングstenの脆化遷移温度を大幅に下げることができることを発見しました。この発見は、主に民生用のバランス部品にバルクで使用される第一世代のタングsten重合金の開発に直接つながりました。その後、圧延設備の精度と焼鈍工程の進歩により、厚さは当初のセンチメートルレベルからミリメートルレベルへと徐々に減少し、今日では数十マイクロメートルに達し、資源利用の大規模から集約的への移行を実現しました。21 世紀には、熱間等方圧加圧法や放電プラズマ焼結法などの高度な焼結技術の産業応用により、ピレット密度と微細組織の均一性がさらに向上し、その後の圧延パスが削減され、エネルギー消費とタングstenの損失率が低下しました。

近年、タングsten合金板の製造においては、全工程における資源循環への取り組みが進められています。例えば、タングsten合金加工時に発生するスクラップ材、圧延された酸化皮膜、廃部品などは、水素還元や亜鉛溶解によって高純度タングsten粉末に戻し、再びバッチ工程に投入することで、比較的完全な閉ループ利用システムを形成しています。同時に、タングsten資源の品位低下に対応するため、一部の研究機関では、性能を維持しながらタングsten含有量を低減したり、モリブデンやタンタルで部分的に代替したりすることで、省資源型の合金システムを構築しようと試みています。タングsten合金板の開発軌跡は、タングsten資源が「高純度・高消費」から「高効率・循環」利用モデルへと進化してきた縮図と言えるでしょう。このプロセスは、技術の進歩と持続可能な開発の要請の両方を反映しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2.2 化学工学の観点から見たタングステン合金板

化学工学の観点から見ると、タングステン合金板の研究開発は、多相反応、相界面制御、熱および物質移動の最適化といった中核課題に対する工学的ソリューションを具体化しています。粉末冶金における液相焼結は、化学工学における典型的な単位操作であり、タングステン粒子の再配列、バインダー相の濡れと広がり、溶解・再沈殿機構、ガス排出速度論などが含まれます。研究者たちは、焼結温度プロファイル、水素露点、ピレット充填方法などのパラメータを調整することで、多孔度、バインダー相の分布、タングステン粒子の球状化を正確に制御することに成功しました。これは本質的に、化学反応工学と材料科学の学際的な応用です。

圧延と焼鈍工程では、応力場と拡散場が連成します。化学工学で一般的に用いられる有限要素シミュレーションと数値流体力学（CFD）手法は、圧延中の温度分布と応力分布、および焼鈍中の元素拡散挙動の解析に広く適用されています。これにより、パス圧下率と中間焼鈍条件を最適化し、エッジ剥離や割れなどの欠陥を低減できます。さらに、無電解めっきや真空熱処理などの表面処理も、板材の耐酸化性と接合強度に直接影響を与える典型的な化学工学単位操作です。

さらに、腐食性媒体中におけるタングステン合金板の挙動に関する研究は、化学機器における材料選定のための重要な参考データとなります。電気化学試験と浸漬実験を通じて、研究者らは酸、アルカリ、塩分環境下における様々な合金系の腐食速度モデルを確立し、耐用年数の延長とメンテナンスコストの削減を理論的に裏付けています。化学工学の観点から見ると、タングステン合金板は最終製品であるだけでなく、精密かつ制御可能な一連の化学的・物理的プロセスを高度に統合した成果物でもあります。その研究価値は、同様の高融点多相材料の工学的スケールアップのための再現可能な経験を提供することにあります。

1.2.3 タングステン合金板の応用分野における現状

タングステン合金板は、高密度と良好な加工性のバランスが求められることから、現代の産業システムにおいて不可欠な地位を確立しています。医療機器分野では、優れた放射線減衰能と生体適合性を備えたタングステン合金板が、ハイエンド放射線治療装置のコリメータやマルチリーフグレーティングなどのコアコンポーネントの最適な材料となっています。その厚さ精度と表面品質は、治療位置の精度に影響を与えます。

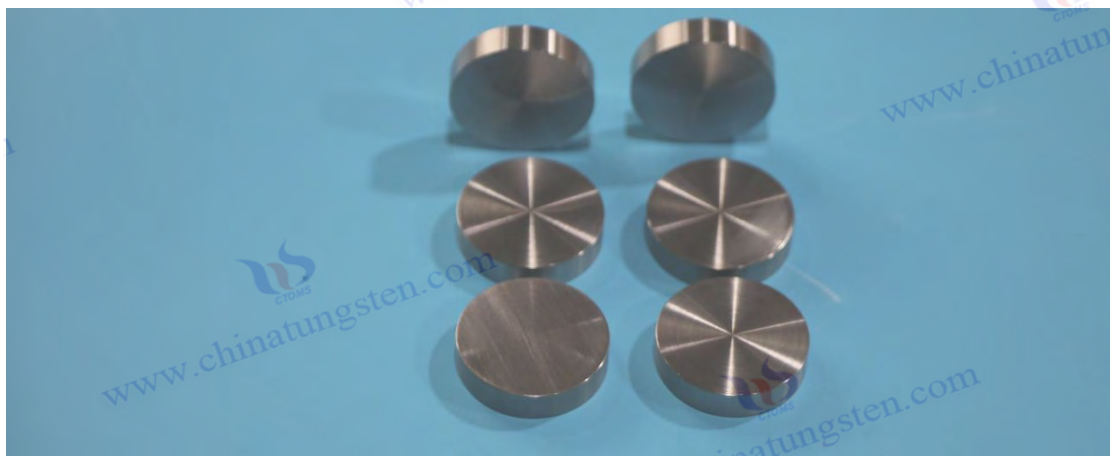
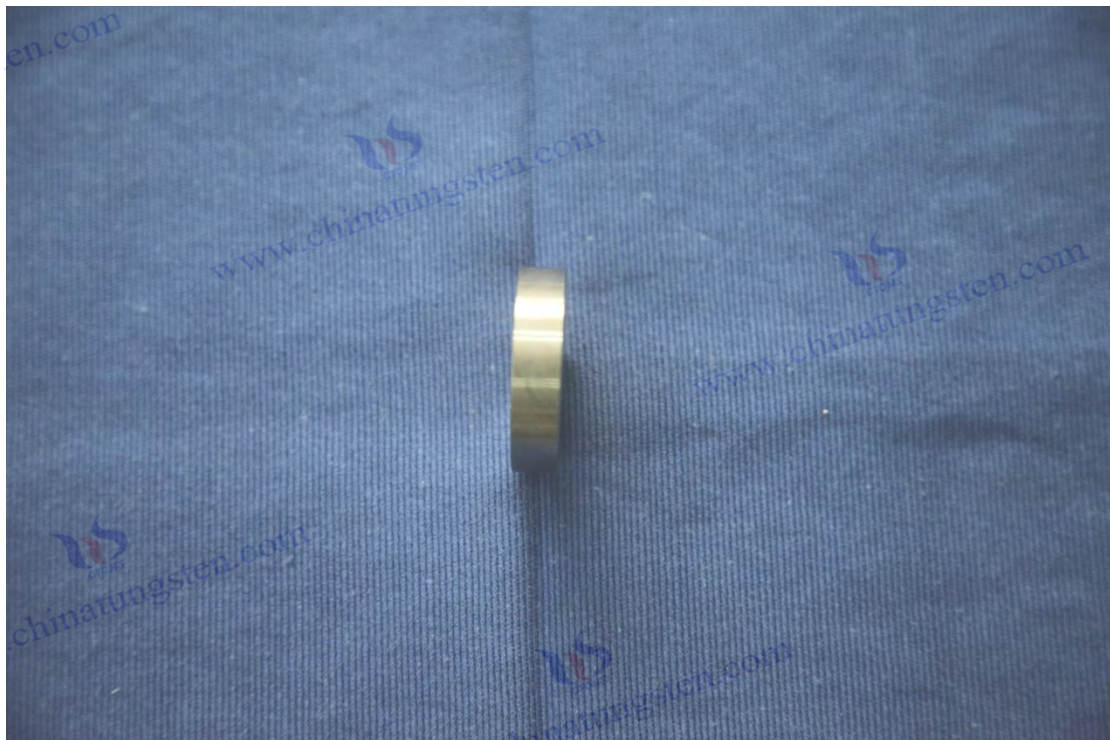
精密機器や電子機器産業では、タングステン合金板は、その高い密度と適度な導電性という慣性特性を活かし、振動制御部品や電磁シールド部品として使用されています。分析機器、高精度天秤、慣性航法装置などの分野では、タングステン合金板は小型化と高い安定性の両立に貢献しています。

さらに、タングステン合金板は、真空コーティングや熱管理において徐々に重要な位置を占めつつあります。スパッタリングターゲットのバックプレートやヒートシンク材料として、高い

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱伝導性と低熱膨張性の要件を両立させています。近年、新エネルギーや次世代情報技術の急速な発展に伴い、高性能熱伝導材料やシールド材料の需要は拡大を続けています。独自の特性を持つタングステン合金板は、従来の用途から新興分野へと拡大しています。

注目すべきは、タングステン合金板が単独で使用するのではなく、他の高性能材料と相補的に使用される点です。場合によっては、チタン合金や炭素繊維複合材と組み合わせることで、軽量化と機能性の両立を実現しています。このように、単独で重要な機能を発揮しながらも、他の材料と協調的に作用する能力こそが、現代の工業材料分野におけるタングステン合金板の確固たる地位を確固たるものにしていくのです。加工精度や表面処理技術のさらなる向上により、その応用分野は依然として大きく拡大する余地があります。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

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

第2章 タングステン合金板の分類システム

2.1 材料組成によるタングステン合金板

タングステン合金板を材料組成で分類するのが、最も一般的で直感的な方法です。この分類は、バインダー相の化学組成の違いを反映しており、機械的特性、熱物理的特性、電磁気的特性、および加工適応性の系統的な違いを決定します。現在、ほとんどすべての工業的に生産されるタングステン合金板は、ニッケルを主なバインダー元素として使用しています。これは、ニッケルがタングステンに対する濡れ性が良く、活性化焼結が適度で、タングステンとの熱膨張の不一致が小さいためです。異なる第2成分に基づいて、ニッケル-鉄とニッケル-銅の2つの主要なシリーズが形成されています。さらに、少量のニッケル-モリブデン、ニッケル-レニウム、またはその他の実験的なシステムがありますが、これらはまだ大規模なシート生産には至っていません。2つの主流システムのタングステン含有量は通常90%~97%の間で、バインダー相の総量は3%~10%の間で制御されます。比率と熱機械処理パラメータを微調整することで、最終的な特性を広範囲に制御できます。

2.1.1 ニッケル-鉄-タングステン合金板

ニッケル-鉄タングステン合金板は、工業化された最初のタイプのタングステン合金板であり、今日でも市場を支配しています。その典型的な組成は、W 90%~97%、Ni 2.5%~7%、Fe 0.5%~3%で、Ni/Feの質量比は通常7:3~8:2に維持されます。この比率設計は、20世紀半ばの広範な実験的スクリーニングに基づいており、この範囲であれば液相焼結段階で適切な量の液相を形成でき、タングステン粒子の十分な再配列を促進しながら、バインダー相の過度の凝集や脆性相の出現を回避できることが示されました。

ニッケル-鉄系の特徴は、バインダー相が鉄-ニッケル固溶体であり、顕著な強磁性を示すため、材料全体として強い磁気応答が得られることです。この特性は、磁気シールドや磁気駆動を必要とする用途において、この合金に自然な利点をもたらします。同時に、鉄の添加はバインダー相の積層欠陥エネルギーを大幅に低減し、焼結後期における溶解-再沈殿プロセスを促進し、タングステン粒子をより球形化し、タングステン相とバインダー相間の界面結合強度を高めます。マクロ的には、これは引張強度と破壊靱性の向上として現れます。

板材加工において、ニッケル-鉄系は優れた熱可塑性と冷間加工性を示します。高温焼結後、ピレットは1100℃~1300℃で複数回の熱間圧延が可能で、その後中間焼鈍と冷間圧延を施すことで最終的に0.05mm未満まで薄板化できます。圧延中のエッジ割れの発生が少なく、高い歩留まりを実現します。熱処理条件は最終的な特性に大きく影響します。低温・長時間焼鈍は微細なタングステン粒子と繊維構造を維持し、より高い強度を実現します。一方、高温・短時間焼鈍はタングステン粒子の粗大化とバインダー相の均質化を促進し、延性を向上させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面处理面では、ニッケル鉄タングステン合金板はニッケル、金、銀などの無電解めっきが容易で、真空環境下で拡散アルミニウムめっきを施すことで保護層を形成し、耐酸化性と耐腐食性をさらに向上させることができます。現在、このシリーズの板は、高級分析天秤の分銅、慣性計のバランスブロック、光学機器の振動減衰板など、高密度と一定レベルの機械的信頼性の両方が求められる民生用精密部品に広く使用されています。圧延設備と熱処理技術の進歩により、ニッケル鉄タングステン合金板の厚さ均一性と平坦性はマイクロメートルレベルに達し、高級機器の微細な品質偏差に対する厳しい要求を満たしています。

2.1.2 ニッケル銅タングステン合金板

ニッケル銅タングステン合金板は、ニッケル鉄合金から開発された非磁性タングステン合金板です。典型的な組成は、W 90～96%、Ni 3～8%、Cu 1～5%で、Ni/Cu の質量比は通常 3:1～7:3 です。銅の導入により、材料のマクロ的な強磁性が完全に排除されるため、強磁場環境や高い電磁両立性要件が求められる環境に最適な選択肢となります。同時に、銅の高い熱伝導性と電気伝導性により、このシリーズの板は優れた熱拡散性と電気接触性能を備えています。

ミクロな視点から見ると、ニッケル-銅系のバインダー相も面心立方固溶体である。しかし、銅とニッケルの無限の混和性により、バインダー相は組成の均一性がより優れている。焼結中の液相出現温度はニッケル-鉄系よりもわずかに低く、焼結温度の低下とタングステン粒子の異常成長の抑制に有利である。タングステン粒子の球状化度は一般にニッケル-鉄系よりも高く、界面の清浄度がより高い。そのため、同じタングステン含有量では伸びがわずかに高くなることが多いが、引張強度はわずかに低下し、強度と塑性の間のトレードオフを反映している。

加工特性の観点から、ニッケル銅合金は酸化に対してより敏感です。高温圧延は保護雰囲気または真空下で行う必要があります。そうしないと、表面に緩い酸化層が形成されやすく、その後の冷間圧延に悪影響を及ぼします。冷間加工硬化率はニッケル鉄合金よりもわずかに低いいため、高圧下圧延に適しており、極薄箔（厚さ最大 20 μm）の製造に適しています。焼鈍処理の許容範囲が広く、過熱の影響を受けにくいいため、連続生産ラインに適しています。

表面处理の面では、ニッケル銅合金は本質的に優れた耐食性と電気接触特性を備えているため、多くの場合、直接研磨または軽い化学洗浄のみで要件を満たすことができ、複雑なめっき工程が不要です。用途の面では、このシリーズのシートは主に医療用放射線治療機器のコリメータブレード、電磁シールドカバー、真空スパッタリングターゲットバックプレート、ヒートシンクなど、非磁性、高熱伝導性、高導電性が求められる用途に使用されています。近年、5G 通信や高出力電子機器の放熱需要の高まりに伴い、ニッケル銅タングステン合金シートの薄板化および複合化の用途が急速に拡大し、大きな活力を示しています。

2.1.3 タングステン銅合金板

タングステン銅合金板は、分類システムにおいて特別な位置を占めています。厳密に言えば、従来の意味での固溶タングステン合金ではなく、擬似合金または金属基複合材料に属します。典型的な組成範囲は、W が 50～90%、Cu が 10～50%で、両相はほぼ混和しません。銅は、タン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

グステン骨格内に連続または半連続のネットワーク状に分布しています。合金化バインダー相が存在しないため、タングステン銅板は、微細構造、性能特性、および加工方法において、前述のニッケル基タングステン合金板とは根本的に異なります。

タングステン銅シートの製造には、主に熔融浸透法と直接活性化焼結法が採用されています。

熔融浸透法では、まず多孔質のタングステン骨格を加圧・焼結し、次に銅の融点よりわずかに高い温度で熔融銅を細孔に浸透させます。一方、活性化焼結法では、少量のニッケルまたはコバルトをタングステン粉末に予め混合し、1300℃～1400℃で一段階で直接緻密化します。どちらのプロセスでも、熱伝導率と電気伝導率が非常に高く（通常 180～220 W / (m · K) ）、電気伝導率は 40%～55% IACS に達し、熱膨張係数は半導体材料とよく一致します。

シート加工において、タングステン銅は銅相の存在により、優れた熱間および冷間加工性を示します。タングステン含有量が 70%～80%の品種は、室温で直接大きな圧延率で圧延することができ、表面仕上げが高く、中間焼鈍がほとんど必要なく、仕上げ厚さ 0.1mm 未満を容易に達成できます。タングステン含有量が 85%を超える場合は、温間圧延と保護雰囲気が必要です。タングステン銅シートの最も顕著な利点は、非磁性、優れた熱伝導性、およびアーク浸食に対する強い耐性です。そのため、高電圧電気接点、真空スイッチ電極、抵抗溶接電極、電子パッケージングヒートシンク、ロケットエンジンノズルスロートライナーなど、高温、アーク、熱衝撃への同時耐性が求められる民生および産業分野で広く認知されています。近年、高出力 IGBT モジュールや第三世代半導体基板の放熱需要が爆発的に増加しており、超薄型高タングステン銅板（厚さ<0.3mm、タングステン含有量≥85%）が研究・生産のホットスポットとなっています。

2.1.4 タングステン-銀合金板

タングステン銀合金板も擬似合金系に属し、銀は柔らかく導電性の高い相であり、タングステンが硬い骨格を形成し、両者は互いに溶解しません。その組成は通常、タングステン 50～80%と銀 20～50%です。製造プロセスはタングステン銅合金と非常に似ており、主に高温溶解と浸透法を用いますが、粉末混合後に高圧凝固を行う方法も採用できます。銀の融点は銅よりも低い（961℃）ため、溶解と浸透温度もそれに応じて低くなり、プロセスウィンドウが広くなり、設備要件も緩和されます。

タングステン銀板は、電気伝導率と熱伝導率の両方でタングステン銅板を上回っています。電気伝導率は 60%～80% IACS に容易に達し、熱伝導率は 250～380 W / (m · K) の範囲にあり、タングステンの高い硬度と耐摩耗性を維持しています。さらに重要なのは、電気アーク下で生成される酸化銀は蒸気圧が高く、熱による損傷を容易に運び去るため、アーク浸食と溶接に対する優れた耐性が材料に与えられます。加工性能の面では、銀含有量が 30%以上のタングステン銀板は、ほぼ完全に冷たい状態で 0.05 mm 以下に圧延することができ、エッジの割れが最小限に抑えられ、銀白色の表面が優れた外観を示します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

現在、タングステン銀板は主に低電圧・中電圧電気接点、精密リレー接点、摺動電気接点、および特定の特殊導波管の内壁コーティング用基板として使用されています。民生用高級遮断器、車載リレー、航空リレーなどの分野では、長寿命、低接触抵抗、低物質移動特性といった特性から、従来の銀カドミウム系材料や銀ニッケル系材料に徐々に取って代わっています。

2.1.5 その他のバインダー相タングステン合金板

前述の主流システムに加え、近年では、新規または複合バインダー相を用いたタングステン合金板もいくつか登場しています。これらは主に研究室段階から工業化への移行段階にあり、特定の機能要件を満たすために少量生産されています。

タングステン - ニッケル - コバルト系: ニッケル - 鉄またはニッケル - 銅ベースに 1% ~ 3% のコバルトを追加すると、バインダー相の強度と高温での軟化に対する耐性が大幅に向上し、より高い動作温度を必要とするヒートシンクや構造部品に適したものになります。タングステン-ニッケル-モリブデン系: タングステンの一部をモリブデン (5%~20%) で置換することで、高い密度を維持しながら全体の熱膨張係数を低減し、セラミックスやガラスとの熱整合を向上させます。電子機器のパッケージシェルや真空シール用トランジションシートなどによく使用されます。

タングステン-希土類系: La_2O_3 、 Y_2O_3 、 CeO_2 などの希土類酸化物を微量添加することで、分散強化機構により再結晶温度と高温強度が向上するとともに、タングステン結晶粒が微細化され、薄板圧延時の耐割れ性も向上します。

TiC、ZrCなどの炭化物粒子をニッケル基バインダー相に添加することで第三相強化層を形成し、硬度と耐摩耗性を大幅に向上させます。主に耐摩耗ライニングや精密金型インサートに使用されます。FeCoNiCrMnやFeCoNiCrAlなどの高エントロピー合金粉末をバインダー相として用いることで、高密度を維持しながら、より高い強度と耐酸化性を実現する新たな研究方向。現在は、まだ実験室レベルの箔開発段階にある。

2.2 コアパフォーマンスのタングステン合金シート

タングステン合金板をその主要特性に基づいて分類することは、エンジニアリング用途における材料の主要な機能に対する直接的な需要を反映しています。現在、タングステン合金板は、その主要特性に基づいて、高密度、高硬度、耐腐食性 / 耐摩耗性の3つのカテゴリに大別できます。これらの3つのカテゴリには重複する部分もありますが、主要な機能はそれぞれ異なります。

2.2.1 高密度タングステン合金板

高密度タングステン合金板は、最も生産量が多く、広く使用されているタングステン合金板です。その設計目標は、十分な機械加工性と機械的信頼性を維持しながら、理論密度を最大化す

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ることです。典型的な密度は $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ですが、中には 19.0 g/cm^3 近くに達するものもあり、ほとんどのエンジニアリング金属の密度をはるかに上回ります。

これらの板材は、ほぼ全てニッケル-鉄合金またはニッケル-銅合金で構成され、タングステン含有量は 93%~97%で、バインダー相の総量は 3%~7%に制御されています。理論密度にさらに近づけるため、高純度の微細タングステン粉末を使用し、液相焼結保持時間を延長し、熱間静水圧プレス後の二次プレスを施すことで、気孔率を 0.1%未満に低減しています。圧延工程は、主に大圧下率の熱間圧延とそれに続く多パス冷間圧延で構成され、さらに厳格な中間真空焼鈍を施すことで、厚さ方向の密度均一性偏差が 0.5%を超えないようにしています。

高密度タングステン合金板は、質量の集中と体積の低減が求められる用途において大きな利点を発揮します。医療分野では、放射線治療装置の多葉コリメータに 0.15~0.5mm 厚の 93W-4.9Ni-2.1Fe 板が一般的に使用されています。高密度であることから、放射線遮蔽効率の向上と体積の削減が実現し、治療精度とベッド回転率の向上に直接寄与します。精密機器分野では、この材料は分析天秤、ジャイロスコープ、慣性航法システムのカウンターウェイトやバランスプレートにも広く使用されています。厚さは通常 0.05~2mm で、密度許容差は $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 以内です。

近年、電気自動車やウェアラブルデバイスにおけるローカルカウンターウェイトの需要増加に伴い、高密度タングステン合金板は極薄 ($< 0.1 \text{ mm}$) かつ高表面品質 ($Ra \leq 0.1 \text{ }\mu\text{m}$) へと開発が進められています。一部のハイエンド製品では、ポリマーやアルミニウム合金との複合積層が実現しており、民生用エレクトロニクス分野における応用範囲がさらに拡大しています。

2.2.2 高硬度タングステン合金板

高硬度タングステン合金板は、表面硬度および全体硬度の大幅な向上を優先しており、通常、ピッカース硬度は 380~550 HV30 ですが、強化グレードによっては 600 HV30 を超えるものもあります。このタイプの板は、組成最適化、変形強化、第二相分散という 3 つの手法によって硬度の向上を実現しています。

一般的な技術的アプローチとしては、タングステン含有量を 95%~98% に増やして軟質バインダー相の割合を減らす、コバルトの固溶強化および析出強化効果を利用するために高コバルト-ニッケル-鉄バインダー相 (Co 含有量 3%~8%) を使用する、総加工率 70% を超える冷間圧延で強い繊維状組織と高密度転位を形成する、分散強化のために TiC、ZrC、WC などの炭化物粒子 (体積率 2%~8%) を導入する、バインダー相から微細な金属間化合物を析出させるために低温長期時効を行うなどがあります。

高硬度タングステン合金板は、一定の延性を維持しながら、耐傷性、耐圧痕性、耐疲労性を大幅に向上させます。精密金型分野では、携帯電話フレームのプレス加工用ステンレス鋼製金型インサートとして使用すると、硬度 450HV 以上のタングステン合金板は、従来の高速度鋼に比べて金型寿命を 3~5 倍に延ばすことができます。光学ガラスのホットプレス金型では、表面

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

硬度 520HV のタングステン合金板とイオン注入窒化タングステン合金板を組み合わせることで、高温ガラスの付着や摩耗に効果的に耐えることができます。

さらに、高級時計製造においては、高硬度タングステン合金板がローターやマイクロギアに加工され、高密度化によって慣性力を高めると同時に、高硬度によって長期使用時の耐摩耗性を確保しています。近年では、一部のメーカーが真空熱処理と極低温処理を組み合わせた複合プロセスを用いてタングステン合金板の表面硬度に勾配を設け、表面の耐摩耗性と芯部の靱性のバランスをさらに向上させています。

2.2.3 耐腐食性および耐摩耗性タングステン合金板

耐食性および耐摩耗性タングステン合金板は、主に化学、海洋、食品加工など、腐食性媒体や研磨性環境に接触する作業環境向けに開発されています。その主な目的は、酸、アルカリ、塩分、および研磨性侵食条件下での材料の耐用年数を向上させることです。

主な実施経路としては、高ニッケル銅またはニッケルクロムバインダー相システムを選択し、ニッケル含有量を 8%~12%、クロム含有量を 2%~5% に増やして自己不動態化機能を形成する、表面にニッケルリンまたはニッケルホウ素を化学メッキするか、CrN、TiAlN、DLCなどの厚さ 10~50 μm の硬質コーティングを真空メッキする、微量の希土類元素またはホウ素とリンを添加してバインダー相でより緻密な保護酸化膜の形成を促進する、高エネルギーボールミル + スパークプラズマ焼結プロセスを使用してナノ結晶またはアモルファスナノ結晶複合構造を得る、などがあります。

化学ポンプのインペラーガード、食品用攪拌機のインサート、海水淡水化装置のバルブプレートなどの用途において、高ニッケル表面コーティングと基材を備えたタングステン合金板は、優れた耐孔食性と耐隙間腐食性を示します。スラリーパイプラインのライニングや鉍物処理設備の選別スクリーンなどの高摩耗環境において、TiC 分散強化型タングステン合金板の重量減少は、高クロム鋳鉄の 1/5~1/8 に過ぎません。

耐食性・耐摩耗性に優れたタングステン合金板の中には、傾斜構造設計を採用しているものもあることを特筆すべきでしょう。表面層は高クロム・ニッケル結合相と硬質相で満たされ、中心部は従来のニッケル・鉄比を維持することで、全体的な靱性と加工性を犠牲にすることなく、耐食性と耐摩耗性を両立させています。この構造設計は、複雑な使用環境におけるタングステン合金板の最新戦略を表しています。

2.3 タングステン合金板のサイズと仕様による分類

タングステン合金板をサイズで分類することは、メーカーと下流ユーザー間の最も直接的なコミュニケーション手段です。厚さは、加工の難易度、コスト、そして適用範囲を決定する最

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

も重要なパラメータです。幅と長さも影響しますが、通常は厚さが決定されれば、せん断、レーザー切断、ウォータージェット切断などによって柔軟に調整できます。現在、業界では比較的統一された厚さ範囲の分類が確立されており、これは加工能力の限界を反映し、様々な典型的な適用シナリオに対応しています。

2.3.1 極薄タングステン合金板（厚さ<0.1mm）

極薄タングステン合金板とは、通常、仕上がり厚さが0.005mmから0.099mmの箔を指し、最薄部では0.008mm未満に達します。これらの板の製造は、タングステン合金圧延技術の最高レベルを要し、原料の純度、ピレットの均一性、圧延精度、そしてクリーンな環境において極めて高い基準が求められます。

極薄箔の製造には、通常、タングステン含有量が90%～95%のニッケル-鉄またはニッケル-銅系が使用され、冷間加工性を確保するためにバインダー相の割合がわずかに高くなります。ピレットは、まず熱間静水圧プレスまたは真空熱間圧延によって厚さ2～5mmの板に予備成形され、その後、複数回の冷間圧延パスが行われます。各パスの圧下率は5%～15%に厳密に制御され、総加工歩留まりは95%を超えることがよくあります。中間焼鈍は、酸化物介在物によって引き起こされる脆性破壊を回避するために、高真空または高純度水素雰囲気下で実行する必要があります。完成した箔の表面仕上げは、Ra 0.05 μm未満に達することができ、厚さ公差は±0.003mm以内に制御されます。

極薄タングステン合金板は、主に医療用放射線治療装置の多葉コリメータの最薄ブレード、フレキシブル放射線遮蔽カーテン、精密機器の振動減衰フィルム、高級腕時計の自動回転子、一部のフレキシブル電子基板などに使用されています。近年、ウェアラブル医療機器や折りたたみ式スクリーンスマートフォンにおける極薄・高密度材料の需要増加に伴い、厚さ0.03～0.07mmのニッケル銅系極薄箔をポリマーと組み合わせることで、遮蔽性と柔軟性を兼ね備えた新しい機能性フィルムが開発され始めています。

2.3.2 従来厚さ（0.1～10 mm）のタングステン合金板

0.1mmから10mmの厚さ範囲は現在、最大かつ最も広く使用されている範囲であり、タングステン合金板の総生産量の90%以上を占めています。この厚さ範囲の加工技術は非常に成熟しており、コストも比較的制御可能で、寸法精度と性能の一貫性はほとんどの産業の要求を満たすことができます。

この厚さ範囲は、熱間圧延から冷間圧延仕上げまでのプロセスチェーン全体をカバーしています。1100～1300℃で複数回の熱間圧延を行った後、ピレットの厚さは3～8mmにまで減少し、その後、冷間圧延と複数回の中間焼鈍工程を経て、最終的に必要な仕様に達します。厚さ公差は通常±0.01～±0.05mmの範囲で管理され、必要に応じて表面研磨、サンディング、または化学エッチング処理を施すことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

標準厚さのタングステン合金板は、ほぼすべての主要用途をカバーしています。0.1～0.5mm はコリメータブレードやシールドプレート、0.5～2mm はカウンターウェイト、振動ダンパー、ヒートシンク、2～6mm は金型インサートやターゲットバックプレート、6～10mm は主に構造用支持体やプレキャストブランクとして使用されます。この厚さの多様性は表面処理にも反映されており、ニッケル、金、銀、DLC めっき、または直接陽極酸化処理による着色装飾層の形成が可能で、工業用途から消費者製品の美観まで、様々なニーズに対応しています。

2.3.3 厚肉タングステン合金板（厚さ>10mm）

厚さ 10mm を超えるタングステン合金板は、一般的に厚板または厚肉板と呼ばれ、最大で 50mm を超えるものもあります。これらの製品はタングステン合金板の総生産量に占める割合は小さいものの、板単価が高く加工が難しいことから、多くのメーカーが重要な生産能力として保有しています。

厚肉鋼板は主に熱間圧延によって製造され、冷間圧延も併用されます。焼結ピレットの直径は通常 300～500mm です。熱間圧延温度は 1350～1450℃ に制御され、1 パスあたり 20～30% の圧下率で厚さが 12～15mm に達するまで圧延を続け、その後、温間圧延または冷間圧延に移され、仕上げ加工が行われます。エッジ割れを防止するため、クラッド圧延または横方向拘束圧延が一般的に採用されています。完成品の厚さ公差は通常 $\pm 0.1 \sim \pm 0.3\text{mm}$ で、表面は脱炭層と酸化スケールを除去するためにフライス加工または研削加工が必要です。

厚肉タングステン合金板は、主に大型医療用直線加速器のコリメータベース、産業用 CT 検出器の遮蔽体、大型慣性計のバランスディスク、石油掘削用カウンターウェイト、高エネルギー物理学実験の熱吸収体などに使用されています。サイズが大きく重量も重いため、輸送や加工には特殊な工具が必要となることがよくあります。そのため、下流のユーザーは、後工程の切削を最小限に抑えるため、ニアネットシェイプ設計を採用することがよくあります。

2.3.4 カスタムサイズのタングステン合金シート

特注サイズのタングステン合金板とは、標準的な長方形や厚さを超える、様々な不規則な形状、超幅広、超長尺、あるいは複合構造板を指します。これらの製品は、お客様の図面に基づいて完全に製造されており、タングステン合金板の生産が「標準化供給」から「ソリューション提供」へと移行する傾向を反映しています。

一般的な特殊タイプには、深絞り段差付き成形シート、貫通穴または皿穴付き穿孔シート、幅 600mm を超える超広幅シート、長さ 2m を超える超長尺ストリップ、表面に微細構造アレイを備えた機能性シート、銅、アルミニウム、モリブデン、セラミックなどを直接複合した積層シートなどがあります。製造には、特殊な金型、レーザー切断、CNC フライス加工、真空ろう付け、熱間静水圧プレスカプセル化などの特別なプロセスが必要になることがよくあります。

例えば、一部の高級医療機器では、幅 500mm、厚さ 0.2mm、エッジ精度 0.05mm のダブルテール溝を持つタングステン合金板が求められます。また、一部の航空宇宙用光学機器では、鏡面研磨

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

面と複雑な曲面を持つタングステン合金制振板が求められます。これらの特殊製品は単価が高いものの、お客様の二次加工工程を削減できるため、全体的なコストは実際には低くなります。

2.4 用途別タングステン合金板

タングステン合金板を用途別に分類することで、様々な業界におけるこの材料の実際の価値をより明確に把握できます。現在、タングステン合金板の主な用途分野は比較的安定したパターンを形成しており、医療、工業製造、電子情報、その他の特殊な用途をカバーしています。

2.4.1 国防および軍事用タングステン合金板

タングステン合金板は、その高密度、高強度、優れた靱性から、主に防衛・軍事産業で使用されています。これらの用途には、質量集中、構造安定性、または特定の機能を必要とする部品が含まれます。タングステン合金板は、タングステン含有量が高いため慣性特性に優れ、パイonder相が機械加工性を最適化し、精密成形や表面処理を可能にします。

カウンターウェイトのバランス調整において、タングステン合金板は質量分布を調整することでシステムの安定動作を助け、均一な厚さは精度を保証します。防護構造用途では、タングステン合金板は放射線減衰特性を活かして薄層で高効率な遮蔽を提供し、複合設計は全体の強度を高めます。タングステン合金板の熱安定性は高温環境に耐え、表面コーティングは耐腐食性を向上させます。

アプリケーションでは信頼性が重視され、タングステン-ニッケル-鉄系が一般的で、長期使用における化学的安定性を確保しています。防衛・軍事産業におけるタングステン合金板の役割は、部品の小型化を促進し、高密度化によって設置面積を削減することに成功しています。

2.4.2 工業製造用タングステン合金板

工業製造において、タングステン合金板は高密度と優れた耐摩耗性という相乗効果を発揮し、様々なバランス調整部品、振動減衰部品、耐摩耗ライナー、金型部品などに広く使用されています。精密機器においては、カウンターウェイト、分析用バランスウェイト、慣性航法部品などにニッケル鉄系高密度板が使用され、質量分布の精密制御による機器の安定性向上に貢献しています。高速回転機械の制振板では、タングステン合金板の高い弾性率と適度な減衰特性を活かし、共振を効果的に抑制しています。

金型業界では、タングステン合金板は、スタンピングダイインサート、ホットプレスガラスモールドコア、伸線ダイインレットブッシングなどに加工されています。高い硬度と耐高温軟化性により、金型の耐用年数が大幅に延長されます。石油・鉱山設備の耐摩耗ライナー、バルブ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プレート、ノズルにも、研磨侵食と腐食性媒体の二重の影響に対処するため、炭化物強化タングステン合金板がよく使用されています。

2.4.3 原子力および医療用途向けタングステン合金板

医療および原子力産業では、タングステン合金板は主に放射線遮蔽およびコリメーション部品に使用されています。放射線治療装置のマルチリーフコリメータでは、一般的に厚さ 0.1～2mm のニッケル鉄またはニッケル銅ベースのシートが使用され、積層により放射線ビームを柔軟に成形できます。従来の鉛と比較して、タングステン合金板は無毒で強度が高く、鋭いエッジを維持しやすいため、現在主流の選択肢となっています。核医学画像診断装置の検出器コリメータや PET/CT 散乱防止グリッドでも、画像解像度を向上させるためにタングステン合金板が広く使用されています。大型鋳物の X 線探傷やパイプ溶接部のガンマ線検査などの工業用非破壊検査では、タングステン合金板製の遮蔽ボックスやコリメーションウィンドウも必要です。原子力産業では、限られたスペース内で効率的な遮蔽を実現するために、放射線遮蔽容器のライニングや廃棄物貯蔵タンクの局所的な補強に、より厚いタングステン合金板が使用されることがあります。陽子線治療装置や重粒子線治療装置の普及に伴い、極薄で均一性に優れたタングステン合金板の需要はますます高まっています。

