

タングステン銅電極とは

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 はじめに

- 1.1 タングステン銅電極の定義
- 1.2 タングステン銅電極の基本特性
- 1.3 タングステン銅電極の開発の歴史

第 2 章 タングステン銅電極の材料基礎

- 2.1 タングステンの特性
- 2.2 銅の特性
- 2.3 タングステン-銅複合機構
 - 2.3.1 タングステン銅電極の物理的適合性
 - 2.3.1.1 構造の互換性
 - 2.3.1.2 熱適合性
 - 2.3.2 タングステン銅電極の性能相乗効果
 - 2.3.2.1 電気伝導性と熱伝導性の相乗効果
 - 2.3.2.2 耐高温性と構造安定性の相乗効果
- 2.4 タングステン銅電極の主な原材料要件
 - 2.4.1 タングステン粉末の要件
 - 2.4.2 銅粉末の要件
 - 2.4.3 原材料の前処理基準

第 3 章 タングステン銅電極の物理的および化学的性質

- 3.1 タングステン銅電極の物理的性質
 - 3.1.1 タングステン銅電極の密度
 - 3.1.1.1 密度計算方法
 - 3.1.1.2 密度と組成の関係
 - 3.1.1.3 密度がアプリケーションに与える影響
 - 3.1.2 タングステン銅電極の熱特性
 - 3.1.2.1 熱伝導率
 - 3.1.2.2 熱膨張係数
 - 3.1.2.3 高温耐性
- 3.2 タングステン銅電極の機能性能
 - 3.2.1 タングステン銅電極の導電特性
 - 3.2.1.1 導電率
 - 3.2.1.2 抵抗率
 - 3.2.1.3 電流容量
 - 3.2.2 タングステン銅電極の耐アーク侵食性
 - 3.2.2.1 アーク消耗のメカニズム
 - 3.2.2.2 アブレーション耐性の評価
 - 3.2.2.3 アブレーション耐性に影響を与える要因
- 3.3 タングステン銅電極のその他の特性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.1 タングステン銅電極の硬度
- 3.3.2 タングステン銅電極の強度
- 3.3.3 タングステン銅電極の靱性
- 3.3.4 タングステン銅電極の耐摩耗性
- 3.3.5 タングステン銅電極の耐食性
- 3.3.6 タングステン銅電極の耐溶着性および耐接着性
- 3.4 CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極 MSDS

第4章 タングステン銅電極の分類

- 4.1 組成比による分類 タングステン銅電極
 - 4.1.1 高タングステン含有量電極（タングステン 80%～95%）
 - 4.1.2 中タングステン含有量電極（タングステン 50%～80%）
 - 4.1.3 低タングステン含有量電極（タングステン 20%～50%）
- 4.2 タングステン銅電極の応用シナリオ指向の分類
 - 4.2.1 EDM 用電極
 - 4.2.2 高電圧電気機器用電極
 - 4.2.3 溶接現場における電極
 - 4.2.4 航空宇宙および軍事用途向け特殊電極
- 4.3 タングステン銅電極の形態学的および構造的特性の分類
 - 4.3.1 ブロック電極
 - 4.3.2 棒電極
 - 4.3.3 シート電極
 - 4.3.4 特殊形状電極
- 4.4 タングステン銅電極の性能に基づく分類
 - 4.4.1 高導電性電極
 - 4.4.2 耐アーク腐食性電極
 - 4.4.3 高強度電極
 - 4.4.4 高耐熱電極
- 4.5 タングステン銅電極の微細構造による分類
 - 4.5.1 均一に分散した電極
 - 4.5.2 スケルトン充填電極
 - 4.5.3 勾配分布電極
- 4.6 タングステン銅電極のマクロ的物理的形態による分類
 - 4.6.1 高密度電極
 - 4.6.2 多孔質電極
 - 4.6.3 複合コーティング電極

第5章 タングステン銅電極の製造プロセス

- 5.1 浸透プロセス
 - 5.1.1 タングステンスケルトンのプレファブリケーション
 - 5.1.1.1 タングステン粉末成形
 - 5.1.1.2 タングステン骨格焼結

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

- 5.1.1.3 タングステンスケルトン細孔制御
- 5.1.2 浸透制御
 - 5.1.2.1 銅材料の準備
 - 5.1.2.2 浸透温度制御
 - 5.1.2.3 浸透時間制御
- 5.2 後処理技術
 - 5.2.1 切断
 - 5.2.2 研削
 - 5.2.3 表面処理
 - 5.2.4 寸法精度管理

第 6 章 タングステン銅電極の応用シナリオ

- 6.1 EDM におけるタングステン銅電極の応用
 - 6.1.1 金型加工への応用
 - 6.1.2 難加工材料の加工への応用
 - 6.1.3 EDM への適用の利点
- 6.2 高電圧電気機器におけるタングステン銅電極の応用
 - 6.2.1 高電圧スイッチへの応用
 - 6.2.2 避雷器への応用
 - 6.2.3 高電圧電気機器における応用上の利点
- 6.3 溶接およびろう付けにおけるタングステン銅電極の応用
 - 6.3.1 抵抗溶接における応用
 - 6.3.2 ろう付けへの応用
 - 6.3.3 溶接分野における応用上の利点
- 6.4 航空宇宙および軍事産業におけるタングステン銅電極の応用
 - 6.4.1 ロケットエンジン関連部品への応用
 - 6.4.2 ガイダンスコンポーネントへの適用
 - 6.4.3 航空宇宙および軍事産業におけるアプリケーションの利点

第 7 章 タングステン銅電極の品質管理と試験基準

- 7.1 タングステン銅電極の主要指標の検出
 - 7.1.1 タングステン銅電極の物理的特性試験
 - 7.1.1.1 密度試験方法および規格
 - 7.1.1.2 熱性能試験方法と規格
 - 7.1.1.3 導電率試験方法と規格
 - 7.1.2 タングステン銅電極の化学的性質
 - 7.1.2.1 組成分析法
 - 7.1.2.2 耐食性試験方法
 - 7.1.2.3 不純物含有量試験基準
 - 7.1.3 タングステン銅電極の機械的特性
 - 7.1.3.1 硬度試験方法と規格
 - 7.1.3.2 強度試験方法と規格

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.3.3 韌性試験方法と規格
- 7.2 タングステン銅電極の微細構造検査
 - 7.2.1 金属組織分析
 - 7.2.1.1 金属組織学的サンプル調製
 - 7.2.1.2 位相分布均一性の評価基準
 - 7.2.1.3 粒度検出
 - 7.2.2 タングステン銅電極の欠陥検出
 - 7.2.2.1 気孔率の検出方法と許容範囲
 - 7.2.2.2 ひび割れ検出方法と基準
 - 7.2.2.3 介在物検出方法と管理基準
- 7.3 タングステン銅電極の業界規格
 - 7.3.1 関連する国内規格
 - 7.3.1.1 中国規格の関連規定
 - 7.3.1.2 業界標準の要件
 - 7.3.2 関連する国際規格
 - 7.3.2.1 国際タングステン銅電極規格
 - 7.3.2.2 欧州、アメリカ、日本、韓国およびその他の国におけるタングステン銅電極規格

第 8 章 タングステン銅電極市場と技術動向

- 8.1 タングステン銅電極の産業チェーンの分析
 - 8.1.1 上流原材料供給
 - 8.1.2 中流製造
 - 8.1.3 下流アプリケーション市場
- 8.2 タングステン銅電極の技術的方向性
 - 8.2.1 準備プロセスの最適化
 - 8.2.2 パフォーマンス改善パス
 - 8.2.3 アプリケーション拡張の検討

付録:

タングステン銅電極用語集
参考文献



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.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 はじめに

1.1 タングステン銅電極の定義

(Cu)から作られた複合電極です。その定義には、特定の用途におけるその組成、調製方法、および機能特性が含まれます。タングステン銅電極では、通常、タングステンを主な骨格材料として、銅をフィラーとして使用します。2 つの金属はさまざまな割合で組み合わせられ (例: WCu 70/30、WCu 80/20)、高融点、高温耐性、優れた導電性を備えた材料になります。タングステンは 3422°C という高い融点を持つため、電極は優れた熱安定性とアーク浸食に対する耐性を備えています。一方、融点が 1083°C の銅は、高い電気伝導性と熱伝導性を備えており、効率的な電流伝達と急速な熱放散を保証します。この複合材料の特性により、放電加工 (EDM)、抵抗溶接、電気接点などの用途で広く使用されています。タングステン銅電極の定義には、その微細構造も含まれます。これらの電極は、粉末冶金、プレス、焼結によってタングステンと銅の粉末を混合するか、真空含浸によって多孔質のタングステン骨格に液体銅を浸透させることによって形成され、均一な相分布と低い多孔性を実現します。

実用分野において、タングステン銅電極の定義は、ワークピースの材料を除去するための放電加工 (EDM) における工具電極としての使用や、高電流・高圧力に耐える抵抗溶接における電極としての使用など、その機能特性を包含するようにさらに拡大しています。比率と調製プロセスは、特定のニーズに合わせて調整できます。たとえば、タングステン含有量の高い電極は耐摩耗性と耐アーク性に優れており、銅含有量の高い電極は導電性を最適化します。タングステン銅電極の定義には、従来の単一金属電極との違いも含まれます。複合材料の利点は、タングステンと銅の特性のバランスにあり、純銅の低融点や純タングステンの低導電性など、単一材料の限界を克服します。近年、製造技術の進歩に伴い、タングステン銅電極の定義は積層造形やナノテクノロジーの分野へと徐々に拡大し、より微細な微細構造と新しい用途が模索されています。

1.2 タングステン銅電極の基本特性

タングステン銅電極は、複合材料として独特の物理的、機械的、電気的特性を有しており、様々な用途に特に適しています。まず、導電性はタングステン銅電極の中核特性です。銅相の高い導電性 (約 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$) は、効率的な電流伝送経路を提供します。タングステンの導電性は低いですが (約 $1.8 \times 10^7 \text{ S/m}$)、銅の分布を最適化することで、タングステン銅電極の導電性は従来の銅電極の 80%~90% に達し、放電加工や溶接の要件を満たします。熱伝導性も重要な特性です。銅の熱伝導性とタングステンの適度な熱伝導性 (約 $174 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) を組み合わせることで、熱伝導率が $180 \sim 220 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ の合金が生まれ、機械加工や溶接中に発生する熱を急速に放散して、局所的な過熱を防止します。

耐高温性はタングステン銅電極の大きな利点です。タングステンは融点が非常に高いため、アークや高温環境でも安定性が確保されます。銅相は溶融後に気孔を埋め、材料の熱安定性をさらに高め、3000°C までの過酷な条件に適しています。タングステンは硬度 (約 3430 HV) が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高く、耐摩耗性があるため、アーク浸食に対する耐性も優れています。これにより、放電加工中の電極表面の摩耗が大幅に減少し、寿命が延びます。機械的強度と硬度も重要な特性です。タングステン銅電極は、1000 MPa を超える圧縮強度と 200~300 HV の硬度を誇り、高圧や頻繁な機械的作用に耐えることができます。一方、銅相は韌性を提供し、脆性破壊のリスクを軽減します。

低い熱膨張係数（約 6~8 ppm/°C）は、タングステン銅電極独自の利点です。シリコンまたはセラミック基板に適合し、熱サイクル中の応力を軽減し、特にマイクロエレクトロニクスパッケージングに適しています。耐腐食性は、タングステンの化学的安定性と銅の表面処理（ニッケルメッキなど）によって実現され、湿気の多い環境や工業環境に適しています。微細構造的には、タングステン銅電極の均一な相分布と低い多孔性（通常 1% 未満）により、一貫した性能が保証されます。これらの基本特性が組み合わさって、タングステン銅電極の汎用性が構成され、高精度加工、電気接点、および熱管理で優れた性能を発揮します。今後、ナノテクノロジーと表面改質の発展により、これらの特性がさらに最適化されると期待されます。

1.3 タングステン銅電極の開発の歴史

タングステン銅電極は、材料科学と産業ニーズの歴史的進化を反映しており、その起源は 20 世紀半ばの粉末冶金の進歩と電気産業の急速な発展にまで遡ります。タングステン銅電極の研究開発は、軍事および産業用途におけるタングステンと銅のユニークな特性に牽引されて、1940 年代に始まりました。初期の研究は粉末冶金プロセスに焦点を当て、1945 年にアメリカ金属学会（ASM）がタングステン銅複合材料の製造について初めて報告し、タングステンと銅の粉末を混合、加圧、焼結することで電気接点への応用を検討しました。この段階のタングステン銅電極は、主にローエンドの電気機器に使用されており、性能が限られており、多孔性が高く、導電性と耐久性に改善の余地がありました。

1950 年代から 1970 年代にかけて、真空浸透技術の導入により、タングステン銅電極の開発は急速な成長期に入りました。1955 年、シーメンスは真空浸透法の開発に成功し、焼結タングステン骨格に液体銅を浸透させ、気孔率を大幅に低減し、材料の密度と導電性を向上させました。この技術革新により、タングステン銅電極を放電加工（EDM）に応用できるようになり、炭化タングステンなどの硬質材料の加工に最適になりました。1960 年代には、東芝やゼネラルエレクトリックなどの日本とアメリカの企業が比率と微細構造をさらに最適化した結果、WCu 70/30 と WCu 80/20 が業界標準となり、高電圧スイッチや溶接電極に広く使用されるようになりました。

1980 年代から 2000 年代にかけて、タングステン銅電極の応用分野はマイクロエレクトロニクスや航空宇宙に拡大し、作製技術の革新を推進しました。1985 年には、熱間等方圧成形（HIP）技術が導入され、材料の均一性と機械的強度が向上し、高精度加工のニーズに対応しました。1990 年代には、ナノタングステン粉末の導入により、結晶粒の微細化が進み、耐摩耗性と耐アーク侵食性が向上しました。2000 年以降、積層造形と 3D プリント技術の台頭により、タングステン銅電極の作製はパーソナライズされたカスタマイズへと進み、複雑な形状の電極が可能になりました。2020 年代には、人工知能と材料シミュレーションを組み合わせ、タ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ングステン銅電極の研究開発は、5G 機器や高温センサーのニーズを満たすために、傾斜機能材料と表面改質に焦点を当てました。2025 年までに、タングステン銅電極は高性能処理とエレクトロニクスの中核材料となり、その発展の歴史は技術革新と応用ニーズの深い融合を反映しています。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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 タングステン銅電極の材料基礎

2.1 タングステンの特性

タングステン銅電極の主要成分であるタングstenは、高性能アプリケーションに独自の基盤を提供する特性を備えています。タングstenは高融点金属であり、融点は 3422℃と、既知の金属の中で最も高い値です。この特性により、タングstenは極めて高温の環境でも構造的な安定性を維持でき、特に放電加工（EDM）や抵抗溶接で発生するアークや高温衝撃への耐性に適しています。タングstenの密度は 19.25 g/cm³であるため、電極は高い質量耐性と変形耐性を備えています。圧縮強度は 1000 MPa を超え、硬度は約 3430 HV で、優れた耐摩耗性と機械的強度を備えています。これらの特性により、頻繁な機械的ストレスやアーク浸食にも耐えることができ、電極の耐用年数を延ばします。熱伝導率は約 174 W/m·K と銅よりも低いですが、高い融点がこの欠点を補い、高温でも形状を維持します。

タングstenの化学的安定性もまた、優れた特性です。酸、アルカリ、酸化環境への耐性があり、特に湿気の多い環境や工業環境において、表面の著しい腐食に対して優れた耐性を示します。これにより、屋外や過酷な環境下でもタングsten銅電極を安心してご使用いただけます。しかし、タングstenは電気伝導率が比較的低い（約 1.8×10^{-7} S/m）ため、単独での使用は制限され、他の高導電性材料との複合化が必要となります。熱膨張係数は約 4.5 ppm/°C で、多くのセラミック材料や半導体材料と同等であるため、熱サイクル時の応力が低減し、マイクロエレクトロニクスパッケージングにおいて優れた特性を発揮します。タングstenは加工性が低く、粉末冶金法や高温焼結法で作製する必要がありますが、微細な粒子構造のため、プロセスの最適化によって性能を向上させることができます。近年、ナノタングsten粉末の導入により、タングstenの均一性と強度がさらに向上し、高精度電極への応用の可能性が高まっています。

2.2 銅の特性

タングsten銅電極のもう 1 つの主要成分である銅は、優れた電気的性能と熱的性能をもたらす特性を備えています。銅の融点は 1083℃ でタングstenよりも低いですが、その高い電気伝導性と熱伝導性により、効率的な電流伝送と熱放散に理想的な材料となっています。タングsten銅電極では、粉末冶金または真空浸透によって銅相がタングsten骨格に組み込まれ、連続した導電ネットワークが形成され、放電加工や溶接中に安定した電流伝送が確保されます。密度は 8.96 g/cm³ で、銅はタングstenよりも軽量ですが、延性と韌性があるため機械的な柔軟性が高く、機械的ストレス下での脆性破壊のリスクが軽減されます。

銅は純粋な状態では耐食性が弱く、酸化や硫化の影響を受けやすい。しかし、タングsten銅複合材料では、タングstenの化学的安定性によって保護され、さらに銅表面にニッケルや金などのコーティングを施すことで耐候性を高めることができる。銅の熱膨張率は約 17 ppm/°C と比較的高いが、タングstenと組み合わせることでシリコンやセラミック基板と一致するため、マイクロエレクトロニクス用途に適している。銅は加工性に優れ、精密な切削や成形が容易で、複雑な電極形状の製造にも対応できる。しかし、銅は高温で軟化する性質があるため、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

単独での使用は制限され、タングステンのサポートに頼る必要がある。近年、不純物による電気伝導性や熱伝導性への影響を低減するために、より純度の高い電気銅が広く採用されている。銅の特性により、タングステン銅電極は高い電気伝導性と熱伝導性を備えており、電気および熱管理アプリケーションで優れた性能を発揮します。

2.3 タングステン-銅複合機構

タングステン銅複合メカニズムは、タングステン銅電極の性能の基礎を理解する鍵であり、タングステンと銅の微視的レベルでの相互作用と製造プロセスの最適化に関わっています。タングステン銅複合材料は、粉末冶金法または真空浸透法によって製造されます。基本原理は、タングステンの高融点を骨格として、銅の低融点を充填相として利用することで、相補的な性能システムを形成することです。粉末冶金法では、タングステン粉末と銅粉末を特定の比率で混合し、ブランクに成形した後、高温で焼結します。銅は液相中のタングステン粒子を濡らし、細孔を埋めて均一な複合構造を形成します。真空浸透法では、まず多孔質のタングステン骨格を作製し、その後、真空環境で銅の融点を超える温度に加熱します。液相の銅がブランクに浸透して充填し、材料の密度を高めます。

複合メカニズムの核心は、タングステンと銅の物理的・化学的非相溶性にあります。両者の間には顕著な化合物は形成されず、界面は主に機械的に結合され、部分的に拡散しているため、相転移や脆性相の形成は最小限に抑えられます。タングステン骨格は構造的サポートと耐高温性を提供し、銅相は連続ネットワークを形成し、電気伝導性と熱伝導性を最適化します。微細構造において、タングステン粒子は通常、5~20 ミクロンの大きさの不規則な多角形として分布しています。銅は細孔を埋め、多孔度は 1%未満に制御できます。熱処理と圧力支援プロセス（熱間静水圧プレスなど）により、界面の結合と均一性はさらに向上します。複合メカニズムには熱膨張のマッチングも含まれます。タングステンの低熱膨張性と銅の高い熱膨張性を比例調整によってバランスさせ、その結果、熱膨張係数は 6~8 ppm/°C となり、さまざまな基板に適応できます。

2.3.1 タングステン-銅電極の物理的適合性

タングステン-銅電極の物理的適合性は、複合メカニズムの重要な要素であり、タングステンと銅の熱的、機械的、電気的特性の調和に関わっています。まず、熱適合性は熱膨張係数(CTE)の一致に反映されます。タングステンの CTE は 4.5 ppm/°C であるのに対し、銅の CTE は 17 ppm/°C です。単独で使用するとこの差は顕著ですが、複合比率（例：WCu 85/15）を調整することで、最終的な CTE をシリコンまたはセラミック基板に近い 6~8 ppm/°C に制御でき、熱サイクル中の応力集中を軽減できます。この特性は、マイクロエレクトロニクスパッケージングやセンサーアプリケーションにおいて、パッケージの反りや破損を防ぐ上で特に重要です。

機械的な適合性は、硬度と靱性のバランスに反映されます。タングステンの硬度は最大 3430 HV ですが、銅の硬度は約 70 HV しかありません。複合により、タングステン銅電極の硬度は

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

通常 200~300 HV になり、耐摩耗性と延性を兼ね備えています。タングステン骨格は機械的な支持を提供し、銅相は韌性を高め、衝撃エネルギーを吸収し、特に電極表面の摩耗が減少する EDM で脆性破壊を防ぎます。電気的な適合性が核心です。銅の高い導電性とタングステンの低い導電性 ($1.8 \times 10^{-7} \text{ S/m}$) は、銅相の連続ネットワークを介して調整されています。電気伝導率は純銅の 80%~90% に近く、大電流伝送のニーズを満たしています。

物理的な適合性は界面安定性にも影響します。タングステンと銅の間には顕著な化学反応は起こらず、界面は主に機械的な結合と拡散によって形成されるため、脆性相の形成が最小限に抑えられ、長期安定性が向上します。真空含浸プロセスは界面の濡れ性を最適化し、未充填気孔を減らし、密度を向上させます。熱伝導率も適合性を反映しており、銅相が熱伝導を支配し、タングステン相が熱安定性をもたらします。将来的には、ナノパウダーや表面改質によって適合性がさらに向上し、高温センサーや 5G デバイスなど、より過酷な環境への応用が可能になる可能性があります。

2.3.1.1 構造適合性

タングステン銅電極は、その物理的適合性の中核を成す要素です。これは、タングステンと銅の微細構造の幾何学的適合性と界面安定性に関係し、電極の機械的特性と長期的な信頼性に直接影響を及ぼします。構造的適合性は、主にタングステン骨格と銅フィラー相の調整に反映され、粉末冶金法または真空浸透法によって実現されます。粉末冶金法では、タングステン粉末（通常 5~20 ミクロン）と銅粉末を特定の比率（例：WCu 70/30）で混合し、成形体にプレスします。焼結過程において、液相の銅はタングステン粒子を濡らして細孔を埋め、タングステンを連続骨格、銅を分散相とする複合構造を形成します。真空浸透法では、まず多孔質のタングステン骨格が形成されます。次に、タングステン骨格を真空環境下で銅の融点（1083℃）以上に加熱することで、液体銅が浸透し、細孔を埋めます。これにより、気孔率が大幅に低下し（通常 1%未満）、材料の密度と均一性が向上します。タングステン粒子は不規則な多角形パターンで分布し、銅が隙間を均一に埋めます。界面は主に機械的に連結・拡散しているため、微小亀裂や層間剥離のリスクが最小限に抑えられます。構造適合性は、粒径と相分布の均一性にも反映されています。ナノタングステン粉末の導入により実現された微粒子は、機械的強度と耐摩耗性を向上させ、1000MPa を超える圧縮強度と 200~300HV の硬度を実現します。銅相の連続ネットワークは、導電経路の完全性を維持し、抵抗のばらつきを低減します。顕微鏡分析により、均一な相分布が電極全体の安定性を向上させることが示されています。放電加工（EDM）においては、構造の均一性が放電のばらつきを低減し、加工精度と表面品質を向上させます。マイクロエレクトロニクスパッケージングにおいては、構造適合性によりシリコン（熱膨張係数約 2.6 ppm/°C）またはセラミック基板との低応力接合が確保され、熱サイクル中の反りや破損を防止します。機械試験と走査型電子顕微鏡（SEM）観察により、界面接合の安定性が構造適合性の鍵となり、熱応力や機械的応力による故障を低減することが実証されています。さらに、製造プロセスは構造適合性にとって極めて重要です。熱間等方圧加圧（HIP）プロセスは、高温で全方向の圧力をかけることで気孔をさらに圧縮し、タングステンと銅の界

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

面結合を強化し、材料の疲労耐性を向上させます。ナノテクノロジーによって導入された超微粉末は粒界強度を高め、高精度電極に適しています。構造適合性を最適化するには、粉末の粒子サイズの制御と焼結パラメータの調整も必要です。将来の動的シミュレーションとプロセス革新により、粒度分布がさらに微細化し、気孔率が 0.5%未満に低減することで、航空宇宙部品や 5G デバイスの電極など、複雑な形状や高耐久性を必要とする用途が可能になります。

2.3.1.2 熱適合性

タングステン銅電極の熱適合性は、その物理的適合性の重要な要素です。熱適合性には、タングステンと銅の熱膨張と熱伝導率の調整が関係しており、熱サイクルや高温環境下での電極の安定性と信頼性に影響します。タングステンの熱膨張係数 (CTE) は $4.5 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ であるのに対し、銅は $17 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ です。単独で使用した場合、この差は大きくなりますが、複合比を調整することで、タングステン銅電極の CTE を $6\sim 8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ に制御できます。この値は、シリコン (約 $2.6 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) やアルミナセラミック (約 $7 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) 基板の値とほぼ同じです。これにより、熱サイクル中の応力集中が軽減され、パッケージの反りや破損が防止されるため、特にマイクロエレクトロニクス パッケージングや高温センサー アプリケーションで効果的です。熱適合性を実現するには、タングステンと銅の比率を最適化する必要があります。例えば、WCu 比 85/15 の材料は高温でも優れた性能を発揮します。熱シミュレーションでは、その低応力特性が検証されており、熱膨張率はシリコン基板の 10%以内です。

熱伝導率は、熱適合性のもうひとつの重要な焦点です。銅の熱伝導率はおおよそ $400 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ で、タングステンの $174 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ よりも高くなっています。タングステン銅複合電極の熱伝導率は $180\sim 220 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ です。銅相が熱伝導を支配し、タングステン相が熱安定性をもたらします。EDM では、高い熱伝導率によって放熱熱が急速に分散され (瞬間的に数千 $^{\circ}\text{C}$ に達する)、ワークピースの変形や焼けにつながる電極の局所的な過熱を防ぎ、表面品質を向上させます。抵抗溶接では、均一な熱分布によって熱影響部 (HAZ) が縮小され、溶接継手の強度と耐久性が向上します。熱適合性には融点の違いも関係します。タングステンの融点は 3422°C 、銅の融点は 1083°C ですが、液相焼結によって調和されます。高温下では銅がタングステン骨格を充填し、熱安定性を向上させます。実験データによると、WCu 70/30 の熱伝導率は、200A の電流値と 300°C の温度において安定した動作をサポートします。ナノテクノロジーによる微粒子の導入により、熱伝導経路がさらに最適化され、熱抵抗が約 15%低減されます。熱適合性は微細構造にも左右されます。低多孔性と均一な相分布は熱伝導時の散乱を低減し、熱間等方圧加圧 (HIP) は界面の熱伝導率を向上させます。熱疲労試験では、 -50°C から 300°C までの熱サイクルにおけるタングステン銅電極の変形率が 0.1%未満であることが示されており、優れた熱安定性を実証しています。将来的には、機能傾斜設計 (タングステン含有量が内部から表面に向かって徐々に減少する設計) や中間相 (モリブデンなど) の導入により、熱適合性をさらに最適化し、高温圧力センサーや電力機器など、より大きな温度差や複雑な熱管理要件にも対応できるようになります。

2.3.2 タングステン銅電極の性能相乗効果

タングステン銅電極の相乗効果は、その複合メカニズムの究極の現れです。この相乗効果は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステンと銅の導電性、熱伝導性、機械的強度、耐久性における相乗効果に関係しており、さまざまな用途において電極の全体的な性能を総合的に向上させます。この相乗効果は、粉末冶金や真空浸透などの最適化された製造プロセスに依存しており、タングステン骨格と銅フィラー間の均一な分布と界面安定性を確保しています。タングstenは融点が高く（3422℃）、高温およびアーク浸食に対する耐性を備えています。一方、銅は導電性と熱伝導性が高く、電気および熱管理性能が最適化されます。タングステン銅複合電極は、熱膨張係数 6~8 ppm/℃ と熱伝導率 180~220 W/m·K のバランスを実現し、マイクロエレクトロニクスパッケージングや高温センサーの要件を満たしています。微細構造の低多孔性と微細粒径により、機械的強度と耐摩耗性が向上し、圧縮強度は 1000 MPa を超え、硬度は 200 ~ 300 HV になります。

2.3.2.1 電気伝導性と熱伝導性の相乗効果

タングステン銅電極は、その相乗効果の核となるものです。この相乗効果は、タングステンと銅の相補的な電気的特性と熱的特性から生まれ、放電加工、溶接、マイクロエレクトロニクス用途における電極の効率を直接的に向上させます。電気伝導性は主に銅相によってもたらされ、 5.8×10^7 S/m という高い導電率を誇り、効率的な電流伝送を保証する連続した導電ネットワークを形成します。タングステン銅電極におけるタングステンの導電率は低いものの、銅の比率（例：WCu 70/30（70/30）は、導電率が純銅の 80%~90%に達し、放電加工の高電流要件と溶接の低抵抗要件を満たします。微細組織内の銅相の均一な分布により、抵抗のばらつきが低減され、放電安定性が向上します。特にマイクロモールドなどの精密加工用途では顕著です。実験データによると、WCu 70/30 は高電流条件下でも純銅に近い導電率を実現し、高精度で効率的な加工を可能にします。

熱伝導率の相乗効果は電気伝導率と密接に関連しています。銅の熱伝導率は約 400 W/m·K で、タングステンの 174 W/m·K を大幅に上回っています。タングステン銅複合電極の熱伝導率は 180~220 W/m·K です。銅相が熱伝達を支配し、タングステン相が熱安定性をもたらします。放電加工では、熱伝導率によって放電熱が電極外部へ速やかに分散され、ワークピースの変形や焼損につながる局所的な過熱を防ぎます。抵抗溶接では、熱が均一に分散されることで熱影響部（HAZ）が縮小され、溶接継手の強度と耐久性が向上し、HAZ を 0.1mm 以内に抑えることができます。タングstenは融点が高く（3422℃）、高温アーク条件下でも構造的な完全性を確保します。一方、銅は融点が低く（1083℃）、液相充填による熱伝導経路の連続性を高めます。85/15 の WCu 比による熱伝導率は、300℃での安定した動作をサポートします。

この相乗効果は、低熱膨張係数と熱伝導率の組み合わせにも反映されており、熱応力が軽減され、長期安定性が向上します。ナノテクノロジーは微粒子（<5 ミクロン）を導入し、電気および熱伝導ネットワークをさらに最適化して、熱抵抗と電気抵抗をそれぞれ約 15%と 10%低減し、高出力チップの放熱に適しています。実際のアプリケーションでは、タングsten銅電極の相乗効果は、500A の電流で伝導安定性と熱管理効率を維持するなど、高電圧スイッチ接点や 5G 機器で優れています。将来的には、タングsten銅比を調整したり、中間相（モリブデンなど）を導入したり、表面改質（銀メッキなど）したりすることで、相乗効果を高め、高温センサーや送電機器などの大電流や複雑な熱管理要件に対応できるようになります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.2.2 耐高温性と構造安定性の相乗効果

タングステン銅電極は、その性能相乗効果の重要な発現です。この相乗効果は、高温環境におけるタングステンと銅の相補効果から生まれ、極限条件下でも電極の信頼性と長期にわたる耐用年数を保証します。タングステンの耐高温性は主にタングステンによってもたらされます。タングステン融点は 3422℃と、あらゆる金属の中で最も高い値です。この特性により、タングステン銅電極は、放電加工（EDM）や抵抗溶接における最大 3000℃のアークショックにも、大きな溶融や変形を生じることなく耐えることができます。複合構造において、タングステンは骨格材料として機能し、高温での熱応力に耐える高強度で熱的に安定したネットワークを形成します。高硬度材料（タングステン鋼など）の加工や高電流切断などの実際の用途では、タングステンの高温耐性により電極表面の完全性が確保され、アブレーションや材料の損失が低減されます。

構造安定性の相乗効果は、銅の充填と微細構造の最適化にかかっています。銅の融点は 1083℃です。焼結または真空浸透処理において、銅は液体の状態でタングステン骨格を充填し、材料の密度を高めます。気孔率は通常 1%未満に制御されます。この低気孔率構造は、熱サイクル試験中の微小亀裂のリスクを低減します。銅相の延性は熱応力をさらに吸収し、脆性破壊を防止します。微細構造においては、粉末冶金法または熱間等方圧加圧法（HIP）によって、タングステン粒子と銅の均一な分布が実現されます。微細粒子は耐疲労性を向上させ、圧縮強度は 1000MPa 以上に達します。