2.4.4 電子情報用途向けタングステン合金板

電子情報産業におけるタングステン合金板の需要は、主に熱管理、電磁シールド、スパッタリングターゲット材の 3 つの分野に集中しています。高出力チップ、5G 基地局用パワーアンプ、レーザーなどのデバイスでは、タングステン銅またはニッケル銅ベースのタングステン合金板がヒートシンクや拡張層としてよく使用され、半導体材料に近い熱膨張係数と高い熱伝導率を活かして接合部温度を効果的に下げています。タングステン合金板は、真空スパッタリングターゲットのバックプレートとしても頻繁に使用され、純タングステンまたはタングステンレニウムターゲットとろう付けまたは爆発接合によって接合されます。これにより、接合強度を確保しながら全体的なコストを抑えることができます。

電磁両立性（EMC）分野では、非磁性タングステン合金板は、携帯電話、医療用電子機器、航空電子機器など、磁場に敏感な機器のシールドカバー、吸収パッチ、接地スプリングなどに使用されています。一部の高級オーディオ機器では、スピーカーの振動板ウェイトリングに高密度タングステン合金板を使用し、低周波応答を向上させています。近年、第三代半導体（窒化ガリウム、炭化ケイ素）デバイスの急速な発展に伴い、より薄く、より熱伝導性の高いタングステン銅板の需要が急速に高まり、関連プロセスの継続的な最適化が推進されています。

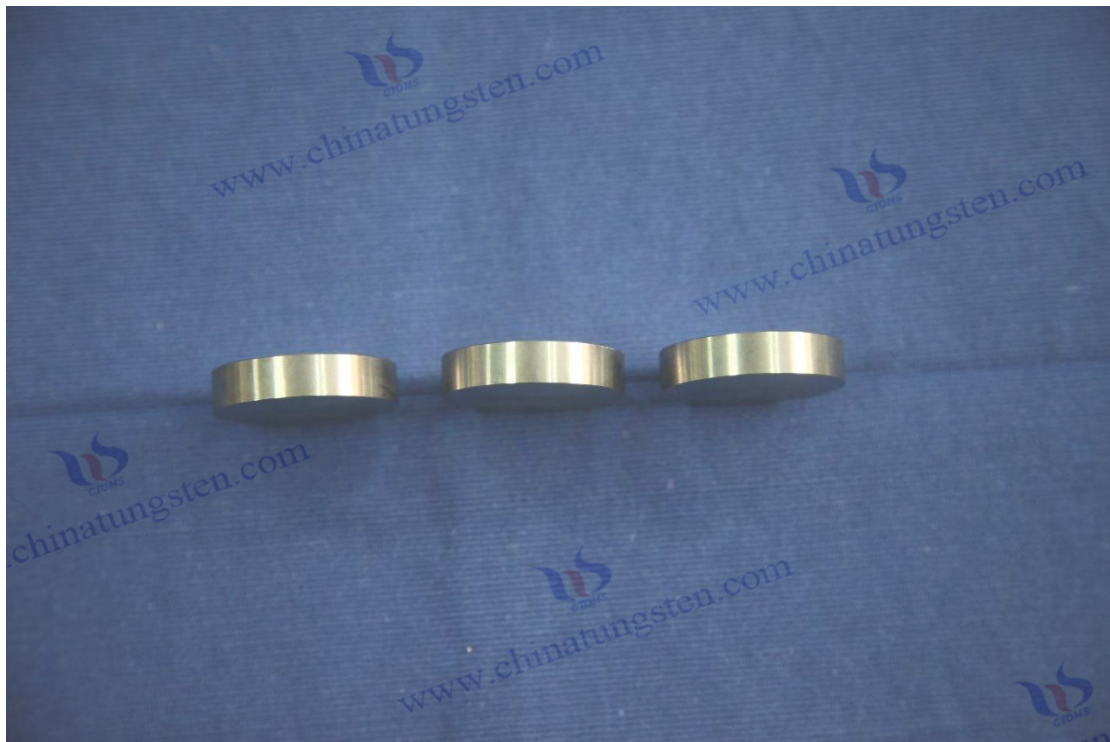
2.4.5 その他の特殊タングステン合金板

上記の主な用途以外にも、タングステン合金板は特定の用途において独自の役割を果たしています。高級時計業界では、研磨されたタングステン合金板を用いて自動巻きローターを製造し、巻き上げ効率を高め、装着時の重厚感を高めています。スポーツ用品業界では、ゴルフクラブのヘッドにタングステン合金板を象嵌することで、重心調整やショットの安定性向上を

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実現しています。宝飾・装飾芸術分野では、金メッキや黒メッキを施したタングステン合金板が時計ケース、指輪のインナーバンド、装飾留め具などに使用されており、傷がつきにくい表面と独特の金属光沢で人気が高まっています。

科学研究分野において、タングステン合金板は、高密度ターゲットシート、サンプルホルダー、真空チャンバーの局所ライニングなどに加工され、シンクロトン放射光源や粒子加速器実験に利用されています。美術品の修復や文化財の保存においても、精密ウェイトや構造補強材としてタングステン合金板が使用されることがあります。さらに、ウェアラブルデバイスの振動モーターウェイト、ドローンのジンバルバランスプレート、レーシングカーのホイールウェイトなど、新たな学際分野でも、小型化と高性能化を両立させるため、タングステン合金板が徐々に採用されつつあります。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

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

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

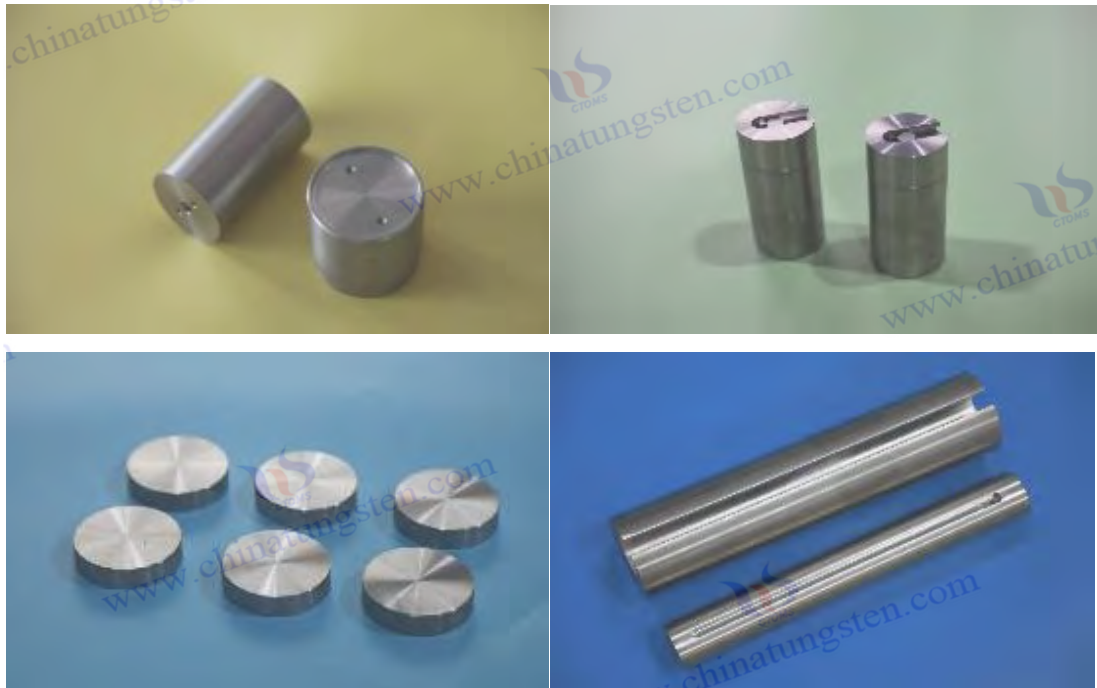
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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
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

第3章 タングステン合金板の合金原理と組成システム

3.1 タングステン合金板の合金化の化学的原理

タングステン合金板は、本質的にタングステンに少量の他の金属または化合物を導入することで、タングステン本来の高密度と高融点を維持しながら、常温での可塑性、高温強度、耐酸化性、および加工性を大幅に向上させます。タングステン自体は体心立方構造と大きな原子半径を有しています。純粋なタングstenは室温で可動滑り系をほとんど持たず、脆性遷移温度は 300~400℃以上と高く、常温圧延中に割れが発生しやすくなります。合金化によって導入された面心立方または六方最密充填バインダー相は、タングステン粒子に連続的な塑性変形経路を提供します。同時に、焼結と熱間加工の過程では、溶解-再沈殿、界面濡れ、相間応力の調整といった一連の物理化学的プロセスが進行し、最終的にタングステン粒子がバインダー相に包み込まれた典型的な二相複合構造を形成します。

3.1.1 タングステンと他の金属元素の相図分析

タングstenは液体状態ではほとんどの遷移金属と無限に混和しますが、固体状態では溶解度が極めて低いです。これがタングsten合金板の合金化における基本的な状態図の特徴です。W-Ni 二元状態図によると、タングsten中のニッケルの固溶度は 1500℃ では 2 at% を超えず、室温まで冷却するとほぼゼロになりますが、ニッケル中のタングstenの溶解度はわずかに高くなりますが、それでも限られています。W-Fe、W-Cu、W-Co、W-Mo などのシステムも同様の特性を示します。高温では広い液相領域が存在し、液相焼結が促進されます。低温では、ほぼ完全に混和しない共晶または周共晶システムが形成されます。この「高温混和性と低温分離性」の特性により、タングsten合金は、液相焼結段階でオストワルド成熟機構によりタングsten粒子の球状化と緻密化を実現し、固体冷却後にはタングsten粒子とバインダー相が明確に分離された二相構造を形成します。

W-Cu 系および W-Ag 系はさらに極端で、液体状態でも部分的にしか混和せず、固体状態ではまったく化合物を形成しないため、典型的な疑似合金になります。一方、W-Mo および W-Re では、モリブデンおよびレニウムがタングstenと連続固溶体を形成できます。この特性を利用して、モリブデンまたはレニウムでタングstenの一部を置換することにより、熱膨張係数を調整したり、再結晶温度を上げたりすることができます。実際の製造では、W-Ni-Fe 三元状態図が最も一般的に使用されています。液相線出現温度付近では、液相 + タングsten固相の広い 2 相領域があります。ニッケルと鉄の比率が 7:3 ~ 8:2 の場合、液相の量は適度で、ピレットが崩壊することなくタングsten粒子を濡らすのに十分です。状態図分析は、組成設計の直接的な基礎を提供します。

3.1.2 固溶強化と分散強化の化学的メカニズム

タングsten合金板の強度はバインダー相に由来します。ニッケル、鉄、銅、コバルトなどの元素は、面心立方γ相に無限に混和し、置換型固溶体を形成します。より大きな原子半径を持つタングsten、モリブデン、レニウムがニッケルベースのバインダー相に溶解すると、格子

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

歪みが生じ、転位運動が阻害されるため、バインダー相自体の降伏強度が向上します。コバルトの添加は、積層欠陥エネルギーを低減し、交差滑りと双晶形成を促進し、さらに加工硬化能力を高めるため、特に効果的です。鉄と銅は、バインダー相の積層欠陥エネルギーをある程度低減し、変形の協調を容易にし、間接的に全体的な塑性を向上させます。

分散強化は、タングステン合金板が高強度と高温性能を実現するための重要なメカニズムです。焼結過程において、バインダー相へのタングステンの溶解度は温度低下とともに急激に低下し、過飽和状態のタングステン原子は冷却過程で極めて微細な粒子として再析出し、タングステン / バインダー相界面に固定されて界面強化層を形成します。同時に、TiC などの人工的に添加された第二相粒子が、ZrC、HfC および希土類酸化物は焼結中に溶解せず、バインダー相または界面に均一に分布するため、転位や粒界移動を効果的に抑制します。近年、ナノ結晶タングステン合金板ではタングステン粒子径が 100nm 未満にまで制御され、ホール・ペッチ関係を利用することで強度が大幅に向上しました。これら 2 つの強化メカニズムの相乗効果により、タングステン合金板は 900℃を超える高温下でも高い強度を維持できます。

3.1.3 合金相の形成条件と安定性

タングステン合金板の主な合金相には、タングステン固溶体相、 γ - (Ni、Fe、Cu) バインダー相、および場合によっては金属間化合物または酸化物分散相が含まれます。 γ 相の形成は、液相焼結中のバインダー元素の十分な拡散および均質化に依存します。焼結温度は、最低共晶点より約 50~100℃高く、その温度に保持することで、タングステン粒子が再配列して球状化できるようにします。水素雰囲気中の微量水蒸気の制御は、酸素含有量に影響を与えます。含有量が高すぎると揮発性の WO_2 (OH)₂ が形成されてタングステンの損失につながります。一方、含有量が低すぎると、通気性が悪くなり、気孔が閉じてしまいます。

バインダー相の長期安定性は、主にタングステンとバインダー相の界面エネルギーと熱膨張差によって制御されます。液相焼結温度では、タングステンとニッケル、鉄、銅との界面における濡れ角は 0° に近くなります。冷却後、界面結合は主に金属結合となり、高い強度が得られます。熱膨張係数の差によって生じる残留界面応力は、焼鈍処理中に部分的に解放されますが、温度が高すぎるとカーケンドールボイドや脆い界面相 (Ni_4W など) が発生する可能性があります (Fe_7W_6)。微量の希土類元素、ホウ素、リンを添加すると、界面に偏析が生じ、薄い非晶質または複合膜が形成され、界面の高温安定性がさらに向上します。真空または中性雰囲気下では、タングステン合金板は 1000℃を超える温度でも顕著な相変態や微細組織の粗大化を起こさずに長期間使用できますが、空気中ではバインダー相を保護し、優先酸化を抑制するために表面コーティングが必要です。

3.2 タングステン合金板における構成元素の役割と割合

タングステン合金板における構成元素の役割と配合比は、合金設計の中核を成す要素です。タングステン、バインダー元素、微量添加剤の配合比を合理的に選択・制御することで、高密度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

と高融点を維持しながら、材料の加工性、機械的挙動、環境適応性を最適化することができます。主元素であるタングステンは材料の密度基盤と高温安定性を提供し、ニッケル、鉄、銅などのバインダー元素は脆性を改善し、緻密化を促進する役割を果たします。配合設計は通常、状態図解析、焼結速度論、熱機械加工実験に基づいて行われ、各元素が液相焼結段階で濡れ性と拡散効果を十分に発揮し、固体状態で安定した二相構造を形成することを保証します。タングステン含有量が多すぎると塑性不足につながり、バインダー相が多すぎると全体の密度が低下するため、用途に応じて配合比を調整する必要があります。例えば、高硬度が求められる用途ではタングステンの割合を適切に増やすことができますが、熱伝導性が重要なシステムでは、銅などの元素の含有量をそれに応じて増やします。微量元素を添加することで、微細構造がさらに微細化され、粒成長が抑制され、界面強度が向上しますが、有害な相の導入を避けるため、その割合を厳密に制御する必要があります。全体として、構成元素の役割は、原子レベルの固溶体強化、ミクロンレベルの相界面制御、そしてマクロレベルの性能バランスといった、マルチスケールの相乗効果に反映されます。この配合原理は、従来のニッケル-鉄系やニッケル-銅系だけでなく、新興の複合系にも適用でき、材料エンジニアが特定のニーズに合わせて合金組成をカスタマイズするのに役立ちます。

実際の配合において、タングステン粉末の純度と粒度分布は最終的な性能に大きな影響を与えます。高純度の微粉末は均一な分布と気孔率の低減に効果的ですが、バインダー相元素は通常、均一な混合を確保するために金属粉末またはプレアロイ粉末の形で添加されます。焼結温度の選択は配合と密接に関連しており、バインダー相の割合が高いほど焼結温度が低下し、エネルギー消費量が削減され、タングステン粒子の粗大化が抑制されます。熱処理中の配合の最適化には、焼鈍条件の設計、冷却速度の調整による固溶体中の元素分布の制御が含まれ、強度と靱性のバランスを実現します。表面処理においても配合を考慮する必要があります。例えば、コーティング前の表面元素濃度を調整することで密着性を向上させることができます。タングステン合金板の組成は、資源の入手可能性と環境要因の影響を受けます。鉄や銅の一部はリサイクル材料から得られる場合もありますが、不純物は許容範囲内に抑える必要があります。

3.2.1 ニッケル-鉄系におけるタングステン合金板の相乗効果メカニズム

タングステン合金板におけるニッケル-鉄系の相乗効果は、主にバインダー相におけるニッケルと鉄の相補的挙動と、タングステン粒子との界面相互作用に起因します。この系では、主要なバインダー元素であるニッケルが良好な濡れ性と延性を提供し、鉄の添加は固溶強化を促進し、相安定性を調整します。これらが相まって、液相焼結プロセスの円滑な進行を促進します。焼結初期段階では、ニッケルと鉄が低融点の液相を形成し、タングステン粒子を急速に包み込み、粒子の再配列と初期緻密化を実現します。鉄の関与により、液相の粘性が低下し、拡散速度が上昇し、タングステン原子がバインダー相に溶解しやすくなり、冷却時に微粒子が析出することで、界面がさらに強化されます。この相乗効果はミクロ組織の進化にも反映されています。ニッケル-鉄固溶体は面心立方構造を有し、変形応力を効果的に吸収し、タングステン粒子間の直接接触を低減することで、全体的な塑性特性を向上させます。この相乗効果により、熱間加工段階では、圧延時の割れ伝播が抑制され、焼鈍処理後にはミクロ組織の均一性が回復します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

化学的観点から見ると、ニッケルと鉄の電子構造の違いは固溶体の格子歪みにつながり、転位運動を阻害し、バインダー相の強度を高めます。同時に、鉄の強磁性は電磁気特性に影響を与えますが、系の非磁性優位性は変化しません。界面では、ニッケルはクリーンな結合を形成する傾向があり、鉄は小さな酸化物の安定的な存在を促進し、共同で界面エネルギーを高めます。冷却中は、両者の相乗効果によりタングステン粒子の異常な成長が抑制され、微細な球状形態が維持されます。これは、その後の冷間加工に有利です。微視的には、このメカニズムは溶解-再沈殿メカニズムに関与しています。高温では、タングステン-ニッケル-鉄相に部分的に溶解し、低温では再沈殿して粒界を固定することで、高温安定性を高めます。巨視的には、これは材料が繰り返し熱サイクル中に寸法安定性を維持するという形で現れ、耐熱疲労性が求められる用途に適しています。比例制御は、この機構の有効性の鍵となります。ニッケルと鉄の比率は通常、濡れ性と強化効果のバランスをとるために調整されます。鉄含有量が多すぎると脆性相が生じる可能性があります、適切な量であれば靱性が最適化されます。

さらに分析を進めると、相乗効果は腐食挙動にも及ぶことが明らかになりました。ニッケルは不動態皮膜の基礎となり、鉄はその均一な分布を助け、酸性媒体における耐食性を向上させます。加工性能の面では、インターパスアニリングは両者の相乗効果を利用して微細構造を修復し、残留応力の蓄積を低減します。環境適応性に関しては、このシステムは異なる湿度や温度条件に対応するための微調整を可能にし、長期的なサービス信頼性を確保します。まとめると、ニッケル-鉄系の相乗効果メカニズムは、元素間の補完性とマルチスケール相互作用という材料科学の原理を体現しており、タングステン合金板の工学的応用のための信頼できる基盤を提供します。

3.2. 2 タングステン合金板ニッケル-銅系の相乗効果メカニズム

タングステン合金板におけるニッケル-銅系の相乗効果のメカニズムは、ニッケルと銅の無限の混和性と、タングステンとの独特な界面化学挙動に基づいています。この系では、ニッケルが結合強度と濡れ性を提供し、銅の添加により熱伝導性と電気伝導性が大幅に向上します。それらが一緒になって均一な固溶体バインダー相を形成し、焼結中に緻密化と微細構造の最適化を促進します。液相出現段階では、ニッケル-銅液相は表面張力が低く、タングステン粒子を容易に広げて覆い、効率的な再配置を可能にします。銅の関与により、液相の流動性が高まり、タングステン原子の拡散と移動が加速され、凝固時により細かい界面層が形成され、気孔残留物が減少します。相乗効果は熱物性に反映されています。ニッケル-銅固溶体は、ニッケルの延性と銅の熱拡散特性を組み合わせ、熱衝撃下での材料の優れた安定性を実現します。処理中、このメカニズムにより、熱間圧延と冷間圧延中に材料の変形を調整し、層間の分離を回避できます。

化学的なメカニズムの観点から見ると、ニッケルと銅の原子サイズが近いこと、固溶体中の無秩序な分布が確保され、わずかな格子歪みと相強度の増加をもたらします。同時に、銅は非磁性であるため、システム全体が磁化されるのを防ぎ、電磁気に敏感な環境に適しています。界面相互作用では、ニッケルは化学結合に傾き、銅は物理吸着を助け、一緒に低エネルギー界面を形成して結合耐久性を向上させます。冷却の進化に関しては、両者が相乗的に作用してタングステン粒子の不均一な球状化を抑制し、微細構造の一貫性を維持し、極薄シートの製造を促

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

進します。マイクロスケールでは、このメカニズムは熱力学的平衡に関与しています。タングステン原子は高温で溶解し、低温で沈殿して分散した強化粒子を形成し、高温クリープに対する耐性を高めます。マクロ的に見ると、この材料は温度勾配環境下でも均一な熱伝導率を維持するため、熱管理部品に適しています。耐食性と耐候性に関しては、ニッケルと銅が相乗的に表面不動態皮膜の急速な形成を促進し、高湿度環境や塩水噴霧環境下における保護性能を向上させます。圧延最適化においては、焼鈍処理によって両者の拡散特性差を利用し、結晶欠陥を修復することで表面品質を向上させます。環境条件下では、このシステムにより、異なる酸化雰囲気に適応するために組成比を微調整することができ、長期曝露下でも材料特性の段階的な変化を制御できます。

3.2.3 タングステン合金板への微量元素のドーピング効果

タングステン合金板は、主に粒界偏析、相界面改質、固溶体摂動などを通じて、材料の微細構造と特性に影響を与えます。この効果は、従来のニッケル-鉄系またはニッケル-銅系において特に顕著です。微量の希土類元素、ホウ素、リン、コバルトなどを添加することで、タングステン粒子を微細化し、バインダー相の靱性を向上させ、全体的な均一性を高めることができます。焼結過程において、ドーパントは液相中に蓄積する傾向があり、表面エネルギーを低下させ、タングステン粒子の均一な分布を促進し、成長を抑制します。ドーピング後、微細構造はより安定し、多孔性が低下し、密度が増加します。熱間加工においては、この効果により、亀裂発生抑制、焼鈍時の応力解放の促進、歩留まりの向上が期待できます。

メカニズム的には、ランタンやイットリウムなどの希土類元素をドーピングすると、分散酸化物相が形成され、粒界を固定し、結晶移動を阻害し、再結晶温度を上昇させます。ホウ素とリンは界面に薄膜を形成し、濡れ角を調整して相間結合を強化します。コバルトをドーピングすると、バインダー固溶体が強化され、積層欠陥エネルギーが増加し、変形適合性が向上します。微視的には、ドーピングによって電子密度の局所的な変化が引き起こされ、拡散速度に影響を与え、低温で微細相が析出することで材料の強度がさらに高まります。巨視的には、破壊靱性と硬度のバランスが取れた機械的特性が得られ、精密部品に適しています。

腐食挙動の観点から見ると、ドーピング元素は不動態皮膜の成長を助け、媒体侵食に対する耐性を向上させます。表面処理においては、ドーピングによってコーティングの密着性が向上し、耐用年数が延長されます。環境適応においては、この効果により、様々な温度や湿度条件に対応するための的確な調整が可能になります。まとめると、微量元素のドーピング効果は、少量の添加が大きな影響を与えるという材料原理を体現しており、タングステン合金板の性能を最適化するための効果的なアプローチを提供します。実験的検証により、この効果が新たなドーピング戦略の指針となり、材料科学の継続的な進歩を促進できることが示されています。

3.3 タングステン合金板の組成設計の化学的原理

タングステン合金板は、主に相平衡、拡散速度論、そして界面化学挙動を軸に設計されています。これらの原理は、原料調製から最終熱処理までの全工程を導き、材料特性の安定性と再現性を確保します。組成設計の中核は、タングステンとバインダー相元素の比率を制御すること

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

にあります。相図解析は、潜在的な相構造を予測し、有害な相の形成を回避するために使用されます。例えば、タングステン-ニッケル-鉄系では、液相焼結中の濡れ性と冷却後の固溶体の安定性を維持するために、ニッケル-鉄比のバランスが化学原理的に重視されます。拡散原理では、高温における元素の移動速度を考慮する必要があります。タングステン原子はニッケルや銅よりも拡散が遅いため、均一な分布を促進するために保持時間を長く設定する必要があります。界面化学原理には、タングステン粒子とバインダー相間の結合エネルギーが関係しています。微量元素は、表面張力を調整し、界面結合強度を向上させるために、設計にしばしば導入されます。

実際の設計では、化学的原則には酸化還元バランスの考慮も含まれます。焼結雰囲気の水素露点は、タングステンの酸化を抑制し、バインダー相の還元を促進するために、組成と一致させる必要があります。配合中、タングステン含有量が多い場合は、可塑性の低下を補うためにバインダー相を増やす必要があります。一方、バインダー相が多すぎる場合は、密度を維持するための調整が必要になります。熱処理プロセスは相変態の原則に従い、冷却速度を制御することで析出相のサイズと分布を調整し、機械的特性を最適化します。表面の化学原則はコーティング設計に反映されており、元素の偏析によって引き起こされる接着の問題を回避するために、組成はめっき溶液と適合する必要があります。環境への配慮に基づき、原則としてリサイクル元素を使用しますが、脆い相の導入を防ぐために、酸素や炭素などの不純物の含有量を制御する必要があります。

3.3.1 タングステン合金板の性能指向組成最適化ロジック

タングステン合金板の性能重視の組成最適化ロジックは、最終用途の要件を起点とし、元素比と添加順序を逆算することで、密度、硬度、熱伝導率、延性といった特性の調和のとれたバランスを確保します。このロジックはまず主要な特性を特定します。例えば、高密度を追求する場合、タングステン比を高めることを優先し、同時にバインダー相を微調整することで加工性を維持します。最適化プロセスは複数回の反復で構成されます。まず、状態図に基づいて初期組成比を推定し、液相含有量を決定します。その後、実験検証を経て、焼結収縮率に合わせて調整を行います。このロジックは元素間の相乗効果を重視しています。例えば、ニッケルは延性を高め、鉄や銅は強度や熱伝導率を補います。これらの元素の組成比を最適化することで熱安定性を向上させることができます。マイクロドーピングは微調整手段として機能します。希土類元素は微細構造を改良し、ホウ素とリンは界面を調整して耐食性を向上させます。

このロジックには、性能とのトレードオフも考慮されています。高硬度を実現するために、タングステン含有量を増やし、炭化物を添加しますが、靱性の低下を監視する必要があります。焼鈍処理の最適化によってバランスを回復する必要があります。熱伝導率を向上させるために、銅の比率を高めますが、過剰な液相が多孔質組織につながるのを避ける必要があります。最適化においては、化学シミュレーションツールが相形成経路の予測を支援し、実験サイクルの削減に役立ちます。熱機械加工プロセスのフィードバックもロジックに組み込まれており、圧延欠陥解析は、変形の整合性を向上させるためにコバルトを添加するなど、組成の微調整に役立ちます。環境性能については、耐食相の形成に重点を置き、クロムまたはモリブデンの添加比率は媒体の種類に応じて調整されます。全体的なロジックは、要件定義 - 配合設計 - 準備検

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

証 - 性能試験 - 反復調整という閉ループを形成し、組成と性能の密接な相関関係を確保します。このロジックにより、タングステン合金シートは精密機器や熱管理などの分野の多様な要件に適應することができ、材料設計の実用的な方向性を示しています。

3.3.2 タングステン合金板の組成均一性を保つための化学的制御方法

タングステン合金板の組成均一性は、主に粉末混合、焼結パラメータ調整、熱処理拡散によって化学的に制御されます。これらの方法により、原料から最終製品に至るまでのあらゆる段階で品質管理が確保され、偏析や不均一性による性能変動を回避できます。粉末混合段階では、メカニカルアロイングやスプレードライなどの方法を用いて、タングステン、ニッケル、鉄などの元素をミクロンレベルで均一に分散させます。界面活性剤などの化学添加剤は、粉末の分散を補助します。焼結制御においては、液相量の調整が非常に重要です。温度勾配設計は均一な濡れを促進し、水素流は揮発性不純物を除去して局所的な濃縮を低減します。冷却速度調整は元素の不均一な拡散を抑制し、急速冷却は均一な状態を維持します。

熱処理法には真空焼鈍法が用いられ、原子レベルの拡散を促進し、濃度勾配を排除し、複数回の焼鈍サイクルを通して材料をさらに均質化します。イオン注入や化学蒸着などの表面化学的手法は、板材表面に均一な層を形成し、全体的な均一性を向上させます。品質管理においては、化学分析のフィードバックに基づいて手法を反復的に改善し、例えば分光法を用いて偏析領域を検出した後、配合を調整します。環境に配慮した方法では、予め合金化された粉末を使用することで、不均一な混合のリスクを低減します。

3.3.3 タングステン合金板の性能に対する不純物元素の影響

タングステン合金板に含まれる不純物は、主に原料タングステン粉末、バインダー相粉末、加工中に導入されるガス、および設備残留物に由来します。極めて微量の不純物であっても、微細構造、機械的挙動、および環境適応性に重大な影響を及ぼす可能性があります。一般的な不純物としては、酸素、炭素、窒素、リン、硫黄、ケイ素、カリウム、ナトリウム、カルシウムなどが挙げられますが、中でも酸素と炭素が最も広範囲に影響を与えます。

酸素が自由または酸化物の形で存在する場合、タングステン粒子の表面に薄い酸化膜を容易に形成し、液相焼結中の濡れ性が低下し、界面結合が弱まり、局所的なマイクロ細孔または介在物が発生します。これにより、破壊靱性が低下し、圧延割れが発生しやすくなります。また、酸素は高温でタングステンと反応して揮発性酸化物を形成し、タングステン粒子の表面を粗くし、粒子の再配列を妨げ、最終密度に影響を及ぼします。炭素の存在はより複雑です。微量の炭素はタングステンと微細炭化物を形成し、ある程度の分散強化をもたらしますが、過剰な炭素は粒界または界面に偏析して脆い WC または W_2C を形成し、界面強度が大幅に弱まり、

応力下での粒界破壊の傾向が高まります。窒素は通常、高温水素雰囲気下で還元・除去されますが、残留窒素はタングステンと針状窒化物相を形成し、亀裂の発生源となります。リンや硫黄などの微量元素は、バインダー相や界面に蓄積しやすく、低融点化合物を形成して高温強度を低下させ、高温脆化を引き起こします。カリウムやナトリウムなどのアルカリ金属、カルシ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ウム、シリコンは、主にタングステン粉末を製造するタングステン酸塩工程における残留物に由来します。これらは焼結中に揮発したり気孔を形成したりして、構造の連続性を損ない、ひどい場合には気泡や剥離を引き起こします。

不純物も性能に相乗効果をもたらします。例えば、酸素とリンが共存すると、リン酸ガラス相が形成されやすくなり、タングステン粒子を包み込んで溶解・再沈殿プロセスを阻害し、タングステン粒子の形状が不規則になり、真球度が低下します。高温使用中、不純物が濃縮された領域は酸化や腐食の優先的な発生場所となり、材料の破損を加速させます。極薄板の製造においては、不純物に起因する微細な欠陥が増幅され、エッジクラックやオレンジピールのような表面欠陥の起点となる可能性があります。そのため、現代のタングステン合金板の製造では、原料の純度とプロセスの清浄度に対する要求がますます高まっており、不純物の制御は、材料がハイエンドアプリケーションに参入できるかどうかを左右する重要な要素の一つとなっています。

3.3.4 タングステン合金板から不純物元素を除去する方法

タングステン合金板は、原料の準備から完成品の熱処理まで、プロセスチェーン全体にわたって製造されます。化学精製、物理精製、雰囲気精製、後処理など、様々な方法を総合的に採用し、多段階の精製システムを形成しています。

原料段階での除去プロセスは極めて重要です。タングステン粉末は、通常、高純度のタングステン酸アンモニウムを前駆体として用い、複数回の再結晶化と深部水素還元プロセスを経て、酸素、アルカリ金属、リンなどの不純物を低レベルまで低減します。バインダー相のニッケル、鉄、銅粉末は、カルボニル法または電解法を用いて調製され、その後、真空脱ガス処理によって炭素、酸素、硫黄含有量をさらに低減します。混合前に、タングステン粉末は二次的な高温水素精製処理を受けることが多く、水素と酸化物の還元反応を利用して水蒸気を生成し、これを排出することで、カリウムやナトリウムなどの残留揮発性不純物も同時に除去されます。

焼結段階は、ガス状および揮発性不純物を除去する上で極めて重要な段階です。湿潤水素雰囲気（厳密に露点制御）は、タングステン粒子表面の酸化物を効率的に還元し、水蒸気を炉外に排出します。一方、乾燥水素または高真空焼結は、窒素および残留炭化水素の除去に用いられます。リンや硫黄などの低融点不純物が揮発後に再凝縮するのを防ぐため、段階的な加熱プロセスがしばしば採用されます。まず低温で脱ガス処理を行い、その後、液相焼結温度まで急速に温度を上昇させます。炉内充填物とピレット間の断熱パッドは、二次汚染を防ぐため、高純度グラファイトまたはアルミナで作製する必要があります。

熱間加工および熱処理中の除去は、主に高真空または高純度の流通水素に依存します。熱間圧延または温間圧延前の予熱は真空炉で行われ、残留アルカリ金属のさらなる揮発が促進されます。冷間圧延後の複数回の中間焼鈍も高真空条件下で行われ、残留ガスは拡散によって排出されます。極薄箔の製造では、厚さ方向にマイクロボアが発生しないように、専用の真空脱ガス焼鈍工程が追加されることがよくあります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

後処理では、表面または表面近傍の不純物を除去します。化学酸洗は、表面の酸素およびリンを多く含む層を選択的に溶解します。電解研磨またはプラズマ洗浄は、吸着した有機物および金属イオンを効果的に除去します。チタンゲッターを用いた真空熱処理は、残留酸素および窒素を深く捕捉します。一部の高級鋼板では、ピレットの最終精製にゾーンメルティング精錬法または電子ビーム溶融法も用いられます。

要約すると、タングステン合金板における不純物除去は、「発生源管理 - 工程除去 - 完成品精製」という3段階の戦略に基づいています。複数の方法の相乗効果により、酸素含有量を極めて低い範囲に安定的に制御できるだけでなく、その他の有害な不純物も大幅に低減され、材料の高い信頼性と長寿命の基盤が築かれます。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

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

第4章 タングステン合金板の構造と特性の関係

4.1 タングステン合金板の微細構造

タングステン合金板の微細構造は、通常、2相複合特性を示し、硬質相のタングステン粒子がニッケルベースまたは銅ベースのバインダー相に囲まれ、サーメットのような微細構造を形成します。この構造は粉末冶金に由来し、焼結後に熱処理加工処理によってさらに進みます。タングステン粒子はほとんどが球形または多面体であり、そのサイズ分布は構造の均一性に影響します。バインダー相は粒子間の隙間を埋め、連続した変形チャネルを提供します。構造には多孔性や転位などの欠陥が避けられませんが、プロセス制御によって最小限に抑えることができます。微細構造には界面層も含まれ、元素の拡散によって形成された遷移領域が相間結合を強化します。走査型電子顕微鏡（SEM）や透過型電子顕微鏡（TEM）などの観察方法により、構造の詳細が明らかになり、特性の起源の分析に役立ちます。構造の進化は処理段階によって異なります。粒子は焼結中に球状化し、圧延中に繊維状になります。

4.1.1 粒構造と粒界化学組成

タングステン合金板は、主に体心立方（BCC）結晶のタングステン相と面心立方（FCC）結晶のバインダー相で構成されています。前者は主要体積を占め、高い硬度と密度の基礎となります。一方、後者は連続マトリックスとして機能し、全体的な可塑性を向上させます。焼結中、タングステン粒子は溶解-再沈殿機構によって徐々に球状化します。当初、多角形粒子は液相の影響を受けて均一な表面曲率を持つ傾向があり、最終的には比較的均一なサイズの凝集体を形成します。この構造的変化はバインダー相の濡れ性に影響を受けます。良好な濡れ性は粒子の再配列を促進し、接触角を低下させ、低エネルギー粒界を形成します。粒径は通常、粉末の粒径と焼結温度によって制御されます。粉末を細かくし、保持時間を長くすると、粒子構造が細かくなり、強度が向上しますが、延性が低下する可能性があります。圧延により変形誘起再結晶が導入され、圧延方向に沿って結晶粒が伸長し、繊維状の組織が形成され、異方性がさらに最適化されます。

粒界の化学組成はタングステン合金板において重要な役割を果たし、主にタングステンとバインダー相の界面における元素分布に関与します。界面には少量のタングステン原子が蓄積することが多く、バインダー相から析出することで薄い固溶体領域が形成され、接合強度が向上します。ニッケル-鉄系では、鉄は粒界に偏析する傾向があり、電子密度を調節し、転位の移動経路に影響を与えます。銅系では、界面において銅が均一に分布し、熱伝導チャネルの連続性を促進します。酸素やリンなどの微量不純物は粒界に蓄積し、界面エネルギーを変化させる複合膜を形成する可能性があります。脆化を防ぐには、精製プロセスを通じてこれらの不純物を制御する必要があります。化学組成分析では、一般的にエネルギー分散型分光法（EDS）または原子プローブマイクロアナリシスを用いて、界面における勾配変化を明らかにします。この勾配は応力を緩和し、亀裂の伝播を抑制するのに役立ちます。

さらに、粒構造の安定性は粒界組成と密接に関連しています。高真空焼結は界面における酸素酸化物の形成を抑制し、清浄な界面を維持し、高温使用時の信頼性を向上させます。焼鈍処理

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は拡散によって組成を調整し、偏析元素を希釈し、構造バランスを回復させます。粒界の種類は多様であり、大角粒界は元素の移動を促進し、小角粒界はより安定しています。還元などの処理パラメータは粒界密度に影響を与え、高密度粒界は転位を固定し、硬度を高める可能性があります。環境にさらされると、粒界組成が腐食経路を決定し、不動態化元素の濃縮は保護膜を形成する可能性があります。

4.1.2 合金相の分布と化学状態

タングステン合金板の合金相には、主にタングステン固溶体相とバインダー固溶体が含まれます。前者はタングステン粒子内での溶解が制限された合金元素で構成され、後者はニッケルベースまたは銅ベースのマトリックスに溶解したタングステン原子で構成されます。分布に関しては、タングステン相は個別の粒子としてバインダー相に均一に埋め込まれ、複合ネットワークを形成します。粒子間隔はバインダー相の体積比によって決まります。間隔が狭いほど、均一な応力伝達に有利です。化学的には、タングステン相は高純度状態を維持し、表面に薄い酸化物または固溶体遷移領域が存在する場合があります。バインダー相の化学状態はより複雑です。ニッケル - 鉄系では、 γ 相固溶体であり、鉄原子がニッケルの一部の位置を置き換えて無秩序な配列を形成します。この状態は安定していますが、温度変化によって秩序だった相が析出することがあります。銅系も同様です。銅とニッケルは無限に混和するため、均一な状態が保証され、相分離の傾向はありません。

相分布の最適化は、焼結速度に依存します。液相中の粒子の再配置により、分布がよりランダムになり、凝集が防止されます。熱処理により分布がさらに均一化され、拡散による粒界調整により局所的な密度差が減少します。化学状態は冷却速度の影響を受けます。急速冷却は過飽和状態に固定され、一方、緩やかな冷却は沈殿を促進し、微細な強化相を形成します。界面の化学状態は独特で、元素の勾配領域が存在します。タングステンは徐々に粒子からバインダー相に移行し、相溶性が向上します。X 線回折などの観察技術で状態を確認し、有害な化合物のピークは見られません。不均一な分布は性能の勾配につながる可能性があり、攪拌と混合による初期の均一性制御が必要になります。アニーリング中の状態進化には再結晶、結晶欠陥の減少、導電性の向上が含まれます。

さらに、相分布と状態の相互作用は環境挙動に影響を与えます。均一に分布したバインダー相は継続的な保護を提供し、化学的に安定した状態は酸化に抵抗します。加工、圧延、引張加工の過程で相が分散し、配向構造が形成されます。この状態は維持されますが、ひずみによって転位の蓄積が誘発されます。

4.1.3 欠陥構造の化学的起源分析

タングステン合金板には、主に点欠陥、線欠陥、表面欠陥、体積欠陥が含まれます。これらの化学的原因是、元素の不均一な拡散、相間反応、および不純物の導入に起因します。空孔や格子間原子などの点欠陥は、焼結中にバインダー相中のタングステン原子が溶解・析出することによって発生することが多く、過飽和タングステンは空孔濃度の増加につながります。線欠

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

陥、すなわち転位は、圧延変形に関連しています。バインダー相における固溶強化は転位密度を増加させ、化学的には鉄または銅原子が転位を固定し、その運動に影響を与えます。粒界や相界面などの表面欠陥は、化学的には不純物の偏析によって引き起こされます。酸素とリンが界面に蓄積して化合物を形成し、それらのエネルギー状態を変化させます。気孔や介在物などの体積欠陥は、残留ガスや除去されていない酸化物に起因する不完全な焼結によって引き起こされます。

分析の結果、欠陥形成は熱力学によっても駆動されることが明らかになりました。高温拡散は空孔の移動を促進し、低温凝固はクラスターを形成します。不純物は大きな化学的影響を与え、炭素と窒素は格子間化合物を形成して欠陥体積を増加させます。アニール処理は欠陥を低減し、拡散によって空孔を修復し、化学平衡下で不純物を再分配します。界面欠陥には特有の原因があります。熱膨張差は微小亀裂を誘発し、元素の勾配は応力を緩和します。電子顕微鏡などの観察手法は原因を明らかにし、エネルギー分散型 X 線分光法は不純物の相関関係を明らかにします。欠陥が性能に与える影響は制御する必要があり、化学的精製は欠陥形成の強度を低減します。

4.2 タングステン合金板の特性とメカニズム

タングステン合金板は、主にその複合構造の独特な設計に由来しています。タングステン相とバインダー相の相互作用により、密度、熱伝導率、熱安定性など、様々な特性が実現されています。その性能メカニズムには、原子レベルのパッキング、電子輸送、相間支持といった化学プロセスが関与しています。例えば、高密度はタングステン原子の密集に起因し、熱伝導率と電気伝導率は自由電子の移動経路に依存します。熱安定性メカニズムは相構造の熱力学的平衡に基づいており、界面結合により高温変形が抑制されます。メカニズム解析は、圧延プロセスが電子散乱にどのように影響し、それによって導電性がどのように制御されるかなど、性能の起源を理解するのに役立ちます。環境要因下では、表面化学状態が安定性に影響を与える酸化挙動もメカニズムに含まれます。

4.2.1 タングステン合金板における高密度化学原子充填の原理

タングステン合金板の高密度化学原子充填原理は、主にタングステン原子の高原子量と体心立方結晶構造の緻密な配列に基づいています。この構造により、原子は限られた空間を効率的に充填することができ、合金化プロセスによって充填方法がさらに最適化されます。粉末冶金により、タングステン粉末は焼結中に粒子の再配列を起こし、液相バインダーはタングステン原子の近接を促進し、緻密なネットワークを形成します。原子充填の原理は、ファンデルワールス力と金属結合の相乗効果に関係しています。タングステン原子は半径が比較的大きいですが、格子定数は中程度であるため、体心立方単位内の原子間隙間が最小限に抑えられます。ニッケルや鉄などの合金元素を添加しても、タングステン相の充填は直接変化しませんが、固溶体形成によって全体の体積が調整され、空孔欠陥が減少します。

積層原理は相間相互作用にも反映されています。バインダー相の原子は、固体表面を濡らす液体のように、タングステン粒子間の隙間を埋め、化学結合によって接続強度を高めます。焼結

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

速度論では、表面エネルギーが原子移動を促し、タングステン表面の原子が凹部に拡散することで、滑らかな積層が実現します。冷却過程においては、熱収縮によって原子間隔がさらに圧縮され、化学平衡状態にある析出相が構造を固定するのに役立ちます。微視的には、この原理はタングステン格子の秩序性として現れ、置換型固溶体が格子の膨張を抑制し、高い充填率を維持します。巨視的な性能においては、この原子レベルの緻密さから高密度が生まれ、高質量密度を必要とする用途に適しています。

さらに分析を進めると、充填原理は元素の電気陰性度の影響を受けることが明らかになりました。タングステンとバインダー相元素の電気陰性度の差は電子共有を促進し、安定した結合ネットワークを形成します。界面における原子充填の独特な勾配領域により、タングステン原子は徐々にバインダー相に統合され、全体的な一貫性が向上します。温度勾配などのプロセスパラメータは充填プロセスを制御し、高温は拡散時間を延長し、充填の均一性を最適化します。不純物元素は干渉し、酸素と他の元素によって形成される化合物は空間を占有するため、還元雰囲気を使用して除去する必要があります。アニーリングは充填秩序を復元し、拡散は空隙を修復します。環境適応において、この原理は温度変化下で比較的安定した密度を保証し、長期使用をサポートします。

4.2.2 タングステン合金板の熱伝導性と電気伝導性を高める化学的キャリアメカニズム

タングステン合金板は、主に自由電子とフォノンの輸送に依存しています。タングステン相は高い電子密度を提供し、バインダー相は輸送経路を最適化して複合キャリアシステムを形成します。伝導メカニズムは金属結合内の電子共有に関与しています。タングステン原子の外側の電子は容易に分離して電子ガスを形成し、合金化によるニッケルまたは銅原子の導入はキャリア濃度を増加させます。熱伝導性はフォノン振動によって実現され、格子振動はタングステン相を効率的に伝播し、バインダー相は散乱を緩衝します。このメカニズムの化学的根拠は価電子配置にあります。タングステンの d 電子層はバインダー相の sp 電子と混成し、キャリア移動度を高めます。

キャリアメカニズムは相分布にも反映されています。連続結合相は導電性ネットワークを形成し、界面抵抗を低減します。また、化学的安定性により、電子の流れが妨げられることはありません。焼結プロセスによってこのメカニズムが最適化され、液相は清浄な界面を形成し、ポテンシャル障壁を低下させます。冷却された析出物はキャリアを散乱させる可能性がありますが、適切な強化は熱伝導率を実際に向上させます。微視的には、このメカニズムはフェルミ面の形状に関係しています。合金元素は電子構造を調整し、キャリアの有効質量に影響を与えます。マクロ的な性能においては、このメカニズムは熱管理と電子機器への応用をサポートし、熱伝導率と電気伝導率のバランスを実現します。

さらに、このメカニズムは欠陥化学の影響を受け、転位や空孔がキャリアを散乱させるため、アニール処理によって低減させる必要があります。酸素などの不純物元素はトラップを形成し、電子を捕獲して導電性を低下させますが、精製プロセスによってこの影響は軽減されます。温度依存性において、このメカニズムは電子-フォノン結合を示します。高温では散乱が増加しますが、タングステン相の安定性は基本レベルに留まります。表面の化学状態はこのメカニ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ズムに影響を与えます。酸化物層はキャリアをブロックし、コーティングは保護と性能回復を行います。加工工程では、圧延によってテクスチャが形成され、配向メカニズムによって異方性導電性が向上します。環境要因下では、腐食によってキャリア経路が変化し、パッシベーション膜がメンテナンスに役立ちます。

4.2.3 タングステン合金板の熱安定性を支える化学構造

タングステン合金板は、主に二相構造の熱力学的平衡から成ります。タングステン相の高い融点は骨格的な支持を提供し、バインダー相の固溶体は応力分布を調整し、高温変形を抑制します。構造的な支持の化学的原理は相間結合であり、金属結合成分と共有結合成分の混合物が高温でも結合ネットワークの崩壊を防ぎます。焼結中に形成される界面層は、元素拡散によって傾斜構造を形成し、熱膨張差を緩和して全体的な完全性を維持します。冷却プロセスによって支持が固定され、析出相が粒界を固定して移動を抑制します。

支持機構はマイクロ組織の安定性にも反映されています。タングステン粒子の球状化は応力集中を低減し、バインダー相の均一な分布は熱負荷を分散させます。化学的には、固溶強化によって相の融点が上昇し、合金元素は自由エネルギーを調整して相変態の駆動力を低下させます。ミクロ的には、支持機構は相間の原子振動の調和とフォノンモードの協調を促し、局所的な軟化を防止します。マクロ的な性能では、この支持機構は高温用途に対応し、周期的な加熱下でもその安定性が実証されています。

さらに分析を進めると、このメカニズムは酸化化学影響を受けており、表面に保護膜を形成して酸素の拡散を遮断しながら内部構造を維持することが明らかになりました。不純物は支持体構造に干渉し、リンなどの元素は脆性相を誘発しますが、高純度プロセスによって除去されます。アニーリングは支持体構造を最適化し、拡散は組成を調整し、平衡を回復します。温度勾配下では、支持体は緩やかな応答を示し、低温領域ではタングステン相が優勢となり、高温領域ではバインダー相が補助的に作用します。加工履歴もこのメカニズムに影響を与え、過去の変形によって転位ネットワークが形成され、高温強度が向上します。環境曝露下では、腐食試験によって支持体の信頼性が実証され、化学的に不活性な相によって寿命が延長されます。

4.3 タングステン合金板の機械的性質と化学的性質の相関関係

タングステン合金板の特性は、主に材料の微細構造が化学結合と元素分布を通じてマクロ的な挙動にどのように影響するかに反映されます。この相関関係は、硬度、耐摩耗性、耐食性などの特性の起源を理解するのに役立ちます。強度や靱性などの機械的性質は、格子配列や相間相互作用に由来することが多く、耐食性などの化学的性質は表面反応や元素の電気化学的挙動に関係します。これら2つは界面化学反応によって密接に結びついています。例えば、タングステン相の硬質骨格は機械的支持を提供し、バインダー相の固溶体は化学的安定性を調整することで、性能バランスを形成します。この相関メカニズムには、原子レベルの結合強度の寄与が含まれます。タングステン相の硬度は金属結合によって支配され、共有結合成分は界面における結合を強化し、変形抵抗に影響を与えます。焼結中の化学反応は構造を形成し、液相は元素の拡散を促進して勾配領域を形成し、応力集中を機械的に低減し、耐酸化性を化学的に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

向上させます。熱処理は相関関係をさらに強め、焼鈍は拡散によって元素の位置を調整し、機械的可塑性と化学的不活性性を最適化します。環境要因下では、この相関関係は性能において相乗的な反応として現れます。湿度や酸性媒体は、機械的完全性と化学的保護層を同時に弱める可能性があります。加工履歴もこの相関関係に影響を与えます。圧延によって導入される転位網は、機械的強度を増大させ、化学的には電子分布を変化させ、腐食電位に影響を与えます。不純物元素の役割も無視できません。酸素やリンの偏析は化学的には弱い結合領域を形成し、機械的には亀裂の発生源となるため、これらの影響を軽減するために精製が必要となります。

4.3.1 タングステン合金板の硬度と化学結合強度の関係

タングステン合金板と化学結合の強度は、材料内の結合タイプの多様性と強度分布に基づいています。この関係は、タングステン相とバインダー相の相互作用が、材料の変形抵抗にどのように共同で寄与しているかを反映しています。機械的指標としての硬度は原子間相互作用の強さに由来し、化学結合の強さは結合エネルギーと電子共有の程度によって影響を受けます。タングステン合金板では、タングステン相の体心立方構造は金属結合によって支配されており、金属結合は高い結合強度を持ち、基本的な硬度をもたらします。バインダー相の面心立方固溶体は、より多くの共有結合成分を導入し、全体的な結合ネットワークを制御します。この関係の中核は、界面における結合の混合にあります。タングステン原子とニッケルまたは鉄の結合は、結合強度の勾配分布を持つ遷移領域を形成し、外部荷重を緩和するのに役立ちます。

化学結合強度の向上は、多くの場合、固溶強化によって達成されます。合金元素が結晶格子に溶解して歪みを引き起こし、転位運動に対する抵抗を増加させることで、硬度が向上します。タングステン相内では、結合強度は純度に依存します。高純度状態では、金属結合が均一に分布しているため、硬度が安定します。不純物の導入により結合が弱まり、局所的に柔らかい領域が形成されます。バインダー相では、ニッケルと鉄の混合により結合強度が向上し、鉄原子により電子雲密度が調整されて結合の安定性が促進されます。焼結プロセスはこの関係に影響を及ぼします。液相で結合の再結合が起こり、冷却中に析出物によって結合ネットワークがさらに強化され、硬度の変化が生じます。圧延変形により結合ひずみが生じ、周囲の元素が転位に化学的に豊富になり、局所的な硬度が増加しますが、平衡には焼鈍が必要です。

この関係は温度依存性にも及びます。高温では結合振動が増加し、硬度が低下します。しかし、タングステン相の結合強度は比較的安定しており、高温環境下での用途に適しています。表面化学結合強度は硬度試験に影響を与えます。酸化層は弱い結合を形成するため、保護コーティングによる修復が必要です。炭素などの不純物が添加されると炭化物結合が形成されますが、この結合は強力ですが、脆化を防ぐには均一に分散させる必要があります。環境要因によっては、湿度が水素結合を促進し、表面結合を弱め、間接的に硬度を低下させます。

4.3.2 タングステン合金板の耐化学腐食機構

タングステン合金板は、主に材料構造の複合設計と表面化学反応の相乗効果によって実現されます。このメカニズムにより、摩擦や媒体の作用下でも材料の完全性が維持されます。機械的特性としての耐摩耗性は、表面硬度と靱性のバランスに左右されます。一方、耐化学腐食性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は、不動態皮膜と元素の電気化学的挙動によって侵食を抑制します。この2つは相互作用して保護システムを形成します。タングステン合金板では、タングステン相が耐摩耗性の枠組みを提供し、バインダー相が化学活性を調整し、界面における元素分布が耐性メカニズムを最適化します。このメカニズムの核心は、摩擦時の化学変化にあります。表面原子は応力下で再配列し、酸化物層または吸着膜を形成して摩耗速度を低減します。

耐腐食メカニズムは電気化学的不動態化によって実現されます。ニッケルまたは銅が表面に安定した酸化膜の形成を促進し、媒体の浸透を遮断します。機械的には、膜の密着性は結合強度に依存します。摩耗環境では、このメカニズムは酸化摩耗と腐食摩耗の結合に関与します。化学反応によって保護生成物が生成され、摩擦係数が機械的に低下します。焼結プロセスは組織を形成し、液相が均一な微細構造を促進し、腐食に敏感な領域を減らします。圧延後の表面テクスチャはこのメカニズムに影響を与え、表面を化学的に平滑化することで媒体の付着を低減し、機械的に応力を均等に分散させます。不純物元素の干渉メカニズムには、リンや硫黄の濃縮による局部腐食の誘発などがあり、精製と管理が必要です。

このメカニズムは顕著な温度依存性を示し、高温では酸化が加速しますが、タングステン相の安定性は維持されます。コーティング処理によってこのメカニズムは強化され、無電解ニッケルめっきは追加のバリアを形成し、耐摩耗性を向上させます。酸やアルカリなどの環境媒体はメカニズムを変化させ、不動態皮膜の適応性が長期的な性能を左右します。

4.3.3 タングステン合金板の表面化学バリア効果による耐食性

タングステン合金板の耐食性は、主に酸化膜と吸着層の形成によって達成されます。この機能は、媒体と基板の接触を防ぐことで材料の安定性を維持します。耐食性は化学的性質として、表面元素の電気化学的挙動に起因し、バリア効果は多層構造の構築を伴います。機械的性質としては、膜層は剥離に抵抗するための接着性を備えていなければなりません。タングステン合金板では、タングステン相表面は容易に酸化されてWO₃層を形成しますが、ニッケルなどのバインダー元素が複合膜の形成を促進し、バリア効果を高めます。その基本原理は、熱力学的安定性と低い膜自由エネルギーであり、これによりさらなる反応が抑制されます。

バリア効果は自己不動態化によって実現されます。フィルムは最初の酸化後に自己修復し、その化学組成にはニッケルまたは酸化銅が含まれます。機械的には、フィルムの柔軟性により亀裂が防止されます。焼結後の表面状態はバリアの性能に影響を及ぼします。きれいな表面は均一なフィルム形成を促進します。圧延中の表面粗さはバリアの有効性を制御します。化学的には、マイクロテクスチャにより接着点が増加します。酸素などの不純物の初期含有量がバリアの品質を決定します。過剰な酸素は多孔質フィルムにつながります。環境条件下では、バリアはさまざまな媒体に適応します。酸性条件下では、フィルムは溶解して再構築されます。さらに、温度はバリアの性能に大きく影響します。高温は拡散を加速しますが、複合フィルムの安定性とバリア機能は維持されます。コーティング技術によりバリアの有効性が拡張されます。真空クロムメッキにより追加層が形成され、全体的な耐性が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.4 タングステン合金板のプロセス・構造・性能相関分析

タングステン合金板のプロセス・構造・性能相関分析は、製造から最終性能までの論理的な連鎖に焦点を当てています。この分析は、プロセスパラメータがどのようにマイクロ組織を制御し、それによってマクロ的な挙動に影響を与えるかを理解するのに役立ちます。焼結、圧延、表面処理などのプロセスステップはそれぞれ異なるスケールで作用します。焼結は初期構造を確立し、圧延は変形をさらに最適化し、表面処理は化学界面をターゲットとします。仲介役として機能する構造には、結晶粒分布、相間結合、欠陥状態が含まれます。これらの要素は、化学結合と元素の拡散を通じて性能と結びついています。性能には機械的、熱的、化学的側面が含まれます。例えば、硬度は格子強度に由来し、耐食性は表面バリアに依存します。この相関関係は多層伝導として現れます。プロセスによって原子配列が変化し、構造によって結合ネットワークが調整され、それに応じて性能が反応します。この分析フレームワークはフィードバックループを重視し、性能試験結果に基づいてプロセス調整を行い、材料の産業用途への適合性を確保します。この分析により、タングステン合金シートの設計がより体系的になり、精密分野での使用をサポートします。

実際の分析では、相関関係は熱力学と速度論のバランスにも左右されます。プロセス温度は拡散速度に影響を与え、構造安定性は性能の耐久性を決定します。元素比は相関関係において橋渡しの役割を果たします。タングステン含有量が多いと高密度構造となり、性能は高密度に傾きますが、可塑性についてはプロセス補正が必要です。環境要因も分析に組み込まれ、湿度や温度の変化は相関関係の堅牢性を検証します。不純物管理はプロセス全体を通して維持され、化学精製によって欠陥の増幅が性能に影響を与えるのを防ぎます。

4.4.1 焼結プロセスがタングステン合金板の微細構造に及ぼす影響

焼結工程は、主に温度、雰囲気、時間などのパラメータによってタングステン合金シートの微細構造を調整し、相形成、粒子の進化、界面結合を制御します。この調整が、その後の材料処理と性能の基礎となります。焼結中、粉末混合物は固相拡散から液相形成へと変化します。タングステン粒子はバインダー相の濡れ下で再配列し、均一に分散した二相構造を形成します。温度制御は非常に重要です。高温は液相形成を促進し、ニッケルや銅などのバインダー元素は溶融してタングステン粒子を包み込み、表面エネルギーを化学的に低下させて粒子の球状化を促進します。固相焼結では、過剰な液相による多孔質構造を避けるため、低温が使用されます。雰囲気も制御に影響を与えます。水素は酸化物を還元して清浄な界面を維持し、窒素または真空は残留ガスによる多孔性を抑制します。時間パラメータは十分な拡散を可能にします。保持時間を長くすると、バインダー相のタングステン原子の限定的な溶解が促進され、その後の冷却により微細な相が析出して構造が強化されます。

制御効果は粒径の調整にも反映されています。急速加熱では微粒子が保持され、ゆっくりとしたプロセスで成長します。化学的メカニズムにはオストワルド成長が関与しており、大きな粒子が小さな粒子を飲み込み、均一なサイズを実現します。相分布は割合によって制御されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

バインダー相の割合が増加すると、構造は連続ネットワークに向かう傾向があり、凝集性が向上します。焼結中に界面化学が徐々に形成され、元素傾斜領域が現れ、タングステンとニッケルの相互拡散により遷移層が形成され、結合が強化されます。欠陥制御が重要な焦点です。液相充填により気孔率が低減し、転位は高温で回復し、化学不純物は揮発して排出され、凝集を防ぎます。焼結構造は圧延の基礎となり、均一なマイクロ組織は亀裂のない変形を容易にします。

さらに、制御効果は熱処理段階にも及んでいます。焼結後の焼鈍処理により、組織はさらに均質化され、元素の拡散と配置調整が行われ、粒界組成が最適化されます。プロセスパラメータを組み合わせることで、ターゲットを絞った制御が可能になります。例えば、微細粒組織を追求する場合、低温で保持時間を長くすることで、粒界移動を化学的に抑制します。雰囲気の高純度も制御効果に影響を与えます。高純度環境は酸化物介在物を低減し、構造の完全性を維持します。不純物元素の処理は焼結に反映され、リンと硫黄は揮発によって除去され、残留量が少ないため構造が安定します。環境適応性の観点から、この制御により、温度変化下でも構造が比較的安定しており、熱サイクル用途に適しています。

4.4.2 タングステン合金板の機械的性質に対する圧延プロセスの影響メカニズム

圧延工程は、主に変形誘起構造変化を通じてタングステン合金板の機械的特性に影響を与え、強度、靱性、硬度を調節します。このメカニズムには、転位の蓄積、結晶粒微細化、相間調整など、多層的な相互作用が関与しています。熱間圧延でも冷間圧延でも、圧延中はタングステン相が主な応力を負担し、バインダー相が変形流動を補助することで、化学結合ネットワークの再構築、転位密度の増加、降伏強度の向上につながります。高温の熱間圧延は動的回復を引き起こし、拡散によって結晶欠陥の治癒が促進され、脆化が防止されます。冷間圧延は、すべり系の活性化、圧延方向に沿ったタングステン粒子の伸長、繊維状組織の形成、引張特性の向上など、加工硬化をさらに促進します。

影響メカニズムは靱性調整にも反映されています。中間焼鈍を伴う多パス圧延は、化学拡散によって応力分布を調整し、残留応力による割れ発生の傾向を低減します。圧下率制御メカニズムは重要であり、大きな圧下率は再結晶核を誘発し、結晶粒を微細化し、強度と靱性のバランスを改善します。相間メカニズムでは、バインダー相がバッファ層として機能し、変形エネルギーを吸収し、化学結合の強さが配位効率を決定します。欠陥の発達もメカニズムの構成要素であり、圧延によって転位壁が生成され、化学的には元素の偏析とピンニングによって組織が安定化されます。表面効果もメカニズムに反映され、圧延仕上げは疲労性能に影響を与え、化学的には酸化開始点を減少させます。

さらに分析を進めると、このメカニズムは温度に大きく依存することが明らかになり、温間圧延と熱間圧延の利点を組み合わせたものとなっています。このメカニズムは回復と硬化の両方を示し、機械的特性を最適化します。圧延速度などのプロセスパラメータはこのメカニズムに影響を与え、回復時間を急速に短縮し、硬度を高めます。不純物元素はメカニズムに干渉し、酸素などの元素は亀裂を引き起こすため、これらの影響を軽減するために事前の精製が必要となります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.4.3 タングステン合金板の化学的性質に対する表面処理の最適化パス

表面処理は、主にめっき、酸化、化学修飾などの方法によってタングステン合金板の化学的性質を最適化し、保護界面を形成します。この方法により、耐腐食性、耐酸化性、親和性などの化学的挙動が向上します。このプロセスでは、表面洗浄とそれに続く膜堆積により、媒体の侵入を防ぐ新しい化学相層が形成されます。電気めっきが一般的で、ニッケルまたは金の層を電気化学的に堆積させ、イオン還元によって緻密な膜の形成を最適化します。密着性はマトリックス元素の拡散に依存します。真空めっきは高温環境で使用され、蒸発アルミニウム堆積によってアルミナバリアが形成され、高い化学的安定性が得られます。化学研磨は表面欠陥を除去します。酸性条件下では、タングステン相がわずかに溶解し、界面が滑らかになり、化学的不活性が向上します。

最適化パスウェイには、複合処理、コーティング後の熱拡散、化学結合の強化、そしてパスウェイ内における元素の相互浸透による傾斜領域の形成も含まれ、接着性を向上させます。イオン注入パスウェイは窒素または炭素を導入し、表面を硬化させると同時に化学的性質を最適化します。このメカニズムは、結晶格子への原子の埋め込み、電子構造の変化、そして誘電抵抗の向上を伴います。陽極酸化パスウェイは酸化膜を生成します。電解条件下では、タングステン酸化物層が自己生成します。パスウェイは電圧を制御して厚さを調整し、化学的に不活性化膜層が基板を不活性化します。洗浄前処理はパスウェイの基本であり、超音波またはプラズマ処理によって汚染物質を除去し、その後の均一な接着を保証します。

さらに、コーティング工程では温度制御が非常に重要です。低温処理は基材の構造を維持し、高温拡散は界面を最適化します。不純物はコーティング工程に影響を与え、表面残留物は膜形成を阻害するため、これを軽減するために多段階の洗浄が必要となります。環境適応型コーティング工程では、酸性およびアルカリ性媒体に適したコーティング剤を選択し、その効果を化学的適合性によって決定します。アニール後の処理により膜層がさらに安定化し、均一な拡散が確保され、長期的な化学的性能が向上します。

4.5 特殊環境下におけるタングステン合金板の構造と性能応答

タングステン合金板は、主に材料の外部環境への適応を反映しています。この応答には、微細構造の変化とマクロ的な挙動の調整が含まれ、高温、放射線、圧力などの条件下で材料がどのように機能を維持するかを理解するのに役立ちます。構造応答には、結晶粒の変化、相間相互作用、欠陥ダイナミクスが含まれ、性能応答は、高温での熱安定性、放射線下での耐薬品性、圧力下での機械的变化など、機械的、熱的、化学的側面に反映されます。応答メカニズムは、化学結合の弾性と相構造のバランスに起因します。タングステン相は骨格支持を提供し、パイonder相は緩衝材として機能します。環境要因の重なりは応答を複雑化させます。温度上昇は拡散を誘発し、放射線は電子構造に影響を与え、圧力は原子間隔を変化させます。相関分析は、原子レベルの結合再構築からマクロ的な性能劣化まで、マルチスケールの視点を重視します。合金の最適化などのプロセス前処理により応答性が向上し、元素比の調整により環境内での構造が徐々に安定します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実際の応答においては、構造と性能の相互作用がフィードバックループを形成します。初期構造が応答の開始点を決定し、その後の変化が性能の耐久性に影響を与えます。不純物元素の役割を考慮する必要があります。例えば、酸素は応答のマイナス変化を加速させる可能性があります。これは精製によって軽減できます。温度勾配や放射線量の緩やかな変化に対しては、応答は非線形性を示し、初期には安定し、後期には加速します。圧力応答には体積圧縮が関与し、化学結合の圧縮は強度を高めます。

4.5.1 高温条件下でのタングステン合金板の構造安定性の変化

タングステン合金板は、主に熱活性化拡散プロセスと相間熱膨張の調整によって生じます。これらの変化は、材料全体の完全性と機能の連続性に影響を及ぼします。高温では、タングステン相の体心立方格子は比較的安定していますが、バインダー相の固溶体で原子移動が始まります。タングステン原子は粒子の端からバインダー相に溶解し、過飽和状態を形成します。温度が上昇すると、この溶解が激しくなり、粒子の表面曲率が変化し、小さな粒子が徐々に収縮し、大きな粒子のサイズがわずかに増加して、構造が粗大化します。このメカニズムには界面化学が関与しています。熱エネルギーが元素拡散を促進し、ニッケルまたは銅原子がタングステン相に浸透して薄い固溶体ゾーンを形成し、応力分布を調整して界面剥離を防ぎます。冷却すると、過飽和タングステン相は微細な相を析出させ、粒界を固定して部分的に初期構造を復元しますが、繰り返しサイクルを実行すると残留変化が蓄積される可能性があります。

構造変化は欠陥ダイナミクスにも反映されます。高温では、転位登攀が活発になり、空孔濃度が増加し、化学的には酸素などの不純物が粒界に蓄積して、移動速度に影響を与える化合物膜を形成します。相分布は徐々に変化します。バインダー相はわずかに膨張する可能性があります。タングステン相の膨張係数が低いこと、全体的な変形は緩和されます。変化の程度は環境暴露期間に依存します。短期暴露では構造回復が促進されますが、長期暴露では再結晶核が形成され、新しい粒子が形成されて安定性が最適化されます。これらの変化中に化学結合が再構築されます。金属結合はタングステン相の強度を維持し、共有結合成分は界面の耐熱性を高めます。アニーリングによりこれらの変化を制御できます。冷却速度を制御することで好ましい構造が固定され、過度の粗大化を回避できます。さらに分析を進めると、温度閾値の変化は合金系に関連していることが明らかになりました。ニッケル-鉄系は高温で徐々に粗大化するのに対し、ニッケル-銅系は銅の熱伝導率により均一に反応します。不純物制御はこれらの変化に影響を与えます。リンなどの元素は局所的な軟化を引き起こすため、事前の精製が必要です。周囲に湿度が存在する場合、水分は表面酸化を促進し、外側から内側への構造変化を引き起こし、傾斜領域を形成する可能性があります。機械的応答は構造変化と相関しており、高温クリープ下では粒子が滑り、バインダー相が協調的に変形します。熱サイクル環境下では、これらの変化は疲労の蓄積を示しており、ドーピングによって粒界の弱화를軽減する必要があります。

4.5.2 放射線環境下におけるタングステン合金板の化学的構造耐性

放射線環境下におけるタングステン合金板の耐久性は、主に材料の複合微細構造がエネルギー付与に対して示す応答に基づいています。この耐性は、放射線や粒子の影響下でも、材料が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

化学結合ネットワークと相構造の完全性を維持するのに役立ちます。X線や電子線などの放射線を受けると、タングステン相の高原子番号がエネルギーを吸収し、カスケード変位を引き起こします。化学的には、原子結合は一時的に切断され、その後再結合することで点欠陥クラスターを形成します。構造耐性のメカニズムは電子構造の調整に関与しています。放射線は電子励起を誘発し、タングステン原子の外殻電子をジャンプさせますが、これらはすぐに緩和して平衡状態に戻ります。バインダー相の固溶体は衝撃を緩和し、ニッケルまたは銅原子の均一な分布はエネルギーを分散させ、局所的な損傷を防ぎます。界面化学も耐性に関与しています。傾斜領域における元素の相互浸透は結合強度を高め、放射線によって変位した原子は自己修復します。

この耐性は欠陥の進化にも反映されます。放射線は空孔-格子間原子対を生成し、化学拡散は再結合を促進し、蓄積を減少させます。相分布は安定を保ち、タングステン粒子がバインダー相を遮蔽することで放射線束が減少します。これらの変化は照射量に大きく依存します。低照射量では構造が微調整され、高照射量では膨張が起こり、わずかな体積変化はドーピングによって緩和されます。化学状態は放射線に反応し、酸化膜が形成され、表面不活性化によって耐性が向上します。アニール処理は耐性をさらに高めます。熱エネルギーは欠陥の移動を促進し、格子秩序を回復させます。

合金系は耐久性において大きな違いを示します。ニッケル-鉄系は磁場照射下で協調的な反応を示しますが、ニッケル-銅系は導電性によりエネルギーを均一に分散させます。不純物元素は耐久性に影響を与えます。酸素などの元素は放射線生成物を捕捉し、精製と制御を必要とする化合物を形成します。放射加熱などの環境条件下では、耐久性は相乗効果を示し、熱拡散によって欠陥の治癒が促進されます。機械的な関係では、放射線硬化は強度を向上させますが、韌性の変化を監視する必要があります。長期曝露下では、耐久性は徐々に変化し、組織が放射線場に適応して継続的な機能を維持します。

4.5.3 極圧下におけるタングステン合金板の性能向上

タングステン合金板は、主に構造の圧縮応答と相間協調の動的プロセスに起因します。この動的プロセスは、材料の機械的挙動と化学的安定性に影響を与え、高圧下での適応メカニズムの理解に役立ちます。圧力が加えられると、タングステン相の格子が圧縮され、原子間距離が減少し、化学結合強度が増加し、硬度が増加します。この変化には体積変化と材料全体の収縮が伴いますが、バインダー相の延性がタングステン相の脆性傾向を緩和し、断片化を防ぎます。このメカニズムでは、転位運動が活発で、高圧下ですべり系が活性化され、化学元素の分布が調整され、応力集中が分散されます。界面は重要な役割を果たし、勾配領域での変形協調が分離を防ぎます。