耐高温性と構造安定性の相乗効果は、熱膨張係数のマッチングにも反映されています。タングステンの低い熱膨張係数は、銅の高い熱膨張係数に比例して調整され、複合熱膨張係数（CTE）は 6~8ppm/℃となり、シリコン（2.6ppm/℃）やセラミック基板の熱膨張係数に近づき、熱応力の集中を軽減します。マイクロエレクトロニクスパッケージングにおいては、この特性によりチップと電極間の反りが抑制され、高温センサーにおいては、長期間の高温動作をサポートします。表面処理（ニッケルメッキなど）は、耐酸化性をさらに向上させ、湿気の多い環境や工業環境における耐用年数を延ばします。

2.4 タングステン銅電極の主要原材料の要件

原材料の純度要件

多くのハイエンド分野で広く使用されているキーマテリアルであるタングステン銅電極の性能は、使用されるキー原材料であるタングステン粉末と銅粉末の品質と密接に関係しています。高純度の原材料は、タングステン銅電極の優れた性能を確保するための礎です。タングステン銅電極を製造する際、タングステン粉末の純度は通常 99.9%以上に達する必要があります。超精密放電加工など、電極の性能に対する要求が極めて高いアプリケーションシナリオでも、より高い純度が必要です。これは、微量の不純物であっても、電極内部に欠陥を形成し、材料構造の均一性を破壊する可能性があるためです。たとえば、タングステン粉末に鉄やニッケルなどの不純物元素が含まれている場合、これらの不純物は高温焼結中にタングステンや銅と反応して脆い相を形成し、電極の強度と靱性が低下して、使用中にひび割れや破損が発生

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

しやすくなります。

同様に、銅粉の純度も非常に重要です。高品質の銅粉の純度は、通常 99.95% 以上である必要があります。不純な銅粉には、酸化物、水分、その他の不純物が含まれている可能性があります、銅の導電性と延性に重大な影響を与えます。タングステン銅電極では、銅が主に良好な導電性と熱伝導性に寄与しています。銅粉が不純な場合、電極の電気伝導率と熱伝導率の効率が大幅に低下します。例えば、銅粉に酸化銅が多く含まれている場合、酸化銅の抵抗率は純銅よりもはるかに高くなり、電極の抵抗が大幅に増加します。その結果、放電加工などの用途で電気エネルギーを熱エネルギーに変換する効率が低下します。これは加工効率に影響を与えるだけでなく、電極の局所的な過熱を引き起こし、電極の損失を加速させる可能性があります。

粒子サイズと粒子サイズ分布の制御

純度に加えて、タングステン粉と銅粉の粒度と分布も、タングステン銅電極の性能に影響を与える重要な要素です。粒子サイズは、さまざまな製造プロセスと最終的なアプリケーションシナリオに基づいて正確に選択する必要があります。タングステン銅電極を製造するための

従来の粉末冶金プロセスでは、タングステン粉の粒子サイズは通常 1~10 μm に制御されます。

タングステン粉を細かくすると、タングステンと銅の接触面積が増加し、焼結プロセス中に元素間の拡散と融合が促進され、より均一で緻密な微細構造の形成が容易になり、電極の強度と硬度が向上し、高硬度材料の加工に適しています。しかし、タングステン粉が細かすぎると、流動性が悪く、粉末の混合や成形プロセス中に均一に分散するのが難しくなり、成形体の密度が不均一になりやすいなどの問題も発生します。粗いタングステン粉末は流動性が優れていますが、焼結電極の内部気孔が相対的に大きくなり、密度が低下して電極の全体的な性能に影響を与えます。

銅粉末は通常、比較的細かい粒子径を有しています。これは、銅の融点が低いいため、焼結工程においてタングステン粒子間の隙間を埋めやすいためです。適切な粒子径の銅粉末は、タングステンとの安定した界面を形成しながら、良好な濡れ性を確保します。例えば、放電加工用電極において、銅粉末の粒子径が適切であれば、放電中に電極が局所的に加熱された場合でも、銅は熱を素早く伝導し、局所的な過熱による電極の過度の摩耗を防ぎます。

さらに、粒度分布の均一性も非常に重要です。理想的には、タングステン粉末と銅粉末の粒度分布は狭い範囲に収まるべきです。粒度分布が広すぎると、混合工程で異なるサイズの粒子が容易に分離し、最終的な電極材料の組成と性能が不均一になる可能性があります。例えば、大きなタングステン粉末粒子が集中している部分は硬度は高いものの韌性が不十分になる可能性があります。一方、小さな粒子が集中している部分は密度が低く、使用中に性能が低下する可能性があります。

原材料特性が電極性能に及ぼす総合的な影響

タングステンと銅の固有の特性は、タングステン銅電極の性能に決定的な役割を果たします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステンは融点（3410℃）が非常に高く、硬度も高いため、タングステン銅電極は優れた耐高温性と耐摩耗性を備えています。高電圧放電管電極の動作時など、接触材料の瞬間温度が数千℃に達する高温環境下でも、タングステンは電極の基本形状と構造的完全性を維持し、高温による軟化や変形を防止します。さらに、高硬度のため、超硬金型の放電加工など、高硬度ワークの加工時に電極が摩耗しにくく、加工精度を確保します。

銅は優れた電気伝導性と熱伝導性を持ち、タングステン銅電極に急速な放熱と効率的な電気伝導の利点を提供します。放電加工中、電極とワークピースの間に頻繁に放電が発生すると、大量の熱が発生します。銅はこの熱を素早く伝導して電極の温度を下げ、熱変形と熱疲労を軽減し、電極の寿命を延ばします。優れた電気伝導性は、安定した放電プロセスを保証し、加工効率を向上させます。タングステン粉末と銅粉末を一定の比率で配合すると、両者が補完し相乗効果を発揮してタングステン銅電極の性能を決定します。適切なタングステン銅比率は、強度、硬度、電気伝導性、熱伝導性、耐アブレーション性の最適なバランスを保証します。たとえば、抵抗溶接電極では一般に高い硬度と導電性が求められ、タングステン含有量を適切に増やすことができます。

2.4.1 タングステン粉末の要件

タングステン銅電極は、複合プロセス中の構造的安定性と性能を確保する上で極めて重要です。これらの要件には、純度、粒径、および形態が含まれます。純度は最も重要であり、特に酸素、炭素、鉄の不純物は 0.1% 未満である必要があります。不純物が多すぎると粒界が弱くなり、導電性が低下して電極の性能に影響を及ぼす可能性があります。ASTM B702 などの国際規格では、高純度タングステン粉末は、水素還元または化学沈殿によって製造され、酸素含有量が 0.05% 未満でなければならないと規定されています。粒径も重要なパラメータです。粒径は通常 1 ～ 20 ミクロンです。微粒子はナノテクノロジーによって導入され、粒子の均一性と機械的強度を高めます。一方、粗い粒子（20 ミクロン超）は、電極の粗加工に使用されます。粒径の選択は用途によって異なります。形態的には、多孔性を低減し、焼結密度を高めるために、球形または球形に近いタングステン粉末が必要です。走査型電子顕微鏡分析によると、球状粉末は不規則な粉末よりも流動性が高く、充填効率が約 15% 向上します。化学的安定性のために、タングステン粉末は製造プロセス中の酸化を防ぐために酸性およびアルカリ性環境に耐える必要があります。表面酸化層の厚さは 10nm 以下に制御する必要があります。ホール効果流量法で測定した流動性は 20 秒/50g 以上であり、均一な粉末混合を保証します。タングステン粉末の嵩密度は圧縮に影響を及ぼし、層間剥離のリスクを減らすために銅粉末と一致させる必要があります。プラズマ球状化やメカニカルアロイングなどの製造プロセスは、粒度分布を最適化できます。将来的には、高純度ナノタングステン粉末は電極の微細構造の一貫性を向上させ、マイクロエレクトロニクスパッケージングや 5G デバイスなどの高精度用途に適したものにすることができます。

2.4.2 銅粉末の要件

タングステン銅電極は、導電性と充填特性に重点を置いており、複合材料の電気的および熱的管理機能を確保しています。純度は中核要件です。銅粉の不純物含有量は 0.05% 未満でなければ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

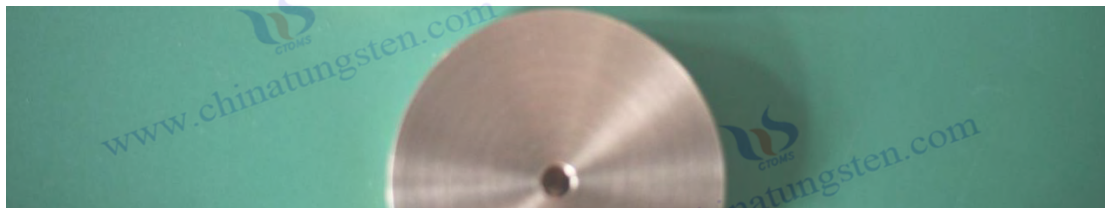
ばならず、酸素含有量は 0.03% 未満に制御する必要があります。酸素が多すぎると酸化銅が形成され、導電性と濡れ性が低下する可能性があります。電解銅粉またはアトマイズ銅粉は、高純度電解液または不活性ガスをアトマイズして製造され、ASTM B413 規格に準拠しています。

粒子サイズは通常 5~15 ミクロンです。粒子サイズが細かいほど充填効率が向上し、粗い粒子サイズは急速焼結に適しています。タングステン粉の粒子サイズに合わせる必要があり、相分布を最適化するために粒子サイズ比を 1: 2~1: 3 に制御する必要があります。

銅粉末は、多孔性を最小限に抑えて流動性を高めるために、球形またはほぼ球形である必要があります。ホール効果流量は 15 s/50 g より良く、嵩密度は約 4~6 g/cm³ で、粉末はタングステン粉末と協調して圧縮される必要があります。化学的安定性には、焼結中に気孔が形成されるのを防ぐために、表面酸化層の厚さが 5 nm 未満である必要があります。表面処理（有機コーティングなど）は耐酸化性を高めることができます。電極の性能をサポートするには、電気伝導性が純銅（ 5.8×10^7 S/m）に近い必要があり、熱伝導性が約 400 W/m·K である必要があります。水アトマイズやガスアトマイズなどの作成プロセスは、粉末の特性に影響を与える可能性があります。超微細銅粉末の使用や合金化（Cu-Ag など）などの将来の取り組みにより、濡れ性と導電安定性が向上し、高電流用途に適したものになります。

2.4.3 原材料の前処理基準

タングステン銅電極は、粉末の均一な混合と制御可能な調製プロセスを確保するために設計されており、これらは複合材料の品質に直接影響します。乾燥は重要なステップです。タングステンおよび銅粉末は、焼結中の気孔形成を防ぐため、真空または不活性ガス（アルゴンなど）雰囲気下で乾燥させる必要があります。混合の均一性は、ボールミルまたは V 型ミキサーを用いて実現されます。混合後の粒度分布は $\pm 5\%$ 以内に制御され、X 線回折（XRD）によって相の一貫性が検証されます。粒度分級はふるい分けによって行われ、ふるい目の大きさは粒度要件に合わせて調整され、大きすぎる粒子や超微粒子が除去されます。粒度分布の標準偏差は 10% 未満です。表面処理には脱酸素またはコーティングが含まれ、酸化層は水素還元によって除去されます。粉末の流動性はホール流量法を用いて試験され、20 秒/50g 以上の値が得られ、均一な加圧が保証されます。保管および輸送は、酸化を防ぐため、光と湿気を避けて密封包装する必要があります。前処理基準は ISO 13320 および ASTM B214 に準拠する必要があります。将来的には、自動グレーディングとリアルタイムモニタリングにより、前処理の精度が向上し、電極性能が最適化されるでしょう。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.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 タングステン銅電極の物理的および化学的性質

銅の相乗効果に由来し、2つの金属の核心的な利点を統合しています。物理的性質の面では、タングステン含有量の増加に伴って密度が増加し、全体的に高いレベルを維持します。タングステンの高融点特性により、融点が高く維持され、純銅をはるかに上回り、高温環境における瞬間的な熱衝撃に耐え、変形しにくいです。電気伝導性と熱伝導性は抜群で、電流を効率的に伝導し、作業中に発生した熱をすばやく放散し、局所的な過熱による損失を効果的に回避します。機械的性質の面では、適度な硬度と高い圧縮強度を持ちながら、ある程度の靱性を考慮しているため、機械的衝撃を受けても破損しにくいです。また、線膨張係数が低く、熱安定性に優れています。温度変化の大きい環境でもサイズが安定するため、精度要件が厳しい精密加工のシナリオに適しています。

3.1 タングステン銅電極の物理的性質

タングステン銅電極は、密度、熱膨張係数、電気伝導率、熱伝導率といった特性を網羅しており、幅広い用途において優れた性能を発揮します。これらの特性は、放電加工、溶接、マイクロエレクトロニクス実装における電極の安定性と効率に直接影響を及ぼします。タングステン銅電極の物理的特性は、タングステンと銅の特性を融合させたものです。タングステンは高い融点と機械的強度を有し、銅は高い電気伝導性と熱伝導性を有します。粉末冶金法または真空浸透法による微細構造の最適化により、均一な相分布と低い多孔性が得られます。これらの特性を融合することで、タングステン銅電極は高温、高電流、複雑な環境下においても信頼性を維持できます。

3.1.1 タングステン銅電極の密度

タングステン銅電極は、その物理的特性を示す重要な指標です。これは材料内部の密度と多孔度を反映し、機械的強度、電気伝導性、熱伝導性に直接影響します。密度特性は、タングステンと銅の複合比と製造プロセスの最適化によって決まります。高密度のタングステンと低密度の銅を特定の比率でバランスさせることで、特定の質量および体積特性を持つ複合材料が形成されます。密度は、加工中の電極の耐摩耗性と耐変形性を決定します。マイクロエレクトロニクス用途では、適切な密度は基板とのマッチングに役立ち、応力集中を軽減します。粉末冶金や真空浸透などの製造プロセスは、焼結温度と圧力を制御することで、最終密度の均一性に大きな影響を与えます。通常、多孔度が低いほど密度値が高くなり、材料の全体的な性能が向上します。

電極の製造において極めて重要であり、電気放電加工における材料除去率や溶接における熱管理効率など、実際の用途における性能に影響を与えます。用途によっては、タングステン銅比を調整して密度特性を最適化する必要がある場合があります。例えば、高密度電極は高い耐久性が求められる用途に適しており、低密度電極は軽量設計に使用できます。微細構造における相分布と緻密性は密度性能の重要な要素であり、今後の研究では、新しいプロセスを通じて密度制御性をさらに向上させることができる可能性があります。このセクションでは、密度計算方法をさらに検討し、性能最適化におけるその役割を分析します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.1.1 密度計算方法

密度計算は、タングステン銅電極の密度を決定するための科学的なアプローチです。材料の内部の緻密さと多孔性を正確に評価する目的で、実験測定と理論導出の両方が行われます。一般的に使用される方法はアルキメデス法で、空気中と液体中の電極の質量差を測定し、これを体積と組み合わせて密度を計算します。この方法は、液体中の物体の浮力を利用します。まず、電極の乾燥質量を量り、特定の液体（蒸留水など）に浸します。浸漬後の質量差を測定し、浮力の式を使用して体積を間接的に計算します。密度は、質量と体積の比として計算されます。この方法は、不規則な形状の電極サンプルに適しています。液体が材料と化学反応しないようにし、誤差を最小限に抑えるために温度を制御することが重要です。

もう一つのアプローチは理論計算です。これは、混合規則を用いて、タングステンと銅の体積分率とそれぞれの密度に基づいて複合材料全体の密度を推定するものです。この方法では、正確な成分比データが必要であり、タングステンと銅は複合プロセス中に大きな体積変化を起こさないと仮定しています。密度は、各成分の密度の加重平均です。計算では、相分布の均一性を考慮する必要があります。実測値は、多孔性や微細欠陥のために理論値から逸脱する可能性があり、微細構造解析による補正が必要です。理論計算は予備設計やプロセスの最適化に適していますが、実験結果を検証する必要があります。

さらに、X線トモグラフィー（XCT）や水銀浸透分析法は、電極の多孔度や密度分布の非破壊検査に使用できます。これらの手法は、画像再構成法や圧力浸透分析法によって内部構造の密度を評価するため、複雑な形状の電極に適しています。計算手法の選択は実験条件や精度要件に応じて異なり、信頼性を向上させるために複数の手法を組み合わせることがよくあります。

3.1.1.2 密度と組成の関係

密度と組成の関係は、タングステン銅電極の物理的特性を理解する鍵であり、タングステンと銅の比率が材料の密度と質量分布に与える影響を反映しています。タングステン銅電極の密度は、主にその成分の比率によって決まります。タングstenは銅よりも密度が高いです。タングsten含有量が増加すると通常、全体の密度が増加しますが、銅の密度が低いいため、銅の含有量が多い場合は希釈の役割を果たします。組成比は、粉末冶金または真空浸透プロセスによって正確に制御されます。たとえば、一般的なWCu 70/30とWCu 80/20の比率では、タングstenの高密度特性が優勢であり、銅の充填効果により微細構造の均一性が最適化されます。組成の変化は相分布に直接影響します。タングstenは骨格材料として構造的な支持を提供し、銅は液相の形で細孔を満たします。比率を調整すると、材料の多孔性と密度が変わり、密度性能に影響します。

密度の組成依存性は、製造プロセスとも密接に関係しています。粉末冶金では、タングsten粉末と銅粉末の粒度比と混合均一性が成分分布の均一性を決定します。焼結温度と圧力はさらに銅の濡れ性と充填効果に影響を与え、最終密度に影響を与えます。真空含浸では、タングsten骨格の多孔性と銅の浸透深さが組成比と直接関係しています。タングsten含有量が多いと細孔充填が不十分になり密度が低下する可能性があります。銅含有量が多いと充填

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

効率が向上します。微細構造解析により、組成比のわずかな変化が相界面面積に差を生じさせ、材料全体の密度に影響を与えることが示されています。理論的には、密度と組成の関係は加重平均モデルによって導き出すことができます。このモデルでは、各成分の密度の寄与を体積分率で重み付けしますが、実際の値は多孔性や界面結合の影響を受けるため、実験と組み合わせで検証する必要があります。

さらに、組成と密度の関係は不純物や添加剤によっても影響を受けます。微量の不純物は界面特性を変化させ、密度の安定性に影響を与える可能性があります。用途によって、組成と密度に対する要件は異なります。例えば、高密度電極は耐摩耗性に優れた用途に適しており、低密度電極は軽量設計に使用されます。

3.1.1.3 密度がアプリケーションに与える影響

密度はタングステン銅電極の中核的な性能パラメータの一つです。そのレベルと分布は、様々な用途における電極の適用性、安定性、効率を直接的に決定します。特に、放電加工、溶接、マイクロエレクトロニクス実装といったハイエンド分野では、密度のわずかな違いが性能に大きな変動を引き起こし、プロセス全体の効果に影響を与える可能性があります。

1. 密度と機械的特性の関係とその応用への影響

タングステン銅電極は、その機械的強度および耐摩耗性と正の相関関係にあります。高密度電極は内部の気孔率が極めて低く、タングステン粒子と銅相が緊密に結合して緻密な微細構造を形成しています。そのため、外力や高温衝撃を受けた際に材料が応力を均一に分散し、局所的な破損や変形が発生しにくくなります。この特性は特に放電加工において重要です。電極とワーク間の高周波放電は、瞬間的に高温および機械的衝撃を発生させます。高密度電極は、高い圧縮強度と耐変形性を備えており、放電加工時の衝撃力に効果的に耐え、表面のアブレーション痕を低減し、構造の緩みによる局所的な崩壊のリスクを低減します。例えば、金型鋼などの高強度材料の精密加工において、高密度タングステン銅電極は安定した形状精度を維持し、均一な放電ギャップを確保することで、ワークの表面仕上げと寸法精度を向上させ、電極単体の寿命を延ばします。

一方、低密度電極は内部に多くの気孔を有するため、タングステンと銅の界面積が減少し、材料全体の耐摩耗性が低下します。このタイプの電極は、精度と耐久性に対する要件が比較的低い小型プラスチック部品の放電加工など、低負荷・短サイクルの加工タスクに適しており、低密度電極のコスト優位性を反映できます。加工時間が長くなると、気孔の周囲に微小亀裂が発生しやすくなり、最終的には電極の故障につながり、交換頻度と生産コストが増加します。

2. 密度が熱伝導率とプロセス最適化に与える影響

密度は、タングステン銅電極の熱伝導率に影響を与える中核的な要因です。高密度は通常、熱伝導効率の向上につながります。材料内部では、銅相が主な熱伝導体として機能し、その分布

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の連続性は材料密度に直接依存します。高密度電極では、銅相がタングステン粒子間の隙間をより均一に充填し、連続した熱伝導ネットワークを形成します。これにより、加工領域で発生した熱（例えば、電気火花放電時の瞬間的な高温）が電極内部に速やかに拡散し、装置固定具を介して外部に伝導されるため、局所的な過熱のリスクが低減します。この効率的な放熱能力は、加工精度にとって非常に重要です。電極表面に熱が蓄積すると、局所的な温度上昇が急激に発生し、電極表面の材料が熔融または蒸発して電極の寸法が減少するだけでなく、放電安定性にも影響を与え、ワーク表面に焼けやひび割れなどの欠陥が生じる可能性があります。例えば、航空機エンジンプレードなどの複雑な曲面の精密加工では、高密度タングステン銅電極の効率的な放熱特性により、長期加工時の温度安定性を確保し、放電パラメータの一貫性を維持し、最終的にワークピースの高精度成形を実現します。

低密度電極は銅相の分布が不連続であり、細孔が熱伝導を阻害して「熱抵抗帯」を形成し、放熱効率を低下させます。低電力加工シナリオではこの欠陥は顕著ではないかもしれませんが、高エネルギー放電加工（大型金型の荒加工など）では、熱蓄積により電極の摩耗が著しく増加し、過熱を回避するために放電エネルギーを削減せざるを得なくなり、間接的に加工効率が低下します。したがって、放熱要件が厳しいアプリケーションでは、高密度電極はプロセス安定性を向上させるための重要な選択肢となります。

3. 溶接アプリケーションにおける密度の多様な役割

溶接分野において、タングステン銅電極の密度は、電気伝導性と熱管理能力に影響を与え、溶接の品質と効率を直接的に決定します。高密度電極は銅相が連続的に分布し、抵抗値が低いいため、溶接プロセスに安定した電流伝送経路を提供し、過剰な抵抗によって発生する「抵抗熱」を低減します。この余分な熱はエネルギーを無駄にするだけでなく、電極自体の過熱や変形を引き起こし、電極とワークピース間の接触安定性に影響を与える可能性があります。例えば、自動車ボディの抵抗スポット溶接では、高密度タングステン銅電極は高電流でも安定した電流出力を維持し、溶接点における熱集中とナゲット形成を確保し、冷間溶接や溶接溶け込みなどの欠陥を回避します。シーム溶接などの連続溶接プロセスでは、優れた電気伝導性により電流変動が低減され、溶接の均一性が確保されます。

密度と電極重量の関係は溶接装置にも影響を与えます。高密度電極は重量が重いいため、固定式の自動溶接装置に適しています。これらの装置のロボットアームや固定具は耐荷重性が高く、カウンターウェイトを調整することで電極とワークピースの正確な接触を確保できます。しかし、可搬型溶接装置（ハンドヘルドスポット溶接ガンなど）では、電極が重すぎると作業者の作業負担が増加します。このような場合、低密度電極の軽量化の利点がより顕著になります。低密度電極の設計では、重量と性能のバランスをとる必要があり、通常はタングステンと銅の比率を最適化して密度を低減しながら、コアの電気伝導性と熱伝導性を最大限に維持する必要があります。

さらに、溶接時の熱サイクルは、電極密度に特別な要件を課します。高密度電極は、その緻密な構造と均一な熱膨張により、加熱と冷却の繰り返しによる内部応力集中による割れが生じにくく、高周波溶接（家電製品生産ラインにおけるバッチ溶接など）に適しています。一方、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

低密度電極は、長期間の熱サイクルを受けると、気孔周辺の応力集中により表面剥離が発生し、耐用年数が短くなる場合があります。

4. マイクロエレクトロニクスパッケージにおける密度と信頼性の関係

マイクロエレクトロニクスパッケージングでは、タングステン銅電極の密度に対する要求はさらに厳しくなります。その核心は、電極と基板間の熱膨張係数の整合と機械的安定性を実現することです。チップパッケージングでは、電極をシリコンウェーハやセラミック基板などの材料にしっかりと接着する必要があります。しかし、材料によって熱膨張係数は異なります。電極密度が高すぎると、全体の熱膨張係数が基板から大きくずれる可能性があります。温度サイクル中に、電極と基板の界面に大きな応力が発生します。この応力が長期間蓄積されると、はんだ割れ、回路の破損、さらにはパッケージの故障につながる可能性があります。そのため、マイクロエレクトロニクスパッケージング用のタングステン銅電極は、密度を精密に制御し、熱膨張係数を基板の熱膨張係数に近い範囲に調整する必要があります。通常は中高密度設計が用いられ、電流伝送を支える構造密度を確保するとともに、最適化された細孔分布（均一に分布した少数の微細孔など）によって熱応力を緩和することで、長期的な信頼性を確保します。同時に、高密度電極の機械的安定性は、マイクロエレクトロニクスのパッケージングにおいて不可欠です。チップのパッケージングにおいては、電極はボンディング、パッケージング、その他のプロセスにおける機械的ストレスに耐えなければなりません。高密度電極は高い圧縮強度を有するため、外力による変形や破損を防ぎ、電極とチップピン間の正確な位置合わせを保証します。しかし、気孔分布が不均一な低密度電極は、ボンディング圧力によって局所的な崩壊を引き起こし、電気接続の安定性に影響を与える可能性があります。例えば、5G チップの高周波パッケージングでは、わずかな電極変形でも信号伝送損失の増加につながる可能性があります。

5. 密度が製造コストとシナリオ適応に与える影響

密度は、タングステン銅電極の製造コストと加工難易度にも直接関係しています。高密度電極の製造には、より高い焼結圧力、より長い保持時間、さらには内部の気孔率を低減するための二次加圧プロセスが必要であり、これにより装置のエネルギー消費量と生産サイクルが間違いなく増加します。同時に、高密度材料の加工（精密研削やワイヤーカットなど）はより困難になり、工具の摩耗が速くなり、製造コストがさらに上昇します。ただし、ハイエンドのアプリケーションシナリオ（航空宇宙エンジンの精密部品の加工など）では、その性能上の利点はコスト増加をカバーするのに十分です。設備の故障や製品の廃棄による損失は電極のコストをはるかに上回り、高密度電極の耐久性が好ましい選択肢となります。低密度電極の製造プロセスは比較的簡単です。焼結圧力の低減と処理時間の短縮はコスト削減につながりますが、その性能上の制約から、極端な性能を必要としないコスト重視の用途（民生用電子機器の低価格部品の溶接など）に適しています。さらに、特定の業界では密度に対する要件が異なります。航空宇宙機器では、全体の重量を軽減するために、コア部品以外の部品には低密度のタングステン銅電極が採用される傾向があり、構造設計によって軽量化を図りつつ必要な強度を維持する傾向があります。一方、原子力発電機器の電極は、放射線環境における材料の劣化や腐食に耐え、長期にわたる安定した動作を確保するために、高密度設計が求められます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.2 タングステン銅電極の熱特性

タングステン - 銅電極の熱特性は、その物理的特性の重要な要素であり、熱伝導率、熱膨張係数、および高温耐性をカバーし、高温環境および熱サイクルにおける電極の性能に直接影響します。熱伝導率は主に銅相によって提供されます。銅の高い熱伝導率は、熱が処理または操作領域から外部にすばやく伝達されることを保証し、局所的な温度を下げ、ワークピースの過熱、変形、または損傷を防ぎます。タングステンの適度な熱伝導率と銅相の相乗効果は、複合材料の全体的な熱管理機能を形成し、EDM および溶接における高熱負荷シナリオに適しています。熱特性には熱膨張係数も含まれます。タングステンの低熱膨張特性と銅の高い熱膨張特性は、比例調整によってバランスが取れています。複合材料の熱膨張係数は、さまざまな基板の熱膨張係数と一致し、熱応力を低減します。

耐高温性は熱性能の核心です。タングstenは高い融点を持つため、極高温下でも電極の安定性を確保します。銅相は高温下で液体となり、細孔を埋めることで熱安定性を高め、アーク環境にも適しています。微細構造における低多孔性と均一な相分布は、熱伝導経路をさらに最適化し、熱間静水圧プレス加工により界面の熱伝導効率を向上させます。熱疲労試験では、タングステン銅電極が広い温度範囲で構造的完全性を維持することが示されており、マイクロエレクトロニクスパッケージングやセンサー用途に適しています。将来的には、機能的な傾斜設計や表面改質によって熱性能をさらに向上させ、より高い温度差や複雑な熱管理要件にも対応できるようになります。

3.1.2.1 熱伝導率

熱伝導率は、タングステン - 銅電極の熱性能の中核指標です。これは材料の熱伝達能力を反映し、高熱負荷用途での性能に直接影響します。熱伝導率は主に銅相によって提供されます。銅の高い熱伝導率は、加工領域または動作領域から外部への熱の迅速な伝達を保証し、局所的な過熱による変形やワークピースの損傷を防ぎます。タングステンの適度な熱伝導率と銅相の相乗効果により、複合材料の全体的な熱管理能力が形成され、放電加工における高エネルギー放電の放熱ニーズに適しています。製造プロセスでは、粉末冶金または真空浸透技術により、タングステンと銅の比率と焼結条件を制御することで、熱伝導経路を最適化します。微細構造における低多孔性と均一な相分布により、熱抵抗が低減し、熱伝導率が向上します。

熱伝導率は、電極の微細構造および組成比とも密接に関係しています。銅含有量が多い場合（例：WCu 70/30）、一般に熱伝導率が高くなります。銅相の連続ネットワークは効率的な熱伝導チャネルを提供し、タングステン骨格は高温でも構造安定性を維持します。溶接用途では、高い熱伝導率により均一な熱分布が保証され、熱影響部が減少し、接合品質が向上します。マイクロエレクトロニクスパッケージングでは、熱伝導率はチップの放熱をサポートし、動作温度を下げ、耐用年数を延ばします。熱間等方圧プレス（HIP）プロセスは、全方向圧力によって界面接合を最適化し、熱伝導効率をさらに向上させます。熱伝導性能は環境要因の影響も受けます。例えば、高温で銅相が軟化することで熱伝達能力がわずかに低下する可能性があります。タングステンのサポート役として全体的な安定性が維持されます。実際の用途において、熱伝導率の最適化は具体的なシナリオによって異なります。例えば、高出力処理にはより

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高い熱伝導率を持つ電極が必要であり、軽量設計では密度を下げるために熱伝導率をある程度犠牲にする場合があります。熱伝導率の試験は通常、レーザーフラッシュ法または定常熱流法を用いて行われます。将来的には、5G デバイスや高温センサーなどの高い熱負荷に対応するために、ナノテクノロジーや機能的勾配設計（例えば、内側から外側への銅含有量の増加）の導入によって熱伝導率をさらに向上させることができる可能性があります。

3.1.2.2 熱膨張係数

電極の熱性能の重要な要素です。これは、温度変動下で材料の体積が変化する能力を反映し、基板との適合性および熱サイクル安定性に直接影響します。CTE は主にタングステンと銅の特性によって決まります。タングステンの低い CTE（約 4.5 ppm/°C）と銅の高い CTE（約 17 ppm/°C）は、複合比を調整することでバランスが取れます。タングステン銅電極の CTE は通常、6~8 ppm/°C に制御されます。この値は、シリコン（約 2.6 ppm/°C）またはアルミナセラミック（約 7 ppm/°C）基板の値に近いです。これにより、熱サイクル中の応力集中が軽減され、パッケージの反りや破損が防止されるため、マイクロエレクトロニクスパッケージングやセンサーアプリケーションに特に適しています。CTE の調整は、W/Cu 比と製造プロセスに依存します。たとえば、85/15 WCu 比は高温で優れた性能を示します。熱シミュレーションにより、その低応力特性が検証されており、シリコン基板との熱膨張適合性は 10% 以内です。微細構造における均一な相分布と低い多孔性により、熱膨張差がさらに最小限に抑えられます。熱間静水圧プレスプロセスは、インターフェースの熱安定性を向上させ、熱サイクル中の微小亀裂のリスクを低減します。放電加工では、適度な熱膨張係数が、高エネルギー放電後の電極の回復能力を保証します。溶接では、熱膨張のマッチングにより接合部の応力が軽減され、耐久性が向上します。熱膨張係数は、周囲温度や長期使用の影響も受けます。高温での銅相の軟化により、膨張がわずかに増加する可能性があります。タングステン骨格のサポートにより、全体的な安定性が維持されます。