性能の進化は、韌性と強度のバランスにも反映されます。強度は初期に増加し、韌性は徐々に低下し、圧力解放後には部分的に回復します。欠陥のダイナミクスは系統的に現れ、空孔の圧縮によって強度が低下し、転位壁が形成され、化学拡散によって安定化が促進されます。相分布は圧力に応答し、タングステン粒子はより密に充填され、バインダー相が隙間を埋めることでコヒーレンスが最適化されます。性能向上の圧力閾値はシステムに依存します。ニッケル-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

鉄系は漸進的に硬化しますが、ニッケル-銅系は熱伝導性により均一に反応します。アニール後の高圧処理により、性能向上を制御し、構造平衡を回復することができます。

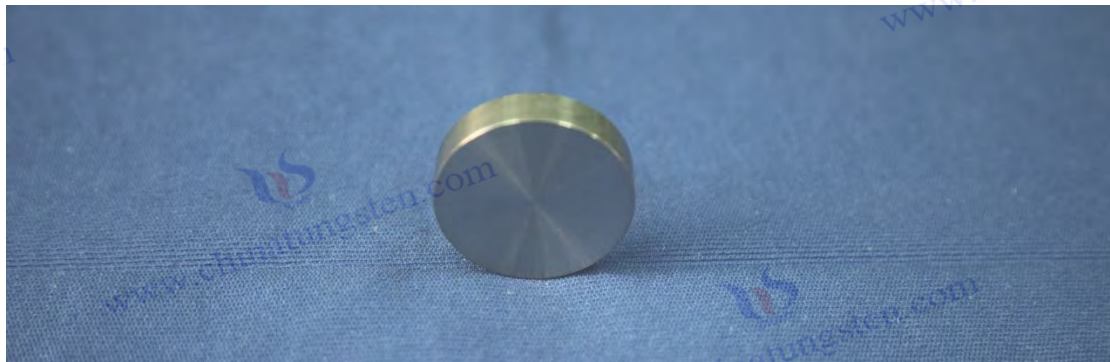
規則的な温度重ね合わせ効果は顕著であり、高圧加熱下では拡散が促進され、進化が加速されますが、これは冷却によって制御できます。不純物元素は規則性を阻害し、リンなどの元素は局所的な弱領域を誘発するため、これを緩和するには精製が必要です。圧力サイクルなどの環境要因は進化に疲労を引き起こし、緩やかな構造変化にはドーピングの最適化が必要です。化学的性質の面では、高圧下での結合圧縮は耐食性を向上させ、表面バリアの密度を高めます。長期間の高圧下では、進化は適応を反映し、性能が安定する傾向があり、継続的な負荷に耐えます。

4.6 CTIA GROUP LTD タングステン合金シート MSDS

CTIA グループ株式会社 タングステン合金板のMSDSは、GB/T 16483-2008「化学品安全データシートの記載内容及び順序」などの規格に基づいています。製品の具体的な成分（タングステン、ニッケル、鉄、銅の割合など）と併せて、物理化学的特性、危険性の特定、緊急時対応策について詳細に説明しています。

タングステン合金は、高密度と高硬度の基礎となるタングステンを主成分とし、ニッケル、鉄または銅をバインダー相として添加し、その割合はシリーズに応じて調整されます。例えば、タングステン-ニッケル-鉄系では、ニッケル-鉄比が濡れ性と強度のバランスを保ちます。炭素や酸素などの微量元素は、脆化相の形成を防ぐため、低濃度に抑えられています。化学的には、この部分ではCAS番号を用いて元素を識別します。タングstenはCAS 7440-33-7、ニッケルはCAS 7440-02-0です。開示される不純物には、原材料に由来するリンや硫黄などの潜在的な汚染物質が含まれており、それらの含有量を低減するための精製プロセスが重視されています。

組成情報には、合金相構造の説明も含まれています。この二相複合材料では、タングsten粒子は体心立方晶系であり、バインダー相は面心立方晶系の固溶体です。化学的に安定しており、揮発性成分は含まれていません。溶解度分析の結果、この材料は水に不溶であることが示されています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

Precision customization: support high density (17-19 g/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

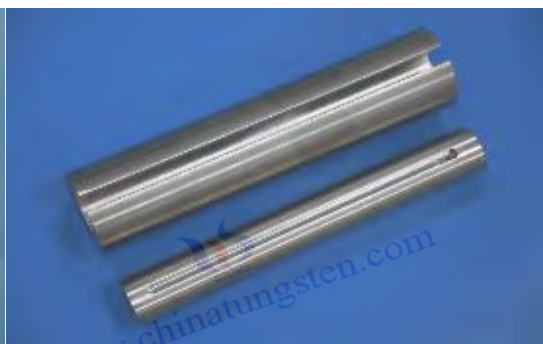
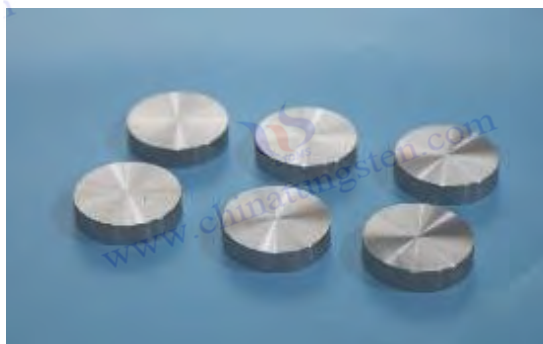
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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
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

第 5 章 タングステン合金板の性能試験および特性評価方法

5.1 タングステン合金板の化学組成分析技術

タングステン合金板は、主に多元素複合特性をターゲットにしており、分光法、蛍光法、湿式化学法を用いて、タングステン、ニッケル、鉄、銅などの主要な元素や微量不純物の定性および定量検出を行っています。これらの技術は材料の品質管理に役立ち、合金の比率、純度、均質性を検証するのに役立ちます。原子吸光分光法と発光分光法は溶解したサンプルの元素決定に適しており、蛍光X線分光法は非破壊で迅速な分析を提供し、化学滴定は特定の微量元素に使用されます。分析前のサンプル調製には、切断、溶解、または表面洗浄が含まれます。溶解では通常、硝酸とフッ化水素酸の混合物を使用して難溶性タングステン相を処理します。技術の選択は元素の種類と含有量によって異なります。蛍光法は、含有量の多いタングステンなどの主要な元素に適しており、微量元素には高感度の分光法が必要です。分析結果はプロセス調整の指針となり、産業用途における材料の信頼性を確保します。

これらの技術ではマトリックス効果も考慮されています。タングステンマトリックスの高密度は信号に干渉する可能性があります。標準サンプルを用いたキャリブレーションによって軽減されます。蛍光分光法などの非破壊法はオンライン検出を容易にし、吸光分光法などの破壊法はより高い精度を提供します。不純物分析は、組織の安定性に影響を与える酸素、炭素、リンなどに焦点を当てています。蛍光スクリーニングに続いて精密なスペクトル分析を行うなど、これらの技術を組み合わせて完全なシステムを構築することも可能です。環境要因を考慮すると、汚染を避けるため、分析はクリーンな実験室で実施する必要があります。

5.1.1 タングステン合金板の原子吸光および発光スペクトル分析

タングステン合金板は、試料を溶解した後、元素を定量する手法として広く用いられています。原子吸光分析（AAS）は原子による特性光の吸収を利用し、発光分析（AE）は励起原子が放出する特性スペクトル線を利用します。これら 2 つの方法を組み合わせることで、タングステン、ニッケル、鉄、銅などの主要元素に加え、微量不純物も測定できます。原子吸光分析では、試料を酸に溶解して溶液を調製し、これを噴霧して炎炉または黒鉛炉に導入します。元素原子は中空陰極ランプから放出される特性光を吸収します。吸収強度は濃度に依存し、標準曲線を用いて含有量を計算します。この方法は、タングステン合金板、特に低濃度のニッケルや鉄の測定に非常に適しており、化学的基底状態原子吸光機構によって選択性が確保されます。試料調製においては、タングステンの難溶性に注意が必要です。溶解には、硝酸とフッ化水素酸の混合液が一般的に使用されます。フッ化物イオンによる干渉は、ホウ酸を添加して錯体を形成することで回避されます。フレイム原子吸光法は高濃度元素の分析に適しており、グラフアイト炉原子吸光法は微量元素の検出感度を向上させます。

発光分光法（OES）は、溶解したサンプルをプラズマまたは電気アークに導入して励起し、原子またはイオンから放出される特性スペクトル線を検出します。強度は回折格子分光法と検出器によって記録され、多元素の同時分析が可能になります。タングステン合金板では、タングステンの高融点のために、誘導結合プラズマ（ICP-OES）などの高エネルギー励起源が必要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

であり、化学的に励起された状態遷移から豊富なスペクトル情報が得られます。タングステンマトリックスはバックグラウンド干渉を引き起こす可能性があるため、マトリックスマッチング補正が必要です。マトリックスマッチング補正は、内部標準法またはバックグラウンド減算を使用して最適化されます。OES の利点は、多元素分析を迅速に実行できることで、製造バッチのバリデーションに適しています。この2つの技術は互いに補完し合っており、AAS は特定の元素に対してより正確であるのに対し、OES は幅広いスペクトルをカバーします。

分析プロセスには、機器の校正、認証標準液を用いた曲線の作成、そして偏析を防ぐためのタングステン合金板サンプルの均一なサンプリングも含まれます。OES では、イオン化などの化学的干渉は抑制剤を添加することで軽減されます。安全上の理由から、酸溶解にはエアレーションが必要です。結果は通常、ニッケル-鉄やニッケル-銅などの合金系の化学量論的バランスを評価するために、質量パーセントで表されます。

5.1.2 タングステン合金板の蛍光 X 線分析による組成の定量法

タングステン合金板の定量分析に用いられる蛍光 X 線分析法（XRF）は、非破壊的な表面分析技術です。X 線を用いて試料原子を励起し、その強度が元素含有量と相関する特性蛍光を発生させます。これにより、タングステン、ニッケル、鉄、銅などの元素を迅速に分析できます。この分析法は、波長分散型（WD-XRF）とエネルギー分散型（ED-XRF）に分けられます。前者は高解像度で精密な実験室分析に適しており、後者は持ち運びが可能で現場での分析に適しています。試料の準備は簡単で、タングステン合金板の表面は、酸化層による干渉を避けるために研磨と洗浄を行うだけで済みます。化学的には、特性 X 線は内殻電子遷移に由来するため、元素の特異性を確実に特定できます。X 線管球などの励起源から一次 X 線が生成され、試料原子に吸収されて二次蛍光を發します。この蛍光は検出器によって収集されます。

定量分析は、基本パラメータ法と経験的補正法のいずれかに基づいています。前者はマトリックス効果を計算し、後者は標準サンプルを用いて曲線を作成します。タングステン合金板はタングステン含有量が高いため、強い吸収が生じるため、緩和のためにマトリックスマッチングした標準試料が必要です。WD-XRF は結晶分光法によりスペクトル線を正確に分離するため、主要元素の定量に適しています。ED-XRF はエネルギー分解能は低いものの、多元素同時検出に非常に効率的です。この方法の利点は、非破壊検査であるため、サンプルの完全性を維持し、再現性の高い測定を可能にすることです。深さ方向の分析は数マイクロメートル以内の表面に限定され、均一な板材に適しています。

スペクトル線の重なりなどの化学的干渉は、ソフトウェアベースのスペクトル解析によって解決されます。タングステンの L 線とニッケルの K 線が重なり合う可能性については、アルゴリズムによる補正が必要です。真空またはヘリウム雰囲気下では軽元素の検出効率が向上しますが、タングステン合金板の場合、重元素は大気条件下で容易に検出されます。ハンドヘルド XRF 技術は、生産環境における迅速なスクリーニングにも応用されています。結果の信頼性は認証標準物質を用いて検証されており、偏差は許容範囲内に抑えられています。このシステムは化学試薬を必要とせず、高い安全性を備えています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.3 タングステン合金板中の微量元素の化学滴定分析

タングステン合金板の分析は、典型的な湿式化学法です。試料を溶解し、標準試薬と反応させます。終点は指示薬の色の変化または電位変化によって決定されます。この方法は、リン、硫黄、または特定の金属イオンなどの特定の微量不純物に適しています。試料は分析前に完全に溶解する必要があります。タングステン合金板は、多くの場合、硝酸とフッ化水素酸の混合液で加熱処理されます。これにより、タングステンの可溶性錯体が化学的に形成され、沈殿による干渉が回避されます。リンなどの微量元素は、リンモリブデン青との錯形成後に滴定されることが多く、硫黄は沈殿によって分離してから定量されます。滴定法には、酸化還元滴定、錯形成滴定、酸塩基滴定などがあり、元素の特性に基づいて選択されます。

錯滴定では、ニッケルまたは鉄の微量な偏差を測定するために、一般的に EDTA を滴定液として用い、化学平衡が反応を制御します。硫黄または特定の遷移元素には酸化還元滴定が適しており、過マンガン酸カリウム滴定法またはヨウ素滴定法が一般的に用いられます。指示薬の選択は非常に重要です。明確な色の変化が終点を示します。サンプルの量と濃度は正確でなければなりません。微量分析では、誤差を増幅し、複数の同時分析を行うことで誤差を低減します。化学分離の前処理も必要です。例えば、リンは主元素からの干渉を避けるために、タングステンマトリックスから抽出する必要があります。

この方法の利点は、装置が簡便でコストが低く、スペクトル測定結果を実験室で検証できることです。感度は、分光光度計による終点測定などの反応増幅によって向上させることができます。安全対策としては、酸の取り扱い中は適切な換気を確保し、フッ化水素の危険性を回避することが挙げられます。

5.2 タングステン合金板の微細組織評価方法

タングステン合金板の分析には、主に電子顕微鏡（SEM）、スペクトル分析、回折法が用いられます。これらの手法は、材料の粒度分布、相組成、欠陥特性を様々なスケールで明らかにし、構造と特性の関係を理解するのに役立ちます。走査型電子顕微鏡（SEM）は表面形態と組成分布の解析に、X線回折（XRD）は相と結晶構造の解析に、透過型電子顕微鏡（TEM）は内部欠陥の解析に用いられます。特性評価前の試料調製には、汚染物質の混入を防ぐため、切断、研磨、イオンシンニングなどの処理が行われます。手法の選択は研究の焦点によって異なります。表面分析には SEM、結晶情報には回折、ナノスケールの欠陥には TEM が適しています。これらの手法を組み合わせることで、多次元的な特性評価が可能になります。例えば、SEM と回折を組み合わせることで相構造を確認できます。これらの手法の化学的基礎は、電子と物質の相互作用にあり、励起信号は原子配列を反映します。酸化を防ぐためには、真空などの環境制御が不可欠です。

5.2.1 走査型電子顕微鏡によるタングステン合金板の形態と組成マッピング

タングステン合金板は、微細構造を特性評価するための一般的な方法です。試料表面を電子ビームで走査し、二次電子信号と後方散乱電子信号を生成することで、タングステン粒子の形態

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

バインダー相の分布、および界面特性を明らかにします。同時に、エネルギー分散型分光法（EDS）を用いて元素の空間分布をマッピングします。この方法は、電子と原子の相互作用に基づいています。入射電子は試料原子を励起して特性信号を生成します。二次電子は表面形態を反映し、後方散乱電子は原子番号の違いに依存します。タングステン原子番号が大きいため、粒子はバインダー相よりも明るくなり、識別が容易になります。試料作製には、機械研磨と電解研磨またはイオン研磨が行われます。帯電の影響を避けるため、表面には炭素または金で導電性メッキを施す必要があります。イメージングは真空環境で行われ、加速電圧を調整することで解像度と侵入深さのバランスをとります。低電圧は表面の細部の観察に適しており、高電圧はより深い観察を可能にします。

形態観察では、タングステン合金板の二相構造が明確に現れます。タングステン粒子は球形または多面体で、バインダー相が隙間を埋めて連続的なネットワークを形成しています。倍率を調整することで、粒界の亀裂や細孔を観察できます。化学組成マッピングでは、X線検出器を用いて特徴的なピークを収集し、ソフトウェア処理によって元素分布マップを作成します。タングステン領域は高密度の信号を示し、ニッケルまたは鉄はバインダー相に濃縮されているため、偏析領域または傾斜領域が明らかになります。マッピング解像度は検出器の効率とスキャン時間に依存し、スキャン時間が長いほど信号対雑音比が向上します。この手法の利点は、形態情報と化学情報を直感的に組み合わせることができる点にあり、焼結不均一性によって引き起こされる構造欠陥の分析に役立ちます。電子後方散乱回折などの補助モードは、結晶方位をさらに詳細に特徴付けることができます。化学的には、粒界に偏析した元素が回折パターンに影響を与えます。

さらに、この方法は熱処理後の構造変化を追跡する役割を果たします。焼きなましサンプルの比較では、粒子の球状化と相間結合が改善されていることが示されています。環境スキャンモードでは湿式サンプルの観察が可能です。タングステン合金シートは通常、乾式状態で分析されます。画像処理ソフトウェアは、粒度分布と相体積率の定量化を支援します。化学マッピングデータを形態画像と重ね合わせて複合ビューを提供できます。酸素などの不純物元素のマッピングにより、酸化物介在物の位置が明らかになり、精製プロセスの指針となります。この方法の限界は表面感度であり、深部構造を評価するには断面観察が必要です。要約すると、走査型電子顕微鏡による形態および組成マッピングは、タングステン合金シートの包括的な微視的特性評価アプローチを提供し、電子信号メカニズムによる構造化学の可視化を可能にし、精密用途における材料の品質評価をサポートします。この方法はまた、構造の不均一性を効果的に識別し、処理パラメータの最適化を促進することも可能にします。

5.2.2 タングステン合金板の X 線回折位相と結晶構造解析

タングステン合金板の非破壊特性評価技術です。X線と結晶の原子面との相互作用を利用して回折ピークを生成し、相組成を特定して格子定数を解析することで、合金系の相平衡と構造安定性の理解に役立ちます。この分析はブラッグの法則に基づいています。入射 X 線は結晶によって反射され、ピーク位置は格子面間隔に対応し、強度は原子配列を反映します。試料は、散乱干渉を避けるために表面が滑らかなシート状または粉末状で使用できます。一般的に Cu-K α 線が線源として使用され、検出器が回折信号を収集します。ソフトウェアは標準カードと照

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合することで、タングステンの体心立方ピークやバインダー相の面心立方ピークなどの相を識別します。相分析では、タングステン合金板は強く鋭いタングステンのピークを示し、バインダー相のピークは弱くなります。合金元素の溶解によりピークシフトが発生し、固溶度が明らかになります。

結晶構造解析には、格子定数を計算するためのピークフィッティングが含まれます。タングステン相の α パラメータは温度によってわずかに変化しますが、バインダー相は鉄または銅の比率に応じて膨張または収縮します。回折に対する化学組成の影響はピーク幅に反映されます。結晶粒が微細化するとピークは広がり、再結晶化したサンプルはピークが狭まります。定量的相分析では、積分強度比を使用して体積分率を推定し、焼結相の形成を理解するのに役立ちます。この方法の利点は、サンプルのバッチを迅速にスキャンできること、実験室とポータブルデバイスの両方で操作できることです。その場合加熱回折などの高度なモードでは、高温相転移を追跡し、タングステンの溶解挙動を化学的に観察します。データ処理にはバックグラウンド減算とピーク分離が含まれ、複雑なスペクトルにはマルチピークフィッティングが必要です。

さらに、この分析は圧延変形組織の評価にも有効です。集合組織ピーク強度の変化は方位分布を反映し、化学的には変形誘起ひずみがピークシフトに影響を与えます。酸化物などの不純物相は、弱いながらも検出可能なピークを示し、精製の指標となります。真空または不活性ガスを用いた環境制御により、酸化ピークの干渉を回避できます。これらの手法を電子顕微鏡などの他の特性評価手法と組み合わせることで、回折結果を確認できます。

5.2.3 透過型電子顕微鏡を用いたタングステン合金板の微細欠陥の観察

タングステン合金板は、高解像度の特性評価技術です。高エネルギー電子ビームを使用して薄いサンプルを貫通し、明視野および暗視野画像と回折パターンを生成することで、転位、空孔、粒界、析出物などのナノスケールの欠陥を明らかにし、構造が性能に与える影響の分析に役立ちます。この観察は、電子波と結晶の相互作用に基づいています。透過型電子顕微鏡は欠陥のコントラストを明らかにし、電子回折は局所的な結晶情報を提供します。サンプルは、曲がりや汚染を避けるために、イオンの数十ナノメートルまで薄くする必要があります。高密度のタングステンを貫通するために、高い加速電圧が使用されます。化学的には、電子散乱は原子番号に依存し、タングステンはバインダー相と比較的強いコントラストを持っています。欠陥観察では、明視野画像で転位線が曲がって表示され、化学的転位コア要素の偏析が移動に影響を与えます。

粒界観察では界面構造が明らかになり、高解像度画像では原子配列が示されます。化学的には、ホウ素などの偏析元素が界面に蓄積し、結合が強化されます。微細なタングステン粒子などの析出相は、バインダー相内の格子状に画像化され、その形状と分布を観察できます。暗視野画像では特定の欠陥が強調表示され、回折比較では転位の種類が分析されます。この手法の利点は、原子レベルの分解能と、厚さの影響を排除するエネルギーフィルタリングの組み合わせにあります。その場合加熱は欠陥のダイナミクスを観察するために使用され、高温拡散によって空

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

孔を化学的に修復します。データ処理には、欠陥モデルを確認するための画像フィルタリングとシミュレーションマッチングが含まれます。

さらに、この観察は圧延変形欠陥の追跡にも有効です。冷間加工した試料は高密度の転位ネットワークを示し、焼鈍処理後に減少します。針状化合物などの不純物誘起欠陥を画像化することで、制御の指針を得ることができます。炭素汚染を避けるため、高真空雰囲気を使用します。この手法は、走査透過モード（STEM）による元素マッピングと組み合わせることで、欠陥の化学情報を拡張します。

5.3 タングステン合金板の性能指標試験仕様

タングステン合金板は、主に国家規格、業界規格、および社内仕様にに基づいています。これらの規格には、密度、硬度、機械的強度、熱伝導率、電気伝導率などの主要なパラメータを測定する方法が網羅されており、工業用途における材料の一貫性と信頼性を確保しています。試験プロセスでは、サンプルの代表性、機器の校正、一定湿度・室温条件下での動作などの環境制御が重視されます。密度と充填密度は水置換法またはガス置換法を用いて測定され、硬度はブリネル法、ピッカース法、またはロックウェル法を用いて測定されます。規格には、均一性を反映するために複数のサンプルの平均値を用いる再現性要件も含まれています。化学組成は性能試験に影響を与えるため、タングステン含有量が多い場合は測定誤差の補正を考慮する必要があります。試験報告書には、機器のモデル、標準番号、および偏差分析を記録する必要があります。

5.3.1 タングステン合金板の密度および充填密度の試験方法

タングステン合金板の測定には、アルキメデスの水置換法とガス置換法があります。前者は日常の実験室に適しており、後者は高精度のサンプルや液体への浸漬に適さないサンプルに適しています。この方法では、体積置換の原理に基づいて材料の密度を計算し、理論密度と比較して充填密度を評価します。水置換法では、まずサンプルを乾燥させて重量を測定し、次に蒸留水またはエタノールに浸漬して湿重量を測定します。化学的には、合金と反応せず、表面溶解を防ぐような液体を選択する必要があります。計算式では、液体の密度と温度補正を考慮して、正確な測定を保証します。サンプルの形状が規則的な場合は、体積を直接測定します。不規則なシートの場合は、細い糸で吊り下げて浸漬します。気泡による干渉を減らすために、複数回の測定を行い、平均化します。

ガス置換法では、ヘリウムまたは窒素を使用します。サンプルは既知容量の容器に入れられ、ガス圧の変化がサンプル容量を反映します。化学的に不活性なガスは酸化を防ぎます。この方法の利点は乾燥状態で操作できることで、薄いシートや酸化しやすい表面に適しています。密度の計算には、成分の加重平均に基づく理論的な密度基準が必要です。タングステンが主成分の場合、理論値は純タングステンの密度に近くなります。試験仕様では、油や酸化スケールのない清浄なサンプルを使用し、表面研磨後に測定を行うことが求められます。周囲温度は標準室温に保たれ、湿度は低く保たれ、吸着水の影響を防ぎます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

さらに、この方法は生産バッチの検証にも広く利用されており、均一性を評価するための多点サンプリングや、偏差が大きい場合の焼結プロセスの追跡に用いられます。化学純度は結果に影響を与え、不純物や多孔性は測定密度を低下させます。機器の校正には標準ブロックが使用され、定期的な検証が必要です。薄片を試験する場合は、曲げ誤差を避けるため、積み重ねたり折り畳んだりする必要があります。結果は、密度に対する割合として、立方センチメートルあたりのグラム数で表されます。仕様では安全性が重視されており、水置換法では液体の蒸発に注意し、ガス法では密閉性を確認する必要があります。

5.3.2 タングステン合金板の硬度試験方法

タングステン合金板には、ブリネル硬度、ピッカース硬度、ロックウェル硬度の試験があります。試験の選択は、材料の厚さと期待値によって異なります。ブリネル硬度は全体の硬度に適しており、後者の 2 つは表面または薄い板に使用されます。これらの方法では、くぼみの大きさや深さに基づいて塑性変形に対する抵抗を評価します。ブリネル硬度試験では、鋼球または超硬合金球の圧子を使用し、指定された荷重下でサンプル表面に押し付けます。指定された時間保持した後、圧子の直径を測定して硬度値を計算します。化学的には、圧子の材質は、タングステン相による傷を避けるために耐摩耗性が必要です。サンプル表面は、裏面の変形を防ぐために滑らかに研磨され、十分な厚さである必要があります。荷重の選択は合金の高い硬度を考慮しており、通常は明確なくぼみを生成するために高くなります。

ピッカース硬さ試験では、広い荷重範囲を持つダイヤモンドピラミッド圧子を使用し、微小領域の測定に適しています。圧痕の対角線測定は顕微鏡下で行われ、ダイヤモンドの化学的不活性性により精度が確保されます。薄板試験では、貫通を防ぐため低荷重が使用されます。ロックウェル硬さ試験は、予備荷重に続いて主荷重をかけることで迅速に実施されます。深さの差は直接測定され、タングステン合金板には HRA または HRC スケールが適しています。仕様では、多点試験、グリッド分布の平均化、均一性の評価が求められます。環境振動制御と機器の水平設置が不可欠です。

さらに、この方法は熱処理後の性能追跡にも有効であり、焼鈍処理されたサンプルで観察された硬度の低下からの回復を示します。化学組成は結果に影響を与え、バインダー相の割合が高いほど硬度は低くなります。コーティングなどの表面処理は、測定前に基材から除去する必要があります。機器の校正と定期的な検証には標準ブロックを使用します。エッジ効果を回避するため、薄板の曲げ試験と固定試験を実施します。結果は HB、HV、または HR 単位で表され、荷重が指定されます。仕様では安全性を重視し、圧子の破損を防ぐために圧子保護が施されています。

5.3.3 タングステン合金板の耐食性試験方法

タングステン合金板の耐食性を評価する試験方法としては、浸漬試験、電気化学試験、塩水噴霧試験などがあります。これらの試験方法は、さまざまな腐食環境をシミュレートして、酸性、アルカリ性、塩分を含む媒体に対する材料の耐性を評価し、表面保護と組成設計の最適化に役立ちます。浸漬試験は最も基本的な方法です。サンプルを指定された腐食性媒体に置き、重量

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

変化、表面形態、溶液組成を定期的に観察します。化学的には、硫酸、塩酸、塩化ナトリウム溶液などの媒体を選択し、温度と時間を標準に従って設定します。試験後、サンプルを洗浄し、重量減少を測定して腐食速度を計算し、表面の金属組織観察で孔食または均一腐食の特徴を記録します。この方法の利点は、シンプルで直感的であるため、長期的な腐食挙動の研究に適していることです。

電気化学試験は、主に分極曲線とインピーダンス分光分析を用いて、動的な腐食情報を提供します。試料は三電極システム内の電解質に浸漬された作用電極として機能します。電位走査は電流変化を記録し、ターフェル外挿法を用いて腐食電流密度を計算します。自己腐食電位は熱力学的安定性を反映します。交流インピーダンス分光法は界面抵抗と静電容量を測定し、等価回路モデルを適合させて不動態化膜の保護効果を評価します。タングステン合金板のバインダー相は反応性が高いため、試験中は参照電極の安定性を慎重に考慮する必要があります。塩水噴霧試験は、中性塩水噴霧チャンバーに塩化ナトリウム溶液を噴霧することにより、海洋環境をシミュレートします。表面の錆や孔食が定期的に観察されます。化学的には、塩化物イオンの浸透が局部腐食を引き起こし、評価基準は腐食面積に基づいています。

試験仕様では、サンプルの表面状態が一定であることが求められており、研磨またはコーティング後の試験には注意が必要です。環境管理は、外部からの干渉を避け、温度と湿度を一定に保つ必要があります。複数の試験を並行して実施し、その平均値を用いて腐食の深さまたは速度を統計的に分析する必要があります。腐食生成物は化学分析し、X線回折を用いて酸化物相を特定する必要があります。定性浸漬試験、定量電気化学分析、加速塩水噴霧試験など、複数の方法を組み合わせて実施する必要があります。安全対策としては、酸性ミストの適切な換気と廃液の中和が挙げられます。

5.3.4 タングステン合金板の耐摩耗性試験方法

タングステン合金板の耐摩耗性を試験する主な方法には、ピンディスク摩耗試験、研削ホイール摩耗試験、往復摩擦試験などがあります。これらの方法は、乾式摩擦または潤滑条件下での摩耗挙動をシミュレートし、接触応力下での材料の体積損失と摩擦係数を評価し、硬度と表面処理の最適化に役立ちます。ピンディスク摩耗試験では、サンプルをディスクとして固定し、ピンに荷重を加えて回転させます。化学摩擦熱によって酸化摩耗が誘発され、摩耗量は重量減少または摩耗跡の深さを記録することで計算されます。荷重と回転速度は調整可能で、さまざまな作業条件をシミュレートできます。乾式摩擦は凝着摩耗を強調し、潤滑は研磨粒子の影響を調べます。

研削砥石摩耗試験では、標準の研削砥石を用いてサンプル表面を研削し、単位時間あたりの重量減少を測定します。化学的には、砥粒の埋め込みが切削摩耗を誘発するため、高硬度タングステン合金板に適しています。試験仕様では、再現性を確保するために、研削砥石の粒度と圧力を制御します。往復摩擦試験は、ボールまたはピンがサンプル上を前後に摺動する直線運動をシミュレートします。センサーは摩擦力をリアルタイムで記録し、平均係数を計算します。化学的には、表面疲労は剥離につながり、摩耗痕跡の微細構造を観察してメカニズムを分析します。レーザー共焦点顕微鏡または形状測定法によって、摩耗痕跡の体積を定量化します。

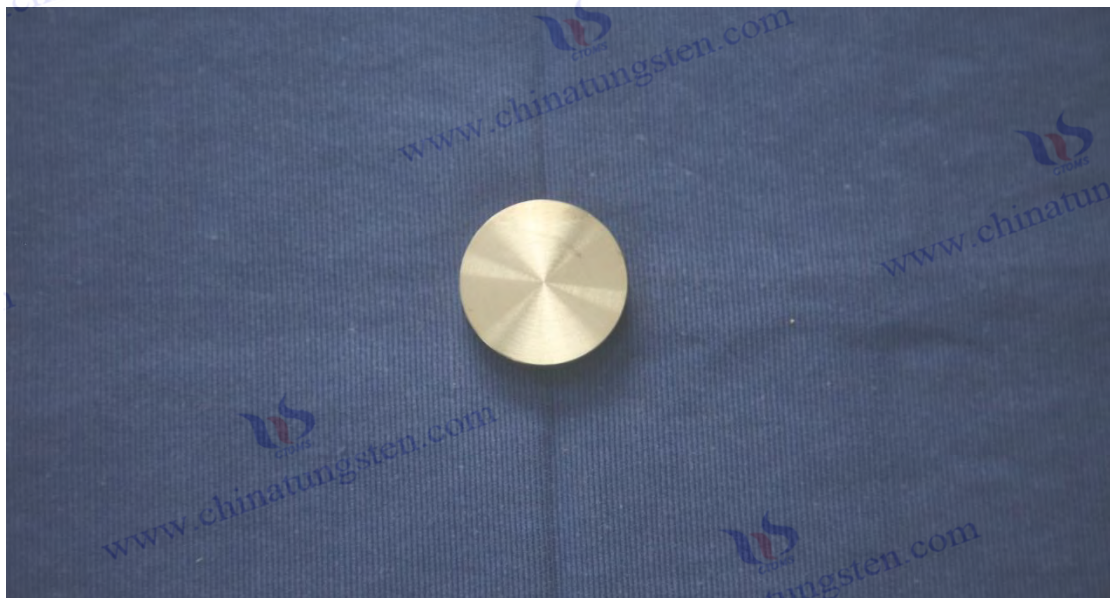
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

試験仕様では、異方性を評価するために、均一なサンプル表面研磨と多方向試験が求められています。湿度が酸化摩耗に与える影響などを考慮し、環境は制御可能でなければなりません。化学洗浄により摩耗粉を除去し、高い計量精度を確保します。摩耗面の分析には走査型電子顕微鏡を用い、転移膜の同定にはエネルギー分散型分光法を用います。ビンディスク法による体積減少の定量化や往復動係数など、複数の手法を組み合わせることで実施します。安全対策として、吸入防止のための集塵を行います。

5.3.5 タングステン合金板の強度試験方法

タングステン合金板材には、引張試験、曲げ試験、圧縮試験があります。これらの試験方法は、材料の引張強度、降伏強度、破壊挙動を測定し、機械的信頼性と加工適応性の評価に役立ちます。引張試験は最も一般的に使用される試験方法です。サンプルは標準的なダンベル型または長方形のストリップに加工され、万能試験機で一軸引張試験を受けます。荷重-変位曲線が記録され、化学転位滑りが塑性変形を支配していることが分かります。引張強度と伸びが計算されます。シート試験には、クランプによる損傷を防ぐため、非接触伸び計が使用されます。ひずみ速度はゆっくりと制御され、準静的挙動を捉えます。

曲げ試験は薄板に適しており、3点または4点の曲げ荷重をかけて曲げ強度とたわみを測定します。化学分析により表面圧縮と内層の引張適合性を評価し、層間結合を評価します。圧縮試験は厚板またはブロックを対象とし、短い円筒形のサンプルを軸方向に圧縮して応力-ひずみを記録します。タングステン合金板は高密度では塑性が制限されます。試験仕様では、標準化されたサンプル寸法と欠陥のない表面が求められます。周囲温度は調整可能で、高温での強度低下を調べることができます。試験中は、アコースティックエミッションを用いて亀裂の進行をリアルタイムで監視します。破断面の化学分析と走査型電子顕微鏡によるディンプルまたは劈開構造の観察により、破断モードを判別できます。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第六章：タングステン合金板の製造工程

6.1 タングステン合金板の製造工程と分類

タングステン合金板の製造工程は、主に粉末冶金法を基本としています。この工程は、原料粉末から完成板に至るまで、粉末混合、加圧成形、焼結、熱処理、後処理など、複数の単位操作を伴います。合金系、ターゲット特性、厚さ規格に基づいて分類されます。主な製造工程は液相焼結を中心とし、固相焼結や活性焼結といった様々な焼結法が用いられます。タングステンの耐火性と高密度特性を考慮したプロセス設計により、緻密化と均一な微細組織を実現します。典型的なプロセスは、高純度タングステン粉末とバインダー粉末を均一に混合することから始まり、冷間静水圧プレスによりピレットを形成し、高温焼結により粒子の再配列と結合を実現した後、熱間圧延、温間圧延、冷間圧延を経て徐々に薄板化し、中間焼鈍により応力を解放し、最後に表面仕上げを行います。分類上、高密度鋼板はタングステン含有量と密度を重視し、非高密度鋼板は擬似合金や複合構造となる場合があります。板厚範囲は工程選択に影響し、薄板は精密圧延を必要とし、厚板は初期ブランキングに重点を置きます。

作製プロセスの柔軟性により、用途に応じた調整が可能です。たとえば、医療用シールドシートでは均一性が重視される一方、工業用耐摩耗シートでは硬質相の強化が重視されます。化学原理はプロセス全体に浸透しており、焼結中の緻密化は液相の濡れによって促進され、加工中の変形調整はバインダー相の可塑性に依存します。酸化防止のための水素雰囲気の使用などの環境制御、および不純物による欠陥の導入を防ぐ純度管理が極めて重要です。プロセスの最適化、特に近年の熱間等方圧加圧法と放電プラズマ焼結法の統合により、初期ブランクの品質が向上し、後続の加工の難易度が低減します。焼結方法（従来の水素炉焼結と真空焼結）による分類も可能です。前者はコストが低く、後者は不純物制御に優れています。

6.1.1 タングステン合金板の主な製造方法

タングステン合金板は粉末冶金法に基づいており、従来の液相焼結、活性焼結、および溶融浸透複合法の3種類に分類されます。これらの方法は、合金系と性能目標に応じて選択され、粉末から板への完全な変換を保証します。従来の液相焼結法は最も成熟した方法です。まず、タングステン粉末をニッケル、鉄、または銅粉末と特定の比率で機械的に混合またはボールミル粉砕します。次に、混合物を冷間等方圧成形して大型のピレットを作製します。その後、水素保護下で温度を液相出現温度以上に上昇させ、保持することで、バインダー相の溶融と濡れを促進し、タングステン粒子の緻密化を促進し、再配列と溶解・再沈殿を実現します。焼結後、ピレットは高温で鍛造または熱間圧延され、徐々に中間の厚さまで薄くされます。その後、温間圧延と冷間圧延を行い、複数回の真空焼鈍処理を施して応力を緩和します。最後に、塩漬けにしたり、シート状に磨いたりします。

活性焼結法は、緻密化が困難な系向けに設計されています。パラジウムやニッケルなどの活性剤を少量粉末に予め添加することで、焼結温度を下げ、固相拡散を促進します。化学的には、活性剤は界面で凝集し、表面エネルギーを低下させます。この方法は、タングステン銅シート

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

または高タングステン含有量シートに適しています。低エネルギー消費と微細構造の微細化といった利点がありますが、活性剤残留物の処理が必要です。溶融浸透複合法では、まず多孔質のタングステンフレームワークをプレスして焼結し、次に銅または銀の液体を真空浸透させます。化学的には、液体金属が細孔を満たし、擬似合金構造を形成します。その後の圧延により超薄板化が容易になり、熱伝導性および導電性シートに適しています。

生産ルートを選択は、拡張性とコストを考慮して行われます。従来のルートはニッケル-鉄系およびニッケル-銅系の量産に適しており、溶融浸透ルートはタングステン-銅系向けに設計されています。熱間静水圧プレスなどの補助プロセスをどのルートにも組み込むことで、初期密度を向上させ、圧延割れを低減できます。ルート全体を通して化学制御が実施され、雰囲気露点管理は酸化を防ぎ、粉末粒子サイズのマッチングは混合均一性に影響を与えます。ルートの末端には化学めっきなどの表面処理が組み込まれており、耐食性を向上させています。環境要因を考慮し、リサイクルされたスクラップ材料は粉碎されて再利用されます。

6.1.2 高密度タングステン合金板と非高密度板のプロセスの違い

高密度タングステン合金板と非高密度タングステン合金板は、組成設計、焼結パラメータ、および加工プロセスによって区別されます。前者はタングステン含有量と密度の最大化を目的とし、後者は熱伝導性や低密度平衡といった特定の機能に重点を置いています。高密度板は通常、タングステン含有量が高く、バインダー相の割合が低くなっています。このプロセスでは、液相保持と二次熱間静水圧プレスを長時間行うことで、気孔率を最小限に抑え、軟質相の体積を化学的に減少させて理論密度に近づけます。焼結温度は、適切な液相範囲で正確に制御され、過剰な流動による崩壊を回避します。加工プロセスでは、高圧下熱間圧延とそれに続く厳格な中間焼鈍処理を重視し、最終製品の均一な微細組織と高い厚さ均一性を維持します。

タングステン銅擬似合金などの非高密度シート材料の場合、タングステン含有量を減らし、溶融浸透プロセスに移行することができます。まず、タングステンフレームワークを焼結し、意図的に多孔性を残し、次に銅を浸透させて空隙を埋めます。化学的には、銅相は固溶体を形成せず、高い熱伝導率のチャネルを提供します。焼結温度は低く、加工経路は冷間圧延への適応性を重視します。銅は可塑性に優れているため、頻繁な焼鈍処理なしで超薄板化を容易に実現できます。非高密度シートでは、活性化焼結法が一般的で、添加剤が低温での緻密化を促進し、タングステン銀または複合システムに適しています。表面処理にも違いがあり、高密度シートはバインダー相を保護するためにニッケルメッキされることが多いのに対し、非高密度シートは銅の耐腐食性を直接利用します。

さらに、プロセスの違いはエネルギー消費量と歩留まりに影響を与えます。高密度プロセスは高度な設備を必要とし、リードタイムは長くなりますが、安定した性能が得られます。一方、非高密度プロセスは柔軟性が高く、小ロットの機能ウェア生産に適しています。高密度プロセスでは不純物が多孔性を容易に増幅させるため、化学純度管理はより厳格に行われます。環境管理に関しては、高密度プロセスでは高純度水素が必要であり、非高密度プロセスでは酸化を防ぐために真空溶融浸透が用いられます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.3 標準的な厚さの範囲とそれに応じたプロセスの選択（0.05 mm～50 mm）

タングステン合金板の厚さは、通常、0.05mm の極薄箔から 50mm の厚板まで様々です。それぞれの工程を選択する際には、加工の難易度と微細組織制御のバランスが求められます。薄板では精密圧延が重視され、厚板ではピレットの準備と鍛造が重視されます。0.05mm から 0.5mm の極薄板では、多パス冷間圧延が主な工程であり、高い加工歩留まりを実現します。バインダー相の割合をわずかに増加させることで、延性を向上させ、エッジ割れを防止します。中間焼鈍は、応力を解放するために高真空下で頻繁に行われ、潤滑剤は表面損傷を軽減するために使用されます。最後に、化学研磨または電解研磨によって滑らかな表面が確保されます。

このプロセスは、厚さ 0.5mm から 10mm の板材において、熱間圧延から冷間圧延仕上げまで、最も成熟しています。熱間圧延では、各パスで大きな圧下率が得られ、温間圧延移行と最適化された焼鈍プロセスにより、繊維状の微細組織が形成されます。厚さ 10mm から 50mm の板材の場合、このプロセスは初期成形に重点を置き、その後、熱間鍛造または熱間圧延により、薄肉の大型冷間等方圧プレスピレットへと加工されます。脱炭を防ぐため、高温保護雰囲気を使用され、強度を維持するために加工速度は低く抑えられています。表面は、主にフライス加工によって酸化層を除去します。

プロセス選定においては設備能力を考慮します。薄板には高精度の圧延機と張力制御が必要であり、厚板には大型の鍛造プレスが必要です。化学的原理は板厚に反映されます。薄板は熱を急速に放散し、大きな加工硬化を示します。一方、厚板は熱影響が蓄積されるため、温度勾配制御が必要となります。板厚が厚くなるにつれて均一性管理はますます困難になり、厚板では多点密度試験が必要となります。環境要因も影響します。薄板は酸化されやすいため、不活性ガス包装が必要です。

6.2 原料粉末の調製

原料粉末の準備は、タングステン合金板の製造における基本的なステップであり、焼結構造の均一性、密度、および最終特性に直接影響します。この準備には、タングステン粉末の還元と精製、合金元素粉末の選択と前処理、および混合による均質化が含まれます。主原料であるタングステン粉末は、液相焼結中の濡れと再配列を確実にするために、高純度と適切な粒径が必要です。ニッケル、鉄、銅などの合金元素粉末はバインダー相を提供し、タングステン粉末の粒径と活性と一致する必要があります。準備プロセスでは、脆性相や細孔への不純物の混入を避けるため、化学的純度と物理的特性の制御に重点が置かれます。典型的なプロセスは、タングステン酸アンモニウムの水素還元から始まり、合金粉末の噴霧化またはカルボニル分解に進み、その後、均一なバッチングを実現するためにふるい分けと混合が行われます。粒度分布とフィッシャーふるい法による検出は、粉末の流動性とプレス性能を確保するための重要な品質管理ポイントです。

製造の化学的原理は、還元反応と表面エネルギーの制御にあります。高純度水素を用いて酸素を還元・除去し、合金粉末は酸化を防ぐために前処理されます。現代のプロセスでは、噴霧乾

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

燥やメカニカルアロイング（機械的合金化）によって混合効率を高め、微細構造を微細化しています。環境要因を考慮すると、粉末は吸湿を防ぐため、乾燥した不活性雰囲気下で保管する必要があります。原材料の品質は、完成品の厚さの均一性と欠陥率に直接影響します。細粒粉末は薄板製造に適しており、粗粒粉末は厚板製造に適しています。

6.2.1 高純度タングステン粉末の製造と品質要件

高純度タングステン粉末の製造は、主にタングステン酸アンモニウムまたは酸化タングステンの水素還元法を採用しています。この方法は、多段階還元によりタングステンの高純度化と粒径制御を実現し、合金板焼結中の粉末の活性と清浄性を確保します。製造プロセスは、タングステン酸アンモニウムの溶解と再結晶精製から始まり、続いて焼成により黄色タングステンまたは青色酸化タングステンを生成します。その後、管状炉またはブッシュボート炉で段階的な水素還元処理を行います。第一段階では低温還元により結晶水と一部の酸素を除去し、第二段階では高温還元により金属タングステン粉末を生成します。化学的には、還元反応は WO_3 と H_2 が反応して W と H_2O を生成することで行われます。タングステン粉末の再酸化を防ぐため、露点制御により水蒸気を速やかに除去します。ボートの速度、水素の流量、温度勾配などのプロセスパラメータによって粉末の粒子サイズが制御されます。温度が低く速度が遅いほど、細かい粉末が形成されます。

品質要件は、純度、粒径、および形態に重点を置いています。純度を確保するには、焼結欠陥を防ぐため、酸素含有量を低く抑え、アルカリ金属およびリン/硫黄を微量に抑える必要があります。粒径は通常、フィッシャー法を用いて測定されます。微粉は緻密化を促進し、粗粉は強度を高めます。形態は、混合と流動性を高めるために、清浄で凝集した表面を持つ、球形または多面体形状である必要があります。試験には、不純物の化学分析、走査型電子顕微鏡による形態観察、レーザー粒度分布分析が含まれます。製造工程では、原料であるタングステン酸アンモニウムは、ナトリウムとカルシウムを除去するために複数回の再結晶化を受け、高純度水素で乾燥されます。タングステンの回収には、プラズマ還元や亜鉛溶融などの様々なプロセスが用いられ、純度がさらに向上します。

この調製における品質要件は、合金シートの用途に関連しています。医療用遮蔽シートでは、放射線散乱を防ぐため不純物含有量を極めて低く抑える必要がありますが、工業用耐摩耗シートでは硬度を高めるため、やや粗い粒子が許容されます。保管には、湿気や酸化を防ぐため、真空または不活性ガスによる包装が必要です。化学的安定性は重要な要件です。粉末は空気中で不動態化しやすく、濡れ性に影響を与える薄い酸化物層を形成するため、還元前の活性化が必要となります。

6.2.2 合金元素粉末（Ni、Fe、Cu、Co、Mo など）の選択と前処理

粉末は、タングステン合金シートの配合に不可欠です。元素の選択は、状態図の濡れ性と機能の適合性に基づいて行われ、前処理により粉末の活性と純度が確保され、不均一な焼結が防止されます。ニッケル粉末は、一般的にカルボニル分解法で製造され、粒子サイズが細かく、活性が高く、延性に優れています。鉄粉末は、電気分解または還元法で製造され、中程度の磁性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

があるため混合が容易です。銅粉末は、アトマイゼーションまたは電気分解法で製造され、非磁性システムに優れた熱伝導性を提供します。コバルト粉末はバインダー相を強化し、モリブデン粉末はタングステンを部分的に置き換えて膨張を調整します。選択基準には、高純度、低酸素含有量、タングステン粉末との粒子サイズの適合性（通常は、偏析を防ぐためにフィッシャー粒子サイズが類似していること）などがあります。

前処理には、表面の酸化層を除去するための水素還元が含まれます。化学的には、 H_2 が酸化物と反応して水を生成し、これを排出することで濡れ角が増加します。真空脱ガス処理によりガス状不純物がさらに低減され、ふるい分けにより凝集物や異物が除去されます。ボールミル処理または機械的活性化処理により、ニッケル-鉄混合などの特定の元素が予備合金化され、固溶体粉末が形成され、均一性が向上します。処理温度は粉末の焼結を防ぐため、穏やかに制御されます。酸洗浄などの化学洗浄により油污は除去されますが、タングステン合金粉末は腐食防止のため、乾式処理されることが多いです。

さらに、選択と前処理の違いはシステム要件を反映しています。ニッケル-鉄系の鉄粉は防錆処理が求められ、ニッケル-銅系の銅粉は耐酸化性が強いです。タングステンの密度に合わせるため、高純度モリブデン粉がアトマイズに選定されます。品質試験には、酸素、炭素、粒度分布の化学分析が含まれます。

6.2.3 粉末粒度分布制御とフィッシャー粒度検出

タングステン合金板原料の製造における中核的な品質管理方法。分布の最適化は、還元パラメータとふるい分けを調整することによって達成され、フィッシャー法は平均粒径の評価を提供し、プレスと焼結性能を保証します。粒度分布制御はタングステン粉末の還元に反映されます。高温と高速ボート速度は粗い粉末を生成し、低温と低速は微粉を生成します。化学的には、還元速度は結晶核の成長に影響を与え、水素流量と水蒸気濃度を調整することで異常な粗大化を抑制します。合金粉末の噴霧または粉碎は、分布の狭まりを制御し、極端に微粉によって引き起こされる凝集や粗粉によって引き起こされる多孔性を回避します。レーザー粒度分析装置またはふるい分け法は、分布曲線を監視します。理想的には、分布が広く、狭まりと緻密化を促進する対数正規分布である必要があります。

フィッシャー粒度分布法は、空気透過の原理に基づいています。粉末層抵抗は平均粒子径を反映し、ガスの化学的表面吸着は透過に影響を与えますが、標準条件下では再現性は良好です。試験サンプルは乾燥され均一に充填され、圧力差に基づいてふるい下径が算出されます。この方法は簡便かつ迅速で、生産管理に適しており、微細から粗粒まで、一般的なタングステン粉末の範囲をカバーし、厚さ要件に適合します。制御は混合調整と組み合わせられており、微細タングステン粉末を粗い合金粉末と混合することで、流動性を最適化します。

この制御と検出は、最終製品の均一性に関係します。狭い分布は欠陥のない薄板に有利であり、広い分布は高強度の厚板に有利です。化学純度は検出に影響を与えます。酸素濃度が高い場合や粉末の凝集がある場合は、測定値が大きくなります。サンプルの吸湿を防ぐには、環境湿度の管理が不可欠です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.4 粉末の混合と合金化方法

粉末の混合と合金化は、タングステン合金板の製造における均質化工程です。焼結偏析を防ぐため、機械混合、ボールミル、またはスプレードライによって均一な元素分布が実現されます。機械混合では、分離を防ぐために低速回転の V 型またはダブルコーンミキサーが一般的に使用されます。化学的には、粉末表面への静電力またはファンデルワールス力が均一性に影響を与え、アルコールなどの添加剤が分散を促進します。ランダム混合を確保するために、混合時間は数時間に延長されることもあります。ボールミル合金化では、高エネルギーボールミルを使用し、衝撃によってメカノケミカル反応を誘発することで、一部の元素を事前に合金化し、粒子サイズを微細化し、活性を向上させます。ただし、酸化を防ぐために不活性ガスによる保護が必要です。

スプレードライは、粉末懸濁液を霧化・乾燥して球状粒子にし、化学結合剤で一時的に結合させることで流動性と圧縮性を向上させます。この方法の利点は、複合粉末の均一性にあり、大量生産に適しています。混合後、サンプルを採取し、化学分析または電子顕微鏡検査で分布を確認します。均一性は、元素の偏差が小さいことで定義されます。

これらの方法の違いは生産規模を反映しています。機械混合は簡便で低コスト、ボールミルは微細構造の精製に適しており、スプレードライは高品質の均一性を実現します。化学原理は拡散と吸着を伴い、混合は表面接触を促進します。分離を防ぐため、保管は重要であり、振動は避けるべきです。

6.3 粉末成形プロセス

粉末成形は、タングステン合金板の製造において重要な工程であり、原料粉末と焼結ブランクを接合します。圧力を加えるか、補助媒体を用いることで、ルースパウダーを特定の形状、強度、密度を持つグリーンブランクへと変換します。この工程は、その後の焼結における収縮の均一性と、最終製品の微細構造の一貫性に直接影響します。成形方法には、冷間静水圧成形、圧縮成形、射出成形などがあり、粉末の特性、ブランクサイズ、目標厚さに基づいて選択されます。タングステン合金粉末は流動性と圧縮性が低いため、成形時にはタングステンの高密度性とバインダー相の濡れ効果を考慮する必要があります。この工程の原理は、粒子の再配列、塑性変形、摩擦効果に関係しており、圧力分布の均一性がグリーンブランクの密度勾配を決定します。グリーンブランクは、取り扱いや脱脂作業を容易にし、ひび割れや変形を防ぐために十分な強度が必要です。パラフィンやポリマーなどの化学添加剤は、一時的に結合を強化するため、その後除去されます。

近年、成形プロセスの最適化は、グリーン化と自動化に重点を置いています。冷間静水圧プレスは大型ブランクに適しており、圧縮成形は小型・中型部品に適しており、射出成形は複雑な形状の薄肉ブランクにも適用されています。粉末の酸化を防ぐための乾燥雰囲気や、スプリングバックを防ぐための緩やかな圧力解放などの環境制御が重要です。成形後のグリーンブランク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンクの密度は通常、理論値の一定の割合であり、最適化によって焼結収縮の差を低減できます。欠陥制御は、剥離と密度の不均一性に焦点を当てており、プロセスパラメータを調整することで軽減されます。

6.3.1 冷間等方圧プレス

冷間静水圧プレス（COP）は、タングステン合金板ブランクを製造する方法の一つです。液体媒体を用いて均一な圧力を伝達し、粉末を柔軟な金型に圧縮して高密度のグリーンブランクを形成します。この方法は、大型または複雑な形状のブランクに適しており、等方的な圧力を保証します。このプロセスでは、ゴムまたはプラスチックの金型に混合粉末を充填し、密封した後、高圧容器に入れます。圧力伝達媒体として水または油を使用し、圧力を徐々に所望のレベルまで増加させます。この圧力を一定時間維持した後、ブランクを減圧して取り出します。化学的には、均一な圧力は粒子の緻密な再配列を促進し、摩擦による密度勾配を低減します。タングステン粉末の高硬度は、静水圧プレス時の隙間を効果的に埋め、バインダー相粉末は協調変形を補助します。

この成形プロセスの利点は、グリーンブランクの密度分布が均一であるため、その後のシート圧延に適しており、成形で一般的に見られるエッジ部分の低密度領域を回避できることです。柔軟なダイ設計により、円筒形、板状、または不規則な形状のブランクを製造でき、少量の潤滑剤を添加することで充填フローが向上します。緩やかな圧力解放制御により、弾性反発による微小亀裂を防止します。グリーンブランクの強度は、粉末の粒子サイズを適合させることで向上します。粉末が細かいほど充填性は向上しますが、凝集を防ぐ必要があります。プロセスパラメータの最適化には、加圧速度と保持時間が関係し、保持時間を長くすると粒子の固着が促進されます。

この成形法は、高密度タングステン合金板の製造に広く用いられています。冷間静水圧プレス後の大型ピレットは、熱間圧延で高効率に加工されます。化学純度の管理は極めて重要であり、汚染を防ぐには清浄な媒体の使用が不可欠です。成形後のグリーンピレット表面は滑らかで、その後の機械加工の取り代を削減します。ドライバッグ法などの様々な方法により操作が簡素化され、ウェットバッグ法はより柔軟性に優れています。環境要因を考慮すると、金型材料のリサイクルはコスト削減につながります。

6.3.2 圧縮成形と圧力パラメータの最適化

圧縮成形と圧力パラメータの最適化は、タングステン合金板の小型ブランクを製造する従来の方法です。この方法では、鋼製の金型を通して一方向または双方向の圧力を加えて粉末を圧縮します。装置はシンプルなので大量生産に適しています。最適化は、圧力分布とスムーズな脱型に重点が置かれています。このプロセスでは、硬い金型に粉末を充填し、油圧プレスで圧力を加え、金型の壁との摩擦で粒子を再配置・変形させ、グリーンブランクを形成します。化学的に、タングステン粉末の圧縮性には限界があるため、パラフィンワックスなどの一時的なバインダーを添加すると、粒子間の結合が強化され、グリーンブランクの強度が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

一方向圧縮では金型の壁を潤滑して摩擦を減らす必要がありますが、双方向圧縮では密度の均一性が向上します。

圧力パラメータの最適化には、荷重の大きさ、加圧速度、保持時間などが含まれます。高圧では密度は増加しますが、層間剥離が発生しやすくなります。一方、低圧では気孔率が増加します。最適化は実験的に決定され、応力集中を避けるため、徐々に加圧します。ステアリン酸亜鉛などの離型剤は、摩擦を低減し、固着を防止します。成形体の密度勾配は、フローティングダイやマルチパンチ設計によって緩和されます。

標準厚さのタングステン合金板ブランクを製造し、その後、小片ブランクを鍛造または圧延します。最適化された化学添加剤の配合により、強度と徹底した脱脂のバランスが保たれます。段階的な圧力解放制御により、スプリングバックによる割れを低減します。温間ダイプレスなどの加工法は流動性を高めますが、タングステン合金は通常、室温で加工されます。環境制御により、粉末の乾燥状態を維持し、吸湿を防ぎます。

6.3.3 薄板プリフォームへの射出成形の応用

射出成形は、薄板プリフォームの製造に用いられます。タングステン合金粉末を有機バインダーと混合して原料とし、高圧下で金型に射出成形することで、複雑な形状や薄肉のグリーンブランクを形成します。この方法は粉末冶金における形状の自由度を高め、精密な薄板プリフォームに適しています。このプロセスは原料の準備から始まります。粉末はワックスペースまたはポリマーバインダーと高温で混合され、バインダーが粒子を化学的に包み込み、流動性を向上させます。造粒後、原料は加熱された金型に射出され、圧力によってキャビティに充填されます。冷却・固化後、ブランクは型から取り出されます。化学脱脂によりバインダーが除去され、溶剤または熱脱脂により有機物が分解されて多孔質のプリフォームが形成されます。このプリフォームは焼結され、密度が高められます。

このアプリケーションの利点は、ニアネットシェイプ成形、薄板ブランクの均一な厚さ、そして滑らかな表面削り出し加工にあります。高タングステン充填量の原料は、偏析を防ぐために最適な粘度が必要です。温度や圧力などの射出パラメータは粉末特性に適合する必要があります。肉厚制御には精密な金型設計が不可欠です。この用途は、超薄タングステン合金シートプリフォームにおいて大きな可能性を秘めており、穿孔シートなどの複雑な形状の成形を可能にします。炭化物の脆化を防ぐため、残留炭素含有量の少ない化学バインダーを選定しています。ゆっくりと脱脂することで、ブリストアやクラックの発生を防ぎます。その後の焼結収縮も制御可能です。バインダーは環境に配慮したリサイクルが可能で、汚染を低減します。

6.3.4 グリーン体の強度向上と脱脂プロセス

成形後のプロセスにおいて、グリーン体の強度向上と脱バインダーは非常に重要です。グリーン体の強度は添加剤の添加や予備焼結によって向上しますが、脱バインダーは一時的なバインダーを除去し、後続の焼結における欠陥の防止を確保します。強度向上の方法としては、バ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

インダー比率の増加や低温予備焼結、バインダー粒子の化学的架橋、予備焼結中の微量拡散によるネックボンドの形成などが挙げられます。成形後のグリーン体の強度は圧力に依存しますが、射出成形された原料は高い固有強度を有しています。

脱脂プロセスは、溶剤脱脂と熱脱脂に分けられます。溶剤脱脂では、材料を有機溶剤に浸してワックスペースを溶解し、熱脱脂ではポリマーを加熱して分解します。加熱速度を化学的に制御することで、急速な蒸発と泡立ちを防ぎます。溶剤脱脂と加熱を組み合わせた脱脂プロセスは、効率が高く、残留物も少なく済みます。最適化されたプロセスパラメータは割れを防ぎ、サポート材はピレットの準備に役立ちます。このプロセスは、射出成形ピレットにおいて特に重要であり、徹底した脱脂は焼結純度に影響を及ぼします。強度向上と脱脂のバランスをとる必要があります、結合が強すぎると脱脂が困難になります。残留炭素の化学分析により、脱脂効果をモニタリングします。溶剤は、環境排ガス処理によって回収されます。

6.4 焼結プロセス

焼結はタングステン合金板の製造における中核工程です。高温処理により、成形されたグリーンピレットは高密度バルク材料へと変化し、気孔が除去され、安定した二相微細構造を形成します。このプロセスは、材料の密度、相分布、および界面結合強度を直接決定します。焼結方法には、水素雰囲気中での垂直焼結、真空焼結、焼結と熱間静水圧加圧（HIP）の統合などがあります。水素焼結は従来の液相系に適しており、真空焼結は不純物制御に重点を置き、統合プロセスは複雑なピレットの品質を向上させます。プロセスの原理は、固相拡散、液相再配列、および溶解再沈殿メカニズムです。タングステン粒子はバインダー相の濡れ下で球状化し、界面化学結合を強化します。過剰焼結（粗大化）または焼結不足（多孔性）を回避するには、温度、雰囲気、保持パラメータを合金システムに正確に一致させる必要があります。

近年、焼結の最適化には連続炉とインテリジェント制御が組み込まれ、均一性とエネルギー効率が向上しています。化学雰囲気は重要な役割を果たし、水素による酸化物の還元と真空による揮発性不純物の除去が重要です。ピレットの装填方法は温度場に影響を与え、垂直懸架またはボート装填は変形を軽減します。冷却速度は析出相を制御し、緩やかな冷却は均一性を促進します。欠陥防止はブリストアとクラックの発生に重点を置き、事前脱ガスと勾配加熱によって軽減されます。

6.4.1 水素雰囲気中での垂直焼結技術

水素雰囲気中での垂直焼結は、タングステン合金板ピレットの緻密化に古くから用いられている方法である。モリブデンボートの下、または吊り下げ状態で水素保護炉内で加熱することで、液相焼結と不純物低減が達成される。この技術は、ニッケル - 鉄系およびニッケル - 銅系の量産に適している。このプロセスでは、グリーンピレットを垂直またはボート内に置き、水素を連続的に流す。温度を液相線温度以上に上げて保持することで、還元反応によって表面酸化物を除去し、同時に水蒸気をガス流とともに排出する。化学的には、水素は酸素と反応して水を生成し、ピレットを清浄に保ち、バインダー相によるタングステン粒子の濡れを促進し、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

再配置と緻密化を促進する。垂直配置により、ピレットとボートの接触が減少し、付着や局所的な汚染を回避できる。

技術的優位性は、還元雰囲気との二重の効果にあります。この効果は、不純物を低減すると同時に、タングステンの酸化と揮発を防ぎます。炉の種類は主に連続式プッシュボート炉またはベルジャー炉で、前者は高度な自動化を実現し、後者はより均一な温度を実現します。加熱曲線はセグメント化されており、低温脱ガスにより残留バインダーが除去され、中温で固相拡散が起こり、高温で液相保持が行われます。保持期間中、タングステン粒子は球状化し、溶解・再沈殿機構によって界面が微細化されます。冷却は、熱応力割れを防ぐため、水素中での速度で制御されます。

この技術は、高密度タングステン合金板の焼結において成熟した技術として適用されています。水素露点を厳密に管理することで、低露点域でも十分な還元が確保され、高露点域でも過還元が防止されます。ピレット間隔を最適化することで、均一な気流を確保し、温度勾配を低減します。多段水素ろ過により化学純度が向上します。湿式水素などのバリエーションは水分を制御し、酸素除去を促進します。環境排ガス処理により水分を中和します。

6.4.2 液相焼結温度窓と保持時間の制御

液相焼結温度ウィンドウと保持時間の制御は、タングステン合金板の焼結プロセスにおける中核パラメータであり、液相量、粒子の再配列、および微細構造の進化に直接影響します。この制御により、異常成長を回避しながら十分な緻密化を確保できます。温度ウィンドウはバインダー相の融点よりも高く設定されています。液相が現れた後、適量が流れてタングステン粒子を濡らし、化学レベルの表面エネルギーの低下によって再配列が促進され、小さな粒子が溶解して大きな粒子の表面に析出します。温度ウィンドウが狭いと液相が不足し、少なすぎると密度が低下します。一方、液相が多すぎると、成形体の崩壊や偏析につながります。温度ウィンドウはニッケル-鉄系では高く、ニッケル-銅系では低く、状態図に基づいて調整する必要があります。

保持時間は液相中の反応度を制御します。保持時間が短い場合は転位反応が支配的となり、保持時間が長い場合は溶解・再沈殿と球状化が支配的となります。最適な保持時間は実験的に決定され、初期段階では急速な緻密化が、後期段階では緩やかな微細化が実現されます。加熱速度はウィンドウの入口点に影響を与えます。加熱速度を遅くすることで局所的な過熱を回避できます。雰囲気制御も併用され、水素流が揮発性物質を運び去り、ウィンドウの安定性を維持します。

この制御はピレットの厚さによって異なります。大型ピレットでは変形を防ぐため、より控えめな加熱ウィンドウを設けますが、小型ピレットでは均一性を高めるため、より長時間の保温が可能です。コバルトなどの化学添加剤は加熱ウィンドウを広げ、流動性を向上させます。熱電対を用いた多点温度測定によりモニタリングを行い、炉内の温度を一定に保ちます。冷却は

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ゆっくりと行われ、加熱ウィンドウから排出され、微細組織を固定します。様々なバリエーションがあり、最適な保温のために高温から低温へと段階的に変化するセグメント保温も用意されています。環境エネルギー管理により、保温時間を短縮できます。

6.4.3 真空焼結と焼結・熱間等方圧プレス統合プロセス

真空焼結と焼結-熱間等方圧加圧（HIP）は、高級タングステン合金板ピレットを製造するための高度な方法です。前者は高真空下でガス状不純物を除去し、後者は焼結と加圧緻密化を組み合わせることで、複雑な形状や高要求のピレットの品質を向上させます。このプロセスは、タングステン-銅擬似合金や高純度システムに適しています。真空焼結は、真空炉内で加熱することで、負圧によって細孔ガスや揮発性不純物を除去し、化学的に水素残留を防止し、界面の清浄性を維持し、固相または低液相拡散を促進します。液相流動の欠如を補うため、従来の焼結よりも高温で焼結されます。

焼結と熱間静水圧プレス（HIP）を統合したプロセスは、単一の装置で完了します。まず、真空焼結による予備緻密化を行い、続いてアルゴンガスを充填した加圧熱間静水圧プレスを行い、全方向への均一な圧力を確保することで閉鎖気孔を除去します。化学的には、高温高压によって拡散が促進され、タングステン粒子間の密着が促進され、界面結合が強化されます。このプロセスの利点は、単一の炉への投入による汚染の低減にあり、カバー付きピレットとカバーなしピレットの両方に適しています。このプロセスは、超薄板ピレットの前処理に大きな可能性を秘めており、統合によって中間欠陥を低減します。真空管理は非常に重要です。低真空は揮発による損失を防ぎます。温度と圧力の曲線は連動しており、加圧前に焼結が行われます。高い化学純度により、希土類元素をドーピングした合金に適しています。真空下での徐冷により応力を回避します。急速ホットプレスなどのバリエーションがあります。環境真空ポンプのオイルリターンも実装されています。

6.4.4 焼結変形制御とサポートツール設計

焼結変形の制御と支持治具の設計は、タングステン合金板ピレットの焼結プロセスにおいて極めて重要です。適切な支持とプロセスパラメータの調整により、高温軟化による重力変形や反りが低減され、ピレットの寸法精度と均一な微細構造が確保されます。焼結中に液相が出現するとピレットの強度が低下し、重力によって沈下や曲がりが生じやすくなります。化学的には、バインダー相の流動が変形を悪化させます。制御は、支持方法と炉の装填姿勢から始める必要があります。高純度アルミナまたはモリブデン板は、高温に耐え、変形しないため、支持治具の設計によく使用されます。表面コーティングは付着を防ぎ、窒化ホウ素などの化学コーティングは摩擦と反応を低減します。

様々なツールオプションをご用意しています。平板ピレットは、多点支持または砂床充填方式を採用し、砂粒子が応力を分散させます。化学的には、高純度の石英砂は優れた不活性性を示します。長尺ピレットには垂直懸架方式が適しており、両端をクランプで固定することで曲げを低減します。熱応力割れを防止するため、熱膨張率の整合を考慮した設計となっています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

また、変形制御には、加熱速度を緩やかにすること、低温での徹底的な脱ガス処理、液相中の保持時間を短くすることで流動時間を短縮することなどが挙げられます。さらに、重力バランスを考慮した傾斜など、ピレット姿勢の最適化も図られています。

相乗効果のある化学雰囲気により、均一な水素の流れが確保され、局所的な軟化が抑制されます。冷却段階では、サポートは低温に維持され、熱応力の解放による変形を防ぎます。再利用可能なツールは、残留物を除去するための洗浄が必要です。フレキシブルなセラミックファイバーサポートなどのバリエーションは、様々な形状に適応します。環境に配慮した材料リサイクルにより、コストを削減します。

6.4.5 大型スラブの焼結中の温度均一性の確保

大型スラブの焼結における均一な温度場は、均一な微細構造と密度を実現するために不可欠です。これは、炉の設計、装填方法、加熱制御によって温度勾配を最小限に抑え、局所的な過焼成または焼成不足を防ぐことで実現されます。大型スラブは熱容量が大きいため、炉内で温度分布が不均一になりがちです。化学的には、温度差が液相の発生タイミングに影響を与え、不均一な転位反応につながります。この問題に対処するため、炉構造を最適化し、複数の加熱ゾーンで独立した温度制御と、出力調整のための多点熱電対フィードバックを備えています。輻射遮蔽板は熱流を均一に分散させ、エッジ部の熱損失を低減します。

炉への装填方法は、ピレットの間隔と位置を重視し、中央に補助加熱体、底部に高熱伝導性材料を配置することで均一な熱伝達を実現します。化学雰囲気が循環し、水素は複数の経路を通過して攪拌炉に出入りします。加熱曲線はセグメント化され、段階的に変化し、保持期間中に電力バランスの調整が行われます。監視システムは温度分布をリアルタイムでマッピングし、大きな偏差が発生した場合は調整を一時停止します。

厚板焼結においては、多層装入炉では均一加熱のために回転や反転が必要となるため、このような保証は困難です。高純度炉ライニングは、熱放射に影響を与える汚染物質を低減します。均一冷却は熱応力勾配を防ぎます。その他にも、局所的な温度補償機能を備えた誘導加熱システムなどがあります。環境エネルギー管理は、マルチゾーン制御によってエネルギーを節約します。

6.5 熱処理と熱処理

熱間加工と熱処理は、焼結ピレットから完成シートに至るまでのタングステン合金シートの変形と微細組織制御の段階です。高温鍛造、熱間圧延、温間圧延、焼鈍処理により、板厚の低減と性能の最適化が実現されます。この工程により、焼結ピレットの脆性が改善され、繊維構造が導入され、強度と靱性が向上します。熱間加工の原理は、動的回復と再結晶化です。化学的には、高温によって滑り系が活性化され、バインダー相がタングステン粒子の変形を調整します。鍛造は鑄造組織を破壊し、熱間圧延は大きな変形によって板厚を減少させ、中間焼鈍は応力を解放し、可塑性を回復させます。熱処理には、結晶粒径と析出物を調整するための真空焼鈍と時効処理が含まれます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロセス最適化は、温度範囲と変形量の適合に重点を置いています。高温処理は容易ですが、酸化防止が必要です。一方、低温焼入れは高速ですが、割れのリスクがあります。雰囲気制御では、脱炭や酸化を防ぐために水素または真空を使用します。圧延パス設計には漸進圧下を組み込まれ、潤滑は表面損傷を軽減します。冷却速度は微細組織に影響を与えるため、熱処理中の炉内温度の均一性は非常に重要です。欠陥防止は、クラッドまたは側圧によって軽減されるエッジクラックと層間剥離に重点を置いています。まとめると、熱間加工と熱処理は高温塑性工学的利用を示し、バルクから薄板まで、タングステン合金板の変形経路を提供します。

6.5.1 鍛造および熱間圧延プロセス

鍛造と熱間圧延は、タングステン合金板の熱間加工の初期段階です。高温での大きな変形により、焼結ピレットは角張ったり薄くなったりし、粗大組織が破壊されて変形組織が形成され、その後の冷間圧延の基礎が築かれます。鍛造では、一般的に自由鍛造または型鍛造が用いられます。ピレットは高温に加熱され、水素保護下でハンマーまたはプレス加工されます。化学的には、高温によって変形抵抗が低下し、バインダー相が流動してタングステン粒子を包み込み、破損を防ぎます。方向を交互に変える多方向鍛造は、均一な変形を促進し、微細組織の初期繊維形成を実現します。