3.1.2.3 高温耐性

耐高温性は、タングステン銅電極の熱特性における顕著な特徴です。これは、材料の構造安定性と、極めて高温環境での性能維持能力を反映し、高熱負荷用途への適合性を直接的に決定します。この耐高温性は主に、すべての金属の中で最も高い 3422°C の融点を持つタングステンによってもたらされます。この特性により、タングステン銅電極は、アーク放電または高温溶接中に構造的完全性を維持し、溶融や変形に抵抗します。複合構造において、タングステンは骨格材料として機能し、高強度で熱的に安定したネットワークを形成します。銅相は高温で液体の状態では細孔を満たし、材料全体の熱安定性を高め、高硬度材料の放電加工や高電圧スイッチの切断操作に適しています。耐熱性は、微細構造と準備プロセスにも依存します。粉末冶金法や真空浸透法によって低多孔性と均一な相分布が実現され、高温での熱応力集中が軽減されます。熱間等方圧加圧法（HIP）は、界面接合をさらに最適化し、熱疲労耐性を向上させます。放電加工（EDM）では、耐熱性により高エネルギー放電時の電極表面のアブレーションが低減され、耐用年数が延長されます。耐熱性は銅相の影響も受けます。銅は融点が低く（1083°C）、非常に高温になると軟化する可能性があります。タングステン骨格のサポートにより構造的完全性が維持されます。表面処理（ニッケルメッキなど）は耐酸化性をさらに高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

め、湿気の多い環境や工業環境における耐用年数を延長します。

3.2 タングステン銅電極の機能性能

タングステン銅電極は、導電性、耐アーク侵食性、機械的耐久性、熱管理能力を網羅しており、実用化における中核的な価値です。これらの特性は、タングステンと銅の複合特性に由来します。製造プロセスと微細構造を最適化することで、タングステン銅電極は、放電加工、溶接、マイクロエレクトロニクス実装において多機能性を発揮します。銅相によって導電性が提供され、効率的な電流伝達が保証されます。タングステンの高い融点と硬度によって耐アーク侵食性がサポートされ、表面損失が低減されます。均一な相分布と低い多孔性によって機械的耐久性が実現され、高負荷動作がサポートされます。熱管理は、銅の熱伝導性とタングステンの安定性を組み合わせることで、高温環境での性能を最適化します。

3.2.1 タングステン銅電極の導電性

タングステン銅電極は、その機能的価値の中核を成すものであり、放電加工、溶接、マイクロエレクトロニクス実装などの分野における電気効率と長期信頼性を直接的に決定づけます。この独自の性能は、タングステンと銅の相乗効果によるものです。銅は天然の導電性金属であるため、電極内に連続的な電流伝送ネットワークを形成し、低抵抗の電荷フロー経路を提供します。一方、タングステンは高融点と高強度という堅牢な骨格を有し、高温や機械的ストレスなどの過酷な動作条件下でも電極の構造的安定性を維持し、銅相の過熱や変形による導電経路の断絶を防ぎます。この2つの特性を組み合わせることで、銅の導電性の利点を維持しながら、強度と耐高温性における純銅の欠点を克服し、タングステン銅電極は複雑な電気環境に最適な選択肢となります。

電気伝導性の微細構造的基礎

タングステン銅電極は微細構造と密接に関連しており、その中心となるのは銅相の分布とタングステン-銅界面の接合品質です。粉末冶金法や真空含浸法などのプロセスを用いることで、微細構造を精密に制御することができます。粉末冶金法では、タングステン粉末と銅粉末を一定の割合で混合し、加圧焼結することで、銅相がタングステン粒子間の隙間を均一に充填し、緻密な「タングステン骨格-銅フィラー」構造を形成します。真空含浸法では、高温で溶融銅を焼結前のタングステン骨格に浸透させ、毛細管現象を利用して銅相を連続的に分散させます。どちらのプロセスも、内部の気孔率と界面欠陥を低減することを目標としています。気孔率は電流経路を遮断し、局所抵抗の急激な増加につながる可能性があります。一方、界面の接合不良は「接触抵抗」を形成し、電荷移動抵抗を増大させる可能性があります。したがって、高い導電性を得るには、低い多孔性と均一な相分布が不可欠です。これらの条件により、電極内の均一な電流伝導が確保され、局所的な抵抗差による熱集中や電流変動が回避されます。

タングステンと銅の比率は、電気伝導性を調整する上で重要なパラメータです。理論的には、銅含有量が多いほど電気伝導性は向上します。これは、より多くの銅相がより高密度の導電ネットワークを形成できるためです。しかし、銅含有量が高すぎると、タングステン骨格の支持

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機能が弱まり、高温で電極が軟化して変形しやすくなります。実際の用途では、状況に応じて両者の比率を調整する必要があります。例えば、導電効率を重視する場合には銅含有量を高く設定し、高温安定性を考慮する必要がある場合にはタングステンの割合を適切に増加させます。この比率調整は、本質的に「導電性」と「構造安定性」のバランスを見つけ、さまざまな動作条件の核心ニーズに適応することです。

導電特性がアプリケーションシナリオに与える影響

放電加工において、電気伝導性は加工精度と電極寿命に直接影響します。加工中、電極とワークの間に高周波放電が発生し、高温の熔融材料が生成されます。安定した電流伝送は、均一な放電エネルギーを確保するための前提条件です。高導電性のタングステン銅電極は、電流密度を均一に分散させ、過度な局所抵抗によって引き起こされる「過放電」現象、つまり局所的な電流集中による異常な高温を回避します。過放電は、電極表面のアブレーションやワーク表面のピットやクラックなどの欠陥を引き起こす可能性があります。同時に、優れた導電性はエネルギー損失を低減し、より多くの電気エネルギーを加工に必要な熱エネルギーに変換し、加工効率を向上させます。また、安定した電流伝送は、電極の「電気化学的腐食」を低減し、損失速度を遅くし、使い捨てサイクルを延長します。

溶接分野において、電気伝導性の良否は溶接品質の安定性に直接影響します。抵抗スポット溶接であれシーム溶接であれ、電極は電流を溶接部へ効率的に伝達し、抵抗熱によってワークの接触面を熔融させて熔融コアを形成する必要があります。高導電性のタングステン銅電極は、電極とワークの接触点における安定した電流出力を確保し、抵抗変動による熱ムラを回避します。熱不足は冷溶接を引き起こし、熱過多はワークへの浸透や電極の固着を引き起こす可能性があります。さらに、溶接プロセス中は抵抗熱によって電極自体も発熱します。導電性が悪いと、電極の高温により表面酸化や変形が生じ、導電性がさらに低下し、「性能低下→過熱悪化」という悪循環に陥る可能性があります。高導電性電極は低抵抗特性を持つため、自己発熱を抑え、長期にわたって安定した溶接効果を維持できます。

マイクロエレクトロニクスパッケージングでは、導電性に対する要求がより高度になっています。チップと基板間の接続において、導電性インターコネクトとしてのタングステン銅電極は、信号伝送の完全性を確保するために、低抵抗で安定した回路伝導を実現する必要があります。高周波・高速電子信号は抵抗の変化に非常に敏感です。わずかな抵抗変動でさえ、信号の遅延や減衰を引き起こす可能性があります。そのため、マイクロエレクトロニクスパッケージングに使用されるタングステン銅電極は、極めて高い導電性の一貫性を備え、内部に局所的な高抵抗領域があってはなりません。局所的な高抵抗領域があると、信号伝送の「ボトルネック」となる可能性があります。同時に、パッケージング環境における温度サイクルは、材料の膨張と収縮を引き起こします。

コア導電パラメータの相関と重要性

導電率、抵抗率、電流容量は、タングステン銅電極の導電性能を測定するための中核パラメー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タです。これら 3 つは相互に関連しており、それぞれ異なる焦点を持っています。導電率は、材料の電流伝導能力を反映しています。値が高いほど導電性が優れています。抵抗率は導電率の逆数であり、電流の伝達に対する抵抗を直接反映します。実際の用途では、これら 2 つのパラメータが共同で特定の電圧における電極の電流強度を決定し、エネルギー出力効率に影響を与えます。電流容量は、過熱や構造損傷なしに電極を連続的に通過できる最大電流を表します。これは導電性能に関係するだけでなく、材料の放熱能力や耐熱性とも密接に関係しています。高い導電性は電流通過時のジュール熱を低減し、タングステン骨格の耐熱性は高電流を流すための構造的サポートを提供します。

タングステン銅電極の設計においては、これら 3 つのパラメータのバランスが極めて重要です。例えば、高電流用途では、高い導電性（発熱を最小限に抑える）と高い電流容量（構造破損を防ぐ）の両方を維持する必要があります。一方、精密マイクロエレクトロニクスでは、正確な信号伝送を確保するために、導電性の安定性と均一性に重点が置かれます。これらのパラメータの徹底的な研究と制御は、タングステン銅電極の性能を最適化するための基盤であり、多様なハイエンド用途への適応性を保証する技術的保証でもあります。

3.2.1.1 導電率

導電性はタングステン銅電極の導電特性の基本的な指標であり、材料の電荷移動能力を反映し、電気アプリケーションにおける効率に直接影響します。導電性は主に銅相によってもたらされ、その高い導電性により電極内での効率的な電流伝送が保証され、連続した導電ネットワークが形成されます。タングステンの導電性は銅よりも低いですが、最適化された複合プロセス（WCu 比 70/30 など）により、その導電性は純銅に近づき、EDM の高電流要件と溶接の低抵抗要件を満たします。微細構造内の銅相の均一な分布により、抵抗の変動が低減し、放電安定性が向上します。これは特に、導電性が加工精度と表面品質を直接左右する精密加工アプリケーション（マイクロモールドなど）に当てはまります。

高い導電性の実現は製造プロセスに依存します。粉末冶金は、焼結温度と圧力によって銅の濡れ性と充填性を制御します。真空含浸は、液体銅の浸透を通じて相界面を最適化し、気孔率を低減し、散乱効果を最小限に抑えます。熱間静水圧加圧（HIP）は、界面結合をさらに強化し、導電性の一貫性を向上させます。導電性は組成比によっても影響を受けます。銅含有量が多い（WCu 60/40 など）と、一般的に導電性が高くなり、高効率処理に適しています。一方、タングステン含有量が多い（WCu 90/10 など）は、耐摩耗性を優先する場合に優れた性能を発揮します。実際の用途では、高い導電性は安定したアーク放電をサポートし、エネルギー損失を低減し、電極寿命を延ばします。将来的には、ナノ銅粉末の導入や表面改質（銀メッキなど）

により、導電性をさらに向上させ、5G 機器や電力伝送などの大電流・高周波用途に適応することができます。

3.2.1.2 抵抗率

抵抗率は、タングステン銅電極の導電性を示す重要な指標の一つです。これは、材料の電流抵

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

抗を反映し、電気エネルギーの伝達と発熱の効率に直接影響します。抵抗率は主にタングステンと銅の複合特性によって決まります。銅の低抵抗率は効率的な電流経路を提供し、タングステンは高抵抗率であるため、高比率で全体のインピーダンスが増加する可能性があります。この比率を最適化することで、タングステン銅電極の抵抗率は純銅に近いレベルまで効果的に低減され、低エネルギー損失が求められる用途に適しています。微細構造における低多孔性と均一な相分布は、電子散乱を低減し、抵抗率の一貫性を高めます。これは特に長距離電流伝送において顕著です。抵抗率の制御は製造プロセスに依存します。粉末冶金では、精密な混合と焼結によって銅相の連続性を最適化し、真空浸透法では、気孔に液体銅を充填することで抵抗率をさらに低減します。熱処理や圧力アシストプロセス（HIP など）は、材料密度を向上させ、粒界や欠陥による抵抗増加を低減します。抵抗率は温度や環境の影響も受けます。高温で銅相が軟化することで抵抗がわずかに増加する場合がありますが、タングステン骨格のサポートにより全体的な安定性が維持されます。放電加工では、低抵抗が熱の影響を軽減し、表面品質を向上させます。溶接では、低抵抗が接合抵抗を低減し、効率を向上させます。

3.2.1.3 電流容量

電流容量は、タングステン銅電極の導電特性を示す重要な指標です。高電流条件下での電極の安定性と耐久性を反映し、高負荷用途への適合性を直接的に決定します。電流容量は主に、銅相の高い導電性とタングステンの高い融点によって支えられています。銅は効率的な電流伝送経路を提供し、タングステンの骨格構造は高温アーク下での安定性を維持し、溶融や変形を防ぎます。タングステン銅電極は、最適化された比率（WCu 80/20 など）により、高電流条件下でも非常に優れた性能を発揮します。微細構造における低多孔性と均一な相分布により、局所的な過熱のリスクが低減し、電流容量が向上します。

高い通電容量の達成は製造プロセスに依存します。粉末冶金は、焼結温度と圧力を制御することで相界面を最適化します。真空浸透は、液体銅の浸透によって密度を向上させます。熱間静水圧加圧は、材料の機械的強度と導電安定性をさらに高めます。タングステン含有量が多い（WCu 90/10 など）とアーク浸食に対する耐性が向上し、高エネルギー放電用途に適します。一方、銅含有量が多い（WCu 60/40 など）と低抵抗伝送が最適化されます。放電加工では、高い通電容量が大量の材料除去をサポートし、溶接では、高電流下でも接合部の品質と耐久性を確保します。実際の用途では、通電容量は周囲温度と放熱条件にも影響されます。適切な熱管理（空冷または液冷など）は、通電限界を向上させることができます。通電容量の向上は、電極設計にも依存します。複雑な形状では均一な電流分布が必要であり、表面処理（メッキなど）により耐腐食性を高め、耐用年数を延ばすことができます。

3.2.2 タングステン銅電極の耐アーク侵食性

タングステン銅電極の性能は、高エネルギーアーク放電環境における耐久性と安定性を反映しています。この特性は、放電加工（EDM）、抵抗溶接、高電圧スイッチングなどの分野で大きな利点をもたらします。耐アーク侵食性は、主にタングステンの高い融点と硬度、そして銅の導電性と充填性の組み合わせによるものです。粉末冶金法または真空浸透法による微細構造の最適化、低多孔性、均一な相分布により、耐侵食性はさらに向上します。アークの作用下

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

では、電極表面で材料の蒸発または溶融が発生する可能性があります。耐アーク侵食性は、加工精度、耐用年数、そして費用対効果に直接影響します。

3.2.2.1 アーク侵食のメカニズム

アーク侵食のメカニズムは、タングステン銅電極の耐アーク侵食性を理解する上で重要です。このメカニズムには、アーク放電が材料表面にもたらす熱効果と材料損失が関係します。アーク侵食は、高電圧または高電流条件下での放電から始まり、高温プラズマ（数千℃に達する）を生成します。この電極表面の瞬間加熱により、材料が局所的に溶融または蒸発します。タングステン銅電極では、アーク作用は最初に銅相に影響を及ぼします。融点が高い（1083℃）ため、液体の銅は高温で蒸発またはスパッタリングし、タングステン骨格が露出することがあります。タングステンは融点が高い（3422℃）ため、アーク放電下でも構造的な安定性が確保されますが、表面酸化やマイクロアブレーションが発生し、ピットやクラックが形成される場合があります。侵食プロセスには熱応力も関与します。急速な加熱と冷却は材料内に応力集中を招き、マイクロクラックの伝播を引き起こす可能性があります。

アークアブレーションのメカニズムは、微細構造の影響も受けます。低気孔率は熱集中点を低減し、均一な相分布（WCu 70/30 など）は熱伝導を最適化し、局所的な過熱のリスクを低減します。アークエネルギーと放電周波数もアブレーションの程度に影響を与えます。高エネルギー放電は材料損失を増大させますが、低周波放電は表面損傷が軽微な場合があります。金属蒸気や酸化物などのアブレーション生成物がワークピース表面に堆積し、加工品質に影響を与える可能性があります。熱間静水圧プレス（HIP）などの準備プロセスは、密度を高め、気孔内の蒸発点を減らすことで、アブレーション耐性を高めます。今後、アークエネルギー分布と材料の相転移を研究することで、アブレーションメカニズムのさらなる解明と電極設計の最適化が可能になります。

3.2.2.2 アブレーション耐性の評価

耐侵食性評価は、タングステン銅電極のアーク侵食性を評価するための科学的手法です。実験テストと性能分析により、実際の用途における電極の信頼性を確保します。この評価は通常、アーク侵食試験によって行われ、高エネルギー放電条件をシミュレートし、電極の表面質量損失、寸法変化、および表面形態を記録します。質量損失率は重要な指標です。耐侵食性の高い電極は、長時間放電後、純銅またはグラファイト電極よりも質量損失が大幅に低くなります。80/20 WCu 比は、200A で非常に優れた性能を発揮します。寸法変化は 3D スキャンを使用して測定し、電極プロフィールに沿った摩耗の程度を評価します。摩耗率が低いほど、耐侵食性が高いことを示します。表面形態分析では、走査型電子顕微鏡（SEM）を使用して侵食後の微細構造を観察し、ピットの深さ、亀裂密度、および酸化層の厚さを評価します。均一な侵食痕は、微細構造の安定性を反映しています。耐侵食性は、規定回数の放電後の電極の性能劣化を記録する寿命試験によっても評価されます。高耐久性電極は、導電性と機械的強度の両方を維持します。ISO 14132 や IEC 62271-102 などの国際規格では、アーク耐量試験や熱安定性評価を含む試験ガイドラインが規定されています。実験結果によると、最適化された製造プロセスを採用した電極は、アブレーション率を約 30% 低減できることが示されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐アブレーション性の評価では、適用シナリオも考慮されます。放電加工においては、耐アブレーション性は加工精度とワーク表面品質に直接影響し、溶接においては電極交換頻度を低減します。

3.2.2.3 アブレーション耐性に影響を与える要因

耐アブレーション性に影響を与える要因は、タングステン銅電極の性能を最適化する上で重要であり、材料組成、微細構造、動作条件などの側面が含まれます。最も重要な要因は組成比です。タングステン含有量が多いほど（例：WCu 90/10）、耐アブレーション性が向上します。タングステンは融点が高く硬度が高いため、アークショックから保護します。銅含有量が多いほど（例：WCu 60/40）、導電性は向上しますが、耐アブレーション性は低下します。耐久性と効率性のバランスをとる必要があります。微細構造は大きな影響を与えます。低多孔性は熱の集中点を減らし、均一な相分布は熱伝達を最適化します。熱間等方圧加圧（HIP）プロセスは密度を向上させ、アブレーション率を約 15% 低減します。

製造プロセスは耐アブレーション性に極めて重要です。粉末冶金では、焼結温度と圧力が銅の濡れ性を左右します。真空含浸では、浸透深さが界面の安定性に影響します。高温処理は欠陥を低減します。ニッケルメッキやコーティングなどの表面処理は耐酸化性を高め、アークによる表面損傷を軽減します。動作条件には、アークエネルギーと放電周波数が含まれます。高エネルギー放電（例：500A）はアブレーションを悪化させ、低周波数放電は損失を低減します。湿気や酸化雰囲気などの環境要因は表面劣化を加速させる可能性があるため、動作条件を最適化する必要があります。電極設計も耐アブレーション性に影響します。複雑な形状では、局所的な過熱を最小限に抑えるために均一な電流分布が必要です。

3.3 タングステン銅電極のその他の特性

タングステン銅電極は、硬度、強度、靱性、耐摩耗性、耐腐食性、さらには溶接や接着に対する耐性など、様々な用途における独自の利点の重要な要素です。これらの特性は、タングステンと銅の複合特性に由来します。微細構造は、粉末冶金法または真空浸透法によって最適化され、低多孔性と高均一性を備えた材料を形成します。タングステンの高融点、硬度、化学的安定性は、耐高温性と耐摩耗性の基盤となり、銅の高い導電性、延性、熱伝導性は、電気特性と靱性を高めます。その他の特性との複合的な性能は、放電加工、溶接、マイクロエレクトロニクスパッケージングにおける電極の耐久性、効率、信頼性に直接影響します。

3.3.1 タングステン銅電極の硬度

タングステン銅電極は、その機械的特性を示す重要な指標であり、高負荷および摩耗条件下での耐久性と変形抵抗を反映しています。この特性は主にタングステンによってもたらされ、その高い硬度が複合材料の主因となっています。銅の充填効果と組み合わせることで、粉末冶金または真空浸透プロセスによって微細構造が最適化され、均一な相分布と低い多孔性が得られます。硬度は、放電加工時の電極の耐浸食性、溶接時の圧縮強度、およびマイクロエレクトロニクス実装における表面安定性に直接影響します。高硬度電極は、頻繁な機械的ストレスや

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

アークショックにも耐えることができ、加工精度を維持しながら耐用年数を延ばします。この硬度の達成は、タングステンと銅の比率と準備プロセスに依存します。タングステン含有量が多いほど（WCu 80/20、WCu 90/10 など）、硬度が高くなります。タングステンの天然硬度は耐摩耗性の基盤となり、銅の延性は焼結時に気孔を埋め、材料全体の密度を高めます。熱間等方圧加圧（HIP）によって最適化された微細構造の微粒子は、硬度をさらに高め、表面摩耗を低減します。硬度試験には通常、ピッカース硬さ法またはロックウェル硬さ法が用いられます。結果は、材料の表面の圧痕耐性を反映します。高温焼結や圧力制御などの準備プロセスは、硬度分布の均一性に直接影響します。実際の用途では、高硬度の電極は高硬度材料の加工において優れた性能を発揮し、電極の変形を最小限に抑えます。

硬度は環境条件や使用条件にも影響されます。高温下では銅相が軟化するため硬度がわずかに低下することがありますが、タングステン骨格による支持により全体的な安定性が維持されます。研磨やコーティングなどの表面処理により、表面硬度と耐腐食性をさらに高めることができます。マイクロエレクトロニクス実装においては、硬度によって電極と基板の密着性が確保され、機械的な損傷を防ぎます。

3.3.2 タングステン銅電極の強度

タングステン銅電極は、その機械的特性を示す重要な指標であり、高圧および機械的応力下における破壊および変形に対する耐性を反映しています。この特性は、タングステンの高い圧縮強度と銅の靱性によって支えられています。粉末冶金法または真空浸透法による微細構造の最適化により、低多孔性と高密度の複合材料が実現します。強度は、放電加工における電極の耐衝撃性、溶接における圧縮強度、そしてマイクロエレクトロニクス実装における構造安定性に直接影響します。高強度電極は、高エネルギー放電や機械的クランプによる応力に耐えることができ、耐用年数を延ばし、加工効率を向上させます。

強度の達成は、タングステンと銅の比率と製造プロセスに依存します。タングステン含有量が高い場合（例：WCu 85/15）、圧縮強度が大幅に向上します。タングステン骨格は高強度の構造的支持を提供し、銅の充填は微細構造の均一性を最適化し、応力集中を軽減します。微細組織における低多孔性と均一な相分布は、熱間静水圧プレス（HIP）によって強化されます。微細粒径は材料の耐疲労性を向上させ、強度試験では圧縮強度が比較的高いレベルに達することが示されています。焼結温度や圧力制御などの製造プロセスは、強度分布の均一性に直接影響します。真空含浸は、液体銅の浸透を通じて界面結合を強化します。強度は動作条件にも影響されます。高温下では銅相が軟化するため強度がわずかに低下する可能性があります。タングステン骨格の支持により全体的な安定性が維持されます。放電加工（EDM）においては、高強度電極は高エネルギー放電の衝撃に耐え、変形を低減します。溶接においては、高圧下での接合形成をサポートします。マイクロエレクトロニクス実装においては、強度が高いことで熱サイクル中に電極が破損するのを防ぎ、信頼性を高めます。

3.3.3 タングステン銅電極の靱性

タングステン銅電極は、衝撃や応力下における破壊やエネルギー吸収に対する耐性など、その

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機械的特性において重要な要素です。この特性は主に銅によってもたらされ、その高い延性と靱性は複合材料において重要な役割を果たします。タングステンの硬度と相まって、粉末冶金法や真空浸透法によって微細構造が最適化され、低多孔性と高均一性を備えた材料が実現します。靱性は、放電加工における電極の耐割れ性、溶接における耐衝撃性、マイクロエレクトロニクス実装における構造的柔軟性に直接影響します。靱性の高い電極は、機械的応力や熱応力を吸収し、脆性破壊を低減し、耐用年数を延ばすことができます。このセクションでは、タングステン銅電極の靱性特性と、実際の用途におけるその役割について詳しく説明します。

靱性の達成は、タングステンの銅に対する比率と準備プロセスに依存します。銅の含有量が多いほど、靱性は向上します。銅の破断時の伸びはエネルギー吸収を提供し、タングステン骨格は高温で構造安定性を維持します。ミクロ組織における低多孔性と均一な相分布は、熱間静水圧プレスによって最適化されます。微細粒サイズは、材料の亀裂伝播に対する耐性を向上させます。靱性試験は、材料が衝撃を受けるといくらかの塑性変形を示すことを示しています。焼結温度や圧力制御などの準備プロセスは、靱性分布の均一性に直接影響を及ぼします。真空含浸は、液体銅を浸透させることで界面結合を改善し、応力集中点を減らします。靱性は動作条件にも影響されます。高温で銅相が軟化することで靱性が向上しますが、過度の温度は強度の低下につながる可能性があります。タングステン骨格が提供するサポートが全体のバランスを維持します。放電加工においては、高靱性電極は高エネルギー放電の衝撃に耐え、亀裂の発生を低減します。溶接においては、熱応力を吸収し、接合部の耐久性を向上させます。マイクロエレクトロニクス実装においては、靱性は熱サイクル中の脆性破壊を防ぎ、信頼性を高めます。研磨などの表面処理は、表面欠陥を低減し、間接的に靱性を向上させることができます。

3.3.4 タングステン銅電極の耐摩耗性

タングステン銅電極は、その機械的特性において重要な要素であり、繰り返し摩擦や高負荷条件下での耐摩耗性と表面安定性を反映しています。この特性は主にタングステンによってもたらされ、その高い硬度と耐摩耗性が複合材料の主役となっています。銅の充填効果と相まって、粉末冶金法または真空浸透法によって微細構造が最適化され、低多孔性と高均一性を備えた材料が実現されています。耐摩耗性は、放電加工における電極の長期耐用年数、溶接における耐接触摩耗性、マイクロエレクトロニクス実装における表面品質に直接影響します。耐摩耗性に優れた電極は、機械的摩擦やアーク衝撃に耐えることができ、材料損失を低減し、加工精度を維持します。

耐摩耗性は、タングステンと銅の比率と作製プロセスに依存します。タングステン含有量が多いほど（WCu 80/20 や WCu 90/10 など）、耐摩耗性は向上します。タングステンの自然な硬さが材料に耐摩耗性の基礎を提供し、銅の延性が焼結中に気孔を埋めることで、微細構造の密度を高めます。微細構造の微粒子は、熱間静水圧プレス（HIP）プロセスによって最適化され、耐摩耗性がさらに向上し、表面の摩耗と侵食が低減します。耐摩耗性試験では、通常、摩擦摩耗試験またはアークアブレーション試験を用いて、表面粗さや質量損失率の変化を測定します。高温焼結や圧力制御などの作製プロセスは、耐摩耗性分布の均一性に直接影響します。実際の用途では、耐摩耗性の高い電極は、高硬度材料（タングステン銅など）の加工において非常に優れた性能を発揮し、電極の変形と交換頻度を低減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐摩耗性は動作条件にも影響されます。高温下での銅相の軟化により耐摩耗性がわずかに低下する可能性があります。タングステン支持体により全体的な安定性が維持されます。研磨やコーティング（例：CrN）などの表面処理により、表面の耐摩耗性と耐腐食性をさらに向上させることができます。マイクロエレクトロニクスパッケージングにおいて、耐摩耗性は繰り返し組み立てを行う際に電極の表面品質を維持し、機械的な損傷を防ぐ役割を果たします。

3.3.5 タングステン銅電極の耐食性

タングステン銅電極は、環境適応性という重要な性能特性を有し、化学的侵食に対する耐性と、湿気、酸性、アルカリ性、または工業環境における長期安定性を反映しています。この特性は主に、タングステンの化学的安定性、銅の表面保護、粉末冶金または真空浸透プロセスによる微細構造の最適化によって実現され、結果として低多孔性と非常に均一な材料が実現されます。耐食性は、放電加工における電極のワークピース表面品質、溶接における耐酸化性、およびマイクロエレクトロニクスパッケージングにおける信頼性に直接影響します。耐食性の高い電極は、環境侵食に耐え、表面劣化を低減し、耐用年数を延ばすことができます。このセクションでは、タングステン銅電極の耐食特性とその応用性能について詳しく説明します。

耐食性は、タングステンと銅の比率と準備プロセスによって決まります。タングステン含有量が多いほど（WCu 85/15 など）、耐食性は高くなります。タングstenは化学的に安定しているため、酸やアルカリに対する耐性が高まり、銅は延性があるため焼結時に気孔が塞がれ、腐食経路が減少します。熱間静水圧プレス（HIP）によって最適化された微細構造の低多孔性により、腐食性媒体が浸透する経路が減少し、微細な粒径によって材料の耐亀裂性が向上します。耐食性テストでは通常、塩水噴霧テストまたは酸浸漬テストが行われ、表面腐食速度と質量損失が測定されます。真空浸透などの準備プロセスでは、液体銅の浸透によって界面密度が向上し、耐食性が向上します。実際の用途では、耐食性の高い電極は化学的に活性な材料（チタン含有合金など）の処理に優れ、ワークピースの汚染を軽減します。

耐食性は動作条件にも影響されます。湿気や酸化性雰囲気は銅相の腐食を加速させる可能性があります。タングステン骨格のサポートと表面処理（ニッケルメッキや金メッキなど）により、全体的な安定性が大幅に向上します。マイクロエレクトロニクスパッケージングにおいて、耐食性は湿度の高い環境下でも電極の酸化を防ぎ、信頼性を高めます。

3.3.6 タングステン銅電極の耐溶着性および耐接着性

タングステン銅電極は、溶接用途において重要な特性です。高温・高圧下における接合材料への付着抵抗と、溶接後の表面清浄性に大きく影響します。この特性は、主にタングステンの耐熱性と銅の表面特性によって支えられています。粉末冶金法または真空浸透法による微細構造の最適化により、低気孔率で均一性の高い材料が実現します。溶接抵抗と付着抵抗は、抵抗溶接における電極の効率、スポット溶接における表面品質、そして長期使用における交換頻度に影響を与えます。高い付着抵抗を持つ電極は、スラグの付着を低減し、溶接継手の品質を向上させ、溶接寿命を延ばすことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

はんだ付け性と耐凝着性を両立させるには、タングステンの銅に対する比率と準備プロセスが重要です。タングステン含有量が多いほど（例：WCu 80/20）、耐凝着性は高くなります。タングステンは融点が高く硬度が高いため、溶融はんだ中の凝着力が低減します。一方、銅は熱伝導性が高いため、焼結時の熱管理が最適化され、表面残留物が減少します。熱間静水圧プレス（HIP）によって最適化された微細構造の低多孔性により、スラグが浸透するチャンネルが減少し、微細な粒径により材料の変形耐性が向上します。耐凝着性は通常、溶接サイクル試験によってテストされ、スラグ付着面積と表面清浄度を測定します。真空浸透などの準備プロセスは、液体銅の浸透によって界面密度を向上させ、耐凝着性を高めます。実際には、耐凝着性の高い電極はスポット溶接やシーム溶接に優れており、洗浄頻度が減少します。

はんだ付け性と耐凝着性は動作条件にも影響されます。高温下では銅相が軟化するため、凝着のリスクが高まりますが、タングステン骨格のサポートと表面処理により、全体的な性能が大幅に向上します。抵抗溶接では、耐凝着性により電極とワークピースのスムーズな分離が保証され、接合品質が向上します。マイクロエレクトロニクス実装では、耐はんだ付け性により、残留物のない複数回のはんだ付け作業が可能になります。

3.4 CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極 MSDS

タングステン銅電極は、タングステンと銅をコア成分とする金属複合材料です。粉末冶金、真空浸透などのプロセスを経て製造され、タングステンと銅の両方の優れた特性を備えており、産業分野で広く使用されています。

材料面では、タングステンは高い融点（3410℃）と高い強度を有し、優れた耐高温性と構造安定性を電極に提供します。高温・高圧といった過酷な環境下でも形状を維持し、変形を防ぎます。一方、銅は高い電気伝導性と熱伝導性を有し、電極は熱を効率的に伝導・放散し、動作中に発生する熱を速やかに放散することで、局所的な過熱や性能低下を防ぎます。この「強靱なタングステンと優れた銅」の組み合わせにより、タングステン銅電極は純タングステンの電気伝導性と熱伝導性の低さという欠点を克服すると同時に、純銅の高温強度不足を補い、独自の性能上の利点をもたらします。