鍛造に続いて熱間圧延が行われ、ピレットはさらに複数パスで薄くなります。各パスで大幅な圧下が行われ、ロールは加熱されるか、ピレットは一定温度に保持されます。化学的には、熱間圧延は能動的な動的回復をもたらす、転位の再配置によって硬化の蓄積が抑制されます。保護雰囲気またはコーティングは酸化を防ぎ、潤滑剤は摩擦を低減します。パス間の再加熱により可塑性が回復します。パラメータの最適化には段階的な温度低下が伴います。高温での初期圧延は変形しやすい一方、低温での仕上げは滑らかな表面を確保します。

このプロセスは、特に厚手のタングステン合金板の製造において顕著です。鍛造時の大きな総変形により焼結気孔が破壊され、熱間圧延により板状の形状が得られます。化学的純度管理は不可欠であり、大気露点を低くすることで水素脆化を防止します。エッジクラックは、丸みを帯びたコーナーロールやサイドガイドによって抑制されます。様々なバリエーションとして、表面を保護するためのクラッド熱間圧延などがあります。環境廃熱回収によりエネルギーを節約します。

6.5.2 多方向鍛造により微細組織の均一性が向上する

多方向鍛造は、タングステン合金板の熱間加工における微細組織の均一性を向上させる効果的な方法です。変形方向を繰り返し変化させることで、ピレット内部の応力と微細組織のバランスの取れた分布を実現し、焼結後に生じる偏析や気孔を低減します。この鍛造方法は、ピレット製造段階で広く用いられています。ピレットを高温に加熱した後、複数の軸方向に沿って交互に鍛造します。化学的には、高温によってタングステン粒子の協調変形が促進され、バインダー相が流動して隙間を埋め、粒子の再配列を促進し、粗大な凝集体を分解します。一方向鍛造では方向性のある組織と密度勾配が形成される傾向がありますが、多方向鍛造では交差応力場を通じて偏析を分散させ、微細組織をより等方的にします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

鍛造工程は通常、複数回の鍛造工程から成り、各工程で方向が変わります（例：XYZ 軸シーケンス）。全体の変形は徐々に蓄積され、繰り返される化学変形によって動的回復が誘発され、転位の再配置によって局所的な硬化が減少します。方向転換の間に炉内で再加熱することで可塑性が回復し、冷間加工割れを防止します。この工程の利点は、大型ピレットの中心均一性を向上させ、端部と中心部の密度差を低減できることです。支持治具は位置決めを容易にし、非対称変形を防止します。

この鍛造工程は高密度タングステン合金板の製造において重要な役割を果たし、微細組織の微細化、タングステン粒子の球状化の促進、界面結合の強化をもたらします。化学純度の管理は極めて重要であり、酸化を防ぎ適切な変形調整を確保するためには保護雰囲気也不可欠です。鍛造周波数と圧下量を一致させることで、内部破損につながる可能性のある過度の速度を防止します。ラジアル・アキシアルの組み合わせなどのバリエーションは、様々な形状に適応可能です。環境廃熱の利用によりエネルギーを節約します。

6.5.3 中間焼鈍と応力除去熱処理

中間焼鈍と応力除去熱処理は、タングステン合金板の熱間加工工程において必要な中間工程です。真空または保護雰囲気下で行われるこれらの工程は、圧延中に蓄積された残留応力と加工硬化を解放し、材料の可塑性を回復させ、次の変形工程に備えます。この熱処理は、熱間圧延後または冷間圧延工程の間に行われ、温度は再結晶閾値以下またはわずかに高い温度に制御されます。化学的には、高温拡散によって転位の移動と消滅が促進され、バインダー相の軟化によってタングステン粒子からの応力解放が調整されます。真空焼鈍は酸化を防ぎ、水素ベースの処理によって表面をさらに還元します。

焼鈍工程は、加熱、保持、冷却の各段階から構成されます。保持時間によって、十分な応力緩和、粒界移動によるミクロ組織の化学的微細化、析出相の溶解または均質化が促進されます。緩やかな冷却により、新たな応力の導入が防止されます。この工程の利点は、累積硬化によるエッジ割れや層間剥離の発生を防止できることであり、これは多パス圧延における回復に不可欠です。温度範囲は合金系に応じて調整されます。ニッケル鉄合金の場合は、回復を促進するため、より高温の領域が使用されます。

この熱処理は薄板製造で頻繁に用いられ、冷間圧延による大変形後に多数の焼鈍サイクルを実施することで、全体的な処理効率を最適化します。化学雰囲気の純度が重要であり、低露点は水素脆化を防ぎます。均一な炉内温度は、複数のピレット間で一貫した結果をもたらします。傾斜焼鈍などの熱処理方法を用いることで、表面と芯材の差を最適化できます。環境真空ポンプのメンテナンスにより、汚染を低減します。

6.5.4 高温溶体化処理と急速冷却

高温溶体化処理と急速冷却は、タングステン合金板の熱処理における強化方法です。合金元素を高温で溶解し、急速に過飽和状態にすることで、材料の強度と高温安定性が向上します。こ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の処理は、最終熱間加工後、または特定の性能要件を満たした場合によく適用されます。溶体化処理では、板をバインダー相が完全に溶解する温度以上に加熱し、その温度に保持します。化学的には、タングステン原子はバインダー相に限られた範囲で溶解し、過飽和固溶体を形成します。界面元素の拡散により、接合が強化されます。保持時間によって均一な溶解が促進され、局所的な偏析が回避されます。

水焼入れやガス焼入れなどの急速冷却は、材料を高温状態に凍結させ、化学的に析出を抑制し、微細分散相や固溶強化効果を維持します。冷却媒体の選択は、焼入れ応力と酸化リスクのバランスを考慮します。不活性ガス焼入れはより穏やかな方法です。このプロセスの利点は、硬度と耐熱性の向上、そして過飽和バインダー相が転位を固定し強度を高めることにあります。

この処理は、耐摩耗性または熱伝導性タングステン合金板に適用され、溶体化処理後に強度が向上しますが、靱性のモニタリングが必要です。化学雰囲気中の真空により脱炭を防止します。精密な温度制御により、過熱と粗大化を防止します。段階冷却などの様々な処理により、応力分布を最適化します。環境媒体のリサイクルにより、消費量を削減します。

6.6 板材製造のための冷間圧延と温間圧延

冷間圧延と温間圧延は、タングステン合金板の製造における仕上げ工程です。常温または中温での多パス圧延により、熱間加工されたピレットは徐々に目標厚さまで薄化され、微細なミクロ組織と優れた表面品質を形成します。この工程は、ミリメートルからマイクロメートルサイズの板材の製造に適しています。常温で行われる冷間圧延は、顕著な加工硬化と大きな総変形をもたらします。一方、温間圧延は、中温域での回復を助け、割れのリスクを低減します。この工程の原理は、転位の増殖、動的回復、そして集合組織の形成です。化学的には、バインダー相が変形中にタングステン粒子を配位させ、脆性破壊を防止します。パスごとの圧下率分布は段階的である必要があり、成形のために最初の圧下率を大きくし、後段の仕上げのために圧下率を小さくする必要があります。圧延方向と集合組織制御は異方性に影響を与え、エッジ管理は割れを防止します。

プロセス最適化は、潤滑と張力制御に重点を置いています。冷間圧延では摩擦を低減するために油潤滑を使用し、温間圧延では酸化を防ぐために不活性ガス保護を行います。中間焼鈍は応力を解放し、塑性を回復させます。薄板生産では、板厚変動を防ぐため、圧延機の精度と高剛性圧延システムを重視します。欠陥防止は、ひび割れやオレンジピールの発生に重点を置き、トリミングと表面検査によって軽減します。

6.6.1 冷間圧延総変形分布とパス圧下率の仕様

冷間圧延における総変形量の配分とパス圧下率のスケジュールは、タングステン合金板の薄板化プロセスにおける中核的な計画要素です。総加工速度と単一パス圧下率を合理的に配分することで、均一な変形と制御可能な応力が確保され、割れや反りを防止します。このスケジュールは熱間圧延ピレットから開始されます。熱間圧延ピレットでは、微細結晶強化と厚さ精度を実現するために、総変形量が大きい場合が多いです。配分の実則は、各パスの初期圧下率

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を大きくして残留熱可塑性を成形に利用し、その後のパスでは徐々に圧下率を小さくして表面を微細化することです。化学的には、大きな圧下率はマルチスリップシステムを活性化し、バインダー相が完全に流動してタングステン粒子を包み込み、粒子の破損を低減します。スケジューリング設計では材料の状態を考慮します。初期の冷間加工硬化は緩やかであるため、より大きな圧下率が可能ですが、後期の硬化蓄積にはより小さな圧下率と長い焼鈍間隔が必要です。パス間に潤滑油を均一に塗布することで、ロール摩擦を低減し、表面傷の原因となるロールの固着を化学的に防止します。張力制御は板形状の安定化に役立ち、中央部や端部の波打ちを防止します。総変形量は目標板厚に基づいて計算されます。極薄板の場合は、圧延と焼鈍を複数回繰り返す必要があります。

このプロセスは、標準板厚から薄板への移行時に柔軟な調整を可能にし、高タングステン合金はエッジ割れを防止するために保守的な圧延を行います。化学雰囲気管理により、圧延された鋼板の酸化を防止します。このプロセスはパスの厚さを記録し、偏差をリアルタイムで調整します。非対称圧延などのバリエーションにより、鋼板の形状を最適化します。環境に配慮した潤滑油のリサイクルにより、汚染を軽減します。

6.6.2 高タングステン合金における温間圧延の応用

高タングステン合金における温間圧延は、中温域での圧延により、常温冷間圧延に伴う脆化リスクを軽減します。適度な加熱によって回復機構が活性化され、大きな変形量で薄肉プロファイルを実現します。この適用は、特に高タングステン含有量の合金系に適しています。温間圧延温度は、回復再結晶温度以下に制御されます。化学的加熱は変形抵抗を低減し、バインダー相を軟化させて配位性を高め、タングステン粒子の滑り抵抗を低減することで、冷間圧延でよく見られるエッジクラックを回避します。圧延機には加熱装置が装備されているか、ピレットを予熱し、不活性ガス保護によって酸化を防止します。

温間圧延の利点は、硬化と回復のバランスが取れていること、冷間圧延に比べてパスあたりの圧下率が高いこと、全体的な加工効率が高いこと、そして焼鈍時間が短いことなどです。化学的には、温間圧延はより活発な動的回復を示し、転位の再配列と蓄積を低減するため、純粋な冷間圧延よりも優れた表面品質が得られます。このプロセスは、熱間圧延移行と冷間圧延仕上げを組み合わせ、ハイブリッドパスを形成します。高タングステン合金はバインダー相が少なく、温間圧延は変形ウィンドウを拡大します。この用途は、極薄高密度タングステン合金板において大きな可能性を秘めており、温間圧延後に強度と靱性のバランスの取れた微細な繊維状マイクロ組織が得られます。化学潤滑により高温適応性を確保し、グラフアイトまたは特殊オイルにより固着を防止します。温度均一性は極めて重要であり、誘導加熱により迅速な応答を実現します。ロール加熱補助などのバリエーションもご用意しています。環境排ガス抽出により安全性を確保します。

6.6.3 圧延方向制御とテクスチャ最適化

圧延方向制御と組織最適化は、タングステン合金板の冷間圧延および温間圧延工程における微細組織制御手法です。一方向、交差、または多方向の圧延経路を通して変形組織と結晶配向

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を調整することで、材料の異方性と性能バランスに影響を与えます。この最適化は、強度、靱性、および熱膨張の方向性制御に役立ちます。一方向圧延は、強固な繊維状組織を形成し、圧延方向に沿ってタングステン粒子を伸長させ、化学転位の平面的な積層により優先配向を生み出します。これにより、縦方向の強度は向上しますが、横方向の靱性は低下します。交差圧延は、各パスで 90 度回転することで配向を破壊し、組織をよりランダムな状態に弱めます。

最適化の原則は用途に応じて選択されます。遮蔽シートには等方性クロスローリングが必要であり、縦方向の強度を必要とする構造部品には一方向圧延が必要です。振り子圧延などの多方向圧延は、材料の均質化をさらに促進します。化学的には、組織は相間応力の分布に影響を与え、最適化は残留熱処理を低減します。焼鈍処理は他の方法と組み合わせて組織強度を制御します。高温焼鈍は組織強度を弱め、低温焼鈍は組織強度を維持します。この制御と最適化はシート生産に大きな影響を与えます。強いテクスチャを持つ極薄箔は曲がりや割れが発生しやすい傾向がありますが、クロス最適化によって改善されます。X 線回折極点図を用いた化学分析により、配向密度を評価します。配向マーキングにより、完成品の下流工程での使用が容易になります。特殊なテクスチャを実現する斜め圧延などのバリエーションも用意されています。環境に配慮したローラーシステムは、洗浄と傷防止に使用されます。

6.6.4 エッジクラック防止とトリミング工程

タングステン合金板の圧延において、エッジ割れの防止とトリミングは重要な欠陥管理要素です。圧延パラメータの調整、エッジの保護、定期的なトリミングにより、割れの発生と伝播を抑制し、板の完全性と歩留まりを確保します。エッジ割れは応力集中によって発生し、化学的にはタングステン粒子のエッジせん断応力が高く、結合相の調整が不十分なことが原因です。予防策としては、圧延パスごとの圧力を徐々に下げること、エッジの移行をスムーズにすること、サイドガイドロールを使用して板の形状を拘束し、エッジの波打ちによる引張応力の発生を防ぐことなどが挙げられます。

トリミング工程では、せん断機またはホイールカッターを用いて、割れたエッジを定期的に除去します。切断面を化学洗浄することで、二次割れを防止します。また、均一な潤滑とエッジへの追加コーティングにより、乾燥摩擦を防止します。温間圧延は割れ感受性を低減し、冷間圧延は硬化の蓄積を監視し、速やかに焼鈍処理を行います。この予防・トリミング工程は、薄板圧延工程で頻繁に使用されます。薄板圧延工程では、極薄段階でひび割れが容易に伝播するため、トリミング間隔を短くする必要があります。化学的な表面検査は、蛍光浸透探傷試験によって補助されます。トリミング後の廃棄物はリサイクルされ、粉砕されます。レーザートリミングなどの加工法は、バリのない高精度な仕上げを実現します。環境に配慮した切削液ろ過により、安全性を確保しています。

6.7 表面処理と仕上げ

表面処理と仕上げは、タングステン合金板の製造における最終段階です。化学洗浄、機械加工、熱処理によるレベリングなどの方法により、表面欠陥が除去され、平坦性と平滑性が向上し、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

材料の外観、耐腐食性、機能的適応性が向上します。このプロセスは、精密用途における板の表面の完全性と接着性能に直接影響します。表面処理は、圧延や熱処理によって生じた酸化物層、濃縮相、粗面を除去し、仕上げは寸法精度とエッジ品質を実現します。このプロセスは、化学的溶解、機械的除去、熱応力解放を原則としています。化学処理は高い選択性を提供し、機械的処理は高い効率性を提供し、熱処理は両方の利点を兼ね備えています。処理手順は通常、最初に洗浄と除染を行い、次に研磨を行い、最後に長さに合わせて切断します。

仕上げ工程では、非破壊性と清浄性を重視しています。化学洗浄は残留腐食を防止し、機械研磨は粒子の付着を抑制し、真空熱レベリングは再酸化を防止します。レーザー切断またはウォータージェット切断は複雑な形状を実現し、熱影響部を低減します。品質管理には、表面粗さ測定と目視検査を行い、Ra 値とクラックの有無を確認します。環境への配慮として、廃液の中和とリサイクル、安全な集塵を行います。

6.7.1 酸化物層を除去するための化学洗浄と酸洗い

タングステン合金板の表面処理では、化学洗浄と酸洗いで酸化物層を除去するのが主な工程です。酸性溶液は、圧延や熱処理中に形成された酸化物スケールや汚れを溶解して除去し、金属光沢を回復して、後続の加工のためのきれいな基板を提供します。この方法は、基板へのダメージを最小限に抑えながら酸化物を選択的に溶解します。洗浄工程は、油を除去するためのアルカリ洗浄から始まり、続いて酸洗いで主に酸化物を除去します。化学的には、酸化物層は主に酸化タングステンとバインダー酸化物で構成されており、硝酸、フッ化水素酸、または硫酸の混合物によって効果的に溶解され、タングステンが錯体を形成させて溶液に入り込みます。酸洗いの時間と温度は、表面の孔食や水素脆化につながる可能性のある過剰エッチングを回避するために慎重に制御されます。

このプロセスの利点は、薄い酸化物層を効率的に除去できること、様々な厚さの板材に対応できること、そして合金系に応じた化学組成の調整が可能なことです。ニッケル-銅系では、酸濃度が低いため銅の過剰な溶解を防ぎます。洗浄後、水洗と中和を行い、その後、一時的な保護膜を形成するために不動態化処理を行います。廃液処理では、フッ化物イオンまたは硝酸塩の中和と回収を行います。この洗浄方法は熱間圧延鋼板に広く使用されています。厚い酸化スケールを除去することで表面活性が向上し、研磨やめっきが容易になります。pH と濃度の化学的モニタリングにより、バッチの一貫性が確保されます。超音波溶解などの様々な方法により、プロセスが加速されます。閉ループ環境システムにより、排出物の削減が可能です。

6.7.2 アルカリ洗浄によりバインダー相の表面濃縮が除去される

バインダー相の表面濃化を除去するためのアルカリ洗浄は、タングステン合金板を対象とした表面処理方法です。アルカリ溶液を用いた圧延または熱処理によって生じたバインダー相の表面濃化を選択的に溶解し、表面組成のバランスを整え、耐食性を向上させます。この方法は、バインダー相含有量の高い合金において、濃化層の選択腐食を防ぐために使用されます。洗浄工程では、水酸化ナトリウムまたは炭酸ナトリウムの高温溶液に浸漬します。化学的には、アルカリはニッケルまたは銅の酸化物と反応して可溶性塩を形成しますが、不活性なタング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ステン相はほぼ不溶性のままです。その後、表面濃化層を薄く除去し、バランスの取れた基材を露出させます。

このプロセスは、高い選択性、タングステン骨格への最小限のダメージ、非磁性または熱伝導性シートへの適合性などの利点を提供します。正確な温度と時間の制御により、過度の孔食を防ぎながら溶解を促進します。洗浄後、残留アルカリは酸で中和され、続いてすすぎと乾燥が行われます。補助攪拌または超音波処理により均一性が向上します。このアルカリ洗浄は、銅が圧延表面に蓄積する傾向があるニッケル銅系シートに特に効果的であり、洗浄後の導電性が均一になります。表面組成の化学分析により、除去効果が検証されます。電解アルカリ洗浄などのバリエーションにより、プロセスが加速されます。環境負荷の少ないアルカリ溶液の再生とリサイクルも可能です。

6.7.3 機械研削と研磨

機械研磨と研削は、タングステン合金板の表面仕上げの中核となる方法です。研磨ベルト、研削ホイール、または研磨ペーストを使用することで、表面の粗さや欠陥を徐々に除去し、高い平滑性と低い粗さを実現します。この方法は、さまざまな厚さの板に適しており、外観と機能面の両方の品質を向上させます。研削は、酸化物の痕跡や波紋を除去するための粗研削から始まり、続いて研磨ベルトまたは研削ホイールを使用して徐々に細かい研削が行われます。化学的および機械的なせん断によって材料が除去されます。タングステンは硬度が高いため、ダイヤモンドまたは炭化ホウ素研磨剤が必要です。研磨には、研磨ペーストを塗布した柔らかい布ホイールを使用し、微細な摩擦によって鏡面仕上げを実現します。

このプロセスは、Ra 値が徐々に減少する制御可能な精度を提供し、平面と曲面の両方に適しています。乾式または湿式研削が可能で、湿式研削では熱による損傷を防ぐために冷却を行います。粗目から細目へと等級分けを行い、中間洗浄を行うことで粒子の付着を防ぎます。この研削・研磨技術は、高精度医療用コリメータプレートに最適で、鏡面仕上げにおける飛散を低減します。化学洗浄後の研磨により残留物の蓄積を防ぎます。振動研磨などのバリエーションがあり、複雑な形状を均一に成形できます。環境集塵は安全です。

6.7.4 真空/水素保護熱レベリングプロセス

薄いタングステン合金板を平坦化する工程です。保護雰囲気下で高温張力または圧延を行うことにより残留応力を解放し、板の平坦性と寸法安定性を向上させます。この工程は反りやすい薄板に適しています。この工程では、板を真空炉または水素炉で応力緩和温度まで加熱し、軽い張力を加えるか、レベリングローラーに通します。化学的には、高温拡散により転位が緩和され、バインダー相が軟化して変形が調整されます。真空は酸化を防ぎ、水素は表面を還元します。

非接触または最小限の接触であるため、表面が滑らかで平坦度が高いという利点があります。再結晶温度以下の温度で組織変化を防ぎます。均一な張力制御により、局所的な伸びを防ぎま

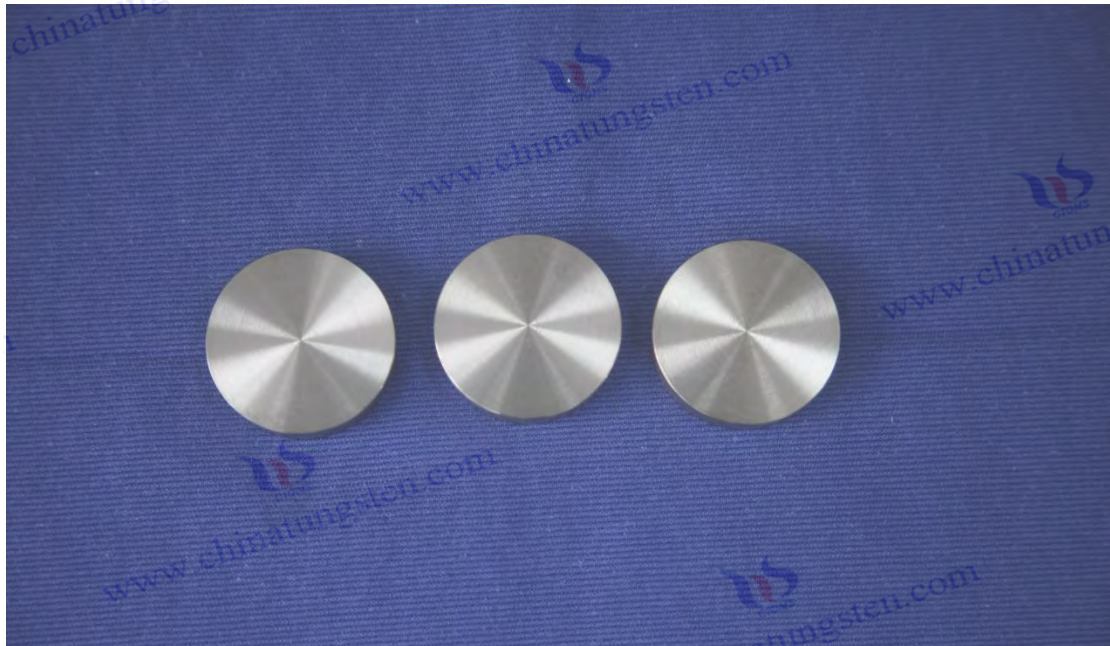
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。このプロセスは、極薄タングステン合金板に広く使用されており、冷間圧延後の反りは熱間レベリングによって矯正されます。化学的純度が重要であり、低露点条件により水素脆化を防止します。バリエーションとしては、連続炉張力レベリングなどがあります。気密性とエネルギー効率に優れた環境を提供します。

6.7.5 精密せん断、レーザー切断、ウォータージェット切断

精密せん断、レーザー切断、ウォータージェット切断は、寸法精度の高い形状や不規則な形状を含むタングステン合金板材の精密加工方法です。これらの方法では、機械刃、レーザービーム、または高圧ウォータージェットを用いて、きれいなエッジと複雑な形状を実現し、下流工程における多様なサイズ要件を満たします。精密せん断では、鋭利な刃先を持つ高精度せん断機を使用し、化学的に集中したせん断力で破断させます。直線状の長方形板材に適しており、調整可能なギャップによりバリの発生を防ぎます。

レーザー切断では、高エネルギーレーザーを用いて材料を溶融・気化させ、その後不活性ガスを用いてスラグを除去します。化学的には熱影響部が小さいため、複雑な輪郭や穴の加工に適しています。出力密度制御により、狭い切断幅も実現できます。ウォータージェット切断では、高圧の水と研磨材を混合したジェット噴射を用いることで、熱変形のない冷間切断と純粋に機械的な研磨による切断が可能で、厚板や熱伝導性合金に適しています。この切断方法は、カスタムタングステン合金板材にも柔軟に対応し、高精度なレーザー穴とストレスフリーのウォータージェットエッジを実現します。切断後の化学洗浄により、汚染を防ぎます。ファイバーレーザーなどの加工方法では、切断速度を向上させることができます。環境廃棄物は安全にリサイクル可能です。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

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

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

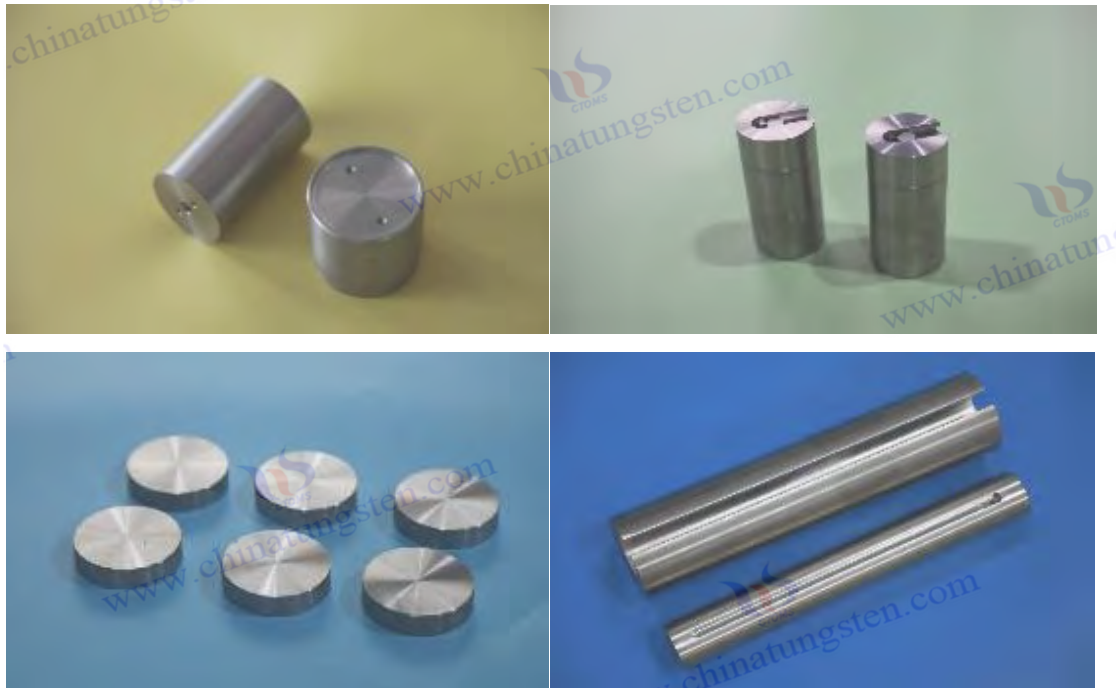
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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
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

第7章 タングステン合金板の応用

7.1 防衛・軍事産業におけるタングステン合金板の応用

タングステン合金板は、主に防衛・軍事産業において、高密度、高強度、優れた靱性が求められる部品に使用されています。高い融点と耐摩耗性により、過酷な環境下でも安定した性能を発揮します。カウンターウェイトや保護構造物への応用も可能で、加工によって機能統合が実現されています。

7.1.1 徹甲弾用タングステン合金板

徹甲弾部品に使用されるタングステン合金板は、高密度と自己発刃特性を活かし、運動エネルギーの集中と貫通力を実現します。合金設計は硬度と靱性のバランスに優れ、仕上げ面は高速安定性を実現します。

7.1.2 カウンターウェイト用タングステン合金板

カウンターウェイト材にはタングステン合金板が使用され、高密度化により限られたスペース内での重量調整が可能になり、慣性バランスの調整と振動抑制に貢献します。均一な厚さにより精度を確保し、表面処理により耐久性を向上させています。

7.1.3 保護用タングステン合金シート

タングステン合金板は、防護構造における放射線減衰と衝撃吸収に役立ち、高密度、薄層、高効率の遮蔽を提供します。複合設計により全体の強度が向上し、多層防護システムに適しています。

7.2 ハイエンド製造業におけるタングステン合金板の応用

ハイエンド製造業におけるタングステン合金板の主な用途は、高密度、高硬度、優れた切削性という複合特性です。これらの用途は、金型製造、切削工具、精密機械部品に及び、小型化、高信頼性、長寿命といった設計目標の達成に貢献します。タングステン合金板は、粉末冶金と精密圧延によって均一な微細組織を実現し、金型インサートにおける耐摩耗性と耐高温軟化性、切削工具における強固な支持力、そして機械式カウンターウェイトにおける質量分布調整における密度の利点を活かした特性を備えています。応用分野においては、タングステン合金板は他の材料と組み合わせたり、表面処理を施したりすることで、その機能範囲をさらに拡大することがよくあります。

ハイエンドの製造には、材料特性の高度なバランスが求められます。タングステン合金板は、高い弾性率と熱安定性により、高応力、高温、高精度の用途に優れています。製造業がインテ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

リジエント化と軽量化へと移行するにつれ、タングステン合金板の用途は従来の金型から積層造形用サポート材や精密機器部品へと拡大しています。表面コーティングや熱処理により、耐腐食性と接着性をさらに最適化し、複雑な動作条件にも対応できます。タングステン合金板は様々な厚さで提供されており、薄い板は精密インレイに、厚い板は構造サポートに適しています。

7.2.1 金型インサート用タングステン合金板

タングステン合金板は、その高い硬度、耐摩耗性、そして高温軟化に対する耐性に由来します。この用途は、プラスチック射出成形金型、ダイカスト金型、ガラスホットプレス金型に広く見られ、金型寿命の延長と製品品質の向上に貢献しています。金型の中核となる金型インサートは、高温、高圧、そして摩耗の繰り返しに耐えます。金型本体に埋め込まれたタングステン合金板は、局所的に耐摩耗性に優れた領域を提供し、金型全体の材料消費量を削減します。タングステン合金板二相構造は、インサートにおいて重要な役割を果たします。タングステン粒子は硬質相として摩耗に抵抗し、バインダー相はある程度の靱性を提供し脆性破壊を防ぎます。

プラスチック射出成形金型では、熔融プラスチックの衝撃や熱サイクルに耐えるため、キャビティエッジやゲート部分にタングステン合金板がよく使用されています。表面研磨により金型への固着が低減し、脱型効率が向上します。ダイカスト金型の用途では、インサート部品は熔融金属からの高速衝撃や高温腐食にさらされますが、タングステン合金板の熱安定性により寸法精度が維持され、熱疲労割れが減少します。ガラスホットプレス金型では、熱膨張率が低く硬度が高いため、精密光学部品の成形時に形状の忠実度が保たれます。インサート設計では、タングステン合金板をろう付け、インレイ、ネジ止めなどで金型鋼に接合します。ニッケルメッキなどの界面処理により密着性が向上します。

高精度スタンピングダイスへの応用が広がっています。携帯電話のフレームや電子コネクタの成形には、ステンレス鋼やチタン合金板の繰り返しスタンピングに耐えるタングステン合金インサートが使用されています。表面硬度勾配設計により、耐摩耗性と耐チップング性のバランスが取れています。近年、電気自動車や民生用電子機器の急速な発展に伴い、長寿命ダイスに対する需要が高まり、タングステン合金インサートはナノ結晶または分散強化材料へと開発が進み、疲労耐性がさらに向上しています。DLC や TiAlN などの表面コーティングが一般的で、化学蒸着法で硬い膜を形成し、基材と相乗的に作用して耐摩耗性を高めます。タングステン合金インサートの厚さはダイスサイズに応じて選択されます。マイクロダイスには薄いインサートを使用し、大きな荷重を支えるには厚いインサートを使用します。

7.2.2 切削工具用タングステン合金板

タングステン合金板は、主に切削工具の基材またはインサートとして使用され、高い硬度と熱安定性を活かして切削補助を提供します。この用途は、特定の特殊切削工具や耐摩耗性インサートに見られ、難削材や高温条件での加工に役立ちます。工具設計において、タングステン合金板はしばしば超硬合金やセラミックと組み合わせてハイブリッド構造を形成します。タングステン合金が強靱な基盤となり、表面には硬質層が溶接またはろう付けされているため、工

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

具寿命全体が向上します。タングステン合金板の密度の利点は、回転工具のバランス調整と振動の低減に役立ちます。

旋削工具やフライス工具において、タングステン合金インサートは、切削力や熱負荷に耐えるため、工具ホルダーや工具支持部に使用されます。結合相は変形を調整し、衝撃を吸収することで、工具先端の欠けを防ぎます。化学的安定性により、工具はクーラント環境下でも耐腐食性を発揮し、無電解めっきなどの表面処理によりさらなる保護性能が得られます。用途は木工工具や複合材料加工工具にも及び、タングステン合金インサートは繊維摩耗に強く、鋭い切れ刃を維持します。

タングステン合金板は、特定の伸線ダイスや押し出し工具のブッシングにも使用され、内孔にタングステン合金リングまたはシートを埋め込み、金属摩耗を抑制します。厚さは工具本体の形状に基づいて選択され、薄い板は軽負荷の精密工具に使用され、厚い板は高負荷の切削に適しています。レーザー微細構造処理などの表面テクスチャ加工は、切削片の除去性能を向上させます。切削工具におけるタングステン合金板の役割は、多材料複合設計を促進することであり、ろう付け接合部は接合強度を最適化します。

近年、難削材の増加に伴い、タングステン合金板は表面が硬く芯部が強靱な傾斜構造へと進化しています。熱処理によって切削工具の硬度分布が調整され、固溶強化によって耐熱性が向上します。工具の再研磨においては、タングステン合金マトリックスが複数回の研磨作業をサポートします。環境適応性に関しては、乾式切削や最小限の潤滑でも安定した切削状態を維持します。

7.2.3 機械式カウンターウェイト用タングステン合金板

タングステン合金板は、その高い密度を活かして限られた空間内で質量を集中させ、精密機械の重心調整、慣性バランス調整、振動低減に貢献します。この用途は、分析機器、慣性航法装置、光学プラットフォームなどに広く用いられています。カウンターウェイト板は特定の形状に精密機械加工され、機械構造に埋め込まれるか接着されます。均一な密度のタングステン合金板は、質量分布を制御可能にし、局所的な偏差がシステムの安定性に影響を与えるのを防ぎます。

分析天秤や遠心分離機では、タングステン合金板が分銅やカウンターウェイトとして使用されています。均一な厚さのため微調整が可能で、表面コーティングにより酸化による質量への影響を抑制します。慣性計測機器では、カウンターウェイトが回転慣性を調整します。また、タングステン合金板は機械加工性に優れているため、複雑な形状にも対応でき、小型化の要件を満たします。光学機器プラットフォームでは、カウンターウェイトが振動減衰に利用されています。高密度の板は重心を下げ、耐衝撃性を向上させます。

タングステン合金板は、ジャイロスコープやモーターローターなどの高速回転機械にも利用され、カウンターウェイトバランス調整によって偏心振動が低減され、ベアリングの寿命が延びています。幅広い厚さの板材を取り揃えており、薄板はマイクロデバイス用、厚板は大規模

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

な質量調整用として提供されています。金メッキなどの表面処理により、外観と耐食性が向上し、化学的安定性により長期にわたる安定した品質が確保されます。

加工技術はアプリケーションの精度に影響を与えます。精密せん断加工により滑らかなエッジが確保され、熱処理による平坦化により平坦性が維持されます。カウンターウェイトにおけるタングステン合金板の役割は、コンパクトな機械設計を促進し、従来の材料を高密度に置き換えることで体積を削減します。環境適応性に関しては、温度変化下でも寸法安定性を示し、幅広い温度範囲での動作をサポートします。

7.3 原子力・医療分野におけるタングステン合金板の応用

タングステン合金板は、主にその高い密度、優れた放射線減衰能、そして生体適合性を活かしています。これらの用途には、原子力施設の遮蔽、医療用放射線治療装置、原子力環境部品などがあり、放射線防護と治療精度の向上に貢献しています。タングステン合金板は、高タングステン含有量による効果的な遮蔽厚さの利点を有し、従来の材料に比べて体積が小さいため、スペースが限られた用途に適しています。原子力遮蔽用途では、タングステン合金板は容器のライニングやコリメーション構造に使用され、医療分野では多葉コリメータや防護装置に多く使用されています。原子力環境部品では、その熱安定性と放射線耐性が活かされています。

アプリケーション設計では、厚さの均一性と表面の滑らかさを重視しています。薄いシートは精密なコリメーションに使用され、厚いシートは構造を支えます。コーティングなどの表面処理は耐腐食性を高め、ポリマーと組み合わせた複合構造は柔軟なシールド効果を高めます。タングステン合金シートは機械加工性に優れているため、複雑な成形が可能で、個々のニーズに対応できます。核医学および放射線治療技術の発展に伴い、タングステン合金シートの用途は、従来のシールドから、センサーや冷却チャネルとの統合といった機能統合へと拡大しています。生体適合性は医療用途における安全性を確保し、放射線照射下における組織安定性は長期使用をサポートします。

7.3.1 核遮蔽用タングステン合金板

タングステン合金板は、ガンマ線と中性子に対する高い減衰能を持つため、原子力遮蔽材として広く利用されています。この用途は、原子力施設のコンテナのライニング、輸送容器の内壁、実験装置の遮蔽などに広く見られ、放射線漏洩を低減し、動作環境を保護するのに役立ちます。タングステン合金板は高密度であるため、限られた厚さでも効果的な遮蔽が可能で、他の材料と比較して大幅な体積削減が可能であり、モジュール設計にも適しています。遮蔽構造物において、タングステン合金板はラミネート加工やミラーマウントによって固定され、表面処理によって放射線酸化に対する耐性が向上します。

核廃棄物貯蔵容器において、タングステン合金板は高エネルギー放射線を吸収するライニングとして機能し、長期にわたって熱安定性を維持します。原子炉外周遮蔽壁などの実験設備では、放射線強度に応じて厚さを調整したタングステン合金板が用いられます。均一な微細構造

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

により、一貫した減衰が保証されます。タングステン合金板は機械加工性に優れているため、不規則な切断が可能で、複雑な形状にも適応できます。複合材料として用いる場合、ホウ化物材料と組み合わせることで中性子吸収性が向上し、良好な化学的適合性を示し、有害な反応を起こさないことが証明されています。用途は核燃料処理装置にも及び、タングステン合金板は操作窓やロボットアーム部品を遮蔽することで、繰り返し照射に耐える耐放射線性を提供します。ニッケルなどの表面コーティングは接合層を保護し、耐用年数を延ばします。核遮蔽におけるタングステン合金板の役割は、施設の小型化、軽量化、輸送の容易化を促進します。環境適応性という点では、高温放射線下でも寸法安定性を示します。

7.3.2 医療用遮蔽材用タングステン合金板

タングステン合金板は、主に放射線治療装置や防護服に使用されています。X線やガンマ線に対する減衰特性を利用することで、精密な放射線形状制御と人体防護を実現し、治療位置の精度向上と安全性の向上に貢献します。医療用遮蔽材の最も代表的な例は、直線加速器の多葉コリメータブレードです。タングステン合金板は多層構造で積層され、独立して可動することでビームプロファイルを形成します。均一な厚さにより、鋭いエッジが確保され、半影が低減されます。

CT スキャナーなど放射線診断装置では、タングステン合金板が検出器のコリメーショングリッドや散乱防止板に使用され、迷走放射線を吸収して画像の鮮明度を向上させます。放射線技師用エプロンや遮蔽カーテンなどの防護具では、タングステン合金板をポリマーと複合することで柔軟な素材を形成し、従来の重い素材に代わる軽量で快適な使用感を提供します。タングステン合金板は生体適合性と無毒性を備えており、医療現場での安全な接触を保証します。

アプリケーション設計は精度を重視しており、研磨されたブレード表面は摩擦を低減し、スムーズな動きを実現します。タングステン合金シートは熱安定性に優れているため、高線量放射線下でも形状を維持し、化学的に不活性なため冷却剤による腐食を防ぎます。厚さは放射線エネルギーに合わせてカスタマイズ可能で、低エネルギーX線には薄いシート、高エネルギーガンマ線には厚いシートを使用します。複合構造はウェアラブル保護にも応用され、均一に分散されたタングステン合金マイクロシートが包括的な保護を提供します。

7.3.3 原子力環境用タングステン合金板

タングステン合金板は、その耐放射線性と熱機械的安定性を活用します。これらの用途は、ヒートシンク、支持構造物、局所遮蔽など、原子力施設の内部部品に見られ、放射線および高温条件下での機器の信頼性の高い動作維持に役立ちます。原子力環境部品は、中性子線、ガンマ線、温度サイクルにさらされますが、タングステン合金板の微細構造安定性は、膨潤と脆化を低減し、バインダー相は応力分布を調和させます。

原子炉や加速器では、タングステン合金板がターゲットのバックプレートや冷却チャネルのライナーとして使用されています。その熱伝導性は放熱を助け、放射線照射下でも寸法安定性を維持します。取り付けブラケットなどの支持構造は、高い強度を活かして振動や熱負荷に耐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

えます。タングステン合金板は機械加工性に優れているため、精密な成形が可能で、狭い空間への設置に適しています。

用途は原子力機器部品にも及び、タングステン合金板は放射線吸収体やコリメート窓として機能し、放射線減衰と熱管理を両立させます。表面処理は耐酸化性を高め、コーティングは長期曝露から保護します。原子力環境におけるタングステン合金板の役割は、機器の耐久性を向上させ、メンテナンス頻度を低減することです。また、化学的安定性は媒体反応から保護します。

7.4 エレクトロニクスおよび新エネルギー分野におけるタングステン合金板の応用

タングステン合金板は、エレクトロニクスおよび新エネルギー分野において、優れた熱伝導性と電気伝導性、適切な熱膨張係数、および高密度を主な用途としています。これらの用途は、パワーデバイスの放熱、電子パッケージング、および電極材料をカバーし、デバイスの小型化、高信頼性、および効率的なエネルギー変換の実現に役立ちます。タングステン合金板は、タングステン銅またはタングステンニッケル銅系を通じて、半導体材料に類似した熱膨張挙動を提供し、熱応力による破損を低減します。放熱基板ではヒートシンクとして熱を拡散し、パッケージングではシェルまたは遷移層として機能し、電極ではアーク浸食に対する耐性を提供します。5G 通信、高出力エレクトロニクス、および新エネルギーバッテリー技術の急速な発展に伴い、タングステン合金板の用途は、従来の真空デバイスから高周波モジュールやエネルギー貯蔵システムへと拡大しています。

エレクトロニクス業界では厳格な熱管理が求められています。タングステン合金板は熱伝導率が高く、熱拡散を促進し、表面コーティングははんだ付け性を高めます。新エネルギー用途では、その安定性により高温または周期的な条件をサポートします。タングステン合金板は柔軟な厚さのオプションがあり、薄い板はマイクロエレクトロニクスに使用され、厚い板は高出力をサポートします。複合構造は一般的で、セラミックやダイヤモンドと組み合わせることで性能を向上させます。タングステン合金板を使用すると、デバイスの統合も促進され、一致する熱伝導材料により接触熱抵抗が減少します。環境適応性の点では、タングステン合金板は広い温度範囲で安定した性能を維持します。つまり、この用途は、電子新エネルギーにおけるタングステン合金板の熱電機能を実証し、性能の組み合わせによりデバイスの効率と寿命を改善し、業界における継続的な技術進歩をサポートします。

7.4.1 放熱基板用タングステン合金板

タングステン合金シートは、主にタングステン銅系の高い熱伝導性と半導体材料の熱膨張との適合性を活用しています。この用途は高出力 LED、レーザー、RF モジュールに広く用いられ、熱を素早く放散し、熱応力割れを低減します。チップとヒートシンク間の中間層として、タングステン合金シートは平坦な支持面を提供し、ニッケル金めっきははんだ付け性を向上させ、高い化学結合強度を実現します。タングステン銅擬似合金構造では、銅相が連続した熱チャネルを形成し、タングステン骨格が熱膨張を制御し、シリコン基板やガリウムヒ素基板に匹敵します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パワーアンプモジュールでは、タングステン合金基板がチップを支え、熱伝導性により高周波動作時の熱蓄積と分散をサポートし、均一な厚さにより平坦性を確保し、反りを低減します。レーザーダイオード用途では、基板がポンプ熱を吸収し、タングステン合金シートの熱容量が瞬間的なピーク値を緩和します。LED パッケージングでは、高出力照明にまで拡大し、従来の銅モリブデンシートに代わり、タングステン合金シートが優れた体積熱管理を提供します。

アプリケーション設計では、チップ接続にろう付けまたは焼結を用いたインターフェース処理と、反応層を回避するための化学的適合性を重視しています。表面微細構造のレーザー加工により接触面積が増加し、熱伝導性が向上します。放熱基板にタングステン合金シートを使用することで、デバイスの小型化と高出力密度での信頼性の高い動作が促進されます。ダイヤモンド粒子を含む複合バリエーションは熱伝導性を高め、限界をさらに広げます。環境適応性に関しては、高温および低温サイクルにおいても安定した性能を発揮します。

7.4.2 電子パッケージ用タングステン合金板

タングステン合金板は、その熱膨張係数の適合性と高密度特性を活かして電子機器パッケージングに使用され、ハウジング、カバー、あるいは気密保護と熱経路を提供する遷移層として機能します。この用途は、高信頼性のマイクロ波デバイスやセンサーパッケージに見られ、内部の真空または不活性ガス環境の維持に役立ちます。タングステン合金板はセラミックまたはガラスのシーリングと互換性があり、化学的安定性が高温ろう付けをサポートし、熱膨張係数が近いことによりシーリングストレスを低減します。

パワー半導体パッケージングにおいて、タングステン合金シートはベースまたはリードフレームの接合部として機能し、接合部からの熱を逃がすと同時に、密度の利点を活かして全体重量を軽減します。マイクロ波管パッケージング用途では、タングステン合金カバープレートが電磁シールドを確保し、高密度化により構造剛性を高めます。センサーハウジングには、耐環境腐食性を高めるためにタングステン合金シートが使用され、表面コーティングははんだ付け性を向上させます。

7.4.3 電極用タングステン合金板

タングステン合金板は、主に耐アーク侵食性と高い導電性を活かしています。この用途は、高電圧スイッチ、抵抗溶接電極、および特定の放電管に見られ、接点寿命の延長と安定した導電性の維持に役立ちます。接触面またはインサートとして使用される際、タングステン相は溶接を阻止し、銅または銀相は導電経路を提供します。化学的には、アブレーション生成物は揮発し、熱損傷を除去します。

抵抗溶接電極では、タングステン合金板が銅基板に埋め込まれ、繰り返しのスポット溶接衝撃に耐えます。高い硬度により変形が抑制され、導電性により大電流に対応します。真空スイッチ用途では、タングステン合金電極が電気アークに面し、耐アブレーション性により滑らかな接触面を維持し、材料の移行を低減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

放電加工用電極への応用が拡大しています。タングステン合金板は摩耗を低減し加工効率を向上させるとともに、最適化された表面性状により均一な放電を実現します。放電管用電極には、高電圧絶縁破壊にも耐えるタングステン合金を採用し、その安定性により繰り返し放電に耐えます。

タングステン合金シートは、接触信頼性と長寿命を向上させ、複合設計により導電性と耐摩耗性を両立しています。厚さは電流レベルに応じて決定され、薄いシートは精密な接触を、厚いシートは高耐久性を実現します。表面研磨により初期抵抗を低減します。

7.5 カードにおけるタングステン合金板の応用

タングステン合金シートの主な用途は、その高密度性です。これにより、重厚な質感と金属光沢に加え、優れた加工性と耐摩耗性が得られます。この用途では、機能性素材と日用品を組み合わせることで、カードに独特の質感と耐久性がもたらされます。タングステン合金シートは、精密に圧延されて薄い箔または複合層となり、その後、プラスチックまたは金属の基板とラミネート加工されます。厚みをコントロールすることで、標準的なカードサイズとの互換性を確保しています。用途は、銀行の決済カード、ペットの識別タグ、記念品のホリデーカードなど多岐にわたり、高級感、個性、そして耐久性に優れた製品を求める消費者のニーズに応えています。

タングステン合金シートは、カードに偽造防止の質感と視覚効果をもたらします。研磨またはブラシ仕上げの表面は美観を高め、金や黒チタンなどのメッキは色の多様性をもたらします。化学的安定性により、カードは日常的な摩耗や腐食に耐え、長期間輝きを保ちます。複合化プロセスでは、タングステン合金層をPVCまたはPC基板に熱圧着し、接着剤で層間強度を確保します。タングステン合金の適用は軽量カード設計にも役立ち、高密度で薄い層により、体積を増やすことなく重量感を実現します。消費の高度化に伴い、タングステン合金カードは高級品からパーソナライズされたギフトへと拡大しており、レーザー彫刻などの加工技術はカスタマイズされたデザインをサポートしています。環境適応性の面では、カードは曲げや高温に耐性があります。

7.5.1 タングステン合金銀行カードおよび決済カード

タングステン合金製の銀行カードとペイメントカードは、薄いタングステン合金シートをカード本体に組み込んだ高級ペイメントツールです。これらのカードは、タングステン合金層を通して金属的な重量感とクールな手触りを提供し、従来のプラスチックカードとは一線を画し、所有者のアイデンティティとユーザーエクスペリエンスを向上させます。タングステン合金シートは通常、極めて薄い箔に巻かれ、多層のプラスチック基板と熱圧着され、透明な保護層で覆われています。タングステン合金は化学的に不活性であるため、日常的な摩擦や曲げによる色褪せや変形がありません。標準カードサイズは既存のカードリーダーと互換性があり、埋め込まれたチップと磁気ストライプは機能に影響を与えません。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン合金製の銀行カードは、金融機関の高級会員カードやブラックカードとしてよく発行されます。その重量感はカードを引き出す際の高級感を高め、金属光沢は視覚的な魅力を高めます。ブラシ仕上げや鏡面研磨など、様々な表面処理に加え、カード番号やデザインのレーザー刻印により、優れた偽造防止機能も備えています。タングステン合金層の厚さは、重量と柔軟性のバランスを微調整し、曲げ試験によって剥離がないことを確認しています。ローズゴールドやガンメタルなどの化学メッキオプションも用意されており、個人の好みに合わせて色を選択できます。

決済カードの用途は非接触決済へと拡大しています。タングステン合金は無線周波数信号に干渉せず、アンテナ層の設計も互換性があります。耐摩耗性が高いため、財布との摩擦でもカードは新品同様の美しさを保ち、長寿命のため交換頻度も低減します。タングステン合金カードの加工技術は成熟しており、ラミネート加工後も滑らかでバリのない精密カットエッジを実現しています。環境適応性という点でも、高温や化学洗浄剤への耐性を備え、世界中で使用可能です。タングステン合金の採用はカード偽造防止技術の向上にもつながり、その独特の密度により模倣が困難です。

7.5.2 タングステン合金ペット識別タグ

タングステン合金製ペット識別タグは、薄いタングステン合金板で作られた小型タグで、首輪でペットを識別するために使用されます。高密度で金属的な質感を持つこのタグは、ペットの活動による摩耗や腐食に強く、耐久性と美観を兼ね備えています。タングステン合金板を薄い板状に圧延し、骨型、丸型、ハート型など様々な形に刻印します。表面には飼い主の情報とペットの名前がレーザー刻印されています。タングステン合金の化学的硬度により、刻印は深く、耐久性があり、かすれることもありません。

ペット識別タグの用途では、タングステン合金は適度な重量でペットへの負担を最小限に抑え、留め具のデザインはしっかりとフィットし、外れにくい構造となっています。研磨またはブラッシュ仕上げの表面は光を反射し、視認性を高めます。また、ブラックロジウムやゴールドなどのメッキオプションにより、様々なカラーバリエーションからお選びいただけます。化学的安定性により、屋外での雨、泥、ペットの舐めなどにも耐え、錆びたり色褪せたりすることなく、タグは無傷のままです。厚みを調整することで、薄型でありながら強度を保ち、曲がりやひび割れに強い設計となっています。

タングステン合金プレートは高級ペット用品市場にも応用が広がり、高級アクセサリとして利用されています。これらのプレートは革製の首輪と組み合わせられ、ペットの写真の輪郭やQRコードリンクなどのカスタムデザインが施されています。

7.5.3 タングステン合金のホリデーおよび記念カスタマイズカード

タングステン合金製のホリデーカードや記念カードは、薄いタングステン合金板から作られ、ホリデーギフトやお土産として人気です。金属的な重厚感と永続的な光沢により、特別な想いやコレクション価値を伝え、紙やプラスチック製のカードとは一線を画します。複合金属また

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は純金属のタングステン合金板から作られ、表面には挨拶、日付、デザインなどがレーザー刻印されています。タングステン合金の化学的安定性により、情報は色褪せることなく長期保存に適しています。

誕生日、記念日、ホリデーグリーティングカードなどのホリデーカードには、タングステン合金が重厚な質感と、剥がした時の喜びを演出します。ゴールドやシルバーなどのメッキカラーは、ホリデーのテーマにマッチします。記念カードは、結婚式、卒業式、企業の節目など、様々な場面で使用され、ハートやブックマークなどのオリジナルデザインや、象嵌された宝石、エンボス加工のデザインが芸術的な魅力を高めています。薄型でありながら丈夫なため、郵送や持ち運びに便利です。アプリケーションデザインはパーソナライゼーションを重視しており、レーザー技術による繊細なテクスチャと、鏡のような反射を実現する化学研磨により、視覚的な魅力を高めています。シルクやレザーと組み合わせた複合構造は、ギフトの高級感を高めます。タングステン合金の耐摩耗性により、カードは繰り返し使用しても新品同様の美しさを保ち、高いコレクター価値を生み出します。

7.5.4 タングステン合金産業と資産管理の標識

タングステン合金製の産業用・資産管理用標識は、薄いタングステン合金板を加工して耐久性のある標識にすることで作られ、機器、工具、資産などに恒久的に表示することができます。これらの標識は、高い硬度と化学的安定性により、産業環境における摩耗、腐食、高温に耐え、情報の判読性を長期にわたって確保します。薄板状に圧延されたタングステン合金板には、数字、バーコード、QRコードなどがレーザー刻印または刻印されます。表面研磨またはブラッシングにより耐候性が向上します。タングステン合金は化学的に不活性であるため、酸、アルカリ、油などによる腐食を防ぎ、屋外や化学薬品を使用する環境にも適しています。

産業用標識用途では、タングステン合金製の標識が機械、パイプ、コンテナに固定され、振動や洗浄にも耐えます。高密度のため安定感があり、ストラップやリベットでしっかりと固定されます。資産管理標識は、倉庫の棚やIT機器にQRコードでデジタルシステムと連携し、追跡や在庫管理に活用されます。タングステン合金の耐摩耗性により、頻繁なスキャンや摩擦があっても、標識は鮮明で、情報の判読性を維持します。アプリケーション設計は実用性を重視し、滑らかで傷つきにくいエッジと、取り付けを容易にする精密な穴を備えています。薄型でありながら堅牢で、曲げやひび割れに強く、黒色クロムメッキにより隠蔽性と指紋防止性を高めています。化学的に安定しているため、高圧水ジェット洗浄や溶剤による拭き取りが可能です。タングステン合金製ネームプレートは機械加工性に優れているため、マスカスタマイゼーションが可能で、テンプレートパターンによりコスト削減も可能です。

7.5.5 タングステン合金の衣料品および高級品タグ

タングステン合金製の衣料品タグや高級ブランドのハングタグは、薄いタングステン合金板で作られたファッションタグで、衣料品、バッグ、ジュエリーなどに取り付けられます。商品にメタリックな質感と高級感を与えます。これらのハングタグは、重量感と光沢感によってブ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ランドイメージを高め、従来のプラスチックや紙製のラベルとは一線を画します。タングステン合金板は、ブランドロゴや幾何学模様にも精密にカットされ、表面はブラシ仕上げ、鏡面仕上げ、または金メッキ仕上げが施されています。タングステン合金の化学的硬度により、摩擦による傷や変形がなく、永続的な輝きを保ちます。

アパレルのハングタグでは、タングステン合金製のタグが細いチェーンやリボンで衣類に取り付けられ、その重厚感も高級感を演出します。ブランド名や限定番号をレーザー刻印することで、より一層の高級感を演出します。高級ハンドバッグのハングタグは、通常大きめのサイズで、エンボス加工が施され、立体感を演出します。また、商品のカラースキームに合わせて、ブラックチタンやローズゴールドメッキが施されています。ジュエリーのハングタグには耐腐食性のあるタングステン合金が使用されており、貴金属ジュエリーと並んで長期保存が可能です。アプリケーションデザインは、丸みを帯びた磨き仕上げのエッジと、繊細な細工が施された穴により、美しさと機能性の両方を重視しています。これにより、破れや破損を防ぎます。微調整された厚みは、重量感と柔らかさのバランスを保ち、化学的安定性により、香水や汗による腐食にも耐えます。タングステン合金タグは加工性に優れているため、少量生産でも高品質なカスタマイズが可能で、3D テクスチャや宝石のインレイを施すことで、芸術的な価値を高めることができます。

7.5.6 高級タングステン合金名刺と社交エチケットカード

タングステン合金名刺や社交カードは、薄いタングステン合金板を名刺やギフトカードの形に加工したもので、ビジネスコミュニケーションや社交の場でもご利用いただけます。金属的な重量感と精巧な職人技が、プロフェッショナルな雰囲気と高級感を演出し、一般的な紙製名刺とは一線を画し、持ち主の個性を高めます。タングステン合金板は標準的な名刺の厚さに圧延され、表面には氏名、役職、連絡先がレーザー刻印されています。タングステン合金の化学的硬度により、財布や名刺入れに擦れてもカードが曲がったり摩耗したりすることがなく、永続的な輝きを保ちます。

高級名刺用途では、タングステン合金はクールなメタリック感を演出し、取り出した際に目を引きます。ガンメタルやシルバーホワイトなどのメッキはプロフェッショナルなスタイルにマッチし、ブラシ加工された質感は控えめな高級感を演出します。結婚式の招待状、サンキューカード、フォーマルな招待状などに使用される社交用エチケットカードは、上品な文字やデザインが特徴で、薄手ながらもしっかりとした作りで、郵送や配達にも便利です。

アプリケーションデザインは細部にまでこだわり、傷防止のために面取りされたエッジや、個人のウェブサイトやデジタル名刺にリンクする QR コードを備えています。化学的に安定したため、汗やアルコールによる汚れにも強く、鮮明で長持ちする情報を保証します。タングステン合金カードは加工性に優れているため、両面彫刻が可能で、片面に情報、もう片面に芸術的なデザインを彫刻することができ、コレクション価値を高めています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第8章 タングステン合金板の一般的な問題と解決策

8.1 タングステン合金板の基本的な材料問題と解決策

タングステン合金板は、主に組成分布、結晶構造、および物理的特性の偏差に起因します。これらの問題は、製造および適用時の材料の均一性、信頼性、および機能性に影響を及ぼす可能性があります。組成の不均一性は局所的な性能差につながり、構造欠陥は機械的挙動に影響を与え、物理的特性の偏差は下流のアプリケーションとの適合性を損なう可能性があります。解決策としては、混合の均質化、熱処理による修復、パラメータ調整など、プロセスの最適化と制御が重視されます。これらの問題の原因は、粉末特性、焼結速度、および加工応力に関連することが多く、体系的な検出とフィードバックメカニズムによって効果的に軽減できます。

基本的な材料問題の解決には、予防と是正の組み合わせが重要であり、原料段階での厳格な純度管理、成形・焼結段階での精密なパラメータ管理、そして後処理段階での熱機械制御が重要です。化学原理が解決策を導き、拡散によって均一性が促進され、修復によって欠陥が減少します。問題解決の柔軟性により、合金系に応じた調整が可能になります。ニッケル-鉄系では強度バランス、タングステン-銅系では熱伝導率に重点が置かれます。湿度による不均一な酸化など、環境要因によって問題が悪化する可能性があります、乾燥管理が必要となります。

8.1.1 構成と構造に関する問題

タングステン合金板材は、主に元素分布の不均一性と結晶欠陥という形で現れます。これらの問題は、微細構造における二相平衡と界面結合に影響を与え、マクロ特性に影響を与えます。不均一な組成は粉末混合または焼結拡散不足に起因し、構造欠陥には転位、気孔、相分離などがあります。解決策としては、化学拡散と再結晶メカニズムを活用した均質化法と修復熱処理が挙げられます。問題検出はスペクトルマッピングと電子顕微鏡観察によって行われ、早期介入による廃棄物削減を可能にします。

これらの問題を解決するには、プロセスチェーン全体の協調的な運用も必要です。具体的には、前工程で粉末を最適化して初期偏差を低減し、中期焼結段階での拡散を制御し、最終工程で欠陥を軽減する必要があります。これらの問題は、バインダー相が少ないと均一性を維持することが難しい高タングステン合金でより顕著になります。雰囲気純度などの環境制御も、問題の深刻度に影響を与えます。

8.1.1.1 不均質タングステン合金組成の問題と均質化方法

タングステン合金の析出は、主に粉末混合不足、焼結拡散不足、あるいはピレットサイズが大きすぎることによる元素偏析に起因します。こうした不均一性は、バインダー相の局所的な濃化やタングステン粒子の凝集として現れ、密度分布と機械的平衡に影響を与えます。この問題の原因は混合段階に顕著であり、粉末粒子サイズのばらつきや静電放電によって分離が生じ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。焼結中は、液相の流れの不均一性が偏析を悪化させ、化学的に結合する元素の拡散速度の差が拡散勾配を増幅させます。

均質化法では、まず粉末の混合を強化し、高エネルギーボールミル粉碎またはスプレードライによるプレアロイ化によって元素のミクロ分布を促進します。焼結中は、保持時間の延長またはセグメント化された温度制御により、化学拡散による元素の移動が促進され、液相流が最適化されて均一性が確保されます。後処理として熱間静水圧プレスを行い、異方性圧力を加えることで、独立気泡の除去と拡散による均質化が促進されます。アニーリングにより粉末はさらに均質化され、長時間の真空保持により溶体化処理の調整が可能になります。

実用化においては、大型ピレットはマルチゾーン加熱炉と組み合わせて温度勾配を低減し、小型ピレットは攪拌することで対流を促進します。エネルギー分散型分光法（EDS）などの化学分析により不均一領域を検証し、パラメータの反復調整を導きます。予防策としては、凝集体を除去するための粉末前処理や、流動性のバランスをとるための配合の微調整などが挙げられます。この問題は、タングステン含有量の高い合金でよく見られます。均質化処理により界面接合が改善され、性能のばらつきが減少します。粉末は吸湿や分離を防ぐため、乾燥した環境で保管してください。メカニカルアロイングなどの方法を用いることで、徹底した予備均質化が可能です。

8.1.1.2 結晶構造欠陥の種類と修復戦略

タングステン合金板には、転位、気孔、粒界偏析、異常析出物などの欠陥が含まれます。これらの欠陥は加工応力や焼結不良に起因し、強度、靱性、熱安定性に影響を与えます。転位欠陥は圧延硬化によって蓄積され、気孔は焼結残留と密度不足によって発生し、粒界偏析は不純物の濃縮を招き、析出物は異常なサイズや不均一な分布を示します。化学的には、欠陥は格子周期を乱し、結合エネルギーを低下させます。

修復戦略では、主に熱処理を採用します。これには、転位を解放するための真空焼鈍、化学拡散消滅または再配列、そしてすべり系を回復するための保持期間が含まれます。気孔修復には、熱間静水圧プレスによる高圧閉鎖と、ガス排出後の緻密化が含まれます。粒界偏析は、原材料の精製によって発生源を低減し、その後、高温均質化と拡散希釈を行うことで対処します。異常析出物は、均質性を確保するために急速冷却と凝固、またはサイズ制御のために時効処理されます。応用戦略においては、冷間圧延欠陥は中間焼鈍処理を用いて段階的に修復されることが多く、焼結欠陥は後加圧によって改善されます。新たな欠陥の発生を防ぐため、化学真空雰囲気を使用されます。電子顕微鏡は欠陥の種類を観察し、戦略選択の指針となります。多方向鍛造は、方向性転位を防止するために使用されます。

8.1.2 タングステン合金板の物理的特性の偏差に関する問題

タングステン合金板は、主に密度と硬度の異常、および熱伝導率と膨張率の不一致を伴います。これらの偏差は、プロセス変動や組成の違いに起因し、アプリケーションの適合性と信頼性に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

影響を与えます。密度の偏差は焼結不均一、硬度の異常は加工硬化または焼鈍不足、熱伝導率の低下は液相偏析、膨張率の不一致はバインダー相比の不均衡に起因します。

このソリューションは、パラメータの安定性と事後調整に重点を置いており、圧力補正による密度補正、熱処理による硬度制御、熱伝導率の膨張率の最適化を実現しています。問題検出には、プロセスステップを追跡するための複数点の測定平均化が用いられます。

8.1.2.1 異常な密度と硬度の原因と調整方法

タングステン合金板のひび割れは、主に焼結不足または加工時の不均一な変形によって引き起こされます。密度が低いと残留気孔が生じ、硬度が高いのは冷間加工または過度な焼鈍処理による蓄積が原因です。化学的には、これは気孔内の連続相の中断と、粒界を固定する転位の硬化につながります。原因は、混合偏析にまで遡ることができ、液相の局所的な差異と焼結温度範囲の拡大につながります。

技術的密度調整では、熱間等方圧プレスによる密度向上に重点を置き、高圧密閉セル処理によって均一性を向上させます。異常硬度は、焼鈍または時効強化によって対処し、回復には化学拡散または析出平衡を利用します。低密度ピレットは二次焼結を行い、高硬度ピレットは中間焼鈍を施して等級分けを行います。

技術的な応用においては、大型ピレットの異常な密度に対処するために複数回の圧力による補修が用いられ、小型部品の圧延工程では硬度を向上させるために微調整が行われます。重量減少や圧痕の異常度を評価するために化学分析が用いられます。このプロセスは、粉末の均一性やパラメータの安定性に関連する問題の発生を防ぐのに役立ちます。

8.1.2.2 熱伝導率と熱膨張率の不一致に関する問題と最適化スキーム

タングステン合金板の熱伝導率と熱膨張率の不一致は、バインダー相の分布または割合の不均衡に起因します。熱伝導率が低い場合は銅相が不連続であることを示し、熱膨張率が高い場合はバインダーが過剰であることを示します。化学的には、熱伝導率は電子-フォノン輸送に依存し、これは膨張した相の体積によって決まります。この問題は、焼結時の流動の不均一性、または割合の不均衡によって発生します。

最適化された熱伝導性は、銅の浸透または活性焼結によって向上し、連続的で均一な化学流路を形成します。膨張率の不一致は、タングステン結合比を調整することで対処し、モリブデンの部分置換によって係数を微調整します。熱処理によって分布が均一化され、アニール処理によって界面における拡散が促進されます。

このソリューションの適用においては、タングステン-銅系の熱伝導率は、溶融・浸透後に最適化され、その後、圧延によりチャネルを平坦化します。ニッケル-鉄系の熱膨張率は、焼鈍

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

処理によって制御されます。最適化された試験により、熱伝導率計と膨張計の適合度が検証されます。

8.2 タングステン合金板の製造における問題点と解決策

タングステン合金板は、原材料から完成品までのサプライチェーン全体の最適化を主眼に置いています。これらの課題には、粉末冶金プロセスにおける偏差、圧延成形における不安定性、品質検査・管理における課題などが含まれます。これらの課題は、プロセスパラメータの調整、設備の改善、品質フィードバック機構によって解決されます。製造上の問題は、タングステンの高い融点や合金元素の拡散挙動といった材料特性に起因することが多く、微細構造の不均一性や性能変動につながります。解決策としては、予防と是正の組み合わせが重視されます。粉末段階での精製管理は初期欠陥を低減し、圧延段階でのパス設計は応力蓄積を緩和し、検査段階では複数の手法を組み合わせることで精度を向上させます。製造上の問題の解決には、システムエンジニアリング、プロセスチェーンの連携、バックエンドにおけるフロントエンドの問題の修復、そしてバックエンドからのフィードバックによるフロントエンドの改善も含まれます。タングステン合金板は高密度であるため、薄板製造において割れや偏差などの問題が顕著になりやすく、綿密な管理が求められます。温度や湿度などの環境要因は製造の安定性に影響を与えるため、常に制御する必要があります。

8.2.1 粉末冶金プロセスにおける問題点

粉末冶金プロセスにおける問題は、主に粉末調製の欠陥と焼結プロセスの不具合として現れます。これらの問題はピレットの品質と最終的な板の微細構造に影響を与えますが、原因を特定しプロセスを改善することで解決できます。粉末調製の欠陥は、還元の不均一性や不純物の混入に起因し、焼結の不具合は温度制御と雰囲気管理に関連しています。問題の診断には化学分析と顕微鏡観察を組み合わせる必要があります。改善戦略にはパラメータの最適化と補助技術が含まれます。

プロセス問題の解決は、基本的なステップに焦点を当てています。粉末の精製は欠陥源を低減し、焼結の均質化は密度を向上させます。タングステン合金は耐火性が高いため、高温では問題が悪化するため、精密な制御が求められます。環境清浄度管理は外部からの汚染を防ぎます。

8.2.1.1 粉末調製における欠陥の特定と管理対策

粉末製造における欠陥の特定と制御対策は、主にタングステン粉末および合金元素粉末の純度、粒径、および形態に着目します。凝集、不純物の濃縮、広い粒度分布などの欠陥は、混合の不均一性や焼結時の気孔率の増大につながる可能性があります。欠陥の特定は、レーザー粒度分布計による分布検出、走査型電子顕微鏡による形態観察、およびスペクトル分析による不純物分析によって行われます。化学的には、酸素や炭素などの不純物は還元中に残留し、粒径の不均一性は温度変動に起因します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

これらの欠陥は、酸化タングステンの水素還元中に確認されました。低温での水分除去が不十分だったため、残留酸素が発生し、高温で異常成長して粗大粉末となりました。合金粉末の噴霧化時にガスが巻き込まれたことで、気孔が発生しました。欠陥の同定と分類後、電子顕微鏡下で凝集粒子として形態欠陥が明確に観察され、不純物スペクトルのピークが顕著でした。

制御対策は、まず還元パラメータを最適化し、段階的な温度制御を用いて粒子サイズを微細化し、水素流量を調整して水蒸気濃度を調整し、化学還元剤を用いて酸素濃度の低減を促進します。ふるい分けと気流分級により異常粒子を除去し、ボールミル処理により凝集体を活性化・分解します。前処理として水素脱酸素炉でガスを精製し、原料中の不純物を低減します。粉末の保管には、乾燥、不活性ガスシール、酸化と凝集の防止が含まれます。このアプリケーションでは、高純度タングステン粉末を用いてタングステン酸アンモニウム前駆体の多段階再結晶化を制御し、同時にカルボニル法を用いて合金粉末を調製することで高純度を実現します。反復パラメータを監視し、フィードバックを適用することで、粒度分布を狭めた後、均一な混合を確保します。化学洗浄と酸洗浄により表面不純物を除去し、乾燥とふるい分けを行います。

8.2.1.2 焼結プロセスの欠陥の診断とプロセス改善

焼結プロセス欠陥の診断とプロセス改善は、主に焼結不足時の気孔、焼結過剰時の粗大化、変形偏析といった問題を対象としています。これらの欠陥は、ピレット組織の密度と均一性に影響を与えます。診断は、温度記録、密度測定、および金属組織観察によって行われます。欠陥の原因は、温度ウィンドウの逸脱、焼結不足時の液相再配置不足、焼結過剰時の液相過剰による粒子成長、および大気中の高水分による酸化物介在物の生成に反映されます。

診断方法には、炉の温度プロファイルの偏差分析、金属組織断面における気孔分布の観察、密度勾配を用いた偏析試験などがあります。揮発性残留物の化学分析により、不純物や不具合の有無を確認します。プロセス改善は、温度範囲の調整、分割加熱・保持による液相線期間の最適化、そして化学添加剤を用いた温度範囲の延長から始まります。雰囲気改善には、露点制御と流動性向上、水蒸気除去による酸化抑制が含まれます。熱間静水圧プレスは焼結欠陥の解消に、高圧密閉セル構造は緻密化の向上に寄与します。炉内荷重の改善には、垂直懸架または砂床支持による変形抑制が含まれます。実用化においては、高密度合金焼結は、診断後のパラメータ微調整を伴う統合型熱間プレスによって改善されます。化学純度の向上と事前脱ガスは、ガス欠陥を低減します。真空焼結などの代替法では、水蒸気問題に対処するため、水素を代替します。