タングステン銅電極は、用途に応じて柔軟に調整できます。一般的な比率はWCu70/30とWCu80/20です。銅含有量が多いほど電気伝導性と熱伝導性が向上し、高い電気性能が求められる用途に適しています。一方、タングステン含有量が多いほど耐熱性と機械的強度が向上し、高温・高応力の作業環境に適しています。この比率を調整することで、性能を精密に調整できます。

応用分野の観点から見ると、タングステン銅電極は、多くのハイエンド産業シーンで重要な役割を果たしています。放電加工においては、放電電極として、安定した導電性と耐摩耗性により、金型鋼や超硬合金などの高強度材料を高精度に加工し、ワークピースの表面精度を確保し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。溶接分野、特に抵抗溶接とアーク溶接においては、その効率的な電気伝導性と熱伝導性により、溶接電流の安定した伝送を確保し、熱損失を減らし、はんだ接合部の品質を向上させることができます。マイクロエレクトロニクスパッケージングにおいては、その優れた電気伝導性と基板との熱膨張係数のマッチングにより、相互接続電極として使用し、チップと基板間の信頼性の高い接続を確保し、電子機器の安定性を高めることができます。さらに、航空宇宙、国防などの分野では、高温アーク接点、高電圧スイッチなどの部品にもよく使用され、過酷な作業条件下での性能要件を満たしています。

危険有害性概要: 本製品は固体金属複合材料であり、本質的に無毒です。通常の保管および使用において、有毒物質は放出されません。粉末状ではないため、粉塵を吸入するリスクはなく、爆発性や可燃性もありません。極端な温度（例えば、銅の融点である 1083°C を超える温度）下では、銅相が溶融する可能性があります。この過程で有毒ガスは発生しません。高温との接触による火傷にご注意ください。

消火措置: 本製品は不燃性・非爆発性です。高温下でも物理的变化（銅の溶融など）のみを起こし、有毒ガスを発生しません。火災が発生した場合、本製品には特別な消火措置は必要ありません。一般的な消火措置で十分です。消火の際は、高温の溶融物との接触にご注意ください。火傷の原因となる可能性があります。

漏洩緊急対応: 本製品は固体であり、漏洩の危険性はありません。万が一、破損または外力による損傷が発生した場合でも、破片を回収するだけで済みます。特別な保護措置は必要ありません。破片はリサイクルまたは一般的な産業廃棄物として処理できるため、環境安全性が確保されます。

取り扱いと保管: 取り扱い時には特別な保護具は必要ありません。表面の傷を防ぐには、工業用手袋の着用で十分です。金属表面の腐食を防ぐため、強酸や強塩基などの腐食性物質から離れた、乾燥した換気の良い環境に保管してください。密閉や特別な隔離は不要です。他の工業材料と一緒に保管する場合は、乾燥した状態を保つだけで十分です。

暴露管理および人体保護: 粉末がないため、特別な呼吸保護具や粉塵対策は必要ありません。作業中は、硬い表面との摩擦による傷害を防ぐため、一般的な工業用手袋の着用を推奨します。高温下での作業には、断熱手袋の着用が必要です。

廃棄: 廃棄された電極は金属スクラップとしてリサイクルされ、専門のリサイクル業者に処理を依頼することで、タングステンと銅を抽出し、さらに加工することができます。リサイクルできない材料は一般産業廃棄物として処理され、土壌や水を汚染することはありません。

輸送情報: 輸送中に特別な制限はなく、危険物ラベルの貼付も不要です。包装を無傷に保ち、激しい衝突による変形を避けるだけで、他の非腐食性工業製品と同じロットで出荷できます。

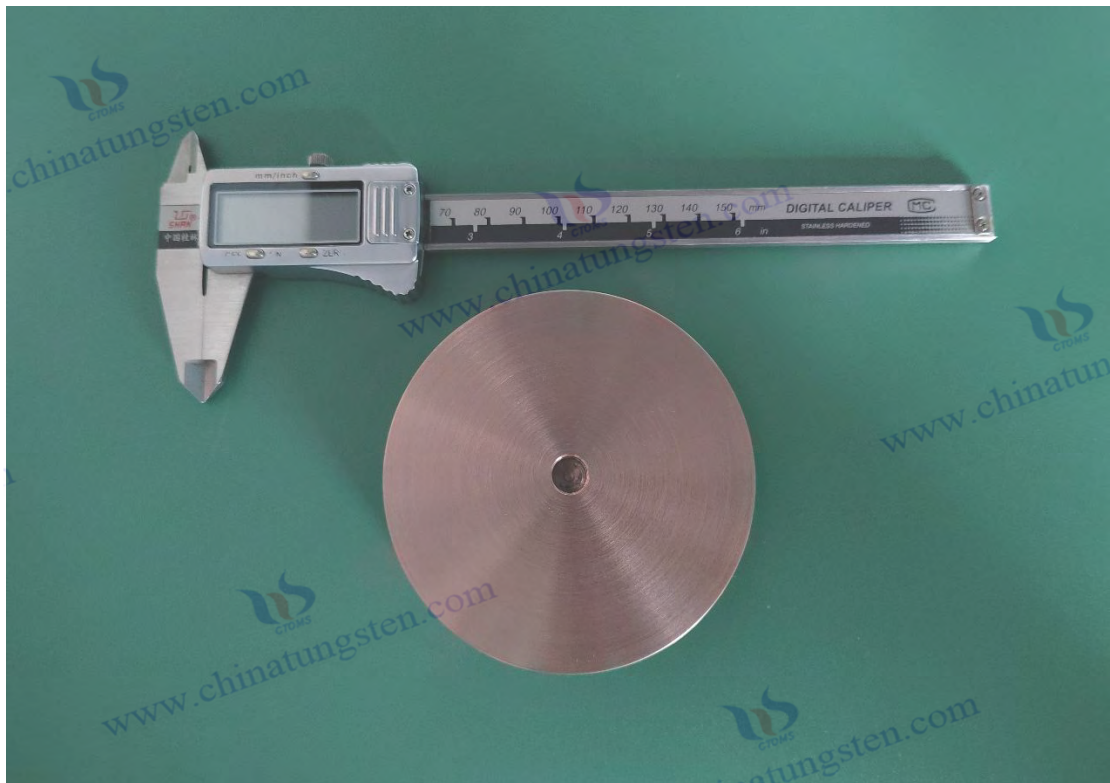
規制情報: 本製品は、「中華人民共和国固形廃棄物環境汚染防止法」、「危険化学品安全管理条

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

例」等の関連法規に準拠しており、危険化学物質や有毒物質ではなく、製造、販売、輸送は全て国家工業材料基準に準拠しています。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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 タングステン銅電極の分類

タングステン銅電極は、様々な規格によって分類できます。一般的な分類方法には、配合比、適用シーン、成形プロセスなどがあります。タングステンと銅の含有量の比率に応じて、高タングステントタイプと高銅タイプに分けられます。高タングステントタイプはタングステン含有量が、耐高温性と硬度に優れており、高温・高応力のシーンに適しています。高銅タイプ

（WCu60/40、WCu70/30 など）は銅含有量が高く、導電性と熱伝導性に優れており、高い電気効率が求められる作業環境に適しています。応用分野によって、主に EDM 電極、溶接電極、マイクロエレクトロニクスパッケージング電極などがあります。EDM 電極は耐アブレーション性と導電性の両方を備えている必要があり、溶接電極は電流安定性を重視し、マイクロエレクトロニクスパッケージング電極は寸法精度と熱マッチングに関して厳しい要件があります。

4.1 タングステン銅電極の組成比による分類

タングステン銅電極の組成比に基づく分類は、タングステンと銅の含有量の比率に基づいて電極を分類する方法です。この分類方法は、電極の物理的、機械的、電気的特性に直接影響を与え、さまざまな応用シナリオのニーズを満たします。タングステン銅電極は、粉末冶金法または真空浸透法によって製造されます。タングステンは高い融点、耐熱性、耐摩耗性を提供し、銅は高い導電性と熱伝導性をもたらします。この比率の調整によって、電極の総合的な性能が決まります。組成比の違いは主にタングステン含有量のレベルに反映され、高タングステン含有量、中タングステン含有量、低タングステン含有量の3つのカテゴリーに分けられます。各タイプの電極は、放電加工、抵抗溶接、マイクロエレクトロニクス実装などの特定の用途に合わせて最適化されています。分類基準では、微細構造と製造プロセスの影響も考慮されています。低多孔性と均一な相分布は、各種電極に共通する特性です。

4.1.1 高タングステン含有量電極（タングステン 80%～95%）

タングステン銅電極は主にタングステんで構成され、銅含有量は通常 5%から 20%です。タングステンは融点（3422℃）が高く、硬度（約 3430HV）も高いため、これらの電極は優れた耐高温性と耐アーク侵食性を備えています。粉末冶金プロセスでは、タングステン粉末を少量の銅粉末と混合し、加圧します。焼結後、銅は液相中の気孔を満たし、緻密なタングステン骨格構造を形成します。低気孔率は材料の安定性を高めます。真空含浸プロセスにより、銅の浸透がさらに最適化され、界面結合が改善されるため、高タングステン含有量電極は過酷な条件下でも構造的完全性を維持できます。

放電加工（EDM）において優れた特性を示し、特に高硬度材料の加工に適しています。タングステンは耐摩耗性に優れているため、電極表面の損失が少なく、寿命が長くなります。抵抗溶接では、高タングステン含有量が高電流切断作業をサポートし、アーク侵食に対する耐性は低タングステン電極よりも大幅に優れているため、スラグの付着が少なくなります。熱間静水圧プレスプロセスにより微細組織中の微粒子が最適化され、圧縮強度が一定の高レベルに達するため、高エネルギー放電シナリオに適しています。ただし、高タングステン含有量電極の電

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

気伝導性と熱伝導性は低く、銅比が低いいため電流伝送効率が制限されるため、放熱設計と組み合わせる必要があります。

航空宇宙部品や高電圧スイッチなどの用途にも使用されています。電極の高タングステン含有量により、3000℃を超える高温耐性が実現し、ニッケルメッキなどの表面処理により耐酸化性がさらに向上します。製造工程では、安定した性能を確保するために、タングステン粉末の純度を 99.9%以上に管理し、粒子径を 5～15 ミクロンに抑える必要があります。

4.1.2 中タングステン含有量電極（タングステン 50%～80%）

中タングステン含有量電極は、銅含有量が 20%から 50%の範囲にある、タングステン銅電極のバランスの取れたタイプです。これらの電極は、耐熱性と導電性のバランスに優れています。粉末冶金法または真空浸透法で製造され、均一なタングステン骨格と銅相ネットワークを有する微細構造を有しています。焼結過程において、液状の銅がタングステン粒子間の空隙を満たします。低空隙率と微細粒径は、熱間静水圧プレスによって最適化され、材料の機械的強度と電気的特性を向上させます。銅含有量の増加により、電気伝導性と熱伝導性の両方が向上し、中タングステン含有量電極は様々な用途で汎用性を発揮します。

中タングステン電極は、放電加工（EDM）において広く使用されており、中硬度材料の精密加工に適しています。タングステンの耐摩耗性と銅の導電性を組み合わせることで、電極の損失が低減し、加工効率が向上します。抵抗溶接においては、中タングステン電極は中電流動作をサポートし、高タングステン電極に比べて優れた熱管理能力を備えているため、熱影響部が低減し、接合品質が向上します。マイクロエレクトロニクスパッケージングもまた重要な用途の一つであり、熱膨張係数がシリコン基板やセラミック基板と一致するため、熱サイクルストレスが低減し、信頼性が向上します。中タングステン電極の性能は、その比率と処理方法によっても左右されます。例えば、WCu 70/30 の比率は耐久性と効率のバランスに優れ、WCu 60/40 の比率は導電性に優れています。高温では銅相の軟化により安定性がわずかに低下する可能性があります。タングステン骨格が電極を支えます。研磨やメッキなどの表面処理は、耐食性を高め、寿命を延ばすのに役立ちます。

4.1.3 低タングステン含有量電極（タングステン 20%～50%）

低タングステン電極（タングステン 20%～50%）は、主に銅をベースとしたタングステン銅電極で、銅の含有量は 50%～80%です。銅の高い電気伝導率（ $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ ）と熱伝導率（約 $400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）により、これらの電極は優れた電気的特性と熱的管理特性を示します。粉末冶金プロセスにより、タングステン粉末は高比率の銅粉末と混合されます。焼結後、銅は連続ネットワークを形成します。熱間静水圧プレスにより、低い多孔性と均一な相分布が最適化され、材料全体の性能が向上します。真空浸透プロセスでは、液体銅を浸透させることで導電パスの完全性がさらに向上し、低タングステン電極は高効率伝導に優れています。

低タングステン含有量の電極は、主に抵抗溶接におけるスポット溶接やシーム溶接など、高い電気伝導性と熱伝導性が必要な場面で使用されます。銅の高性能は抵抗熱の影響を低減し、接

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合部の品質を向上させます。放電加工では、低タングステン含有量の電極は低硬度材料の粗加工に適しています。銅の延性は急速な熱分散をサポートし、局所的な過熱を軽減します。マイクロエレクトロニクスパッケージングでは、熱膨張係数が基板と一致し、銅の高い熱伝導性がチップの放熱をサポートし、寿命を延ばします。ただし、低タングステン含有量電極の耐高温性と耐アーク侵食性は弱く、タングステン比が低いため、極限条件下での安定性が制限されます。放熱や低エネルギー放電と組み合わせて使用する必要があります。

製造工程では、銅粉の純度を 99.9%以上に維持し、粒子径を 5~15 ミクロンに抑える必要があります。タングステン粉の粒子径は、充填を最適化するために若干大きめに設定されています。金メッキなどの表面処理により、耐腐食性が向上し、湿気の多い環境でも長寿命化が期待できます。

4.2 タングステン銅電極の応用シナリオ指向の分類

タングステン銅電極の応用シナリオ指向分類は、特定の使用環境と機能要件に基づいて電極を分類する方法です。この分類方法は、さまざまな産業分野における電極のターゲット設計と性能最適化を重視しています。タングステン銅電極は、粉末冶金法または真空浸透法によって製造されます。タングステンの高い融点と硬度は、銅の高い電気伝導性と熱伝導性と組み合わせられています。応用シナリオに応じて比率と微細構造を調整することで、低多孔性と高均一性を備えた材料を形成します。分類の基準には、放電加工、高電圧電気機器、溶接分野が含まれます。各タイプの電極は、耐アーク侵食性、電気伝導効率、熱管理能力など、特定のプロセスと性能要件に合わせて最適化されています。

4.2.1 EDM 用電極

EDM（放電加工）用に特別に設計された電極はタングステン銅電極で、アーク侵食耐性、機械的強度、および加工精度のために特別に設計されています。これらの電極は通常、高タングステン含有量（WCu 80/20 または WCu 90/10 など）を使用します。タングステン粉末は、粉末冶金プロセスで少量の銅粉末と混合されます。焼結後、銅は液相中の細孔を満たし、高密度のタングステン骨格構造を形成します。低多孔性により、高温衝撃に対する耐性が向上します。真空含浸プロセスにより、銅の浸透がさらに最適化され、界面結合が改善され、高エネルギー放電中の電極の安定性が確保されます。マイクロ構造の微粒子は、熱間静水圧プレス（HIP）によって最適化され、圧縮強度と耐摩耗性が向上します。

EDM 用電極の主な利点は、アーク侵食に対する耐性です。タングstenは融点（3422℃）と硬度（約 3430HV）が高く、数千℃の放電温度にも耐えるため、表面摩耗を低減し、炭化タングstenやチタン合金などの高硬度材料の加工に適しています。表面粗さはミクロンレベルに制御されており、加工精度が保証されています。微細な結晶構造は複雑な形状の形成をサポートします。実際の用途では、電極は高エネルギー放電にも耐え、耐用年数を延ばし、交換頻度を低減します。

しかし、銅含有量が低いと電気伝導性と熱伝導性が低下するため、局所的な過熱を防ぐための

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

放熱設計が必要になります。研磨などの表面処理により表面品質が向上し、精密金型製造に適しています。

4.2.2 高電圧電気機器用電極

タングステン銅電極は、高電圧スイッチおよび電気接点用に特別に設計されており、耐高温性、耐アーク浸食性、および導電安定性を重視しています。これらの電極は通常、中～高タングステン含有量比（WCu 70/30 または WCu 85/15 など）を使用し、粉末冶金プロセスで製造されます。タングステン粉末を銅粉末と混合して焼結すると、銅が液相で細孔を満たし、均一な相ネットワークを形成します。低多孔性により、材料のアーク耐性が向上します。真空含浸プロセスにより銅の浸透が最適化され、熱間等方圧加圧（HIP）により界面結合がさらに改善され、高電圧切断時の電極の信頼性が維持されます。微細構造の微粒子は高い圧縮強度をサポートし、頻繁な機械的動作に適しています。

高電圧電気機器用電極の特性は、高電圧スイッチにおいて優れた性能を発揮します。タングステンは融点（3422℃）が高いため、アーク熱から保護し、耐アーク侵食性により表面侵食を軽減して耐用年数を延ばします。銅は高い導電性により効率的な電流伝送を実現し、大電流の遮断状況に適しています。銅の熱膨張係数は基板と一致するため、熱サイクルストレスを軽減します。最適化された微細構造は抵抗値の変動を低減し、安定した電気性能を実現します。実際の用途では、電極は頻繁なスイッチング動作にも耐え、故障率を低減するため、電力機器や産業用制御システムに広く使用されています。

製造工程では、均一な相分布を確保するために、タングステン粉末と銅粉末の粒度比を 1:2～1:3 に制御する必要があります。ニッケルメッキなどの表面処理により、耐酸化性が向上し、湿気の多い環境や工業環境への適応性も向上します。将来的には、組成比を調整したり、モリブデンなどの界面相を導入したりすることで、耐アーク性と導電性をさらに向上させ、スマートグリッド機器などの高電圧や複雑な電気要件にも対応できるようになります。

4.2.3 溶接現場における電極

抵抗溶接用に特別に設計されたタングステン銅電極は、導電性、熱伝導性、および非固着性を重視しています。これらの電極は通常、低～中程度のタングステン含有量（WCu 60/40 または WCu 70/30 など）を使用します。粉末冶金プロセスにより、タングステン粉末を高濃度の銅粉末と混合します。焼結後、銅は連続ネットワークを形成します。低多孔性は熱間静水圧プレスによって最適化され、熱管理と電気性能を向上させます。真空含浸プロセスにより、液体銅の浸透による導電パスの完全性が向上します。微細構造の微粒子は圧縮強度と靱性をサポートし、高圧溶接環境に適しています。

溶接における電極の主な利点は、その電気伝導性と熱伝導性にあります。銅は高い電気伝導性（ 5.8×10^7 S/m）と熱伝導性（約 400 W/m·K）を有し、抵抗加熱の影響を低減し、接合品質を向上させます。また、熱を均一に分散させることで熱影響部（HAZ）を減少させ、スポット溶接やシーム溶接に適しています。タングステンは耐熱性（3422℃）に優れ、構造的な強度を

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

確保します。さらに、表面处理（研磨など）を施すことで、固着防止特性がさらに最適化され、スラグの付着を低減し、電極寿命を延ばします。実用上、電極は中程度の電流に耐え、効率的な溶接をサポートし、自動車製造や電子機器組立で広く使用されています。

製造工程において、銅粉末の純度は 99.9%以上、粒子径は 5~15 ミクロンである必要があります。タングステン粉末の粒子は、充填を最適化するために若干大きめにする必要があります。高温などの高い動作温度では銅相が軟化するため、一体型の放熱設計が必要になります。将来的には、ナノ銅粉末や多相設計の導入により、導電性と耐凝着性がさらに向上し、軽量構造部品など、高効率または複雑な溶接が求められる用途にも対応できるようになります。

4.2.4 航空宇宙および軍事用途向け特殊電極

タングステン銅電極は、航空宇宙および軍事分野向けに特別に設計されており、耐高温性、機械的強度、および過酷な環境における信頼性を重視しています。これらの電極は通常、高タングステン含有量を利用し、粉末冶金または真空浸透によって製造されます。タングステン粉末を少量の銅粉末と混合し、焼結します。銅は液体の状態で細孔を満たし、堅牢なタングステンの骨格構造を形成します。製造プロセスでは、熱間静水圧プレス（HIP）によって微細構造が最適化され、低多孔性と均一な相分布が得られ、高応力または高温条件下での電極の安定性が確保されます。銅を追加することで、電気伝導性と熱管理が最適化され、複雑な動作環境への適応が可能になります。

航空宇宙産業および軍事産業における特殊電極の主な用途には、宇宙船の熱保護システムや軍事機器の電気接点などがあります。タングステンは高い融点を有し、優れた耐熱性を備えているため、高エネルギー衝撃や極端な熱負荷に耐えることができます。電極の機械的強度は高精度加工と長期使用をサポートし、微細組織の均一性は応力集中を低減し、耐疲労性を高めます。軍事分野では、高性能レーダーや兵器システムの主要部品に電極が使用されることが多く、激しい振動や腐食環境への耐性が求められます。めっきなどの表面处理は、耐候性をさらに高めます。製造工程では、原料の純度と粒径管理に重点を置き、安定した性能を確保します。また、使用シナリオでは、電極に優れた耐アーク侵食性と熱安定性が求められます。銅の熱伝導性は、熱を素早く分散させ、局所的な過熱のリスクを軽減するのに役立ちます。

4.3 形態学および構造的特性によるタングステン銅電極の分類

マクロ形態といった多様な側面を網羅し、様々な用途シナリオへの適応性を実現する核心的な基盤です。これらの特性は、電極の設置適応性、性能効率、加工適合性に直接影響を及ぼします。そのため、形態学および構造的特性による分類は、産業用途における最も直感的な選択方法の一つです。

4.3.1 ブロック電極

ブロック電極は、ブロック状に設計されたタングステン銅電極で、大面積の接触や高強度の支持を必要とする用途に適しています。これらの電極は、粉末冶金プロセスを用いて製造されま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。このプロセスでは、タングステンと銅の粉末を特定の比率で混合し、プレス成形します。焼結過程において、銅は液相中の細孔を埋め、緻密な微細構造を形成します。熱間静水圧プレスにより、ブロック電極の均一性と低多孔性をさらに最適化し、機械的負荷下における材料の安定性を確保します。ブロック設計は機械加工を容易にし、必要に応じて様々なサイズに切断または成形できるため、多様な用途要件に適応できます。

ブロック電極の特性は、放電加工において卓越しており、大型ワークや複雑な形状の加工に適しており、広い接触面積が安定した放電状態を提供します。微細構造における均一な相分布はアーク浸食に対する耐性を高め、タングステンの硬度は長期使用をサポートし、銅の導電性は電流伝送を最適化します。製造工程では、原材料の混合均一性と焼結パラメータの制御がブロック電極の性能に直接影響し、研磨などの表面処理により加工精度を向上させることができます。溶接分野では、ブロック電極は高圧や熱サイクルに耐える金型や支持体として使用できます。将来的には、プレス工程の調整や多相設計の導入により、ブロック電極の機械的特性と適用範囲をさらに向上させることができます。

4.3.2 棒電極

ロッド電極は、棒状に設計されたタングステン銅電極で、精密な位置決めや繊細な加工が求められる用途に適しています。これらの電極は、粉末冶金法または真空浸透法を用いて製造されます。タングステンと銅の粉末を混合し、プレス加工してロッド状に成形します。焼結時に銅が気孔を埋め、細く緻密な構造を形成します。熱間静水圧プレス法によってロッド電極の微細構造が最適化され、気孔率が低く均一な相分布が得られるため、高精度加工時の材料安定性が確保されます。ロッド設計により取り付けとガイドが容易になり、深穴加工や狭い空間での作業に特に適しています。

放電加工（EDM）に優れ、微細加工やマイクロ部品の製造に適しています。細長い形状が高精度放電加工を可能にし、タングステンの耐摩耗性により電極の摩耗を軽減します。微細構造中の銅相は導電性と熱伝導性を提供し、安定した電流伝達と熱管理をサポートします。マイクロエレクトロニクス実装においては、ロッド電極の形状が基板とのアライメントを容易にし、熱膨張を吸収し、応力集中を軽減します。製造工程では、ロッド電極の長さや直径の比率を制御し、機械的強度と加工性を確保する必要があります。研磨などの表面処理により、表面品質を向上させることができます。

4.3.3 シート電極

シート状に設計されたタングステン銅電極で、大面積の接触や均一な放電を必要とする用途に適しています。これらの電極は、粉末冶金プロセスを使用して製造されます。このプロセスでは、タングステンと銅の粉末を特定の比率で混合し、薄いシートにプレスします。焼結中に、銅が液体の状態で細孔を満たし、高密度の微細構造を形成します。熱間静水圧プレスにより、シート電極の均一性と低多孔性がさらに最適化され、機械的負荷や熱サイクル下での材料の安定性が確保されます。シート設計により表面積が広く、ワークピースまたは基板との密着性が向上し、均一な熱分布や高電流伝送が求められる加工要件に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

シート電極は放電加工において優れた性能を発揮し、平らなワークピースの加工や大面積放電が必要な加工に適しています。薄いシート構造は効率的なアーク分布をサポートし、タングステンの耐摩耗性と耐アーク侵食性により表面損失が低減し、耐用年数が延長されます。微細構造中の銅相は導電性と熱伝導性を提供し、安定した電流伝送と熱分散を確保し、局所的な過熱のリスクを軽減します。溶接分野では、シート電極は電極板やヒートシンクとして使用でき、高圧と熱サイクルに耐え、接合品質を向上させます。準備工程では、プレス工程で厚さの均一性を制御する必要があります。原材料の混合均一性と焼結パラメータは、シート電極の性能に直接影響します。研磨などの表面処理により、接触精度を向上させることができます。マイクロエレクトロニクスのパッケージングや熱管理にも応用できます。シート電極は薄型設計のため、チップや基板への接合が容易になり、熱膨張率の整合により応力集中が低減し、信頼性が向上します。シート電極は柔軟性が高いため、複雑な形状にも適応できますが、製造工程ではシートの変形を防ぐための注意が必要です。

4.3.4 特殊形状電極

特殊形状電極は、タングステン銅電極の中で最も複雑な形状です。その形状は、特定のアプリケーションシナリオの機能要件に応じて完全にカスタマイズされ、ブロックやロッドなどの通常の形状の制限を打ち破り、特殊形状面、段状形状、多孔質形状、中空グリッド、複合表面など、さまざまな非標準構造を網羅しています。このタイプの電極の設計は、最終製品の動作パラメータ、組み立てスペース、および性能目標と深く統合する必要があります。最初のモデリングから最終的な形成まで、複数回のシミュレーション検証が必要であり、非常に高い加工精度が求められます。わずかな偏差でも、下流工程の安定性や最終製品の性能指標に直接影響を与える可能性があります。

形態設計の観点から見ると、特殊形状電極の核心は「機能指向」にあります。例えば、自動車カバー金型の複雑なキャビティ加工では、特殊形状のタングステン銅電極は、フィレット、深溝、傾斜といった細部までキャビティの曲面輪郭を完全に再現し、さらにはワーク成形時の抜き勾配までも再現する必要があります。この「鏡像複製」形態設計により、放電加工時の放電ギャップの均一性が確保され、最終的には自動車カバーの表面仕上げと組立精度が向上します。航空機エンジン燃焼室の火炎管の加工では、特殊形状電極は密集した微細溝を有する曲面構造として設計されることが多く、これらの微細溝は火炎管の冷却チャンネルと 1 対 1 で対応しています。放電加工によって形成される冷却チャンネルは、厳格な寸法精度を満たす必要があります。そうでなければ、局所的な冷却の不均一性が生じ、エンジン運転中に熱疲労破壊を引き起こします。

段付き特殊形状電極は、マルチステーション加工の現場で広く使用されており、異なる段差形状は、異なる加工深さや精度要件に対応しています。例えば、携帯電話のミドルフレームの一体加工では、段付き電極の第 1 段で粗加工を行い、大量の材料を除去し、第 2 段で直径を縮小することで微細トリミングを行い、第 3 段で端部のアーク遷移により丸み付けを完了します。この「ワンタッチクランプ、マルチステップ成形」設計により、工具交換回数を削減し、加工効率を向上させ、複数回のクランプによる位置ずれを回避できます。段差の高さ差と直径差は、材料の硬度と加工許容値に基づいて正確に計算する必要があります。特定の段差のサイズに

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

偏差があると、後続の加工サイズの累積誤差が規格を超える可能性があります。

多孔質成形電極の設計は、効率的な放熱と軽量化の両立に重点を置いています。新エネルギー自動車モーターのステーター製造において、電極にはハニカム状の貫通孔が求められます。これらの貫通孔は電極の軽量化だけでなく、内部の気流によって放電による熱を速やかに放散させ、加工精度に影響を与える熱変形を防止します。原子力発電設備の熱交換器部品の加工においては、多孔質成形電極の貫通孔が熱交換器の管束孔と完全に一致する必要があります。一致しない場合、その後の管束組立時に隙間が生じ、伝熱効率に影響を及ぼします。

特殊形状電極の成形工程は、形状精度において決定的な役割を果たします。ワイヤーカット工程は複雑な輪郭の2次元切断が可能で、平坦な特殊形状構造に適しています。一方、放電加工工程は3次元曲面加工が可能で、電極とワークピースの同期動作により複雑な形状を再現し、表面仕上げも保証します。内部チャンネルを持つ多孔質特殊形状電極の場合、深穴加工やレーザー加工などの工程を組み合わせることで、穴の垂直性と貫通性を確保する必要があります。加工工程では、精密測定装置を用いて形状誤差をリアルタイムで検出する必要があります。特定の形状寸法が許容範囲外であることが確認された場合、加工パラメータを直ちに調整する必要があります。さもなければ、電極全体が廃棄されてしまいます。このような極限の精度追求により、特殊形状電極の製造コストは通常形状電極よりもはるかに高くなりますが、ハイエンド製造分野において不可欠なキーコンポーネントとなっています。

4.4 タングステン銅電極の性能指標に基づく分類

タングステン銅電極の性能重視の分類では、導電性、耐熱性、機械的強度といった主要指標の最適化を重視し、特定の性能要件に基づいて電極を分類します。この分類方法では、タングステンと銅の比率と製造プロセスを調整することで、異なる性能要件に対応する専用電極を設計します。タングステン銅電極の微細構造は、粉末冶金法または真空浸透法によって最適化され、低多孔性と均一な相分布を実現します。さらに、熱間静水圧プレスにより、性能の一貫性が向上します。分類基準には、高導電性、耐熱性、高機械的強度などがあり、それぞれの電極は特定の用途で優れた性能を発揮します。

4.4.1 高導電性電極

高導電性電極は、最適な導電性と抵抗率を重視し、効率的な電流伝送を実現するように設計されたタングステン銅電極です。これらの電極は通常、低タングステン含有量です。粉末冶金プロセスにより、タングステン粉末を高濃度の銅粉末と混合し、焼結により銅が連続した導電ネットワークを形成します。微細構造は、熱間静水圧プレス（HIP）によって最適化され、低い多孔性と均一な相分布を実現します。銅の高い導電性（純銅レベルに近い）により、効率的な電流伝送が保証されます。真空含浸プロセスにより、液体銅の含浸を通じて導電経路の完全性がさらに向上し、高導電性電極は電気用途において優れた性能を発揮します。高導電性電極の主な用途は、抵抗溶接とマイクロエレクトロニクス実装です。銅の高い導電性は、安定した電流伝送をサポートし、抵抗加熱の影響を軽減し、接合品質と回路接続効率を向上させます。抵抗溶接では、電極は中程度の電流に耐え、熱を均等に分散し、熱影響部を縮小するため、ス

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ポット溶接やシーム溶接に適しています。マイクロエレクトロニクス実装では、高導電性電極の低い抵抗率が効率的な信号伝送をサポートすると同時に、銅の熱伝導性はチップの放熱を助け、信頼性を高めます。微細構造における均一な銅相ネットワークは、電子散乱を低減します。安定した性能を確保するには、製造工程における銅粉末の純度を高く保ち、粒子サイズを一定の範囲内に制御する必要があります。

高温などの動作条件は銅相を軟化させ、導電性の安定性に影響を与える可能性があります。性能を維持するには、放熱設計や表面処理（金メッキなど）が必要です。表面処理は耐腐食性を向上させ、湿気の多い環境における耐用年数を延ばす効果もあります。高導電性電極は、高周波または大電流の条件下で優れた性能を発揮し、電子機器や自動車製造に広く使用されています。

4.4.2 耐アーク侵食性電極

高エネルギーアーク環境向けに特別に設計されたタングステン銅電極は、耐アーク侵食性と表面安定性を重視しています。これらの電極は、通常、高タングステン含有量です。粉末冶金プロセスにより、タングステン粉末を少量の銅粉末と混合します。焼結後、銅は液相中の細孔を満たし、強固なタングステン骨格構造を形成します。この微細構造は、熱間静水圧加圧（HIP）によって最適化され、低い多孔性と均一な相分布を実現します。タングステンは高い融点と硬度を有し、優れたアーク耐性を発揮します。真空含浸プロセスにより、液相銅を含浸させることで界面結合がさらに強化され、繰り返し放電時の電極の耐久性を確保します。

耐アーク侵食性電極の主な用途は、放電加工や高電圧スイッチなどです。タングステンは融点が高いため、数千度の高温アークにも耐え、表面の溶融や蒸発を抑え、寿命を延ばします。放電加工では、高硬度材料の加工、侵食損失の低減、加工精度の維持が可能です。高電圧スイッチでは、電極の耐アーク性が頻繁な電流遮断をサポートし、表面損傷を軽減します。微細組織における均一なタングステン相ネットワークは熱応力の集中を軽減し、研磨やメッキなどの表面処理により耐酸化性をさらに高め、産業環境に適応することができます。製造工程では、タングステン粉末の純度を高く保ち、粒子径を一定範囲内に制御することで、性能の一貫性を確保する必要があります。また、高エネルギー放電を必要とする特殊な用途にも適用されます。銅の熱伝導性は熱分散を助け、局所的な過熱のリスクを軽減します。

4.4.3 高強度電極

タングステン銅電極は、圧縮強度と変形抵抗を重視し、高機械的応力環境向けに特別に設計されています。これらの電極は通常、中～高タングステン含有量（WCu 85/15 または WCu 70/30 など）を使用し、粉末冶金プロセスによって製造されます。タングステンと銅の粉末を混合・圧縮成形し、焼結中に銅が気孔を埋めることで、緻密な微細構造を形成します。熱間静水圧プレスにより界面結合が最適化され、気孔率が低く均一な相分布を持つ微細構造が得られます。タングステン骨格は高い圧縮抵抗を提供します。真空含浸プロセスにより液体銅を含浸させることで、材料全体の強度がさらに向上し、高負荷運転に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高強度電極の主な用途には、放電加工（EDM）や高圧溶接におけるバルク材料の除去などがあります。タングステンは高い硬度を有し、機械的衝撃に対する耐性を備えています。一方、銅は延性を有し、応力分散を最適化し、亀裂の発生を抑制します。マイクロエレクトロニクス実装においては、高強度電極は熱サイクルや機械的クランプによる応力に耐え、信頼性を高めます。微細構造における微粒子は耐疲労性を向上させます。均一な相分布を確保するため、製造工程ではタングステン粉末と銅粉末の粒度比を一致させる必要があります。研磨などの表面処理は、耐摩耗性を高め、耐用年数を延ばすのに役立ちます。高温などの動作条件は銅相の安定性に影響を与える可能性があり、性能を維持するためには放熱設計が必要となります。高強度電極は高応力環境下で優れた性能を発揮し、航空宇宙部品や工業用金型に広く使用されています。

4.4.4 高耐熱電極

タングステン銅電極は、高温環境向けに特別に設計されており、高温安定性と熱管理能力を重視しています。これらの電極は通常、高タングステン含有量（WCu 90/10 または WCu 85/15 など）を使用し、粉末冶金プロセスで製造されます。タングステン粉末を少量の銅粉末と混合します。焼結後、銅は液相中の細孔を満たし、強固なタングステン骨格構造を形成します。微細構造は、熱間静水圧プレス（HIP）によって最適化され、低い多孔性と均一な相分布を実現します。タングステンは融点が高いため、優れた熱安定性を備えています。液体銅を浸透させる真空浸透プロセスにより、熱伝導経路の完全性が向上し、電極が高温でも性能を維持します。

高耐熱電極の主な用途には、高温センサーや航空宇宙の熱保護システムなどがあります。タングステンの高い融点は数千度の高温環境に対応し、銅の熱伝導性は熱分散を助け、局所的な過熱のリスクを軽減します。マイクロエレクトロニクスパッケージングでは、電極の熱安定性が高温動作時のチップの信頼性を確保し、熱膨張のマッチングが応力集中を軽減します。微細構造における均一なタングステン相ネットワークは熱疲労を軽減し、ニッケルメッキなどの表面処理は耐酸化性を向上させ、湿気の多い環境や工業環境にも適応できます。製造工程では、タングステン粉末の純度を高く保ち、粒子サイズを一定の範囲内に制御することで、一貫した熱性能を確保する必要があります。使用シナリオには、高い熱負荷を必要とする特殊な用途も含まれます。銅相は高温で軟化する可能性がありますが、タングステン骨格がサポートを提供します。

4.5 タングステン銅電極の微細構造による分類

微細構造は製造プロセスによって決定され、タングステン-銅二相の分布状態と結合様式を反映します。主に均一分散型、骨格充填型、傾斜分布型に分類されます。構造の違いは、電極の電気伝導性、熱伝導性、および機械的特性に大きな影響を与えます。

4.5.1 均一分散した電極

均一分散電極は、タングステン銅電極の中で最も微細構造的にバランスの取れたタイプです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

その核心的な特徴は、タングステン粒子と銅相の極めて均一な分布にあります。この構造では、微細なタングステン粒子が銅マトリックスに均一に、かつ離散的に埋め込まれています。タングステン粒子の局所的な凝集や銅相の偏析・凝集は発生していません。粉末冶金プロセスにおける高温焼結によって、2つの相の界面は強固に結合し、「あなたが私の中に、私があなたの中に」というミクロ形態を呈しています。この構造は、単一金属の特性の限界を打ち破り、タングステンの耐高温性と銅の導電性・熱伝導性を相乗的に発揮させ、成分の不均一な分布による性能低下を回避します。

この均一な分散構造を実現する鍵は、製造プロセスの精密な制御にあります。まず、タングステン粉末と銅粉末をボールミル混合プロセスで深く処理し、2つの粉末が完全に接触して機械力の作用下で微細化され、均一な組成の混合粉末を形成します。次に、混合粉末を均一なプレスプロセスでブランクに成形し、圧力がブランクのあらゆる部分に均等に伝達されるようにすることで、局所的な密度差を回避します。最後に、焼結段階では、温度と保持時間を精密に制御することで、界面におけるタングステンと銅の拡散と融合を促進し、安定した結合状態を形成します。プロセス全体を通して、不純物の混入やプロセスパラメータの変動を厳格に回避する必要があります。さもなければ、均一性が損なわれる可能性があります。例えば、ボールミル混合時間が不十分だと粉末の混合が不均一になり、焼結温度が低すぎると界面の結合強度が低下し、微細構造に欠陥が生じます。

均一な分散構造によって得られる電極の核心的な利点は、性能の一貫性です。マクロレベルでは、電極の導電率、熱伝導率、硬度などの指標は、異なる領域で安定しており、位置の変化によって大きく変動することはありません。この特性は、精密放電加工分野など、性能の均一性が厳しく求められる場面において卓越した性能を発揮します。電極とワークが高周波放電加工を行う際、均一な微細構造により、電流密度が電極表面に均一に分散され、局所的な抵抗差による放電エネルギーの集中を回避できるため、ワーク表面の凹凸や焼け跡が低減し、加工面の仕上がりの一貫性が確保されます。長期間の連続加工においても、この均一性により放電パラメータの安定性が維持され、電極性能の変動によるプロセス偏差を低減できます。

高周波溶接用途において、均一に分散した電極の利点は極めて重要です。溶接プロセス中、電極は高周波電流を溶接部に安定的に伝送し、抵抗熱によって材料を溶融させる必要があります。電極の微細構造が不均一な場合、局所的に高抵抗領域が過剰な熱を発生し、溶接部の過熱や固着を引き起こす可能性があります。一方、低抵抗領域は十分な熱伝達が得られず、冷間圧接が発生する可能性があります。均一に分散した構造は、伝送プロセス中に電流が連続した均一な銅相導電ネットワークを介して均一に分散されることを保証します。これにより、溶接部の熱が安定し、溶融コアが完全に形成されると同時に過熱による損傷を回避できます。同時に、均一に分散したタングステン粒子は電極に安定した機械的支持を提供し、繰り返しの加圧接触による局所的な変形を防ぎ、電極の寿命を延ばします。この構造の熱管理上の利点は無視できません。高出力電子機器では、タングステン銅電極はヒートシンクとして機能することがよくあります。均一な熱伝導ネットワークは、ホットスポットから電極全体に熱を迅速かつ均一に拡散させ、ヒートシンクを通して放散します。これにより、局所的な熱蓄積とデバイス性能

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

の低下を防ぎます。また、温度変化が激しい環境下でも、均一な微細構造により熱膨張差による内部応力が低減され、電極割れのリスクを低減します。

4.5.2 スケルトン充填電極

スケルトン充填電極は、独自の構造設計により相乗効果を発揮するタングステン-銅複合材料です。その核となる特徴は、「タングステンスケルトン-銅充填」という相互浸透ネットワーク構造の形成です。この構造において、タングステンは、建物の鉄骨のように連続したスケルトン状の電極支持体を形成し、構造全体に強固な構造基盤を提供します。一方、銅相はタングステンスケルトンの細孔を完全に充填し、連続した導電経路を形成します。2つのコンポーネントは、それぞれの性能上の利点を維持するだけでなく、構造的な補完性を通じて機能的な相乗効果を実現します。この設計は、単一の金属材料の性能限界を打ち破り、高強度、耐熱性、高い電気伝導性および熱伝導性という複合特性を同時に備えた電極を実現します。

骨格充填電極を製造する鍵は、真空浸透プロセスの精密な制御にあり、このプロセスは2つの中核段階に分かれています。1つ目はタングステン骨格の予備製造です。タングステン粉末を特定の配合に従って混合した後、金型で成形し、高温で焼結して一定の多孔度を持つ多孔質骨格を形成します。焼結プロセス中に、タングステン粒子は拡散接合によってしっかりと接続され、連続した3次元ネットワークを構築します。また、骨格内の気孔は、その後の銅相の充填のためのスペースを確保します。この時点で、タングステン骨格は既に高い機械的強度と耐高温性を備えていますが、導電性が低いため、後続のステップで補う必要があります。

第二段階は銅相の浸透です。あらかじめ製造されたタングステン骨格を真空環境に置き、その周りに銅材料を配置して、銅の融点以上に加熱します。高温と真空状態の複合作用により、固体の銅が液体に変わり、毛細管現象と重力浸透の助けを借りて、タングステン骨格の細孔に沿って均一に充填され、すべての隙間が満たされます。真空環境役割は非常に重要です。空気が混入して気泡が発生するのを防ぎ、銅相が細孔内に連続した途切れのない導電ネットワークを形成することを保証します。冷却後、タングステン骨格と銅相は緊密に統合された相互浸透構造を形成します。タングステン骨格は変形防止能力と高温支持を提供し、銅相は電流伝送と放熱の役割を担います。この2つは互いに補完し合い、電極に優れた総合性能をもたらします。

スケルトン充填電極の性能上の利点は、特に高温・高圧用途において顕著です。タングステンスケルトンの連続構造により、純銅をはるかに凌駕する機械的強度と耐高温性が得られます。極限の温度環境下でも構造安定性を維持し、軟化や変形を起こしにくい特性を有しています。銅相の充填により優れた電気伝導性と熱伝導性が得られ、高温部から速やかに放熱し、局所的な過熱による性能低下を防ぎます。この特性により、航空宇宙、原子力などの分野における過酷な動作条件に最適な選択肢となります。

ロケットエンジンのノズル電極用途において、スケルトン充填電極は独自の利点を発揮します。ロケット推進システムの主要部品であるノズルは、作動中に高温ガスによる継続的な浸食

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に耐える必要があり、同時に電極による点火・火災制御も必要とします。この点、非常に高い融点と構造強度を持つタングステンスケルトンは、高温ガスによる浸食に耐え、高温による電極の溶融や変形を防ぎます。スケルトン内に充填された銅相は、ガス浸食によって発生する大量の熱を連続経路で急速に放散し、局所的な過熱による構造破壊を回避します。この「タングステンの耐アブレーション性と銅の熱伝導性」という相乗効果により、ノズル電極は過酷な環境下でも長期にわたって安定した動作を実現します。

スケルトン充填電極は、原子力機器の高温電極部品においても重要な役割を果たしています。原子炉の運転中は、内部環境が非常に高温になるだけでなく、高圧と放射線も伴うため、材料の安定性に対する要求は極めて高くなります。このような状況において、タングステンスケルトンが主要構造体として機能し、長期の高温下でもクリープや腐食に耐え、電極の寸法安定性を維持します。一方、銅相は高電流下でも電極の導電性を確保するとともに、原子炉内の熱を適時に冷却システムに伝導し、熱蓄積による安全リスクを防止します。さらに、タングステンと銅はどちらも優れた放射線安定性を備えているため、この構造の電極は放射線環境下でも安定した性能を維持し、材料の経年劣化による機能劣化を回避します。

工業用電気アーク炉における電極の応用においても、スケルトン充填電極の利点は非常に明白である。電気アーク炉の作動中、電極と装填物との間に発生する高温アークは非常に高温であり、電極は頻繁な機械的衝撃と熱衝撃に耐える必要がある。この時、タングステンスケルトンの高強度特性は、衝撃下での電極の破損を防ぎ、その高温耐性はアークの直接燃焼に耐えることができる。銅相の高い伝導性は、アークの安定した発生を保証し、アーク熱を急速に放散させ、過熱による電極端の損失を回避する。他のタイプの電極と比較して、スケルトン充填電極は、このような高周波・高強度の作業条件下で、より長い耐用年数とより安定した作業性能を示す。

つまり、スケルトン充填電極は、「タングステンスケルトン支持-銅相機能」という構造設計により、機械的特性と機能的特性の完璧なバランスを実現しています。特に高温高圧といった極限環境下における性能が優れており、ハイエンド産業分野に欠かせない基幹材料となっています。

4.5.3 勾配分布電極

勾配分布電極は、タングステン銅複合材料において非常にターゲットを絞った構造設計です。その核となる特徴は、電極断面全体にわたってタングステンと銅の比率が連続的に変化する分布です。電極の端から端にかけて、タングステンの含有量は徐々に増加し、銅の含有量は減少します（あるいはその逆）。これにより、性能が滑らかに変化する微細構造が実現します。この設計は、従来の複合材料における成分の均一な分布とは一線を画しています。組成勾配を慎重に制御することで、電極の各領域でタングステンまたは銅の性能上の利点を優先し、遷移領域の緩衝効果により、急激な性能変化による界面応力の問題を防止します。性能面では、勾配分布電極は顕著な「局所機能化」特性を示します。高タングステン含有量領域は、タングス

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

テンの高融点と高強度により、優れた耐高温性と耐摩耗性を有し、極高温環境下でも構造安定性を維持します。一方、高銅含有量領域は、銅の高い電気伝導性と熱伝導性を活かし、効率的な電流伝送と放熱を実現します。さらに重要なのは、中間遷移領域の組成が緩やかに変化することで、接合部において2つの特性が滑らかにつながることです。タングステン含有量の急激な増加による電気伝導性の急激な低下や、銅含有量の急激な増加による耐高温性の急激な低下は発生しません。この緩やかな性能変化は、異種材料接合時によく見られる応力集中問題を効果的に解決し、複雑な動作環境下における電極の信頼性を大幅に向上させます。

傾斜分布電極の製造プロセスは技術的に極めて困難であり、組成分布の精密な制御が求められます。一般的な製造方法には、積層粉末冶金法と傾斜焼結法があります。積層粉末冶金法は、異なるタングステン-銅比の混合粉末を設計された傾斜順序に従って層状に積層し、一度の加圧焼結で組成の連続的な変化を実現します。遷移領域の平滑性を確保するためには、各粉末層の組成差を精密に制御する必要があります。傾斜焼結法は、焼結プロセス中の温度場または雰囲気場を制御することで、タングステンまたは銅が材料内部で方向性を持って拡散するように誘導し、自然な組成勾配を形成します。どちらの方法を用いる場合でも、高度なシミュレーション技術を用いて組成分布曲線を事前に設計し、プロセスパラメータを精密に制御することで、実際の分布が設計と一致するようにする必要があります。わずかな偏差でも、遷移領域における性能の変動につながる可能性があります。

航空宇宙産業における熱構造部品。例えば、宇宙船が宇宙から大気圏に再突入すると、再突入カプセルの表面は大気と激しい摩擦を起こし、非常に高い温度が発生します。そのため、カプセルの表面材料には優れた耐高温性と耐酸化性が求められます。一方、カプセル内の精密機器は温度に非常に敏感であり、適切な動作温度を維持するために効率的な放熱システムが必要です。このような状況において、傾斜分布電極はカプセル表面と内部の放熱システムを接続する重要な部品として機能します。カプセル側の外端はタングステン含有量を高く設計することで、再突入時の激しい熱に耐える耐高温性を実現し、表面の溶融や酸化を防ぎます。カプセル側の内端は銅含有量を高く設計することで、優れた熱伝導性を活かし、表面で吸収された熱を内部のヒートシンクに素早く伝達し、内部の機器への放熱を防ぎます。遷移ゾーンは、パフォーマンスのスムーズな遷移を提供し、内部と外部の温度差や材料特性の差によって生じる大きな応力を分散させ、繰り返される熱サイクル中に電極のひび割れや剥離を防ぎます。

傾斜分布電極は、高速航空機エンジンの燃焼室部品においても重要な役割を果たしています。燃焼室内部は運転中に高温高压にさらされます。燃料の燃焼によって発生する高温気流は、燃焼室壁に強い洗浄作用をもたらすため、高温にさらされる側には極めて高い耐熱性と耐洗浄性が求められます。一方、燃焼室の外部は冷却システムに接続し、速やかに放熱することで全体の過熱を防ぐ必要があり、外装材には優れた熱伝導性が求められます。傾斜分布電極は、タングステンと銅の比率を傾斜させる合理的な設計により、燃焼室内部では高いタングステン特性を示して高温洗浄に耐え、外側では高い銅特性を示して放熱効率を確保します。中間遷移領域は、内部と外部の間の性能の衝突と応力の矛盾を解決し、長期間にわたる高頻度の動作中に燃焼室が構造的完全性と安定した性能を維持することを保証します。

さらに、傾斜分布電極は、高出力半導体デバイスの放熱電極としても独自の利点を発揮します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

半導体デバイスの動作時には、チップのコア領域で大量の熱が発生するため、電極には効率的な熱伝導性を持たせて放熱する必要があります。一方、外部回路と接続される電極部分には、信号伝送損失を低減するために優れた導電性が求められます。チップ接触端から回路接続端にかけて銅含有量を段階的に分布させる設計により、電極は効率的な放熱と低抵抗の導電性という 2 つの要件を同時に満たすことができ、単一材料の性能限界による放熱不足や導電性の低下といった問題を回避できます。

4.6 タングステン銅電極のマクロ的物理的形態による分類

マクロ的な物理的形態は主に電極の表面状態、密度、複合モードに焦点を当てており、さまざまな機能要件を満たすために緻密型、多孔質型、複合コーティング型に分類されます。

4.6.1 高密度電極

高密度電極は、タングステン銅電極の中で最も広く使用されている基本カテゴリーです。その主な特徴は、内部の気孔率が極めて低いことです。タングステン粒子と銅相は密接に結合し、連続した高密度の微細構造を形成し、滑らかで平坦な表面を実現します。この構造は、電極に優れた総合的な性能を与えるだけでなく、様々な産業用途において安定的かつ信頼性の高い動作を可能にするため、精密製造分野における基本的な材料選択肢となっています。

この緻密な構造を実現するための鍵は、高度な製造プロセスにあり、高圧焼結と熱間静水圧プレスが最も一般的に用いられる技術的アプローチです。高圧焼結は、高温下でタングステン銅混合粉末に継続的に高圧を加えることで、粒子を完全に接触、拡散、融合させ、粒子間に形成された気孔を除去します。熱間静水圧プレスはさらに一歩進んで、高温条件下で流体媒体を介してブランクに全方向から均一な圧力を加えることで、材料内の微細な気孔を完全に圧縮し、最終的に欠陥のない緻密な構造を形成します。両方のプロセスの中核となる目標は同じです。圧力と温度の相乗効果により、粒子間の物理的障壁が破壊され、タングステンと銅の 2 つの相の間の緊密な結合が実現され、電極の高性能のための構造的基礎が築かれます。

緻密電極の性能上の利点は、その構造的完全性に由来します。第一に、低多孔性により、銅相は連続的で途切れのない導電ネットワークを形成します。電流が伝送される際に細孔が閉塞して局所的な抵抗変化が生じることがなく、導電性能は安定して効率的です。同時に、密に統合された微細構造は、熱伝導のための滑らかな経路を提供し、加工や作業中に発生した熱を速やかに拡散させ、局所的な過熱による性能低下を回避します。第二に、緻密構造は電極に高い機械的強度と耐変形性を与えます。機械的な圧力や熱応力を受けても、割れたり破損したりしにくく、長期間安定した形状を維持できるため、耐用年数が長くなります。さらに、滑らかで平坦な表面は、ワークとの接触時の抵抗変動を低減し、加工中の不純物付着の可能性も低減するため、プロセス安定性の向上につながります。

EDM 分野において、高密度電極の利点は特に顕著です。EDM は、電極とワークピース間の高周波放電を利用して材料を除去します。電極の構造密度は、放電エネルギー分布の均一性に直接影響します。電極内部に気孔があると、放電プロセス中に局所的なエネルギー集中が発生し、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ワークピースの表面に不規則なアブレーション痕跡が生じ、加工精度に影響を与える可能性があります。一方、高密度電極の均一な構造は、放電エネルギーの安定した放出を確保し、ワークピースの表面粗さを一定に保つことができます。これは、金型製造など、精度要求が厳しい場面に特に適しています。例えば、精密ギア金型の加工において、高密度電極は安定した放電性能を通じてギアの歯形を正確に複製し、金型の寸法精度と表面品質を確保し、その後のギアの量産に確実な保証を提供します。

抵抗溶接の用途において、緻密電極はかけがえのない役割を果たします。溶接プロセス中、電極はワークピースに密着して電流を伝達すると同時に、一定の圧力に耐える必要があります。緻密電極は気孔率が低いため、電流伝達における「ボイド効果」、つまり気孔による電流経路の遮断や抵抗の急激な増加を回避できます。これにより、電流が溶接部全体に均一に流れるため、溶接点の発熱が安定し、溶接ナゲット形成の安定性が保証されます。自動車のトランスミッションギアの溶接において、この安定性は非常に重要です。ギア溶接部の強度は、トランスミッション全体の性能に直接影響します。緻密電極は、安定した電流伝達と耐圧力性により、各溶接点の均一な強度を確保し、局所的な溶接欠陥によるギアの故障のリスクを回避します。

マイクロエレクトロニクス実装の分野でも、高密度電極は広く利用されています。マイクロエレクトロニクスデバイスは、電極の寸法精度と性能安定性に対する要求が極めて高くなっています。高密度電極は表面が滑らかで構造が均一であるため、チップや基板との良好な接触を確保し、接触抵抗を低減し、信号伝送効率を向上させることができます。同時に、優れた熱伝導性により、動作中にチップから発生する熱を素早く放散し、過度の温度上昇によるデバイス性能の低下を防ぎます。例えば、スマートフォンチップの実装において、高密度タングステン銅電極は電気伝導と放熱の二重媒体として機能し、安定した電気信号伝送を確保するとともに、チップ温度を効果的に制御し、デバイスの高性能動作を支えています。

4.6.2 多孔質電極

多孔質電極は、特殊な構造特性を持つタングステン銅電極の一種で、多数の規則的または不規則な細孔が分布しています。これらの細孔は材料の欠陥ではなく、プロセス設計によって積極的に形成された構造的特徴です。低多孔度を追求する緻密電極とは異なり、多孔質電極の細孔分布と割合はコア設計パラメータです。焼結プロセス中の圧力、温度、保持時間などのパラメータを調整することにより、細孔の形態と密度を精密に制御し、最終的に機能特性と構造特性の両方を備えた特殊な材料を形成できます。この設計により、電極はタングステン銅複合材料の基本特性を維持しながら、軽量、高比表面積などの独自の利点を獲得し、特定のシナリオのニーズに適応できます。

多孔質電極の製造プロセスの鍵は、焼結プロセスの逆制御にあります。従来の緻密化プロセスでは、高圧と長時間の熱処理によって粒子の融合を促進しますが、多孔質構造を形成するには、焼結圧力を適切に低減し、熱処理時間を短縮する必要があります。これにより、タングステン粉末と銅粉末は不完全な緻密化状態で骨格構造を形成し、粒子間の隙間は気孔として保持されます。さらに、気孔形成剤を添加することで、規則的な気孔の形成を促進することができます。気孔形成剤とは、混合粉末に揮発性または可溶性の物質を添加するものです。焼結プロセ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ス中にこれらの物質は蒸発するか、その後溶解して除去され、所定の形状の気孔チャネルが残ります。いずれの方法においても、プロセスパラメータを正確に制御することで、気孔分布が均一で設計期待値と一致していることを保証し、局所的な気孔集中による性能欠陥を回避する必要があります。

電極に与える多孔質構造の核心的な利点は、軽量性と放熱効率のバランスにあります。多数の気孔が存在することで、材料全体の密度が大幅に低減され、同じ体積の高密度電極と比較して重量が大幅に軽減されます。これは、デバイスの負荷を制御する必要があるシナリオにおいて非常に重要です。同時に、気孔によって形成される複雑なチャネルネットワークは、電極の比表面積を大幅に増加させます。熱が材料を伝導する際、より大きな表面積が周囲環境との熱交換を促進し、気孔内に形成される可能性のある空気循環と相まって、放熱効率が向上します。この「軽量+高放熱」の組み合わせにより、重量に敏感で放熱要件の高いモバイルデバイスや航空宇宙部品などのシナリオにおいて、多孔質電極は不可欠な存在となっています。

ドローンモーターの整流電極の応用において、多孔質電極の利点は十分に発揮されています。ドローンの耐久性は機器の重量に直接関係しており、軽量設計が耐久性向上の鍵となります。モーターはコア部品であるため、電極の重量最適化は特に重要です。多孔質タングステン銅電極は、内部の細孔構造によって重量を軽減すると同時に、銅相の高い導電性により整流時の安定した電流伝送を確保します。さらに重要なのは、ドローンモーターは高速運転時に大量の熱を発生することです。熱が時間内に放散されない場合、モーターが過熱して故障する可能性があります。多孔質構造の高い比表面積は、熱を空気中に素早く放散することができます。モーターハウジングの放熱設計と組み合わせることで、効率的な放熱システムを形成し、モーターが長期飛行中に安定した性能を維持できるようにします。電解加工の分野において、多孔質電極の細孔構造は媒体の貯蔵と伝達において独特の役割を果たしています。電解加工は、電極とワークピースの間の電解液を介して材料の電気化学的溶解を実現します。従来の電極は電解液を連続的に輸送するために外部の配管を必要としましたが、多孔質電極の内部の細孔は電解液の貯蔵とチャネルとして直接機能し、加工プロセス中に電解液をゆっくりと放出することで、加工エリアが常に湿潤状態を保ち、継続的な冷却と潤滑を実現します。この設計は加工装置の配管システムを簡素化し、複雑な表面や深い空洞の電解加工に特に適しています。電極が狭い空間に侵入すると、細孔から放出された電解液が加工エリアに正確に作用し、外部輸送による電解液の不均一な分布の問題を回避し、加工精度と表面品質を向上させます。

燃料電池の電極部品の中でも、多孔質タングステン銅電極は特別な価値を発揮します。燃料電池は、発生した電流を伝導しながら、燃料と酸化剤の触媒反応を実現するために電極を使用する必要があります。そのため、電極には優れた電気伝導性と反応に十分な接触面積の両方が求められます。多孔質電極の細孔構造は、ガスの拡散と反応のための空間を提供し、タングステン銅複合材料の高い導電性は、電子の迅速な伝達を保証します。細孔サイズと分布を最適化することで、反応効率と導電性のバランスをとることができ、燃料電池は高出力を出力しながら安定した動作を維持できます。さらに、多孔質構造は優れた靱性を備えており、バッテリー動作中の体積変化を緩和し、電極の耐用年数を延ばすことができます。

注目すべきは、多孔質電極の設計において、具体的な用途シナリオに応じて細孔パラメータを

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

調整する必要があることです。細孔が大きすぎると構造強度が低下し、小さすぎると放熱性や誘電透過効率に影響を及ぼす可能性があります。そのため、細孔の形態、分布の均一性、割合は、シミュレーションと実験を繰り返し検証する必要があります。このようなカスタマイズされた構造設計は製造の難易度を高めますが、従来の電極では対応できない特殊なニーズにも対応できるため、多孔質電極はタングステン銅電極ファミリーの中で最も汎用性の高いカテゴリーの一つとなっています。

4.6.3 複合コーティング電極

複合コーティング電極は、機能の重ね合わせによって性能の飛躍的な向上を実現するタングステン銅電極の特殊なカテゴリーです。その核となる設計コンセプトは、タングステン銅基板の表面に 1 つまたは複数の機能性コーティングを複合化し、コーティングと基板の相乗効果によって単一材料の性能上の欠点を補うことです。コーティング材料の選択は非常に柔軟で、銀、ニッケル、ダイヤモンド、セラミックなど、用途に応じて様々な材料を選択できます。電気めっき、蒸着、溶射などのプロセスを通じて基板との密接な結合を実現し、最終的に「構造的な支持を提供するタングステン銅基板+特定機能を最適化する表面コーティング」という複合構造を形成します。この設計は、高強度、高い電気伝導性、熱伝導性といったタングステン銅材料の核心的利点を維持するだけでなく、コーティングによって電極に新たな性能次元をもたらし、その応用範囲を大幅に拡大します。

複合コーティング電極の製造における鍵は、コーティングと基材との結合品質にあり、異なるプロセスパスはそれぞれ異なる焦点を持っています。電気めっきプロセスは金属コーティングの製造に適しています。電気分解により、金属イオンがタングステン銅基材の表面に均一に堆積し、緻密なコーティングを形成します。その利点は、コーティングの厚さを制御できることと、基材との強力な結合です。特に、銀やニッケルなどの導電性金属コーティングの製造に適しています。蒸着法は、コーティング材料を真空環境で気化させ、基材表面に膜状に堆積させます。ナノメートルレベルの精度で薄層を作製できます。ダイヤモンドやセラミックなどの非金属コーティングに適しており、コーティングの組成と構造を正確に制御できます。溶射プロセスは、コーティング材料を熔融または半熔融状態に加熱し、高速気流を通して基材表面に噴霧してコーティングを形成します。厚膜や大面積のコーティングに適しており、耐磨耗性および耐熱性コーティングに広く使用されています。使用するプロセスに関わらず、基材表面を前処理（研磨、洗浄、活性化など）し、コーティングと基材の間に不純物や酸化物層がないことを確認する必要があります。そうしないと、コーティングが剥離したり、性能が低下したりする可能性があります。

複合コーティング電極の性能優位性は、その狙いを絞った機能強化にあります。タングステン銅マトリックスは支持体として、安定した機械的強度、導電性、熱伝導性、構造安定性を提供し、使用中に電極の形状と基本性能を維持します。表面コーティングは、接触抵抗の低減、耐磨耗性の向上、耐酸化性の向上など、特定のニーズに合わせて性能を最適化し、特定の用途において純粋なタングステン銅材料の性能を上回る性能を発揮します。この「基本保証+機能強化」モデルにより、電極は複雑な使用条件の包括的な要件に適応しながら、主要性能指標において最高レベルを達成することができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高周波通信機器のコネクタ用途において、銀メッキ複合コーティング電極は優れた性能を発揮します。高周波信号伝送は接触抵抗に非常に敏感で、わずかな抵抗変動でも信号の減衰や歪みを引き起こす可能性があります。タングステン銅基板は優れた導電性を有し、表面の銀コーティングにより接触抵抗をさらに低減できます。銀は最も導電性の高い金属の一つであり、表面が酸化されにくいいため、低抵抗特性を長期間維持できます。この電極をコネクタとして使用する場合、銀メッキ層は接触界面での信号の効率的な伝送を確保し、反射や損失を低減します。特に、衛星通信や 5G 基地局など、信号品質に対する要件が厳しいシナリオに適しています。同時に、タングステン銅基板の高い強度により、コネクタの抜き差し時に変形せず、構造の緩みによる接触不良を回避できます。