8.2.2 圧延と成形の問題

圧延・成形における主な問題には、熱間圧延割れと冷間加工時の不安定変形が含まれます。これらの問題は、板材の健全性と板厚均一性に影響を与え、原因分析と制御手法によって解決できます。熱間圧延割れは応力集中に起因し、冷間変形は硬化蓄積を引き起こします。診断には、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面および断面観察、パス設計の改善、焼鈍処理が含まれます。問題解決は、変形の協調、熱間圧延時の側圧防止、冷間加工焼鈍時の応力解放に重点を置きます。タングステン合金は高硬度であるため、薄板圧延ではこの問題が顕著になります。環境温度制御は変形に影響を与えます。

8.2.2.1 熱間圧延割れの原因と防止方法

熱間圧延割れの主な原因は、高温での応力集中と不均一なマイクロ組織です。割れは端面または表面から発生し、伝播します。化学的には、弱い界面では応力が高く、タングステン粒子の脆性を悪化させます。原因はピレットの気孔率や偏析にまで遡ることができ、圧下率が大きいと応力が靱性を超えます。

予防策としては、まずピレットの焼結を最適化し、密度を高め、初期欠陥を低減します。圧延工程では、初期成形のために少量の圧下を行い、その後微調整を行います。化学潤滑と高温コーティングにより摩擦応力が低減されます。サイドガイドロールはシートの形状を拘束し、エッジの引張応力を防止します。中間加熱により均一な温度が確保され、塑性回復が促進されます。実用化においては、高密度合金を用いた予防的クラッド圧延により、空気を遮断し、応力を緩和します。ひび割れ形態は診断・観察され、表面ひび割れは潤滑を調整することで、内部ひび割れはピレット品質の改善によって対処されます。そのバリエーションとして、一部の熱間圧延工程を温間圧延に置き換える方法などがあります。

8.2.2.2 冷間加工変形の解析と制御

冷間加工変形の解析と制御は、主に板厚精度と表面品質に影響を与える硬化蓄積と反りを対象としています。解析は応力曲線と組織学的観察によって行われます。原因は転位の増殖に現れ、化学的にはバインダー相の塑性限界とタングステン粒子が変形を阻害し、局所的なひずみを引き起こします。

変形制御方法には、小刻みなパス圧下、硬化を解放するための中間焼鈍、滑り回復のための化学拡散などがあります。均一な潤滑剤塗布は摩擦変形を低減します。張力制御は板形状を安定化し、中間波やエッジ波を防止します。圧延工程は解析後に調整され、硬化度が高い場合は焼鈍時間を長くします。塗布制御では、薄板の変形をクロスローリングによって制御し、均一な応力分布を確保します。高い化学純度は、不純物やピンニング転位を低減します。バリエーションとしては、温間圧延と冷間圧延があります。

8.2.3 品質検査と管理の問題

品質検査および管理の問題には、主に非破壊検査（NDT）における課題と寸法公差の偏差が含まれます。これらの問題は、完成品の受入れおよび適用の精度に影響を及ぼします。解決策は、代替方法と技術改善によって達成されます。NDTの課題には、マトリックス干渉や加工変動による寸法偏差などがあります。管理は、オンライン監視とフィードバック調整に重点を置いています。問題解決には、複数の方法を組み合わせて使用すること、破壊的なサンプリングをNDT

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ソリューションに置き換えること、そして精密機器を使用して寸法偏差を修正することが重視されます。タングステン合金は密度が高いため、薄板での試験は困難です。環境校正も精度に影響を与えます。

8.2.3.1 非破壊検査技術の応用における課題と代替ソリューション

非破壊検査（NDT）技術の適用における主な課題は、タングステンの高密度化により X 線の透過が阻害され、超音波の減衰が生じることです。これらの課題により、気孔や亀裂などの内部欠陥の特定が困難になり、また、化学的な密度勾配が信号に干渉します。これらの問題は厚い切片でより顕著になり、薄い切片では表面干渉が大きくなります。

この代替ソリューションは、X 線コンピュータ断層撮影（CT）によるエネルギー浸透の調整と、高い化学純度によるバックグラウンドノイズの低減を組み合わせたものです。超音波フェーズドアレイ技術はビームの焦点を最適化し、従来のプローブに代わるものです。渦電流検出は表面の亀裂検出に、磁性粉末は磁性合金の検出に役立ちます。このソリューションは、X 線内部検査と超音波補正を組み合わせたものです。

8.2.3.2 寸法公差の偏差と精度向上への対応

寸法公差の偏差への対応と精度向上は、主に圧延変動や熱影響によって生じる厚さ、幅、または平坦度の偏差を対象としています。これらの偏差は、不安定な圧延圧力、各パスにおける応力解放の不均一性、そして化学的に増幅された熱膨張差によって引き起こされます。

加工方法には、ロールギャップ調整のためのオンライン計測とフィードバック、そして精密圧延機による自動補正が含まれます。熱間レベリングにより反りを矯正し、化学焼鈍により残留応力を解放します。高剛性ロールシステムと張力制御により弾性変形を低減し、精度を向上させます。

薄板の偏差をレーザー測定を用いてリアルタイムで調整する用途では、厚板鍛造では研削加工により既存の公差を補正することが可能です。高い化学純度により、熱影響による偏差を低減します。CNC 圧延加工もその一つです。

8.3 タングステン合金板の用途、性能上の問題、および解決策

タングステン合金板は、主に様々な分野における実用性能を中心としています。これらの課題には、高温疲労、振動・衝撃、遮蔽効率、生体適合性、導電性・磁性、腐食・酸化などが含まれます。これらの課題への解決策は、メカニズム解析、設計最適化、そして材料改良によって達成されます。アプリケーション上の問題は、多くの場合、環境条件と材料特性の不一致に起因します。高温環境では疲労破壊が一般的であり、放射線遮蔽効率の低下を考慮する必要があります。電子医療機器における異常な導電性は機能に影響を与える可能性があります。性能問題の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

解決には、予防と是正、設計を導くためのメカニズム調査、そして適応性を向上させるための改良技術が重視されます。

問題解決の体系的な性質は、微細構造の調整からマクロ的な保護コーティングに至るまで、マルチスケールの介入に反映されています。航空宇宙用途では耐疲労性と耐衝撃性が重視され、放射線遮蔽では効率回復と安全性の向上が重視され、電子機器および医療用途では導電性の安定性と耐腐食性が優先されます。タングステン合金板の二相構造は、この解決策において重要な役割を果たします。タングステン粒子が強固な支持を提供し、バインダー相が靱性を調整します。温度サイクルや媒体曝露増幅などの環境要因には、的を絞った解決策が必要です。

8.3.1 航空宇宙分野におけるタングステン合金板の応用上の課題

タングステン合金板は、高温環境下での疲労や振動・衝撃負荷を受けます。これらの問題は材料の長期安定性と構造健全性に影響を与えるため、強化処理や耐衝撃設計によって軽減されます。航空宇宙部品は繰り返し熱応力と機械的負荷を受けるため、カウンターウェイトや熱管理材料として使用されるタングステン合金板は、これらの課題に対処する必要があります。問題分析では、メカニズムの特定と設計最適化が重視されます。高温疲労は微視的な損傷の蓄積に起因し、振動・衝撃は応力波の伝播に関連しています。

アプリケーションの問題解決には、材料選定とプロセス改善も不可欠です。タングステン合金は航空宇宙用途において密度と弾性率のバランスに優れていますが、過酷な環境下では、個々のニーズに合わせたソリューションが必要となります。タングステン-ニッケル-鉄系合金は航空宇宙部品に広く用いられており、バインダー相が変形を調整します。環境シミュレーション試験はソリューションの指針となり、加速疲労試験は寿命を評価します。

8.3.1.1 高温疲労破壊のメカニズムと強化処理

高温疲労破壊のメカニズムは、主に繰り返し熱機械的負荷を受けることで微視的損傷が進展することに起因します。タングステン合金板では、このメカニズムは粒界すべり、転位上昇、微小亀裂の発生と伝播として現れます。化学的には、界面における元素偏析が接合強度を低下させ、タングステン粒子周辺の応力集中が損傷を誘発します。このプロセスは段階的に進行します。初期には転位が増殖して残留帯を形成し、中期には微細孔が合体し、後期には亀裂が急速に伝播して破断に至ります。熱サイクルはこのメカニズムを悪化させ、不均一な膨張によって熱応力が発生し、酸化層の形成によって表面がさらに弱化します。

強化処理は、まず合金設計、希土類元素または炭化物のドーピングによる粒界分散と固定、そして偏析元素の化学的制御によるすべり速度の低減と疲労閾値の上昇といった要素から構成されます。熱処理、溶体化処理、そして時効処理によって微細相が析出し、バインダー相の靱性が向上します。同時に、処理温度範囲を制御することで粗大化を抑制します。窒素や炭素の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

イオン注入などの表面強化処理によって傾斜層が形成され、化学拡散によって表面硬度が向上し、亀裂の伝播が抑制されます。

加工用途では、マルチパス焼鈍処理によって微細構造が修復され、化学純度管理によって不純物誘起損傷が低減されます。機構検証には、サイクルシミュレーションと破壊特性の観察による調整のための疲労試験が含まれます。表面圧延などのバリエーションは、引張疲労に対抗するために圧縮応力を導入します。

8.3.1.2 振動・衝撃荷重と耐衝撃設計の問題

振動および衝撃荷重における主な問題は、応力波の伝播によって引き起こされる局所的な損傷にあります。タングステン合金板では、微小亀裂の発生と伝播、化学的に弱い界面への応力集中、そしてタングステン粒子の脆性による衝撃効果の増幅といった形で現れます。その原因は、振動周波数の共鳴と高い瞬間衝撃荷重の重畳、そしてエネルギー吸収のための材料減衰の不足にあり、疲労の加速につながります。

耐衝撃設計では、まず複合構造を最適化し、タングステン合金シートをポリマーで積層し、化学バインダーを用いて衝撃波を緩和します。また、テクスチャー制御も設計に組み込まれ、配向繊維が方向性強度を高めています。弾性ポリマーなどの表面コーティングがエネルギーを吸収し、化学的適合性により安定した接着力を確保します。

設計アプリケーションでは、振動シミュレーション試験によって問題を評価し、板厚分布を調整して応力を分散させます。機構解析と有限要素モデリングによって損傷箇所を予測し、板厚の増厚や補強を検討します。勾配密度設計などのバリエーションは、段階的な吸収を提供します。

まとめると、振動・衝撃荷重と耐衝撃設計の問題は、動的応答工学戦略を具体化したものです。

緩衝材の最適化により、タングステン合金板の耐振動性が向上し、航空宇宙用途における安定性が向上します。設計の改善により、衝撃による損傷は徐々に軽減され、振動環境における材料の信頼性が向上します。

8.3.2 タングステン合金板の放射線遮蔽への応用に関する問題点

タングステン合金板は、効率低下と生体適合性に関する懸念を抱えています。これらの問題は遮蔽効果と安全な使用に影響を与えますが、効率回復と安全性の向上によって解決できます。放射線遮蔽用途において、コリメータや保護層として使用されるタングステン合金板は、長年にわたる放射線曝露に耐える必要があります。効率低下は構造変化に起因し、生体適合性に関する懸念は表面反応に関連しています。

アプリケーションの問題解決には、材料の安定性と最適な保護が重要です。タングステンは高密度であるため、遮蔽において厚みの面で有利ですが、放射線環境に応じて適切なソリューションが必要です。タングステン-ニッケル-銅系は遮蔽材として広く使用されており、非磁性で

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

あるため医療用途への適合性も確保されています。環境シミュレーション試験によってソリューションを導き、放射線量試験によって変化を評価します。

8.3.2.1 シールド効率の減衰と効率回復の理由

遮蔽効率の低下の主な原因は、放射線誘起構造変化（膨潤、多孔性形成、相転移など）です。タングステン合金板では、これらの変化は密度の低下と減衰係数の変動として現れます。化学的には、放射線によって変位した原子が空孔クラスターを生成し、界面損傷が散乱を増幅させます。これらの原因とプロセスは線量に依存し、低線量では微視的な欠陥、中線量から高線量では巨視的な変形が生じます。

効率回復は、まず欠陥を修復するための熱処理、空孔を治癒するための化学拡散、そして二次相の析出を防ぐための制御されたアニール温度によって達成されます。保護表面コーティングは入射放射線を遮断し、化学的に不活性な層はエネルギーを吸収します。回復プロセス中に安定剤が添加され、欠陥を固定し、膨潤を軽減します。

8.3.2.2 生体適合性ハザードの評価と安全性の向上

生体適合性ハザードの評価と安全性向上は、主に表面溶出と組織反応を対象としています。タングステン合金板では、これらのハザードはバインダー元素の限定的な溶解として現れ、化学的にはニッケルイオンまたは銅イオンがアレルギーを誘発する可能性があります。評価は、浸出試験と細胞適合性試験によって行われます。これらのハザードの原因には、表面の酸化や摩耗による活性相の露出などがあります。

安全性の向上は、安定した酸化膜を形成するための表面不動態化から始まり、続いて化学陽極酸化またはめっきによってイオンの移動を阻止します。評価基準には、細胞接着および増殖速度の生物学的試験、および活性元素の割合を低減するための配合改良が含まれます。

8.3.3 電子機器および医療機器におけるタングステン合金板の応用上の課題

タングステン合金板は、異常な導電性や磁性、腐食、酸化といった問題を抱えています。これらの問題は導電性の安定性や機器の寿命に影響を与えますが、トラブルシューティング、改修保護コーティングによって解決できます。電子医療用途では、ヒートシンクやシールドとして使用されるタングステン合金板は、導電性の変動や酸化といった問題に対処する必要があります。これらの異常は不純物や表面変化に起因し、腐食は媒体の侵食に関連しています。

アプリケーション問題の解決には、トラブルシューティングメカニズムとコーティングの最適化が重要です。タングステン-銅系は電子機器に広く用いられており、優れた熱伝導性と電気伝導性を示します。環境試験は解決策を導き、腐食試験は変化の評価を加速します。まとめると、このアプリケーション問題解決は、電気化学プロセスにおける材料安定性を実証し、改良スキームを通じてデバイスにおけるタングステン合金板の信頼性の高い性能をサポートし、電子医療機器分野における技術進歩を促進します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.3.1 電気伝導性と磁気異常の調査と材料改質

電気伝導性および磁気異常の主な原因は、不純物の混入と相組成の変動です。タングステン合金板では、これらの要因は導電経路の遮断や偶発的な磁化として現れます。化学的には、酸素不純物は絶縁層を形成し、鉄元素の偏析は磁区を形成します。異常の調査は、抵抗測定とヒステリシス曲線を用いて不純物や偏析領域を特定することで行われます。

材料改質は、原料を精製し、化学還元前処理によって酸素と鉄を還元することから始まります。改質された合金は、銅の比率を調整することで導電性を高め、モリブデンドーピングによって磁性を弱めます。表面洗浄によって導電性を回復し、化学研磨によって酸化を除去します。

8.3.3.2 腐食と酸化の問題に対する保護とコーティング技術

腐食および酸化に対する保護およびコーティング技術は、主に媒体侵食と空気酸化を対象としています。これらの問題は、タングステン合金板の表面孔食や性能劣化として現れ、バインダー相が優先的に反応して多孔質層を形成します。その原因は、高湿度環境または高温酸素への曝露です。

保護コーティング技術は、まず無電解ニッケルリンめっきで緻密な膜を形成し、続いて化学的な自己触媒反応によって均一な被覆を実現します。次に、コーティング工程で窒素クロムまたはDLCを真空めっきすることで、硬度と不活性性を高めます。この保護前処理によって表面が不動態化され、酸化膜によって基板が安定化されます。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

Precision customization: support high density (17-19 g/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

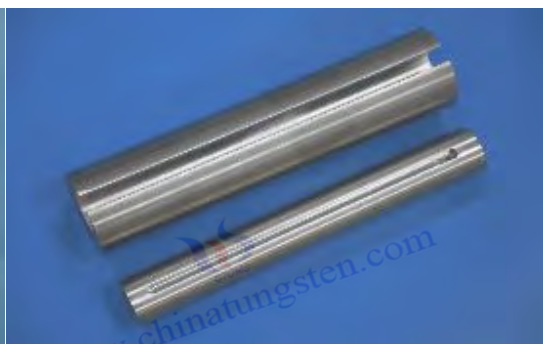
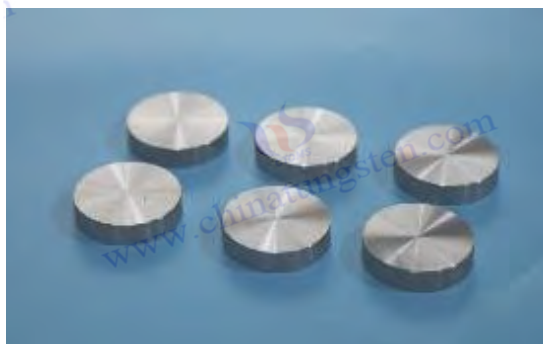
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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
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

付録

付録A：中国のタングステン合金板規格

中国のタングステン合金板の規格は、主に国家非鉄金属標準化技術委員会（TC243）とその小委員会が担当しており、タングステン合金の化学組成、物理的特性、加工技術、品質管理など側面をカバーしています。これらの規格は、国の産業政策と鉱物資源計画に基づいており、工業用途におけるタングステン合金板の信頼性と一貫性を確保しています。規格では、高純度タングステン粉末の使用、液相焼結プロセスの標準化、構造欠陥や性能偏差を避けるための酸素、炭素、リンなどの不純物の厳格な制限を重視しています。標準システムには、国家規格（GB / T シリーズ）、業界規格（YS / T シリーズ）、企業規格が含まれており、タングステン-ニッケル-鉄、タングステン-ニッケル-銅、タングステン-銅などの一般的なシステムに適用できます。

規格では通常、組成範囲、密度分布、硬度指数、寸法公差などが規定されています。焼結後、ピレットは均一性を検証するために熱処理加工を施す必要があります。タングステン含有量を決定するためのシンケリン重量法などの化学分析法は標準化されており、精度が確保されています。規格では環境および安全要件にも対応しており、原材料調達の合法性と持続可能性を重視し、違法な鉱物製品の使用を防止しています。近年、タングステン業界への参入要件の強化に伴い、規格に輸出管理要素が組み込まれ、特定のタングステン合金製品の加工および取引に関するコンプライアンスガイダンスが提供されています。タングステン合金板規格の導入は、粉末冶金から完成板までの全工程における標準化を促進し、ハイエンド製造業における用途拡大を支援しています。

国家規格（GB/T シリーズ）

中国国家規格（GB/T シリーズ）は、中国市場監督管理総局と中国標準化管理局が発行する、中国におけるタングステン合金板の主要規格です。タングステン合金の一般要求事項、試験方法、性能指標を網羅しています。これらの規格は、タングステン合金板の化学組成分析、加工、品質検査に適用され、密度、硬度、熱安定性のバランスを確保します。タングステン合金板の国家規格は、タングステン粉末の純度から焼結温度範囲の制御に至るまで、粉末冶金プロセスの標準化に重点を置いています。化学的には、タングステン含有量、バインダー相比率、不純物閾値を規定し、二相微細構造の均一な分布を実現しています。

標準設定プロセスには、非鉄金属研究機関や製造企業を含む複数の関係者の協力が含まれ、国際標準を参照しながらも中国の資源特性が取り入れられました。タングステン合金板の GB/T 標準には、タングステン棒、板、合金板の一般仕様が含まれており、表面仕上げ、厚さの許容差、焼鈍条件が規定されています。三酸化タングステン含有量の測定などの化学試験方法では、正確性を確保するためにタングステン酸アンモニウムの重量法が使用されています。この標準では熱処理要件も規定されており、焼鈍工程での再結晶温度を最適化して、結晶粒の粗大化が機械的特性に影響するのを防ぎます。輸出向けの標準には規制条項が組み込まれており、タングステン-ニッケル-鉄またはタングステン-ニッケル-銅合金の仕様に関する報告要件を規定し、国際貿易のコンプライアンスをサポートしています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応用レベルでは、GB/T 規格は、精密機器や熱管理におけるタングステン合金板の使用を規定しており、ミクロンサイズの箔からセンチメートルサイズの板まで、幅広いサイズをカバーしています。規格の改訂サイクルでは、ナノ強化合金の採用など、技術の進歩が考慮されています。規格の導入にあたっては、企業は認定試験機関による検証を受け、バッチサンプルを用いて組成と密度を検査する必要があります。環境持続可能性も規格に組み込まれており、タングステン粉末のリサイクルを促進し、資源消費を削減しています。

業界標準（YS/T シリーズ）

工業情報化部が管轄する業界標準（YS/T シリーズ）は、タングステン合金板の化学分析および加工のために策定されており、より詳細な技術仕様を提供しています。これらの標準は、タングステン銅合金およびタングステンベース高密度合金板の製造に適用され、化学組成の正確な測定と安定した性能を保証します。YS/T 標準は、シンケルセチン重量法などのタングステン含有量測定法に重点を置いています。シンケルセチン重量法は、溶解と沈殿分離による高精度分析を実現し、タングステン銅合金中のタングステン含有量の検証に適しています。また、サンプル調製、機器の校正、誤差制御についても規定しており、化学的にはマトリックス干渉の除去を重視しています。

タングステン合金板の業界規格には、粉末の混合から液相焼結の温度プロファイル、粒子の再配列を促進するための液相量の最適化に至るまで、粉末冶金プロセスの詳細が含まれています。YS/T シリーズ規格は、タングステン-ニッケル-鉄系およびタングステン-ニッケル-銅系の板材仕様を網羅し、硬度分布と表面粗さの要件を規定し、金型およびシールド用途への加工適応性をサポートしています。これらの規格は、国家計画を参考に策定されており、原材料の合法性と環境コンプライアンスを確保するための資源アクセス条件も組み込まれています。

YS/T 規格は、応用分野において、電子機器および医療分野におけるタングステン合金板の品質管理、寸法公差、および熱伝導率試験方法の標準化を導きます。改訂プロセスではユーザーからのフィードバックが反映され、タングステン-モリブデン複合材料などの新興合金に関する条項が追加されました。施行にあたっては、企業内に試験所を設置し、試験装置を定期的に校正することが求められます。環境管理に関しては、この規格は炭素排出量の削減に向け、低エネルギー焼結技術の導入を推奨しています。

企業および地域の基準

中国におけるタングステン合金板の製造においては、企業規格と地方規格が補足的な規制となっています。非鉄金属企業や地方の業界団体によって策定されたこれらの規格は、特定の合金系や用途シナリオに柔軟な指針を提供しています。これらの規格は国家規格の枠組みに基づいていますが、企業のプロセス経験を取り入れることで、量産への適応性を確保しています。株洲超硬合金集団の社内規格をはじめとする企業規格は、タングステン合金板の圧延工程や焼鈍条件を規定し、バインダー相の分布を化学的に最適化することで靱性を向上させています。地方規格は、湖南省や江西省などのタングステン生産地域で一般的であり、鉱物資源計画と併せて、原材料のトレーサビリティと不純物管理を重視しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

これらの規格は、タングステン銅合金の化学分析法を網羅し、微量元素の測定まで網羅しており、輸出製品の適合性検証にも適用できます。企業規格は、品質管理システム、生産プロセスへの ISO 9001 認証の統合、そして一貫性を確保するためのバッチ追跡を重視しています。地域規格は、タングステン系高密度合金の標準化仕様など、地域間の連携を促進し、サプライチェーンの最適化を支援します。

アプリケーションレベルでは、企業標準が精密機器におけるタングステン合金板のカスタマイズを規定する一方、地域標準は環境に配慮した生産を促進しています。改訂は市場の動向に柔軟に対応し、高エントロピー合金に関する条項を盛り込んでいます。導入段階では、内部監査によって標準への準拠状況が検証されます。環境の持続可能性は、リサイクルと廃棄粉末の排出削減に重点を置いています。

付録 B タングステン合金板の国際規格

タングステン合金板の国際規格は、主に ASTM International や SAE International などの組織によって策定されています。これらの規格は、高強度タングステン合金板の化学組成、機械的特性、試験方法を網羅する世界的に統一された規制枠組みを提供し、航空宇宙、医療、エレクトロニクス分野における材料の相互運用性を確保しています。国際規格では、高密度タングステン基合金の分類が重視されており、例えば ASTM B777 の等級分けシステムでは、タングステン含有量とバインダー相の種類に基づいて仕様が定義されています。規格策定プロセスでは、複数の国の専門家による協力が求められ、粉末冶金プロセスの一般的な要件が参照されています。

この国際規格の化学分析セクションは、タングステン含有量の測定と不純物の限度値を標準化し、国際貿易における認証を支援します。密度分布、硬度、熱伝導率などの性能指標は、板材の圧延および熱処理の検証に適用できます。また、この規格は ISO 9001 などの品質管理システムも取り入れており、生産の一貫性を確保しています。ワッセナー・アレンジメントなどの輸出管理基準は、タングステン合金の国際流通に影響を与え、コンプライアンス報告を重視しています。

用途においては、国際規格が放射線遮蔽材やヒートシンクにおけるタングステン合金板の使用を規定しており、寸法公差と表面粗さの要件は精密加工をサポートします。改訂サイクルでは技術進歩を考慮し、複合合金に関する条項が盛り込まれています。導入には、第三者機関による試験所認証とバッチ試験の適合が求められます。環境の持続可能性の観点から、リサイクル活動が促進されています。

ASTM 国際規格

ASTM 国際規格は、中国からのタングステン合金板の輸出における中核的な規格です。米国材料試験協会（ASTM）によって策定されたこの規格は、ASTM B777 によるタングステン-ニッケル-鉄合金およびタングステン-ニッケル-銅合金の分類など、タングステン系重合金板の標準

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

規格を網羅し、密度等級と機械的要件を定義しています。これらの規格は板の製造および試験に適用され、二相マイクロ組織のバランスを確保するために、タングステン含有量の範囲、バインダー相比率、および不純物閾値を化学的に規定しています。

ASTM B777 は、タングステン合金板の化学組成と物理的特性を詳細に規定しています。焼結後、板は均一性を検証するために熱間圧延する必要があります。この規格には、タングステン含有量を測定するためのシンシナティエル重量法などの試験方法が含まれており、精密管理をサポートしています。元々は純タングステン板および箔を規定していた ASTM B760 は、合金板の圧延工程の仕様にも拡張されています。

ASTM 規格は、航空宇宙および医療用遮蔽材におけるタングステン合金板の使用に関するガイドラインであり、寸法公差と硬度の仕様は加工適応性をサポートします。改訂プロセスでは、世界各国からのフィードバックが反映され、放射線耐性に関する規定も追加されました。導入にあたっては、社内認定の研究所で検証を行い、バッチサンプリングによって適合性を確認しています。環境管理においては、持続可能な生産を重視しています。

SAE 国際規格

SAE 国際規格は、航空宇宙分野におけるタングステン合金板の用途を規定しています。AMS 7725 などの規格は、厚肉タングステン合金板の性能要件を規定しています。これらの規格は、高い強度と熱安定性を重視しており、高温部品への使用に適しています。SAE 規格は、タングステン-ニッケル-鉄合金の化学組成と微細構造を規定し、電磁干渉を回避するために強磁性を化学的に制限しています。

AMS 7725 規格は、タングステン合金板の密度分布と焼鈍状態を詳細に規定しています。焼結後、板は靱性を検証するために鍛造および圧延工程を経る必要があります。この規格には、引張強度や破壊靱性の測定などの試験方法が含まれており、機械的平衡もサポートしています。

応用分野においては、SAE 規格が航空機器におけるタングステン合金板の使用を規定しており、振動耐性と疲労指標が設計をサポートします。改訂サイクルでは航空宇宙分野の進歩を考慮し、複合構造に関する規定が盛り込まれています。導入には AS9100 認証とバッチ試験への準拠が必須です。環境持続可能性の観点から、低エネルギープロセスが推奨されます。

ISO 国際規格

ISO 国際規格は、タングステン合金板材に関する世界的に統一された枠組みを提供しています。国際標準化機構（ISO）によって策定された ISO 9001 品質マネジメントシステムの統合などの規格は、タングステン重合金板材の一般仕様にも拡張されています。これらの規格は粉末冶金法による板材の製造に適用され、国際貿易規制への適合を確保するために、純度と不純物の管理を化学的に規定しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 規格では、タングステン合金板の化学分析と物理試験が規定されており、焼結プロセスは環境要件を満たす必要があります。これらの規格には、世界的な認証ガイドラインが含まれており、輸出認証をサポートしています。

ISO 規格は、電子機器や医療分野におけるタングステン合金板の使用を規定し、寸法精度や耐食性といった機能要件をサポートしています。改訂プロセスには多国間の協力が求められ、持続可能性に関する規定も盛り込まれています。導入にあたっては、企業は監査を受け、バッチのトレーサビリティとコンプライアンスを確保します。環境管理においては、資源循環が重視されています。つまり、ISO 国際規格は、タングステン合金板のグローバルな品質保証を具体化し、管理システムを通じて生産を標準化し、国際協力の深化を支援しています。

付録 C: ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国、その他の国におけるタングステン合金板の規格

米国、欧州、日本、韓国など、各国のタングステン合金板の規格体系は多様です。米国では主に ASTM 規格が使用され、欧州では EN 規格、日本では JIS 規格、韓国では KS 規格が採用されています。これらの規格は、タングステン合金板の組成、特性、加工方法を網羅しており、地域産業のニーズを重視しています。欧米の規格は航空宇宙および医療用途に焦点を当て、日本の規格はファインケミカル、韓国の規格は電子機器の輸出を支援しています。規格策定には業界団体が関与し、国際規格を参照しつつ地域のリソースも活用しています。

これらの国の標準化学では、タングステン含有量と不純物の制限値が規定されており、性能指標には密度と熱伝導率が含まれています。用途としては、シールドやヒートシンクにおけるタングステン合金板の使用が挙げられます。動的応答技術は、合金の革新を取り入れるために改訂中です。導入には、認定試験所での試験とバッチ検証の遵守が求められます。環境の持続可能性の観点から、リサイクルが重視されています。

アメリカ規格（ASTM、AMS シリーズ）

、タングステン合金板の世界的なベンチマークです。例えば、ASTM B 777 は、タングステン合金板を分類し、密度等級と機械的特性を定義しています。これらの規格は粉末冶金および板の圧延に適用され、タングステン-ニッケル-鉄合金のバインダー相比を化学的に規定することで、非磁性バリエーションを確保しています。ASTM B777 は化学組成と試験方法を詳細に規定しており、焼結板の熱処理検証を義務付けています。航空宇宙用タングステン合金板に関する AMS 7725 は疲労強度に重点を置いています。これらの用途は、航空宇宙および医療分野におけるタングステン合金板の使用をサポートしています。改訂プロセスは専門家によるレビューを受け、放射線に関する規定が組み込まれました。AS9100 認証を取得しました。

欧州規格（EN シリーズ）

欧州規格（EN シリーズ）は、欧州標準化委員会によって策定されています。例えば、EN 2685 は、タングステン合金板に関する一般要求事項を規定しています。これらの規格は、重タングステン合金の組成と特性に適用され、環境適合性を確保するために不純物を化学的に制限し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ています。EN 規格は焼結プロセスと寸法公差を規定し、欧州における板材の取引を支援しています。用途においては、原子力および電子機器用途におけるタングステン合金板の使用をガイドしています。改訂には多国間協力が不可欠です。CE マーキングが義務付けられています。

日本規格（JIS シリーズ）

日本規格（JIS シリーズ）は、日本工業標準調査会によって制定されています。例えば、JIS H 7804 はタングステン合金板の組成を規定しています。これらの規格は、精密化学組成に重点を置いた電子機器用途に適用されます。JIS 規格は純度と加工精度を重視し、日本のタングステン合金板産業を支えています。用途においては、半導体におけるタングステン合金板の使用をガイドするほか、技術指針の改正や JIS 認証の強化にも取り組んでいます。

韓国規格（KS シリーズ）

韓国規格（KS シリーズ）は、韓国工業標準院によって制定されています。例えば、KS D 3615 はタングステン合金板の要件を規定しています。これらの規格は、電子機器の輸出をサポートし、熱伝導率を化学的に定義しています。KS 規格は、韓国における板材製造を支援するための試験方法を規定しています。また、応用分野においては、新エネルギー源の利用をガイドしています。さらに、業界連携の見直しや KS マークの導入も行っています。



CTIA GROUP LTD タングステン合金シート

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

付録D タングステン合金板の用語表

中国語の用語	簡単な説明
タングステン合金板	タングステンを主成分とし、粉末冶金法により成形、圧延された薄い板状の材料。
高比重タングステン合金	高密度タングステンベース合金は、カウンターウェイトやシールドに使用されます。
液相焼結	焼結プロセスでは液相が出現し、粒子の再配置と緻密化が促進されます。
バインダー相	合金中のタングステン粒子は可塑性と靱性をもたらします。
溶解-再沈殿	液相焼結中にタングステン原子が溶解してバインダー相に再沈殿するメカニズムにより、粒子の球状化が促進されます。
冷間等方圧プレス	液体媒体を使用して粉末ブランクを均一に加圧成形する方法。
熱間静水圧プレス	高温高压下で気孔をなくし密度を高める後処理技術。
マルチリーフコリメータ	放射線治療装置内のタングステン合金ブレードで構成されたビーム成形装置。
ヒートシンク	電子機器の放熱に使用される熱伝導性基板は、タングステン銅合金で作られることが多いです。
擬似合金	タングステン銅合金などの 2 つの非固体物質は、溶融浸透によって製造されます。
再結晶焼鈍	高温焼鈍により再結晶が誘発され、加工応力が除去され、可塑性が回復します。
加工硬化	冷間加工により転位密度が増加し、硬度と強度が向上します。
テクスチャ	圧延変形によって生じる結晶方位の優先分布は異方性に影響を及ぼします。
不動態膜	表面に自然または人工的に形成される保護酸化物層により、耐腐食性が向上します。
フィッシャー粒度	空気透過法によって測定された粉末の平均粒子径。
アルキメデス	水の置換によって物質の密度を測定する方法。
ピッカーズ硬度	ダイヤモンド圧子で測定された硬度指数はタングステン合金に適用できます。
X線減衰	物質がX線やガンマ線を吸収したり散乱したりする能力。
熱膨張係数	温度変化下における材料の寸法膨張率は基板とのマッチングに重要です。
生体適合性	この素材は生物組織と接触しても安全で、無毒、非アレルギー性です。

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

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

参考文献

中国語参考文献

- [1] 王曉明、李偉. タングステン合金材料の製造プロセスと性能研究 [J]. 非鉄金属材料と工学, 2020, 41(5):45-52.
- [2] 張華、劉軍「高密度タングステン合金板の粉末冶金プロセスの最適化[J].」粉末冶金技術, 2019, 37(4):278-284.
- [3] 陳立、趙明. タングステン-ニッケル-鉄合金板の微細組織と機械的特性の分析 [J]. Materials Reports, 2021, 35(12): 12015-12020.
- [4] 孫偉、楊凡「タングステン銅複合シートの電子パッケージへの応用[J]」電子材料技術, 2022年, 46(3):89-95.
- [5] 李娜、王強. タングステン合金薄板の圧延工程と表面処理技術. 希少金属材料工学, 2018, 47(8): 1567-1573.
- [6] Xu Gang, Huang Wei. 放射線遮蔽におけるタングステン合金の応用の進歩 [J]. 原子力技術, 2023, 46(2): 201-208.
- [7] Liu Yang, Zhang Lei. 熱処理プロセスがタングステン合金板の性能に及ぼす影響 [J]. 熱処理技術, 2020, 49(10): 112-118.
- [8] 趙鵬、陳明. タングステン合金粉末製造技術の研究の進歩[J]. 粉末冶金工業, 2021, 31(6): 67-74.

英語の参考文献

- [1] スミス J、ジョンソン A. タングステン重合金の製造と特性[J]. 材料科学ジャーナル、2019、54(12):8900-8915.
- [2] German R M. タングステン重合金の液相焼結[J]. 国際粉末冶金誌、2020年、56(4):45-58.
- [3] Lee KH, et al. W-Ni-Fe 合金の微細構造と機械的性質[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802: 140-152.
- [4] Upadhyaya G S. 電気用途向けタングステン-銅複合材料[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 123-135.
- [5] Bose A, et al. タングステン合金板の圧延: プロセスと特性[J]. 粉末冶金, 2022, 65(3): 210-225.
- [6] Kim Y, et al. タングステン合金の放射線遮蔽性能[J]. 原子力工学技術, 2023, 55(5): 1789-1796.
- [7] Das J, et al. タングステン重合金に対する熱処理の影響[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(8): 3678-3690.
- [8] Luo SD, et al. タングステン合金の粉末調製技術[J]. International Materials Reviews, 2021, 66(7): 489-512.

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