表面にダイヤモンドコーティングを施した複合電極は、高硬度材料加工の分野で独自の価値を発揮します。金型鋼や超合金などの材料の放電加工において、電極は高温放電衝撃や機械的摩擦に頻繁に耐える必要があります。純タングステン銅電極は長期間使用すると表面が摩耗したりアブレーションを起こしやすく、加工精度が低下します。ダイヤモンドコーティングは硬度と耐摩耗性に優れているため、電極表面に保護バリアを形成し、加工工程における機械的摩耗や高温侵食を防ぎ、電極の寿命を大幅に延ばします。同時に、ダイヤモンドの優れた熱伝導性は、電極の熱を素早く放散させ、局所的な過熱によるコーティングの破損を防ぎます。この「耐摩耗性+放熱性」という二重の利点により、このタイプの電極は精密金型加工や航空機エンジンブレード製造などの分野で非常に人気があります。

高温酸化防止の用途では、ニッケルコーティングやセラミックコーティングを施した複合電極が重要な役割を果たします。例えば、冶金産業のアーケ炉電極では、電極は高温の酸化環境で継続的に動作する必要があります。純粋なタングステン銅材料の表面には酸化物層が形成されやすく、電気伝導性が低下します。ニッケルコーティングは高温で緻密な酸化膜を形成し、酸素による基板のさらなる腐食を防ぎ、電極の導電ネットワークの破壊を防ぎます。一方、セラミックコーティング（アルミナやジルコニアなど）は耐高温性と耐酸化性が高く、高温動作条件に適しています。物理的な隔離により、基板が腐食性媒体と接触するのを防ぎます。このタイプの複合電極は、タングステン銅の高い電気伝導性と熱伝導性を維持するだけでなく、コーティング自体の耐高温性と耐酸化性も備えているため、高温産業におけるタングステン銅材料の応用範囲を大幅に拡大します。

さらに、複合コーティング技術は多機能統合も実現します。例えば、医療機器の精密電極では、複合生体適合性コーティング（チタン合金コーティングなど）を用いることで、タングステン銅電極の優れた導電性を確保しながら、人体組織との接触による有害反応を回避し、低侵襲手術器具の特殊な要件を満たすことができます。コーティングによる機能カスタマイズにより、複合コーティング電極は様々な従来とは異なるニーズに対応できるようになり、タングステン銅電極ファミリーの中で最も革新的な可能性を秘めたカテゴリーとなっています。

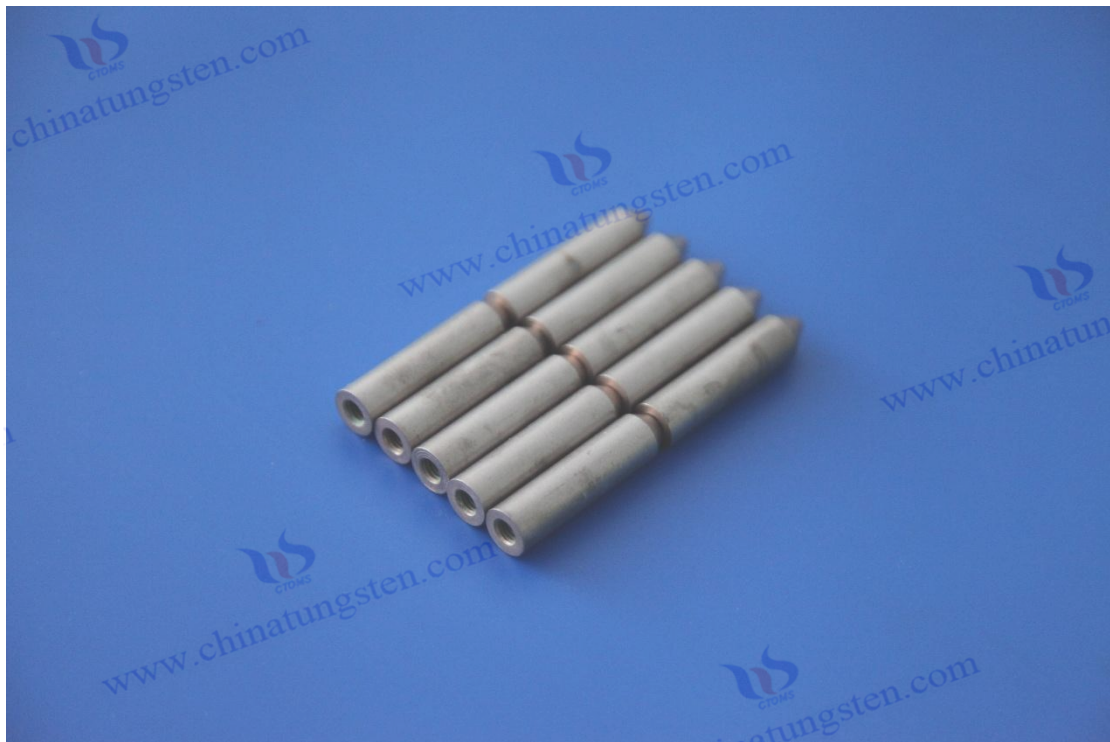
コーティングの厚さと均一性は電極性能に大きな影響を与えます。コーティングが厚すぎると内部応力が大きくなり、ひび割れや剥離につながる可能性があります。一方、コーティングが薄すぎると効果的な保護や機能向上が得られません。そのため、コーティング材料と基材の特性に応じてコーティングプロセスのパラメータを精密に制御する必要があります、コーティン

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

グ性能が基準を満たすことを確認するために、初期シミュレーションとその後の試験が不可欠です。このような厳格な製造要件は生産コストを増加させますが、複合コーティング電極がハイエンド製造分野においてかけがえのない価値を生み出すことを可能にします。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.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 タングステン銅電極の製造技術

5.1 浸透プロセス

浸透プロセスは、タングステン - 銅電極を製造するための中核技術です。液体の銅を多孔質のタングステン骨格に浸透させることで、優れた性能を持つ複合材料を製造します。このプロセスは、タングステン骨格の事前製造と銅の浸透という2つの主な段階で構成され、低い多孔度と均一な相分布を実現することを目的としています。浸透プロセスは粉末冶金に基づいており、真空または不活性雰囲気環境と組み合わせることで、材料の高密度と安定性を確保しています。製造プロセス中、タングステン粉末の成形、焼結、および気孔制御は重要なステップであり、最終的な電極の機械的強度、導電性、および耐久性に直接影響します。温度、圧力、時間などのプロセスパラメータの最適化は、電極の微細構造と性能を大きく左右します。

5.1.1 タングステンスケルトンプレファブリケーション

タングステン骨格のプレファブリケーションは、浸透プロセスの第一段階であり、後続の銅浸透の基礎となる多孔質タングステン構造を形成することを目的としています。この段階では、タングステン粉末の成形、焼結、および気孔率の制御を通じて、一定の強度を持つ骨格構造が構築されます。タングステン骨格の品質は、銅の充填効果と最終的な電極の性能に直接影響します。準備プロセスでは、原料の純度、粒子サイズ、およびプロセスパラメータを正確に制御する必要があります。微細構造の多孔性と均一性は、プレファブリケーションを成功させる鍵です。骨格の密度と安定性を最適化するために、熱間等方圧プレスがよく使用されます。タングステン骨格のプレファブリケーションは浸透プロセスの基礎を築き、後続の処理中に電極が優れた機械的特性を持つことを保証します。

5.1.1.1 タングステン粉末成形

タングステン粉末成形は、タングステンスケルトンのプレファブリケーションにおける基本的なステップです。タングステン粉末を特定の形状にプレスすることで、その後の焼結および浸透工程の準備を整えます。このプロセスでは通常、冷間プレスまたは静水圧プレス技術が用いられ、高純度のタングステン粉末を金型に入れ、機械的に予備成形体を成形します。成形プロセス中、タングステン粉末の粒子サイズと形態は均一でなければなりません。球形または球形に近い粉末は、充填効率と成形体の均一性を向上させます。ボールミルまたはV型ミキサーによって均一な混合が実現され、粉末分布に大きな層化が生じないようにします。成形圧力と金型設計は、成形体の密度と気孔率の分布に直接影響します。適切な圧力をかけることで、内部欠陥を低減できます。

成形されたグリーン体は、その後の高温焼結に耐えられるよう、一定の機械的強度を備えていなければなりません。前プレスなどの表面処理により、グリーン体の安定性をさらに向上させることができます。粉末の吸湿は成形品質の低下につながる可能性があるため、成形中は湿度管理が不可欠です。タングステン粉末の成形は、製造プロセス全体の出発点であり、その品質が後続工程の円滑な進行を左右します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.1.2 タングステン骨格焼結

タングステン骨格焼結は、タングステン粉末成形体を多孔質骨格へと変換する重要な工程です。高温処理により、成形体の強度と安定性が向上します。この工程は通常、真空または水素雰囲気下で行われます。焼結温度はタングステン粉末の特性に合わせて調整され、ネック成長と粒子間の結合を促進します。初期段階では、タングステン粉末粒子は拡散と再結晶によって初期結合を形成します。温度が上昇するにつれて、微細構造は徐々に緻密化し、多孔質構造が形成され始めます。過度の加熱による割れや過熱を避けるため、焼結時間と加熱速度を正確に制御する必要があります。焼結プロセスでは、雰囲気制御も重要です。還元水素雰囲気は表面酸化層を除去し、粒子間の結合を強化します。熱間等方圧加圧（HIP）は焼結をさらに最適化し、全方向からの圧力によって骨格の均一性と強度を高めます。焼結タングステン骨格は、銅の浸透経路を形成するために十分な機械的強度と適切な多孔性を備える必要があります。プロセスパラメータの調整は、骨格の微細構造に影響を与えます。動的シミュレーションや多段階焼結技術などの今後の取り組みにより、焼結効率と骨格品質を向上させ、高精度電極の要求を満たすことができます。

5.1.1.3 タングステン骨格細孔制御

タングステン骨格の多孔性は、浸透を成功させる上で重要なステップです。目標は、骨格の多孔性と細孔径分布を調整し、銅の浸透に最適な条件を作り出すことです。このプロセスは、成形圧力、焼結条件、添加剤の使用によって実現されます。多孔性は銅の充填効率と最終的な電極の性能に直接影響します。成形段階では、圧力を調整することでグリーン体の初期密度を変えることができます。圧力が低いほど多くの細孔が保持され、圧力が高いほど細孔の数は減少します。焼結中は、温度と時間を制御することで、細孔の閉鎖と連結が影響を受けます。適切な焼結パラメータは、開放された細孔構造を維持します。有機バインダーや気孔形成剤などの添加剤は、気孔制御に役立ちます。焼結後、添加剤は熱分解によって除去され、均一な気孔ネットワークを形成します。微細構造分析の結果、均一な気孔径分布が気孔制御の核心であることが示されました。気孔が大きすぎたり不均一だったりすると、銅の浸透が不十分になる可能性があります。熱間静水圧加圧プロセスは、全方向圧力によって気孔構造を最適化し、閉気孔の割合を減らして浸透効率を向上させます。気孔制御は、その後の銅の濡れ性も考慮する必要があります。表面処理により、タングステン骨格と熔融銅の界面結合を向上させることができます。

5.1.2 浸透制御

浸透制御は浸透プロセスの決定的な段階であり、銅浸透プロセスを正確に管理することで、高性能のタングステン銅電極を製造することを目的としています。この段階には、銅材料の準備、浸透温度制御、浸透時間制御という3つの重要なステップが含まれ、液体銅がタングステン骨格の細孔を完全に満たして均一な複合構造を形成することを保証します。浸透制御は、細孔充填率、界面結合強度、および最終電極の密度に直接影響します。微細構造における低多孔性と均一な相分布は、品質保証の中核です。真空または不活性雰囲気環境は浸透効果をさらに最適化し、熱間等方加圧は材料の安定性を向上させるのに役立ちます。浸透制御の最適化は、電気

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

放电加工、溶接、およびマイクロエレクトロニクスパッケージングにおける電極の応用に信頼性の高いパフォーマンスサポートを提供します。

5.1.2.1 銅材料の準備

銅材料の準備は、浸透制御の基本的なステップであり、高品質の銅原料を提供し、液体銅の浸透条件を確立することを目的としています。このプロセスでは通常、銅粉末または銅ブロックの選択、精製、および前処理が行われ、高温での良好な流動性と濡れ性が確保されます。銅材料の純度は重要な要素です。高純度の電気銅またはアトマイズ銅を選択して酸素や硫黄などの不純物の含有量を減らし、浸透プロセス中の気孔や欠陥の形成を回避します。銅材料は、プロセス要件に応じて粉末または塊の形態にすることができます。粉末形態は均一な分布を容易にし、塊形態は大規模な浸透に適しています。粒子サイズまたはブロックサイズは、タングステン骨格の多孔度と一致する必要があります。

前処理には、乾燥と表面洗浄が含まれます。銅材料は真空または不活性ガス雰囲気下で乾燥され、表面の水分と酸化層が除去され、タングステンフレームワークとの界面結合が向上します。機械攪拌またはボールミル粉碎によって均一な混合が達成され、浸透中の銅材料の均一な分布が確保されます。銅材料の準備では、その融点も考慮する必要があります。適切な予熱は浸透効率を向上させます。準備工程では、環境制御を実施することで酸化を防ぎ、銅材料の品質を確保します。

5.1.2.2 浸透温度制御

浸透温度の制御は、浸透制御における重要なステップです。銅が液体状態でタングステン骨格に効果的に浸透し、過度の熱による材料損傷を回避することが不可欠です。このプロセスは通常、真空炉または不活性雰囲気中で行われます。銅の融点以上に温度を設定することで液相となり、銅が十分に濡れて細孔を埋めることができます。正確な温度制御が不可欠です。温度が低すぎると銅が完全に溶融しない可能性があり、温度が高すぎるとタングステン骨格の局所的な溶融や粒成長を引き起こし、微細構造に影響を与える可能性があります。集中した熱応力による割れを防ぐため、加熱速度は徐々に調整する必要があります。

温度制御には雰囲気管理も含まれます。真空環境は酸化反応を抑制し、アルゴンなどの不活性ガスは材料をさらに保護します。熱間静水圧加圧は温度制御を補助し、銅の浸透を促進し、全方向からの圧力によって充填効率を向上させます。含浸温度の安定性は界面接合の品質に直接影響します。過度の温度変動は銅の溢れや不均一な分布を引き起こす可能性があります。炉内の温度分布は、プロセス全体を通して監視し、すべての部品の均一性を確保する必要があります。将来的には、インテリジェント温度制御システムや多段加熱技術の導入により、含浸温度制御がさらに最適化され、電極密度と性能の一貫性が向上するでしょう。

5.1.2.3 浸透時間制御

浸透時間は浸透制御における重要なパラメータであり、溶融銅がタングステン骨格に完全に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

浸透し、安定した複合構造を形成することを保証します。このプロセスは、タングステン骨格の多孔性、銅材料の量、および温度によって決まります。時間が短すぎると充填が不完全になる可能性があり、長すぎると銅の過剰な流出や骨格の変形を引き起こす可能性があります。浸透初期段階では、銅がタングステン表面を濡らし、深い細孔に浸透するのに十分な時間が必要です。その後、時間制御は凝固プロセスに重点を置き、銅の溢れと細孔形成を防ぎます。

時間制御は温度と圧力との連携も必要です。熱間等方圧加圧（HIP）は、全方向の圧力によって浸透時間を短縮し、銅の流れを加速します。このプロセスでは、浸透時間は通常、段階的に設定されます。浸透を確実にする初期段階、接合を促進する安定化段階、そして組織を固める冷却段階です。微細構造分析の結果、適切な浸透時間を設定すると、未充填気孔が減少し、界面接合が向上することが示されています。環境安定性と設備性能は、時間制御の有効性に直接影響します。将来的には、リアルタイム監視や動的調整技術を用いて浸透時間を最適化し、電極の均一性と耐久性を向上させることが期待されます。

5.2 後処理技術

後処理は、タングステン銅電極の製造における最終段階です。切断、研磨、表面処理、寸法精度管理などにより、電極の形状、表面品質、機能性能を最適化することを目的としています。この段階は、浸透工程の後に実施され、電極が特定の用途の要件を満たすことを保証します。タングステン銅電極の後処理では、タングステンの高い硬度と銅の延性を利用し、機械加工と表面改質技術によって微細構造を調整し、耐久性を向上させます。工具の選択、加工環境、品質検査など、プロセスパラメータの正確な制御は重要であり、放電加工、溶接、またはマイクロエレクトロニクスパッケージングにおける電極の性能に直接影響します。

5.2.1 切断

切削は、機械加工後の最初の工程であり、余分な材料を除去してタングステン銅電極を成形します。この工程では通常、超硬工具またはダイヤモンド工具を用いて旋削またはフライス加工を行い、溶浸した粗い素材を除去します。タングステンは硬度が高いため、耐摩耗性の高い工具が必要です。一方、銅は延性が高いため、固着や裂けを防ぐために切削速度と送りを制御する必要があります。切削は、棒状やブロック状など複雑な形状の電極に適しています。熱の蓄積と表面損傷を最小限に抑えるため、工程中は必ずクーラントを使用する必要があります。切削工程は複数の工程で構成され、粗削りで余分な材料を除去し、仕上げで輪郭精度を達成し、徐々に設計寸法に近づけていきます。微細構造の低気孔率は材料の均一な切削を可能にし、熱間静水圧プレス法によって最適化された電極は優れた機械的安定性を示します。後続工程でのスムーズな加工を確保するために、切削後には表面粗さを検査する必要があります。粉塵対策などの環境管理により、粉塵による汚染を防ぐことができます。

5.2.2 研削

研削は、研磨工具を用いて切削片の残留物を除去し、タングステン銅電極の表面仕上げと形状精度を向上させる繊細な後加工工程です。この工程では通常、ダイヤモンド砥石または炭化ケ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

イ素工具を用いて、タングステンの高い硬度を精密に研削します。銅は延性が高いため、過度の摩耗を防ぐために潤滑が必要です。研削は、特に放電加工（EDM）やマイクロエレクトロニクス実装など、高い平坦性が求められる用途において、電極の接触面品質を向上させるのに適しています。微細組織における均一な相分布は、安定した研削結果をもたらします。研削工程は、切削片の痕跡を除去する粗研削と、鏡面仕上げを実現するための精研削の2段階で構成されています。熱割れや表面焼けを防ぐため、研削圧力と速度は工程中に調整する必要があります。冷却剤は温度を下げ、材料特性を保護するために使用されます。熱間静水圧プレス用に最適化された電極は、優れた耐摩耗性を示します。研削後に微小亀裂や穴などの表面欠陥を検査し、品質が基準を満たしていることを確認します。

5.2.3 表面処理

表面処理は、化学的または物理的な方法を用いて、タングステン銅電極の表面特性（耐腐食性、耐酸化性、耐凝着性など）を向上させる、後工程の最適化ステップです。このプロセスには、タングステンの高い硬度と銅の化学的活性を調整するための研磨、めっき、コーティング技術が含まれます。研磨は表面の微細欠陥を除去し、ニッケルまたは金めっきは耐候性を高め、窒化チタンなどのコーティングは耐摩耗性を向上させます。微細構造の低多孔性は、均一な表面処理を可能にします。

表面処理プロセスは、用途に合わせて調整する必要があります。放電加工用電極の場合は、放電安定性を向上させるために研磨が望ましい場合がありますが、溶接電極の場合は、スラグの付着を低減するためにコーティングが必要となる場合があります。内部構造への影響を避けるため、温度と時間を制御する必要があります。最適化された熱間等方圧加圧（HIP）プロセスは、電極表面の密着性を高めます。不活性雰囲気などの環境制御は、酸化を抑制するのに役立ちます。処理後は、表面密着性と耐久性を試験する必要があります。

5.2.4 寸法精度管理

寸法精度管理は後加工の最終段階であり、測定と調整を通じてタングステン銅電極が設計仕様を満たしていることを確認します。この工程では、座標測定機または光学検査装置を用いて電極の長さ、幅、形状公差を検査し、タングステンの高い硬度と銅の延性を考慮して微調整を行います。切断・研磨後、電極は仕上げ工程に入り、寸法偏差をミクロンレベルまで制御し、微細組織の均一性を確保することで高精度加工をサポートします。

寸法精度管理には、複数回の検査と修正が必要です。初期検査で偏差が判明した場合、微研磨や局所的な切断によって修正されます。熱間静水圧プレスに最適化された電極は、優れた寸法安定性を示します。温度変動などの環境要因は材料の熱膨張に影響を与えるため、一定温度での作業が必要となるため、考慮する必要があります。検査データはバッチの一貫性を確保するために記録されます。将来的には、インテリジェント検査システムや3D スキャン技術によって、高精度電極や複雑な構造部品の要求を満たすリアルタイムの精度管理が可能になるでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第6章 タングステン銅電極の応用シナリオ

タングステン銅電極は、優れた導電性、耐高温性、耐アーク侵食性、良好な切削性により、放電加工（EDM）において広く使用されています。精密金型製造においては、低損失と高い加工精度により、複雑なキャビティや微細構造の形成に使用され、特に超硬合金金型の加工に適しています。チタン合金や航空宇宙産業の耐熱合金などの難削材においても、高周波放電によって発生する高温に耐えることができ、精密部品の表面品質と寸法精度を確保します。

タングステン銅電極は、溶接、切断、電気スイッチングにおいても重要な役割を果たします。抵抗溶接においては、電極の摩耗を低減し、安定した溶接強度を確保するため、自動車製造や家電製品製造などの産業に適しています。プラズマ切断においては、高温侵食に耐え、切断効率と切断品質を向上させます。さらに、高電圧遮断器、リレーなどの接点部品として使用されるタングステン銅電極は、アーク侵食や溶融溶接に対する耐性を備えており、電力システムや電気制御機器の安全で安定した動作を保証します。

タングステン銅電極は、防衛、航空宇宙、そして特殊分野においても重要な用途を有しています。ミサイル誘導システムにおいては、その安定性により極限環境下でも適切な動作を保証します。宇宙船の電力システムにおいては、過酷な宇宙環境に耐え、効率的かつ安全なエネルギー伝送を実現します。核実験装置や医療機器においては、耐放射線性、導電性、生体適合性により、それぞれ試験データの精度向上と治療プロセスの安全性向上に貢献します。技術の進歩に伴い、その潜在的な用途は今後も拡大していくでしょう。

6.1 EDM におけるタングステン銅電極の応用

タングステン銅電極は、放電加工（EDM）における重要な用途の一つです。その独特な材料特性により、この技術は精密製造において広く利用されています。放電加工（EDM）はアーク放電によって材料を除去する加工方法ですが、タングステン銅電極は、タングステンの高融点と高硬度、そして銅の高い導電性を併せ持つため、理想的な工具です。粉末冶金や真空浸透といった製造プロセスにより、電極内の低多孔性と均一な相分布が確保され、さらに熱間静水圧プレス加工によって微細構造が最適化され、耐久性と安定性が向上します。タングステン銅電極は、金型加工、難削材加工、そして EDM において、高精度で複雑な部品の製造において重要な役割を果たします。

6.1.1 金型加工への応用

金型加工におけるタングステン銅電極は、高精度製造、特に複雑な金型の放電加工においてその重要性を発揮します。金型製造には精密な形状と滑らかな表面が求められますが、タングステン銅電極は高い硬度と耐アーク侵食性により、この要件を満たします。製造工程では、通常、中～高タングステン含有量（WCu 70/30 または WCu 80/20 など）の電極が使用されます。粉末冶金法によって緻密な微細構造が形成され、熱間静水圧プレスによって圧縮強度と表面安定性が最適化されます。電極の低多孔性は安定した放電性能を確保し、銅の高い導電性は効率的な電流伝達をサポートし、加工時間を短縮します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

金型加工において、タングステン銅電極は特にスタンピング金型、プラスチック金型、鍛造金型などの微細加工に適しています。電極の耐摩耗性により、繰り返し放電しても形状の完全性を維持し、損失を低減します。微細組織における均一な相分布は、深いリブや小さな穴などの複雑な輪郭の形成をサポートし、加工精度はミクロンレベルに達します。研磨などの表面処理により、電極の接触品質がさらに向上し、金型の表面仕上げが向上します。生産工程では、高硬度鋼や合金鋼を加工できるため、自動車部品や電子部品の金型製造ニーズに対応できます。使用シナリオには、マルチ電極協調加工も含まれており、タングステン銅電極の靱性は、複数の調整と設置をサポートします。

冷却剤の使用などの環境制御により熱の影響が低減され、電極寿命が延長されるとともに、研削などの後加工工程により寸法精度が確保されます。将来的には、機能傾斜設計やナノテクノロジーの導入により、金型加工におけるタングステン銅電極の耐久性と加工効率がさらに向上し、航空宇宙部品など、より複雑で要求の厳しい金型製造のニーズを満たすことができます。

6.1.2 難加工材料の加工への応用

難削材加工におけるタングステン銅電極は、極限条件下で優れた性能を発揮することが実証されており、特に高硬度または高融点の材料の加工に適しています。タングステン鋼、チタン合金、セラミックなどの難削材は、その強力な機械的特性のために従来の方法では切削が困難であり、放電加工（EDM）が好ましい技術となっています。タングステン銅電極は、耐高温性と耐アーク侵食性により、コアツールとなっています。製造プロセスでは、電極は高タングステン含有量（例：WCu 90/10）で作られ、真空浸透プロセスにより強力なタングステン骨格が形成されます。熱間静水圧プレス（HIP）により微細構造が最適化され、低多孔性と均一な相分布が得られます。銅の高い電気伝導性は、効率的な放電をサポートします。

難削材の加工において、タングステン銅電極は高エネルギー放電に耐えることができます。タングステンは融点が高く（3000°C以上）、アーク温度から保護し、表面摩耗を軽減するため、炭化タングステンやチタン合金などの材料の加工に適しています。微細構造の微粒子は高精度加工を可能にし、電極の耐摩耗性により長期的な形状安定性を確保するため、タービンブレードや医療用インプラントなどの複雑な形状の成形に適しています。コーティングなどの表面処理は耐酸化性を高め、高湿度環境での性能向上に貢献します。また、切削や研削などの加工後工程は、形状精度を最適化します。

航空宇宙産業や防衛産業でも利用されています。タングステン銅電極の機械的強度は高負荷加工をサポートし、冷却剤の使用により熱割れのリスクを低減し、電極寿命を延ばします。

6.1.3 EDM への適用の利点

放電加工におけるタングステン銅電極は、その材料の複合特性と最適化された製造プロセスにより、高精度かつ効率的な生産を実現します。EDM は、電極の耐アーク侵食性、導電性、そして熱管理能力に依存しています。高タングステン含有量（WCu 80/20 など）のタングステン銅電極は、耐熱性を備えています。タングステンの硬度は放電ショックから保護し、銅の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高い導電性（純銅に近い）は安定した電流伝達を保証します。粉末冶金は低多孔性の微細構造を形成し、熱間静水圧加圧は界面結合を強化します。研磨などの表面処理は、放電の安定性を向上させます。

アプリケーションの利点は、主に耐久性にあります。タングステン銅電極の耐アーク侵食性は、特に高エネルギー放電シナリオにおいて、表面損失を低減し、耐用年数を延ばし、生産コストを削減します。第二に、導電性と熱伝導性の組み合わせは、加工効率を最適化します。銅相における熱分散は局所的な過熱を軽減し、ワークピースの表面品質を向上させ、精密金型やマイクロ部品の製造に適しています。第三に、機械的強度と靱性は複雑な形状の加工をサポートし、電極の低多孔性は亀裂のリスクを低減し、深穴や微細構造の形成に適しています。

応用分野としては、自動車産業や電子機器製造などが挙げられます。タングステン銅電極の熱膨張係数の整合により、ワークピースとワークピース間の応力が低減され、さらに冷却剤と環境制御によって安定性が向上します。

6.2 高電圧電気機器におけるタングステン銅電極の応用

高電圧電気機器におけるタングステン銅電極は、過酷な電気条件下でも優れた性能を発揮し、高い耐久性と安定性が求められる用途で使用されています。タングステンは高い融点と硬度を有し、銅は高い電気伝導性と熱伝導性を兼ね備えているため、高電圧スイッチや避雷器などの機器に最適な材料です。粉末冶金や真空浸透などの製造プロセスにより、電極の低多孔性と均一な微細構造が確保され、さらに熱間静水圧プレスにより、耐アーク性と機械的強度が最適化されます。高電圧電気機器におけるタングステン銅電極の応用は、送電、産業用制御、防衛機器などのニーズを満たし、その性能上の利点は特に高電圧・高電流環境において顕著です。

6.2.1 高電圧スイッチへの応用

高電圧開閉装置におけるタングステン銅電極は、高電圧電気機器への応用における重要な例であり、特に高電流の頻繁な遮断を必要とする用途に適しています。高電圧開閉装置は、電力システムの回路制御および保護に使用されます。タングステン銅電極は、中～高タングステン含有量（WCu 70/30 または WCu 85/15 など）を使用します。タングステン粉末は粉末冶金プロセスによって銅粉末と混合されます。焼結後、銅は液相中の細孔を埋め、緻密な微細構造を形成します。熱間静水圧加圧により界面接合が最適化され、微細構造の低多孔性によりアーク侵食に対する耐性が向上します。銅の高い電気伝導性は、効率的な電流伝送をサポートします。

高電圧開閉装置において、タングステン銅電極の耐高温性は重要な利点です。タングステンは高い融点を持ち、数千度のアーク放電温度に耐えるため、表面の熔融や摩耗が低減し、耐用年数が延長します。電極の耐アーク性は頻繁な開閉操作をサポートし、銅は熱伝導性に優れているため放熱性に優れ、局所的な過熱のリスクを低減し、電氣的安定性を向上させます。微細構造における均一な相分布は応力集中を軽減し、ニッケルメッキなどの表面処理は耐酸化性を高めるため、湿度の高い環境や工業環境に適しています。製造工程では、タングステン粉末の高純度化と粒度制御が求められ、安定した性能を確保します。変電所や産業用配電システムな

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

どの用途があります。タングステン銅電極は高電圧遮断にも耐え、故障率を低減します。研磨などの後処理工程により、接触面の品質を最適化できます。

6.2.2 避雷器への応用

避雷器に用いられるタングステン銅電極は、雷保護において独自の価値を発揮し、特に高エネルギーの雷撃を吸収・分散させるのに適しています。電気機器を過電圧による損傷から保護する避雷器電極は、高タングステン含有量（例：WCu 80/20）を使用し、真空含浸プロセスによって製造されます。タングステン粉末が固体骨格を形成し、銅が液体含浸によって材料に浸透することで、低多孔性と均一な微細構造が得られます。熱間静水圧加圧成形により、材料の耐衝撃性と安定性が向上し、銅の高い導電性が急速な電流放電をサポートします。

避雷器において、タングステン銅電極の耐高温性は重要な利点です。タングステンは高い融点を持つため、落雷時の高温アークから保護し、材料損失を低減して耐用年数を延ばします。また、電極はアーク浸食に対する耐性があるため、複数回の落雷後も性能を維持できます。さらに、銅は熱伝導性に優れているため、熱を素早く放散し、過熱による機器の損傷を防ぎます。微細構造の微粒子は高い機械的強度を提供し、メッキなどの表面処理は耐腐食性と屋外環境への適応性を高めます。製造工程では、原材料の均一な混合と細孔サイズの制御が浸透効率に直接影響を及ぼします。適用事例としては、高圧送電線や通信基地局などが挙げられます。タングステン銅電極は雷電流を効果的に吸収し、切断や研磨などの後加工により形状精度を最適化します。

6.2.3 高電圧電気機器における応用上の利点

高電圧電気機器におけるタングステン銅電極は、その複合特性と最適化された製造プロセスにより、高電圧・高電流環境において優れた性能を発揮します。高電圧電気機器には、耐アーク侵食性、導電性、熱安定性を備えた電極が必要です。タングステン含有量の高いタングステン銅電極は耐熱性を備え、タングステンの硬度はアークショックに対する耐性を提供し、銅の高い導電性（純銅に近い）は効率的な電流伝送を保証します。粉末冶金は低多孔性の微細構造を形成し、熱間等方圧加圧は界面結合を強化します。

めっきなどの表面処理は耐候性を高めます。タングステン銅電極の利点は、主に耐アーク侵食性にあります。タングステン銅電極の耐アーク性は、特に高電圧スイッチや避雷器の頻繁な動作において、表面摩耗を低減し、耐用年数を延ばします。また、導電性と熱伝導性を兼ね備えているため、電気性能が最適化されます。銅相内での放熱により局所的な過熱が抑制され、機器の安定性が向上し、大電流遮断や雷保護に適しています。さらに、機械的強度と耐腐食性により、過酷な環境での動作をサポートします。微細構造の均一性により割れのリスクが低減し、表面処理により耐久性が向上します。用途としては、電力システムや産業機器などが挙げられます。タングステン銅電極の熱膨張係数の整合により基板への応力が低減され、冷却システムと環境制御により性能がさらに向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 溶接およびろう付けにおけるタングステン銅電極の応用

溶接・ろう付けにおけるタングステン銅電極は、高熱・高電流環境において独自の性能を発揮し、効率的な接続と信頼性の高い接合部が求められる産業分野で広く利用されています。タングステンの高融点・高硬度と銅の高い電気・熱伝導性を組み合わせることで、抵抗溶接・ろう付けに最適なツールとなっています。粉末冶金や真空浸透などの製造プロセスにより、電極の低多孔性と均一な微細構造が確保され、さらに熱間静水圧プレスプロセスにより、耐熱疲労性と表面安定性が最適化されます。溶接分野におけるタングステン銅電極の応用は、自動車製造、電子機器組立、金属加工などの産業のニーズを満たしています。その性能上の利点は、特に高強度接続や複雑な作業条件において顕著です。

6.3.1 抵抗溶接への応用

抵抗溶接におけるタングステン銅電極は、金属部品を効率的に接合する上で重要な役割を果たし、特にスポット溶接やシーム溶接などのプロセスに適しています。抵抗溶接は、電流と圧力を用いて金属を溶融させます。タングステン銅電極は、低～中程度のタングステン含有量を使用します。粉末冶金プロセスにおいて、タングステン粉末は高濃度の銅粉末と混合されます。焼結後、銅は連続した導電性ネットワークを形成します。熱間静水圧加圧処理により微細構造が最適化され、低多孔性と均一な相分布が確保されます。銅の高い導電性は安定した電流経路を提供し、タングステンの耐熱性は高温条件下での電極の安定性をサポートします。研磨などの表面処理は、溶接スラグの付着を低減します。

抵抗溶接において、タングステン銅電極は主に自動車のボディパネルや電子部品のスポット溶接に使用されます。電極の熱伝導性は熱を素早く分散させ、熱影響部を減少させ、接合品質を向上させます。タングステンはアーク浸食に対して耐性があるため、繰り返し溶接においても電極の形状を維持し、寿命を延ばします。特に高周波動作に適しています。微細組織における均一な銅相ネットワークは効率的な電流伝送をサポートし、電極の靱性は様々な厚さのワークピースに対応するために複数の調整と取り付けを可能にします。準備工程では、原材料の混合均一性と焼結パラメータが電極の性能に直接影響し、研磨などの後処理工程によって接触面が最適化されます。使用シナリオには、自動車製造や家電製品の製造が含まれます。タングステン銅電極の耐付着性は洗浄頻度を低減し、冷却システムは熱管理能力を向上させます。

6.3.2 ろう付けへの応用

ろう付けにおけるタングステン銅電極は、低入熱接合において独自の価値を発揮し、特に精密金属やセラミックスの接合に適しています。ろう付けは、フィラーを溶融させることでこれを実現します。タングステン銅電極は、中程度のタングステン含有量で真空含浸プロセスを使用して製造されます。タングステン粉末が骨格を形成し、銅が液相浸透によってフィラーに浸透します。熱間静水圧加圧により微細構造が最適化され、低多孔性と均一な相分布が確保されます。銅の高い導電性と熱伝導性は安定した加熱を可能にし、タングステンの耐熱性は電極の変

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

形を防ぎます。めっきなどの表面処理は耐食性を高めます。

ろう付けでは、タングステン銅電極が電子部品や航空宇宙部品の接合に使用されます。この電極の熱管理機能は、熱を均一に分散させ、接合部の熱応力を低減し、接合強度を向上させます。タングステンは硬度が高いため、高温下でも電極の形状を維持し、微細構造の均一性により均一な加熱が保証されるため、特にマイクロ溶接や多層構造に適しています。製造工程においては、気孔制御と銅の濡れ性が浸透効率に直接影響し、切断や研磨などの後処理工程によって電極形状が最適化されます。用途としては、マイクロエレクトロニクスのパッケージングや航空宇宙製造などが挙げられます。タングステン銅電極の熱膨張係数の整合により基板への応力が低減され、不活性雰囲気などの環境制御により酸化が防止されます。

6.3.3 溶接分野における応用上の利点

溶接におけるタングステン銅電極は、その複合材料特性と最適化された製造プロセスにより、高熱・高電流環境において優れた性能を発揮します。溶接には、導電性、熱伝導性、そして耐久性を備えた電極が求められます。タングステン銅電極は、低～中程度のタングステン含有量によってこの導電性を実現します。銅の高い導電性は効率的な電流伝達を保証し、タングステンは高い融点によって高温衝撃への耐性を提供します。粉末冶金法は低気孔率の微細構造を形成し、熱間等方圧加圧法は界面接合を強化します。めっきなどの表面処理は耐候性を高めます。

応用上の利点は、まず電気伝導性と熱伝導性です。タングステン銅電極の銅相ネットワークは、抵抗加熱の影響を低減し、接合品質を向上させ、熱を均一に分散させることで熱影響部を減少させ、特に高周波溶接に適しています。次に、耐高温性と耐アーク侵食性により、耐用年数が延長されます。タングステンの硬度は繰り返し作業をサポートし、表面損失を低減し、複雑な作業条件にも適応します。最後に、耐凝着性と機械的強度により、多様な用途に対応します。微細構造の靱性により、ひび割れのリスクが低減され、表面処理により溶接スラグの付着が低減されます。

応用分野としては、自動車産業や電子機器製造などが挙げられます。タングステン銅電極の熱管理機能は溶接効率を高め、冷却システムと環境制御によって性能をさらに最適化します。

6.4 航空宇宙および軍事産業におけるタングステン銅電極の応用

航空宇宙および軍事分野におけるタングステン銅電極は、極限環境下でも優れた性能を発揮し、高い耐久性と信頼性が求められる重要部品に広く使用されています。タングステンは高い融点と硬度を有し、銅は高い電気伝導性と熱伝導性を兼ね備えているため、ロケットエンジンや誘導部品に最適な材料です。粉末冶金や真空浸透などの製造プロセスにより、電極の低多孔性と均一な微細構造が確保され、さらに熱間静水圧プレスにより耐熱疲労性と機械的強度が最適化されます。航空宇宙および軍事分野におけるタングステン銅電極の応用は、深宇宙探査、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ミサイル技術、防衛機器などのニーズを満たしており、その性能上の利点は特に高温・高応力条件下で顕著です。

6.4.1 ロケットエンジン関連部品への応用

ロケットエンジン部品に使用されるタングステン銅電極は、高温・高圧環境において独自の価値を発揮し、特に推進システムや燃焼室の製造に適しています。ロケットエンジンは、極度の熱負荷下でも安定性を維持する必要があります。タングステン銅電極は、高タングステン含有量の材料を用いて真空含浸プロセスで製造されます。タングステン粉末が固体骨格を形成し、銅が液体含浸によって材料に浸透します。熱間静水圧加圧処理により微細構造が最適化され、低多孔性と均一な相分布が確保されます。銅の高い導電性と熱伝導性は効率的な熱管理をサポートし、タングステンは耐高温性により溶融を防ぎます。めっきなどの表面処理により耐腐食性が向上します。

ロケットエンジンでは、ノズルや燃焼室ライニングにタングステン銅電極が使用されています。その耐高温性により、高温のガス流から保護され、構造の完全性を維持します。微細構造の均一性により、均一な熱分布が確保され、熱応力が低減されます。タングステンの硬度は長期使用を可能にし、銅の熱伝導性は放熱を促進し、部品寿命を延ばすため、特に高推力エンジンに適しています。製造工程においては、気孔率の制御と原材料の純度が浸透効率に直接影響します。切断や研削などの後加工技術により、形状精度が最適化され、複雑な形状にも対応できます。使用シナリオには、宇宙打ち上げや深宇宙探査が含まれます。タングステン銅電極の機械的強度は高圧環境に耐え、不活性雰囲気などの環境制御により酸化を防止します。

6.4.2 ガイダンスコンポーネントへの適用

誘導部品におけるタングステン銅電極は、精密制御と耐振動性において重要な役割を果たし、特にレーダーアンテナやナビゲーションシステムの製造に適しています。誘導部品には高い精度と信頼性が求められます。タングステン銅電極は、中程度のタングステン含有量の粉末冶金プロセスを用いて製造されます。タングステン粉末を銅粉末と混合し、焼結することで導電性ネットワークを形成します。熱間静水圧プレスにより微細構造が最適化され、低多孔性と均一な相分布が確保されます。銅の高い導電性は信号伝送をサポートし、タングステンの硬度は耐振動性を高めます。研磨などの表面処理により、接触品質が向上します。

誘導部品では、タングステン銅電極が電気接点またはヒートシンクとして使用されています。電極の熱伝導性は熱を均一に分散させ、電子部品の過熱を軽減します。微細構造の強靭性は機械的衝撃に対する耐性を備えており、特に高速航空機に適しています。タングステンの耐摩耗性は長期安定性を確保し、銅の導電性は信号品質を最適化し、複雑な電磁環境にも適応します。製造工程では、原材料の混合と焼結パラメータが電極の性能に直接影響を及ぼし、研磨などの後処理工程によって寸法精度が確保されます。ミサイル誘導や衛星航法などの用途に用いられます。タングステン銅電極の熱膨張係数の整合により基板へのストレスが軽減され、防塵処

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

理などの環境制御により信頼性が向上します。

6.4.3 航空宇宙および軍事産業における応用上の利点

航空宇宙および軍事用途におけるタングステン銅電極は、その複合特性と最適化された製造プロセスにより、高温・高応力環境下でも優れた性能を発揮します。航空宇宙および軍事用途では、耐熱性、導電性、機械的強度を備えた電極が求められます。タングステン銅電極は、高いタングステン含有量によって耐熱性を高め、タングステンの硬度によって過酷な条件への耐性を確保し、銅の高い導電性によって効率的な電流または信号伝送を実現します。粉末冶金によって低多孔性の微細構造が形成され、熱間静水圧加圧によって界面接合が強化されます。めっきなどの表面処理によって耐候性が向上します。

アプリケーションの利点は、まず耐熱性に表れています。タングステン銅電極の耐熱性は、高温環境下におけるロケットエンジンや誘導部品の安定した動作をサポートし、材料損失を低減し、耐用年数を延ばします。次に、導電性と熱伝導性の組み合わせが性能を最適化します。銅相の熱分散は局所的な過熱を軽減し、電子部品や信号伝送の効率を向上させ、特に高精度アプリケーションに適しています。さらに、機械的強度と耐振動性は複雑な動作条件をサポートし、微細構造の靱性は亀裂のリスクを低減し、表面処理は耐久性を高めます。使用シナリオには、宇宙打ち上げや防衛機器が含まれます。タングステン銅電極の熱管理機能は部品の信頼性を高め、環境制御および冷却システムは性能をさらに最適化します。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.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 タングステン銅電極の品質管理と試験基準

タングステン銅電極は、原料の選別から完成品の加工に至るまで、全製造工程において厳格なプロセスが求められます。原料工程では、タングステンおよび銅粉末の純度、粒径、均一性を検証し、過剰な不純物が電極の導電性や耐熱性に影響を与えないようにする必要があります。成形および焼結工程では、加圧密度、焼結温度、保持時間を制御することで、内部構造の緻密化、顕著な気孔や亀裂の防止、使用中の摩耗リスクの最小化を実現する必要があります。さらに、加工工程では、特に精密放電加工（EDM）に使用する電極の場合、寸法精度と表面粗さの監視が不可欠です。

試験基準に関しては、タングステン銅電極は品質を検証するために複数の性能試験を受ける必要があります。物理的には、密度、硬度、導電性を試験し、アプリケーションシナリオの基本性能要件を満たしていることを確認します。構造的完全性は、金属顕微鏡または超音波検査を用いて検査され、強度に影響を与える内部欠陥は厳重に排除されます。特殊なシナリオでは、実際の動作条件での摩耗をシミュレートするために、耐アーク摩耗試験と高温安定性試験も必要です。国際的には ASTM 規格が、国内では GB/T 規格が参照されることが多いです。一部のハイエンドアプリケーションでは、より厳しい要件を満たすためにカスタマイズされた規格が採用されることもあります。

7.1 タングステン銅電極の主要指標の検出

タングステン銅電極は、物理的、熱的、電気的な伝導性といった側面において、その性能と信頼性を確保する上で極めて重要です。科学的な試験方法と標準化されたプロセスを通じて、メーカーは電極が特定の用途要件を満たしていることを検証できます。タングステン銅電極は粉末冶金法または真空浸透法で製造され、その微細構造と組成分布が性能に直接影響を及ぼします。熱間等方圧加圧法は、その均一性をさらに最適化します。試験プロセスでは、電極の密度、熱伝導率、電気特性を評価するために、様々な機器と環境制御が用いられます。これらはすべて、放電加工、高電圧電気機器、溶接などの分野で非常に重要です。今後、試験技術の進歩により、さらに洗練された品質管理が実現されるでしょう。

7.1.1 タングステン銅電極の物理的特性試験

タングステン銅電極は品質管理の中核を担い、密度、構造的完全性、機械的特性を評価して、その後の用途の基礎を築きます。物理的特性は、電極作製の品質と微細構造特性を反映します。タングステンの高い硬度と銅の延性は、試験を困難にします。試験は通常、密度、多孔性、表面形態など、複数のパラメータを含む、特殊な装置と標準化された手順を用いて実験室で実施されます。熱間静水圧プレスに最適化された電極は高い物理的安定性を示し、これらの試験結果はプロセス改善の指針となり、高負荷環境や高温環境における電極の信頼性を確保します。

7.1.1.1 密度試験方法および規格

電極の物理的特性試験の出発点です。その目的は、電極の単位体積あたりの質量を測定し、そ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の緻密さと細孔分布を反映することです。密度は電極の機械的強度と導電性に直接影響します。試験では通常、アルキメデス法または置換法が採用され、電極を液体に浸し、重量の変化を測定することで密度を計算します。アルキメデス法では、残留液体が結果に影響を与えないように、電極表面を清潔に保つ必要があります。一貫した測定値を確保するには、操作中に温度と湿度を管理する必要があります。正確な計量と液体の置換によって実現される置換法は、複雑な形状の電極に適しており、高精度の天秤が必要です。

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と多点測定が含まれます。サンプルは異なるバッチからランダムに抽出され、代表的な領域が切り取られて均一性が評価されます。試験環境は外部からの干渉を避けるため、安定していなければなりません。試験結果は、焼結温度や圧力などのプロセスパラメータと相関関係があります。品質管理担当者は、業界標準に基づいて密度範囲を設定します。これらの範囲外の電極については、製造工程まで遡って調査し、粉末の混合条件や浸透条件を調整する必要があります。研磨などの表面処理は、密度試験を補助し、表面欠陥の影響を軽減するのに役立ちます。

7.1.1.2 熱性能試験方法および規格

熱性能試験方法と規格は、タングステン銅電極の熱管理能力を評価する上で重要です。これらの試験では、熱伝導率と熱膨張特性を測定します。熱性能は、高温環境における電極の安定性と放熱効率に直接影響します。試験は通常、熱流計またはレーザーフラッシュ法を用いて行われます。熱流計法は、熱流センサーを用いて熱伝達を測定するもので、一定温度動作を必要とするバルク電極の熱伝導率の評価に適しています。レーザーフラッシュ法は、短いパルスでサンプル表面を加熱し、熱拡散時間を測定します。薄いシートや繊細な部品に適しており、非常に高感度の装置が必要です。

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と環境管理が含まれます。サンプルは表面粗さが測定に影響を与えないように、平坦に研磨する必要があります。試験環境は高温などの実際の動作条件をシミュレートする必要があり、多点測定によって代表性の高いデータが得られます。熱性能の結果は微細構造と相関関係があります。熱間静水圧プレスに最適化された電極は優れた熱安定性を示し、試験データはプロセス調整の指針となります。品質管理担当者は、業界標準に基づいて熱性能の閾値を設定します。これらの閾値から外れた電極については、銅含有量または気孔率の分布を最適化する必要があります。

7.1.1.3 導電率試験方法および規格

導電率試験法と標準規格は、タングステン銅電極の電気特性評価において中心的な役割を果たします。これらの試験では、抵抗率と導電率を測定することで、効率的な電流伝達を確保します。導電率は、EDM（放電加工）や高電圧電気アプリケーションにおける電極の性能に直接影響します。試験には通常、4端子法またはブリッジ法が用いられます。4端子法は、複数の電極点でサンプルに接触することで接触抵抗の影響を最小限に抑えるため、高精度測定に適しており、定電流動作が求められます。ブリッジ法は、ブリッジ回路を用いて抵抗値を比較するため、複雑な電極形状に適しており、高感度な計測機器が求められます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と環境管理が含まれます。サンプルは、結果への幾何学的影響を防ぐため、標準寸法に切断する必要があります。試験環境は電磁干渉から遮断され、温度と湿度が一定に保たれる必要があります。多点測定により、導電率の一貫性が確保されます。導電率は、微細構造と銅含有量と密接に関連しています。熱間等方圧加圧（HIP）によって最適化された電極は、優れた導電率の均一性を示し、試験データは比率調整の指針となります。

7.1.2 タングステン銅電極の化学的性能試験

タングステン銅電極は品質管理において極めて重要な構成要素です。組成分布、耐食性、不純物含有量を評価することで、様々な環境下における電極の化学的安定性と耐用年数を確保します。化学的特性は、電極の耐酸化性、耐食性、そして長期的な信頼性に直接影響します。試験は通常、高度な分析技術と標準化された操作手順を用いて、実験室環境で実施されます。タングステンの高い化学的安定性と銅の活性特性により、多様な試験手順が可能になります。熱間静水圧プレスに最適化された電極は、優れた化学的均一性を示します。試験結果は、原材料の選定とプロセス改善の指針となります。

7.1.2.1 成分分析法

組成分析法は、タングステン銅電極の化学的特性を試験するための基礎となります。タングステンと銅の比率、および他の微量元素の含有量を測定し、その比率が設計要件を満たしていることを確認することを目的としています。このプロセスでは、通常、分光分析または化学滴定法が用いられます。蛍光 X 線分光法（XRF）や誘導結合プラズマ発光分光法（ICP-OES）などの分光分析法は、サンプルから放出されるスペクトル特性に基づいて元素組成を特定できるため、迅速な試験に適しています。化学滴定法は、標準溶液とサンプルの反応を利用してタングステンと銅の含有量を正確に測定するため、高精度の滴定装置が必要です。

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と多点サンプリングが含まれます。サンプルは電極のさまざまな部分から切り取り、均一な粉末に粉砕して代表性を確保する必要があります。試験環境の湿度は、サンプルの酸化や吸湿を防ぐために管理する必要があります。オペレーターは化学試薬を取り扱う際に安全規制に従う必要があります。組成分析の結果は、準備プロセスに関連しています。たとえば、粉末の混合均一性と浸透条件は、最終的な比率に直接影響します。品質管理担当者は、製品仕様に従って組成範囲を設定します。範囲を超える電極は、原材料バッチを追跡するか、プロセスパラメータを調整する必要があります。研磨などの表面処理は、表面汚染の影響を軽減できます。将来的には、ポータブル分光計や自動分析システムを導入することで、組成検出の効率と精度を向上させることができます。

7.1.2.2 耐食性試験方法

耐食性試験方法は、酸性、アルカリ性、または高湿度環境におけるタングステン銅電極の化学的安定性を評価する上で重要であり、産業用途における長期的な性能確保を目的としています。このプロセスには通常、塩水噴霧試験または浸漬試験が含まれます。塩水噴霧試験は、腐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

食性大気環境をシミュレートし、電極表面の変化を観察します。この試験は専用の塩水噴霧チャンバーで実施する必要があります。一方、浸漬試験では、希硫酸や塩化ナトリウム溶液などの特定の腐食性溶液に電極を浸し、表面腐食の程度と質量減少を定期的に確認します。この試験には恒温装置が必要です。標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と環境管理が含まれます。初期欠陥が結果に影響を与えないように、サンプルは均一な表面になるまで研磨する必要があります。試験サイクルはアプリケーション要件に応じて設定され、複数のサンプルグループを並行して試験することで一貫性を検証します。耐食性の結果は、微細構造と表面処理に関連しています。熱間静水圧プレスプロセスによって最適化された電極は、優れた耐食性均一性を示します。試験データは、めっきまたはコーティングプロセスの指針となります。品質管理担当者は、業界標準に従って腐食速度を評価します。範囲外の電極については、銅含有量を最適化するか、耐食処理を導入する必要があります。

7.1.2.3 不純物含有量試験基準

不純物含有量試験規格は、タングステン銅電極の化学的純度を確保する上で重要です。酸素、硫黄、その他の微量元素の影響を特定・制御し、性能への悪影響を防ぐことを目的としています。このプロセスでは、通常、燃焼法または質量分析法が用いられます。燃焼法は、高温で試料を分解し、放出される酸素または窒素の量を測定するため、赤外吸収分光計が必要です。質量分析法は、試料をイオン化することで元素組成を分析するため、微量不純物の検出に適しており、高分解能質量分析計が必要です。標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と環境管理が含まれます。サンプルは異なるバッチからランダムに抽出され、粉碎され、表面の水分を除去するために乾燥されます。試験環境は外部からの汚染がなく、作業者は高温機器を取り扱う際に安全規則を遵守する必要があります。不純物含有量の結果は、原材料の純度と準備環境に関連しています。熱間静水圧プレスに最適化された電極は、不純物レベルが低くなっています。試験データは、原材料の選別とプロセスの最適化に役立ちます。品質管理担当者は、業界標準に基づいて不純物の閾値を設定します。この範囲を超える電極は、粉末の純度を調整するか、精製工程を導入する必要があります。

7.1.3 タングステン銅電極の機械的特性試験

タングステン銅電極は品質管理において極めて重要な構成要素であり、硬度、強度、靱性を評価することで、高荷重や衝撃下における信頼性を確保します。機械的特性は、電極の変形、破損、エネルギー吸収に対する耐性を反映します。試験は通常、専用の機器と標準化された手順を用いて実験室で実施されます。タングステンの高い硬度と銅の延性により、多様な試験手順が可能になります。熱間静水圧プレス用に最適化された電極は優れた機械的均一性を示し、これらの試験結果はプロセス改善や用途選定の指針となります。

7.1.3.1 硬度試験方法と規格

硬度試験法と規格は、タングステン銅電極の機械的性能試験の基本です。これらの試験は、表面の圧痕や摩耗に対する耐性を測定し、加工中または使用中の電極の耐久性を確保すること

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を目的としています。このプロセスでは、通常、ピッカース硬さ法またはロックウェル硬さ法のいずれかが用いられます。ピッカース硬さ法では、ダイヤモンド圧子をサンプル表面に押し付け、圧痕の形状を観察します。この方法は硬質材料の試験に適しており、高精度の顕微鏡が必要です。ロックウェル硬さ法では、圧子の侵入深さを測定することで、硬度の変化を迅速に評価します。大規模な試験に適しており、標準的な試験機が必要です。

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と多点測定が含まれます。初期欠陥が結果に影響を与えるのを避けるため、電極のさまざまな部分からサンプルを切り出し、平坦な表面に研磨する必要があります。試験環境では、熱膨張や表面酸化による干渉を防ぐために、温度と湿度を制御する必要があります。作業者は安全規制に従って機器を操作する必要があります。硬度の結果は、微細構造とタングステン含有量に関連しています。熱間静水圧プレスプロセスの最適化後の電極は、良好な硬度均一性を示し、試験データは比率調整のガイドとなります。品質管理担当者は、業界標準に従って硬度範囲を設定します。範囲外の電極は、焼結または後処理プロセスを最適化する必要があります。研磨などの表面処理は、硬度試験に役立ちます。将来的には、自動硬度計や画像解析の導入により、検出効率と精度を向上させることができます。

7.1.3.2 強度試験方法および規格

タングステン銅電極の圧縮強度と引張強度を評価し、高い機械的応力下における安定性を確保する上で重要です。このプロセスには通常、圧縮試験または引張試験が含まれます。圧縮試験は、圧力をかけてサンプルの変形限界を測定するもので、ブロック電極に適しており、万能試験機が必要です。引張試験は、破断するまで引張力を加えることで引張強度を評価するもので、棒状またはシート状の電極に適しており、専用の治具を使用する必要があります。

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と環境管理が含まれます。サンプルは、形状の一貫性を確保するために標準寸法に加工する必要があり、応力集中を避けるために切込みは滑らかにする必要があります。試験環境は、温度変動が材料特性に影響を与えないように一定の温度を維持する必要があります。均一性を検証するために多点測定が行われます。強度の結果は、微細構造と準備プロセスに関連しています。熱間等方圧加圧（HIP）用に最適化された電極は高い圧縮安定性を示し、試験データは圧力と焼結パラメータの調整に役立ちます。品質管理担当者は、業界標準に基づいて強度の閾値を設定します。この範囲外の電極については、粉末の粒子サイズまたは浸透条件を最適化する必要があります。

7.1.3.3 靱性試験方法および規格

電極の破壊抵抗とエネルギー吸収能力を評価する上で、靱性試験の方法と規格は重要であり、衝撃や熱サイクルに対する信頼性を確保することを目的としています。このプロセスには通常、衝撃試験または破壊靱性試験が含まれます。衝撃試験では、振り子でサンプルを叩き、吸収エネルギーを測定します。これは耐衝撃性の評価に適しており、標準的な振り子試験機が必要です。一方、破壊靱性試験では、事前に作成した亀裂に荷重をかけ、その伝播挙動を分析します。これは精密部品の試験に適しており、高精度の荷重試験装置が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と環境管理が含まれます。サンプルは指定された形状に機械加工され、予亀裂は標準要件を満たす必要があります、表面は初期欠陥を低減するために研磨する必要があります。振動や温度変動が結果に影響を与えないように、試験環境は安定していなければなりません。代表性を確保するために、複数のサンプルグループを並行して試験します。靱性の結果は、微細構造と銅含有量に関連しています。熱間等方圧プレスプロセスによって最適化された電極は、優れた靱性均一性を示します。試験データは、相分布の調整に役立ちます。

7.2 タングステン銅電極の微細構造検査

タングステン銅電極の微細構造試験は、品質管理において極めて重要なステップであり、内部構造特性を分析することで、製造工程の有効性と材料特性を評価することを目的としています。微細構造は、電極の機械的強度、導電性、耐久性に直接影響します。試験は通常、高度な顕微鏡技術と標準化された操作手順を用いて、実験室で実施されます。タングステン銅電極は、粉末冶金法または真空浸透法によって製造されます。その微細構造は、タングステンの骨格と銅の相分布で構成されています。熱間静水圧プレスにより、均一性と密度がさらに最適化されます。検査プロセスには、金属組織分析、相分布の均一性評価、粒径測定などが含まれます。これらはすべて、放電加工、高電圧電気機器、溶接などの分野において重要な指標です。

7.2.1 金属組織分析

金属組織学的分析は、タングステン銅電極の微細構造試験の中核を成すものであり、内部構造の特徴を観察することで材料の品質と一貫性を評価することを目的としています。このプロセスでは、光学顕微鏡または走査型電子顕微鏡（SEM）などの顕微鏡技術を用いて、電極の相構造、細孔分布、界面結合を明らかにします。金属組織学的分析は、未充填の細孔や相分離といった製造工程における欠陥の特定に役立ちます。熱間等方圧プレスに最適化された電極は、優れた構造均一性を示します。この結果は、高負荷または高温下でも安定した電極性能を確保するためのプロセス調整に役立ちます。

7.2.1.1 金属組織学的サンプルの準備

金属組織学的サンプルの準備は、金属組織学的分析における基本的なステップであり、サンプル処理を通して顕微鏡観察に適した滑らかな断面を得ることを目的としています。このプロセスは通常、切断、研磨、研磨という複数の段階から構成されます。切断では、金属組織学的カッターを用いて電極を薄いスライスに切断しますが、材料の損傷を防ぐため、適切な切削工具を選択する必要があります。研磨では、様々な粒度のサンドペーパーを用いて表面粗さを徐々に除去し、圧力と方向を制御することで滑らかな断面を確保します。研磨では、表面仕上げをさらに向上させるためにダイヤモンド懸濁液またはアルミナ研磨ペーストを使用しますが、汚染を防ぐため、無塵環境で実施する必要があります。

銅の相構造を明らかにするために、適切な化学試薬を用いて断面をエッチングすることも含まれます。エッチング時間と試薬濃度は、材料特性に応じて調整されます。熱間静水圧プレス

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（HIP）用に最適化された電極は、観察に影響を与える可能性のある過度の腐食を防ぐため、表面保護に特別な注意を払う必要があります。調製中は温度や湿度などの環境管理が重要であり、サンプルは酸化を防ぐために乾燥した状態で保管する必要があります。品質管理担当者は、業界標準に従って調製物の品質を検証します。傷やひび割れなどの欠陥は分析結果を歪める可能性があります。

7.2.1.2 位相分布均一性の評価基準

相均一性評価は、金属組織分析における重要なステップであり、電極内のタングステンと銅の分布を評価して安定した性能を確保することを目的としています。このプロセスでは、顕微鏡で断面画像を観察し、画像処理ソフトウェアを使用して相構造の均一性を分析します。定量評価は、通常、グリッド法またはポイントカウンティング法のいずれかを使用して行われます。グリッド法では、断面を複数の領域に分割し、各領域の相比を計算します。ポイントカウンティング法では、高解像度の画像システムを使用して、ランダムサンプリングによりタングステンと銅の分布密度を計算します。

標準化された評価プロセスには、サンプルの選択とマルチポイント分析が含まれます。サンプルは、代表性を確保するために異なるバッチと場所から選択する必要があります。分析は断面の複数の領域をカバーして均一性を検証する必要があります。熱間静水圧プレスプロセスによって最適化された電極は、より優れた相分布を示します。テスト結果は、浸透プロセスと粉末の混合に関連しています。局所的な濃縮やボイドなどの欠陥は、パフォーマンスに影響を与える可能性があります。品質管理担当者は、業界標準に基づいて均一性のしきい値を設定します。範囲を超える電極は、原料の粒子サイズまたは焼結条件を調整する必要があります。振動を避けるなどの環境制御により、鮮明な画像が保証されます。将来的には、人工知能分析や3次元画像技術を導入することで、相分布評価の精度と包括性を向上させることができます。

7.2.1.3 粒度検出

粒度試験は金属組織分析において重要な要素であり、タングステンおよび銅の結晶粒の大きさを測定し、電極性能への影響を評価することを目的としています。このプロセスでは、エッチングされた断面を顕微鏡で観察し、標準線切片法または自動画像解析法のいずれかを使用します。標準線切片法ではランダムな直線を用いて結晶粒の断面をプロットしますが、自動画像解析法ではソフトウェアを用いて粒界を特定するため、高倍率の顕微鏡が必要となります。

標準化された検査プロセスには、サンプルの準備と複数領域の測定が含まれます。サンプルは研磨およびエッチングして、粒界が明確に見えるようにする必要があります。均一性を評価するには、断面のさまざまな部分を測定する必要があります。熱間静水圧プレスプロセスの最適化後、電極の粒径はより安定しています。テスト結果は焼結温度と時間と密接に関連しています。粒子が大きすぎる、または不均一な場合、性能が低下する可能性があります。品質管理担当者は、業界標準に従って粒径の範囲を設定します。範囲を超える電極は、焼結パラメータを最適化するか、精製技術を導入する必要があります。一定温度などの環境制御は、熱膨張の影響を回避します。将来的には、ナノスケール顕微鏡や動的イメージング技術を導入することで、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

粒径検出の精度とリアルタイム性能を向上させることができます。

7.2.2 タングステン銅電極の欠陥検出

タングステン銅電極は、微細構造検査の重要な要素であり、気孔、亀裂、介在物などの欠陥を特定・評価することで、電極の品質と信頼性を確保することを目的としています。欠陥は性能低下や耐用年数の短縮につながる可能性があります。試験は通常、実験室環境で、非破壊検査または破壊検査法と標準化された判定手順を組み合わせることで実施されます。粉末冶金や真空浸透などのタングステン銅電極の製造プロセスでは、欠陥が発生する可能性があります。熱間等方圧加圧（HIP）は、微細構造を最適化することでこれらの欠陥を低減します。試験結果はプロセス改善に役立ち、高負荷または過酷な環境下でも安定した電極性能を確保します。

7.2.2.1 気孔率の検出方法と許容範囲

タングステン銅電極における欠陥検出には、気孔検出方法と許容範囲が不可欠です。これらの検査は、内部の空隙を特定し、材料特性への影響を評価することを目的としています。気孔は焼結または浸透中に発生し、電極の密度と導電性に影響を与える可能性があります。検出は通常、X線検査または超音波検査を用いて行われます。X線検査は透過画像を用いて内部の空隙の分布を可視化します。複雑な電極に適しており、高解像度の画像化システムが必要です。超音波検査は音波の反射を利用して内部の空隙を分析します。大型電極に適しており、特殊なプローブと信号処理装置が必要です。

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と多角度スキャンが含まれます。干渉を低減するため、サンプル表面は清浄でなければなりません。また、試験は電極の様々な部位を網羅することで、網羅性を確保します。熱間静水圧プレス（HIP）用に最適化された電極は、気孔率が低くなります。試験結果は、粉末粒子サイズや浸透条件など、気孔形成に直接影響を与える準備プロセスと関連しています。品質管理担当者は、業界標準に基づいて許容気孔率の範囲を設定します。この範囲を超える電極は、焼結温度の調整または真空処理の導入が必要です。

7.2.2.2 ひび割れ検出方法と基準

タングステン銅電極の内部破損リスクを評価する上で、ひび割れ検出方法と基準は重要です。これらの検査は、熱応力または機械的応力によって引き起こされる欠陥を特定することを目的としています。焼結、冷却、または後処理中にひび割れが発生する可能性があり、電極の機械的強度と耐用年数に影響を与えます。検出は通常、浸透探傷試験または磁粉探傷試験によって行われます。浸透探傷試験は、染料の浸透を通して表面のひび割れを検出するため、表面洗浄が必要な複雑な形状に適しています。磁粉探傷試験は、磁場と磁性粒子を用いて内部のひび割れを検出するため、強磁性材料に適しており、磁化装置が必要です。

標準化された試験プロセスには、サンプルの前処理と多点検査が含まれます。表面汚染を除去し、重要な電極領域を検査して完全性を検証する必要があります。熱間等方圧加圧（HIP）用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に最適化された電極は、ひび割れが少なくなります。試験結果は冷却速度と圧力条件と相関関係があり、微小ひび割れなどの欠陥は拡大検査が必要となる場合があります。品質管理担当者は、業界標準に基づいてひび割れ判定基準を設定します。これらの基準を超える電極は、焼結プロセスの最適化、または応力緩和処理の導入が必要です。

7.2.2.3 介在物検出方法および管理基準

介在物検出方法と管理基準は、タングステン銅電極の純度を確保する上で重要です。これらの目的は、原材料に混入した異物や製造工程中に混入した異物を特定することです。介在物には、電極の導電性と耐腐食性に影響を与える酸化物や未溶融粉末が含まれる場合があります。検出は通常、分光分析または電子顕微鏡を用いて行われます。分光分析は、サンプルから放出されるスペクトルシグネチャを分析することで介在物元素を検出します。これは迅速なスクリーニングに適しており、高感度の機器が必要です。一方、電子顕微鏡は、高倍率画像を通して介在物の形態を分析するため、詳細な分析に適しています。エネルギー分散型分光計を使用する必要があります。

標準化された試験プロセスには、サンプルの準備と多領域分析が含まれます。サンプルはスライスして平らな面に研磨する必要があるため、代表性を確保するために電極のさまざまな部分をテストでカバーする必要があります。熱間静水圧プレスプロセスを最適化すると、電極の介在物が少なくなります。試験結果は、原材料の純度と混合物の均一性に関連しています。局所的な異物などの欠陥については、さらに断面分析が必要になる場合があります。品質管理担当者は、業界標準に従って介在物管理基準を設定します。範囲を超える電極は、粉末源を調整するか、ろ過プロセスを導入する必要があります。防塵処理などの環境管理により、二次汚染を回避できます。将来的には、オンライン監視や自動検出技術を導入することで、介在物検出のリアルタイム性と精度を向上させることができます。

7.3 タングステン銅電極の業界標準

タングステン銅電極は、製造、試験、そして適用プロセス全体にわたり、一貫した品質と性能を確保するために不可欠です。関係する権威ある機関によって策定されたこれらの規格は、タングステン銅電極の製造プロセスおよび適用要件と相まって、製造業者とユーザーが技術仕様と安全性を確保するための指針となります。タングステン銅電極は粉末冶金法または真空浸透法によって製造され、その微細構造と性能は業界の要件を満たす必要があります。熱間静水圧プレスにより、その一貫性はさらに最適化されます。業界規格には、材料組成、性能指標、欠陥管理など、関連する国内規格と特定の要件が含まれており、放電加工（EDM）、高電圧電気機器、溶接などの分野に技術サポートを提供します。

7.3.1 関連する国内規格

関連する国内規格は、タングステン銅電極の製造と応用に関する統一的な技術的枠組みを提供し、中国の材料科学と工業製造における最新の進歩を反映しています。これらの規格は、中国国家標準化局と業界団体が共同で策定したもので、電極の製造、試験、使用を網羅しており、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製品の品質と国際競争力の向上を目指しています。粉末冶金法や真空浸透法といったタングステン銅電極の製造プロセスは、これらの規格に準拠する必要があります。熱間等方圧加圧（HIP）によって最適化された電極は、適合性を確認するための試験を受ける必要があります。

7.3.1.1 中国規格の関連規定

中国規格は、主に中国標準化管理局によって発行されており、タングステン銅電極の品質管理と適用に関する具体的な法的小および技術的根拠を提供しています。これらの規制には、「銅タングステンおよび銀タングステン電気接点」や「銅タングステン電気接点の欠陥検出方法」などの国家規格が含まれており、組成要件、性能指標、および欠陥検出仕様が規定されています。製造工程では、タングステンと銅の比率が規格を満たすようにする必要があります。試験には物理的、化学的、および機械的特性が含まれており、熱間静水圧プレスによって最適化された電極は、微細構造試験を受ける必要があります。これらの規格では、製造業者に品質管理システムの構築、原材料および完成品の定期的な試験、コーティングなどの表面処理が耐腐食性要件を満たすようにすることが求められています。

これらの規制は電気合金分野に適用され、高電圧電気機器および放電加工における電極の安定性を重視し、企業に欠陥低減のための先進プロセスの導入を奨励しています。国家電気合金標準化技術委員会などの業界団体が規格の起草を担当しています。主要組織には、中国の技術力を代表する桂林電気科学研究所と温州鴻鋒電気合金有限公司が含まれます。また、規格では、多様な用途シナリオへの適合性を確保するために、明確な製品ラベルとそれに付随する安全指示を義務付けています。

7.3.1.2 業界標準の要件

業界標準は、主に工業情報化部または関連業界団体によって策定され、タングステン銅電極の特定の用途に関する詳細な技術仕様を規定しています。「タングステン銅合金板」などの業界標準を含むこれらの要件は、材料特性、加工技術、および動作条件に重点を置いており、企業が市場の需要を満たす電極を製造できるよう指針となっています。製造工程では、粉末の粒子サイズと焼結パラメータを適切に制御する必要があります。熱間静水圧プレスによって最適化された電極は、強度と導電性の要件を満たす必要があります。切断や研磨などの後加工工程では、形状精度を確保する必要があります。業界標準では、放電加工におけるアーク浸食への耐性、溶接における効率的な熱伝導性、高電圧電気機器における耐高温性を維持することが電極に求められています。試験は微細構造、欠陥、性能指標を網羅する必要があり、メーカーはプロセスパラメータと試験結果を記録するためのバッチ検査システムを確立する必要があります。これらの標準はまた、グリーン生産を促進し、廃棄物の排出を削減し、環境保護要件に準拠しています。桂林精芸電器電子材料科技有限公司などの関連組織が標準策定に参加していることは、業界の技術レベルを反映しています。

7.3.2 関連する国際規格

電極の世界的な応用のための統一された技術的枠組みを提供し、材料科学と工業製造のさま

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

ざまな国と地域の協力とコンセンサスを反映しています。これらの規格は、国際標準化機構（ISO）などの組織によって開発されるか、または欧州、米国、日本、韓国などの主要な工業国によって、自国のニーズと開発レベルに基づいて独自に発行されます。その目的は、国際貿易と技術交流を促進することです。粉末冶金や真空浸透などのタングステン銅電極の製造プロセスは、これらの規格に準拠する必要があります。熱間等方加圧（HIP）プロセスで最適化された電極は、国際的な適合性を検証するためのテストを受ける必要があります。国際規格は、組成要件、性能テスト、およびアプリケーション仕様をカバーし、多国籍企業にガイダンスを提供し、世界市場で一貫した品質と信頼性を保証します。

7.3.2.1 国際タングステン銅電極規格

タングステン銅電極の国際規格は、主に国際標準化機構（ISO）によって開発され、タングステン銅電極の世界的な生産と応用のための統一仕様を確立することを目的としています。これらの規格は、タングステン銅材料の特性とさまざまな産業用途の多様な要件を統合し、原材料の選択から最終製品のテストまでの全プロセスを対象としています。ISO 規格は多くの場合、広範な国際協力に基づいており、ヨーロッパ、米国、日本、韓国などの国の技術的専門知識を取り入れて、世界的な適用性を保証しています。タングステン銅電極は、粉末冶金または真空浸透プロセスによって製造されます。その微細構造と特性は、ISO 指定の成分比と物理的特性に準拠する必要があります。熱間等方圧プレス（HIP）によって最適化された電極は、国際要件を満たすために厳格な性能テストを受ける必要があります。タングステン銅電極に関連する ISO 規格は、主に材料の準備、性能評価、および品質管理を扱っています。例えば、規格では、導電性、耐熱性、機械的強度のバランスをとるために、用途に応じてタングステンと銅の比率を調整する必要があると規定されています。製造工程では、粉末の粒子サイズ、焼結条件、浸透技術を精密に制御し、電極内の低多孔性と均一な相分布を確保する必要があります。試験に関しては、ISO 規格では、X 線や超音波検査などの高度な非破壊検査技術を用いて内部欠陥を特定し、電極の密度、導電性、硬度、耐食性を包括的に評価することが求められています。熱間静水圧プレスプロセスは、材料の密度と性能の一貫性を向上させる上で重要な役割を果たしており、試験結果は国際的に認められた性能基準と比較する必要があります。

これらの規格は、特に放電加工、高電圧電気機器、溶接などの分野に適用され、過酷な条件下での電極の安定性と耐久性を重視しています。ISO 規格はまた、環境に配慮したプロセスの使用を奨励し、生産時の廃棄物の排出を削減し、持続可能な開発における世界的な潮流に適応します。

7.3.2.2 欧州、アメリカ、日本、韓国およびその他の国におけるタングステン銅電極規格

ヨーロッパ、米国、日本、韓国などの国のタングステン銅電極規格は、各地域の産業技術開発と応用ニーズの独自の特徴を反映しています。これらの規格は、それぞれの国の標準化機関によって策定され、異なる技術的伝統と市場志向を反映しています。米国の規格は主に米国溶接協会（AWS）と米国材料試験協会（ASTM）によって発行され、欧州の規格は欧州標準化委員会（CEN）によって策定され、日本の規格は日本工業標準調査会（JISC）によって発行され、韓国の規格は日本の規格を参照しながら地域のニーズを取り入れています。これらの規格は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン銅電極の準備、試験、および適用に関する詳細なガイダンスを提供します。熱間等方圧加圧（HIP）によって最適化された電極は、各地域で指定された性能仕様を満たす必要があります。

米国の AWS 規格は、TIG 溶接および放電加工におけるタングステン銅電極の適用に焦点を当て、電極の組成、形状、表面処理要件を規定しています。ASTM 規格は、材料の機械的特性と耐久性に重点を置いており、航空宇宙および防衛分野に適しています。準備プロセスでは、タングステンと銅の均一な分布を確保する必要があり、テストでは硬度、導電性、アーク浸食耐性がカバーされています。熱間静水圧プレスプロセスで最適化された電極は、複数のバッチテストに合格する必要があります。欧州の CEN 規格は、環境保護と安全性を重視し、高電圧電気機器での電極の使用をカバーし、熱伝導率と耐腐食性のテストに焦点を当てており、準備プロセスでは低公害技術の使用を要求しています。テスト方法には、金属組織分析と非破壊検査が含まれます。熱間静水圧プレスプロセスで最適化された電極は、統一された市場アクセス要件を満たす必要があります。

高精度とプロセス制御で知られる日本の JIS 規格は、特に電子機器産業や自動車産業に適しています。電極の微細構造と表面品質を規定し、作製には精密機器の使用を義務付け、試験には結晶粒度と欠陥の分析が含まれます。熱間静水圧加圧（HIP）は材料の均一性を向上させる上で不可欠であり、試験結果は日本の高い基準と比較する必要があります。韓国の規格は日本の影響を受けており、現地の製造業のニーズに合わせて、溶接と電池製造における電極性能に重点を置いています。作製プロセスでは、粉末の混合と焼結条件を最適化する必要があり、試験では導電性と強度がカバーされます。HIP に最適化された電極は、変化の激しい生産環境に適応する必要があります。

これらの規格の違いは、各地域の技術的優位性と応用上の優先順位を反映しています。米国は実用性を重視し、欧州は環境保護を重視し、日本は精度を重視し、韓国は効率を重視しています。多国籍企業は、ターゲット市場に基づいて適切な規格を選択する必要があります。熱間静水圧プレスプロセスを最適化することで、複数の規格を満たす可能性が生まれます。今後、世界的な技術統合に伴い、これらの規格は、特にインテリジェント製造や新エネルギーの分野において、さらに収束していく可能性があります。タングステン銅電極の規格は、さらに国際的なものになるでしょう。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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

8.1 タングステン銅電極の産業チェーンの分析

タングステン銅電極産業チェーンは、原材料の調達から最終製品の製造までの全プロセスを網羅しており、その市場発展と技術進歩を理解する鍵となります。この分析は、産業チェーンの各リンク間の相互依存性を明らかにし、生産効率と市場競争力を最適化するための重要な基礎を提供します。タングステン銅電極は、粉末冶金または真空浸透プロセスで製造されます。その性能は、上流の原材料の品質と中流の製造プロセスの改良に依存します。熱間静水圧プレスは、製品の一貫性を向上させる上で重要な役割を果たします。産業チェーンの各段階は、技術革新、市場の需要、および政策環境の影響を受けます。今後、世界的な産業の高度化が進むにつれて、産業チェーンの協調的な発展は、タングステン銅電極の応用と拡大をさらに促進するでしょう。

8.1.1 上流原材料供給

タングステン銅電極産業チェーンの基盤は、上流の原料供給です。タングステンの採掘と銅の加工を伴い、後続の生産のための高品質な原料を提供します。この連携は、電極の組成の純度と性能の安定性を直接的に決定します。主要な原料源であるタングステン鉱石は、通常、地下採掘または露天掘りによって得られ、高純度のタングステン粉末を得るには選鉱と精製が必要です。銅は、銅鉱石の製錬またはスクラップ銅のリサイクルによって得られ、銅粉末または粉末冶金に適したバルク材料に加工されます。原料供給の信頼性は、鉱物資源の分布と採掘技術に依存しており、世界中の複数の地域が関与し、複雑な供給ネットワークを形成しています。

原料調製工程には厳格な品質管理が求められます。タングステンおよび銅粉末の粒径、純度、形態は、混合の均一性とその後のスムーズな加工を保証するために、綿密に選別されなければなりません。サプライヤーは、市場の需要変動に対応するために、下流メーカーと緊密に連携し、供給戦略を迅速に調整する必要があります。鉱物採掘の生態系への影響などの環境要因も注目を集めており、業界は持続可能な採掘と資源回収へと移行しています。熱間静水圧プレス工程では、より高い原料純度が求められるため、上流企業は精製技術とプロセスレベルの継続的な向上を促しています。今後、新エネルギー産業やハイエンド製造業の成長に伴い、上流の原料供給はより高い純度要件と、より広範な国際協力のニーズに直面することになるでしょう。

8.1.2 中流製造

中流生産・製造は、タングステン銅電極産業チェーンの中核を成すものであり、上流から提供された原材料を加工して、アプリケーション要件を満たす完成品に仕上げる役割を担っています。この段階には、粉末混合、成形、焼結、浸透などの複数のプロセスが含まれており、粉末冶金または真空浸透技術を用いて完成されます。製造プロセスでは、温度、圧力、雰囲気などのプロセスパラメータを正確に制御し、電極の微細構造密度と相分布の均一性を確保する必要があります。この段階では、熱間静水圧プレスプロセスが重要な役割を果たし、全方向圧力によって材料特性を最適化し、欠陥を減らし、製品の一貫性を向上させます。製造会社は通

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

常、さまざまなアプリケーションシナリオのカスタマイズされたニーズを満たすために、高度な設備と専門の技術チームを備えています。

製造には、電極の形状と表面品質を洗練させるための切断、研磨、表面処理などの後加工も含まれます。これらの工程では、製品が業界基準を満たすことを保証するために、高精度の工具と厳格な品質検査が求められます。製造プロセスは技術革新によって推進されており、近年ではニアネットシェイプ成形やナノパウダーの使用といった新技術が登場し、効率向上とコスト削減に貢献しています。市場需要の変化も、航空宇宙産業やエレクトロニクス産業の特定の要件に合わせてカスタマイズされた生産ラインなど、柔軟な調整を促しています。

8.1.3 下流アプリケーション市場

下流アプリケーション市場は、タングステン銅電極産業チェーンの末端であり、複数のハイテク分野での電極の実用化を網羅し、その性能上の優位性と市場の需要を反映しています。この段階には、放電加工、高電圧電気機器、溶接およびろう付け、航空宇宙および軍事用途などの産業が含まれます。タングステン銅電極は、その耐高温性、導電性、および機械的強度のために広く好まれています。粉末冶金や真空浸透などの準備プロセスにより、電極の微細構造と性能がさまざまなニーズを満たすことが保証されます。熱間等方加圧によって最適化された電極は、下流アプリケーションでより高い安定性と耐久性を示します。市場需要の変化は、下流市場の拡大と製品イノベーションを直接的に推進しています。

放電加工の分野では、タングステン銅電極は金型製造や難削材の加工に広く使用されており、特に自動車産業やエレクトロニクス産業では、高精度加工能力が求められています。企業は顧客のニーズに合わせて電極の形状と性能をカスタマイズし、研削や研磨などの後処理プロセスにより製品の品質がさらに向上します。高電圧電気機器市場では、タングステン銅電極の耐アーク浸食性を利用しており、主に送電機器や産業用制御機器に使用されています。メーカーは、高電圧環境における電極の信頼性を確保する必要があります。溶接・ろう付け分野では、電極の熱伝導性と耐凝着性に依存しており、自動車の組み立てやマイクロエレクトロニクスのパッケージングに広く使用されています。市場の需要は、生産ラインの柔軟な調整を促進しています。航空宇宙・軍事分野は、下流市場のもう一つの重要な柱です。タングステン銅電極はロケットエンジンや誘導部品に使用され、過酷な環境下における性能要件を満たすことが求められます。業界全体にわたる技術協力と研究開発投資により、メーカーは高性能製品の開発に取り組んでいます。熱間等方圧成形（HIP）プロセスによって最適化された電極は、これらの用途において優れた性能を発揮します。市場動向は政策支援や環境規制の影響も受けており、グリーン製造とリサイクル性が重要なトレンドとなっています。

8.2 タングステン銅電極の技術的方向性

タングステン銅電極は、性能向上と市場拡大の鍵となる技術であり、製造プロセスの最適化、新素材の開発、そしてインテリジェントなアプリケーションに注力しています。この重点分野

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は、最新の製造技術と材料科学の進歩を融合させ、電極の効率と耐久性を向上させることで、ますます複雑化する産業ニーズに対応することを目指しています。タングステン銅電極は、粉末冶金法または真空浸透法によって製造されます。微細構造と特性の最適化は技術開発の中核を成し、熱間静水圧プレス法は製品品質の向上に重要な役割を果たします。市場動向に牽引され、研究投資に支えられたこれらの技術進歩は、ハイエンド用途における電極の競争力を高めるでしょう。

8.2.1 準備プロセスの最適化

プロセス最適化は、タングステン銅電極技術の開発における中核分野です。既存プロセスの改善により、電極性能の向上、コスト削減、生産効率の向上を目指します。このプロセスは、粉末調製、成形、焼結、浸透といった複数の工程を網羅しています。粉末冶金法または真空浸透法を基盤とし、熱間静水圧プレス（HIP）を主要な最適化ツールとして活用します。プロセス最適化の目標は、欠陥の低減、微細構造の均一性向上、材料密度の向上を実現し、放電加工（EDM）、高電圧電気機器、航空宇宙・軍用途といった分野の厳しい要件を満たすことです。

粉末の準備は最適化の出発点です。ボールミル技術とアトマイズプロセスを改善することで、タングステンおよび銅粉末の粒度の一貫性と純度が向上し、混合プロセス中の均一性が確保されます。成形段階ではニアネットシェイプ技術を導入し、後続の処理量を削減します。プレス圧力と金型設計を最適化し、グリーン体の密度を高めます。焼結プロセスの最適化は、温度制御と雰囲気管理に重点を置いています。多段階加熱と真空環境により、気孔率と酸化を低減します。熱間静水圧プレスは焼結効果をさらに高めます。浸透段階の最適化により、銅の濡れ性と浸透時間を調整することで、タングステン骨格と銅相の完全な融合が保証され、未充填領域が減少します。

後処理プロセスの最適化も同様に重要です。切断・研削技術の向上により、電極の形状精度と表面品質が向上し、めっきやコーティングなどの表面処理技術の進歩により、耐食性と耐久性が向上しました。プロセス最適化を実現するには、自動化された生産ラインやリアルタイム監視システムなどの高度な設備を導入し、人的ミスを削減する必要があります。将来的には、製造プロセスの最適化に人工知能やシミュレーション技術が組み込まれ、最適なプロセスパラメータを予測し、高精度化や過酷な環境への要求に応える傾斜機能材料やナノ構造電極が開発され、新興市場におけるタングステン銅電極の応用が促進されるでしょう。

8.2.2 パフォーマンス改善パス

タングステン銅電極技術開発の中核目標は、性能向上です。材料の改良とプロセスの革新を通じて、耐熱性、導電性、機械的強度、耐久性を向上させることを目指しています。このアプローチには、組成の最適化、微細構造制御、表面改質が含まれ、放電加工、高電圧電気機器、航空宇宙・軍用途などの分野のニーズを満たすためのブレークスルーが模索されています。タ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン銅電極は、粉末冶金法または真空浸透法を用いて製造されます。その性能は、タングステンと銅の比率と製造プロセスの精密な制御に依存します。熱間静水圧加圧法は、材料の均一性と安定性を向上させる上で重要な役割を果たします。

組成の最適化は、性能を向上させる重要な方法です。タングステンと銅の比率を調整することで、特定の用途シナリオに合わせて導電性や耐熱性を高めることができます。たとえば、銅の含有量を増やすと導電性が向上し、溶接用途に適しており、タングステンの比率を増やすと耐熱性が向上し、ロケットエンジン部品に適しています。ナノ粉末または多相材料を導入して粒径を微細化し、気孔や欠陥を減らし、熱間静水圧プレスプロセスで界面の結合力をさらに最適化し、全体的な機械的強度を向上させることで、微細構造の調整を実現できます。めっきやコーティングなどの表面改質技術は、耐腐食性または抗酸化材料を導入することで、湿気の多い環境や腐食性の高い環境での電極の耐用年数を延ばします。

さらに、性能向上には検出とフィードバックのメカニズムが不可欠です。金属組織分析と欠陥検出により、性能に影響を与える弱点を特定し、プロセスパラメータを調整することで継続的な改善を図ることができます。研究開発チームはメーカーと連携し、合金化や複合材料の使用、界面元素の導入による靱性向上などを検討しています。熱管理技術の進歩も、電極内の熱伝導経路を最適化して局所的な過熱のリスクを低減することで、性能向上に貢献しています。

8.2.3 アプリケーション拡張の検討

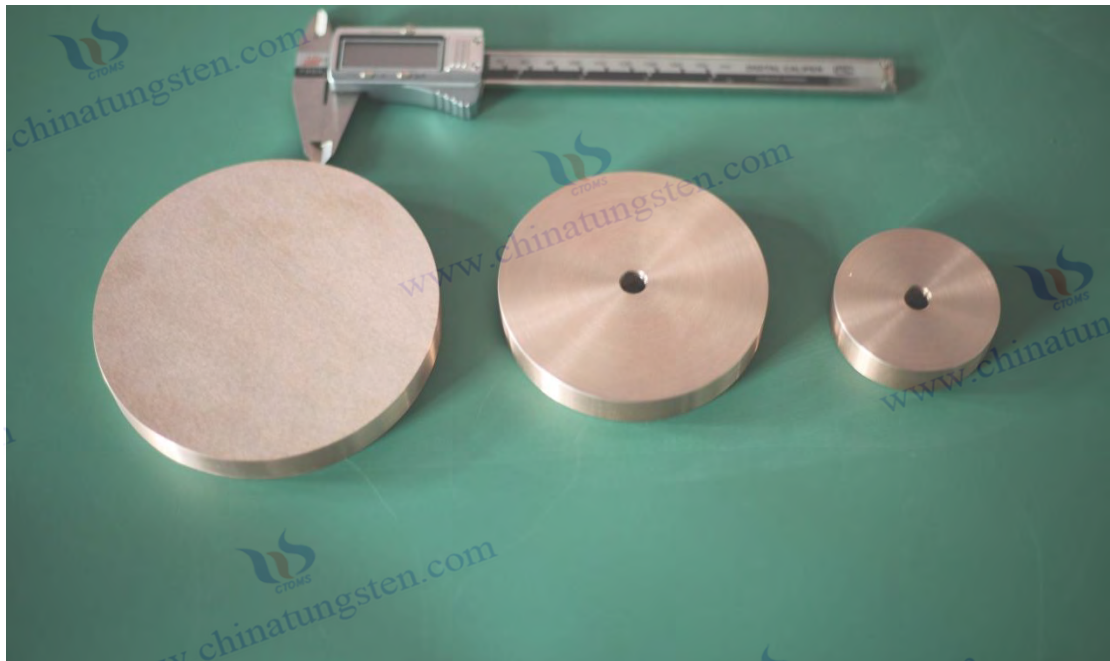
タングステン銅電極の技術開発においては、用途拡大と探究が最前線にあり、その独自の特性を革新的に活用することで新たな市場セグメントの開拓を目指しています。この探究は、新エネルギー、医療機器、インテリジェント製造といった新興産業を網羅し、タングステン銅電極の耐熱性、導電性、機械的強度に基づく新たな応用シナリオの開拓に取り組んでいます。タングステン銅電極は、粉末冶金法または真空含浸法によって製造されます。最適化された微細構造と特性は、用途拡大の基盤となり、熱間等方圧成形法は複雑な環境への適応性を高めます。多様化する市場ニーズと技術の進歩は、タングステン銅電極をより高付加価値分野へと押し上げるでしょう。

新エネルギー分野は、用途拡大の重要な分野です。タングステン銅電極は、その導電性と耐熱性により効率的なエネルギー伝送が可能となるため、電気自動車のバッテリーコネクタや充電装置の電気接点として使用できます。医療機器分野では、高精度加工能力と安定性を備えたタングステン銅電極が小型化のニーズを満たすことから、精密外科用機器や画像機器への応用が検討されています。インテリジェント製造分野では、ロボット関節やセンサーへの応用が検討されています。タングステン銅電極の機械的強度と耐振動性は、高度に動的な環境にも適しています。業界内の技術協力と研究開発投資により、メーカーはこれらの新興市場の独自の要件を満たすカスタマイズ製品の開発に取り組んでいます。

用途拡大には、プロセスイノベーションの支援も不可欠です。機能性傾斜設計やナノテクノロジーを活用することで、多機能特性を持つ電極を製造し、多様な産業のニーズに応えることができます。レーザーエッチングや3Dプリンティングといった後加工技術の導入により、電極

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の形状の複雑性と製造柔軟性が向上しました。市場調査とユーザーからのフィードバックは、探索の重要な基盤であり、メーカーは下流企業と連携して新たな用途の実現可能性を検証する必要があります。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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:

タングステン銅電極用語集

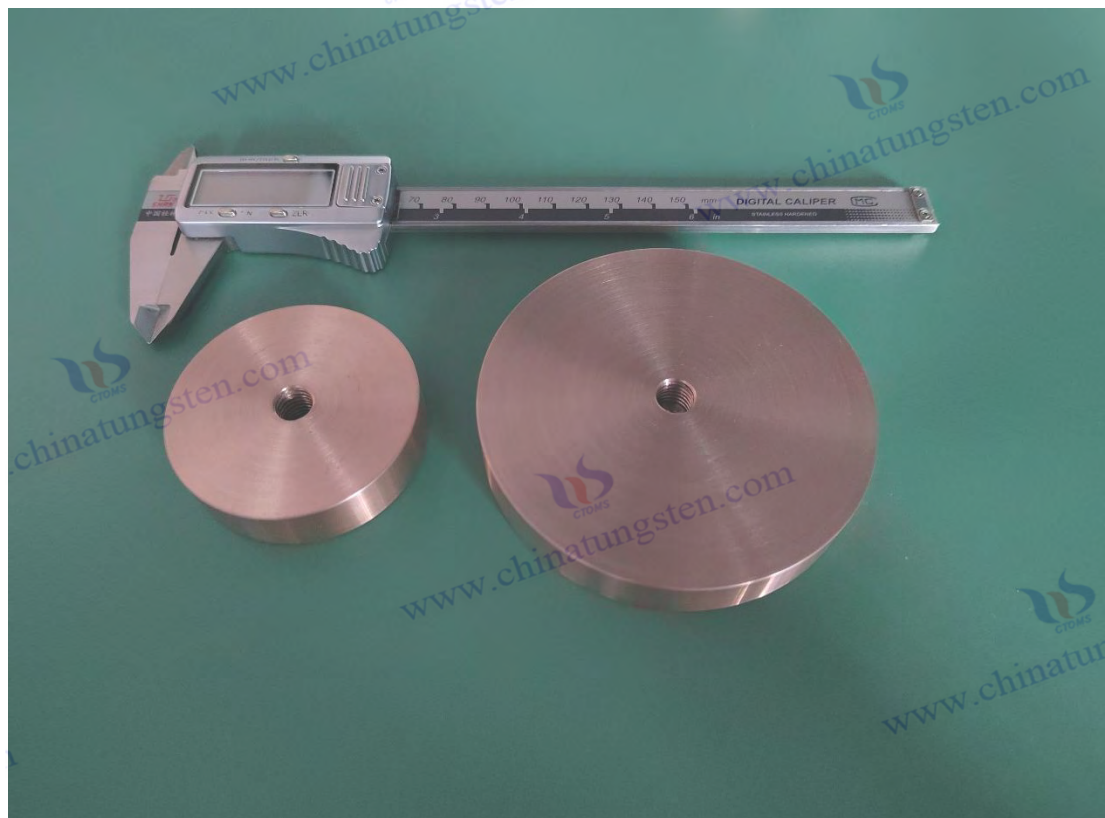
用語	意味
タングステン銅電極	タングステンと銅を特定の比率で混合した合金は、タングステンの高融点、耐高温性、硬度と銅の高い導電性、熱伝導性、延性を兼ね備えています。放電加工（EDM）、高電圧電気機器、溶接・ろう付け、航空宇宙・軍事用途など、幅広い分野で使用されています。粉末冶金法や真空浸透法によって性能が最適化され、熱間等方圧加圧法によって微細構造の一貫性と耐久性がさらに向上します。
粉末冶金	タングステン粉末と銅粉末を混合し、圧縮成形した後、高温で焼結することにより、タングステン銅電極を製造します。このプロセスは、材料の均一性を確保し、気孔率を低減し、焼結パラメータを制御することで所望の機械的・電気的特性を実現します。タングステン銅電極製造における主流技術の一つです。
真空浸透	真空環境下で、予め作製された多孔質タングステン骨格に液体銅を浸透させることにより、タングステン-銅電極を製造するプロセス。この方法は、高温で銅を溶融し、タングステン骨格の細孔を埋めることで、材料の密度と相分布を最適化します。この方法は、高い導電性と高温耐性が求められる電極に特に適しています。
熱間静水圧プレス	高温・等圧ガスを用いてタングステン銅電極に全方向圧力を加えるプロセス。 このプロセスは、内部欠陥を除去し、材料密度を向上させ、性能の安定性を高めます。電極の機械的強度と熱安定性を高めるために広く使用されています。
微細構造	電極の内部微細構造特性（タングステン骨格、銅相分布、粒径、多孔度など）は、導電性、機械的強度、耐久性に直接影響を及ぼします。微細構造品質は、金属組織学的分析と欠陥検出によって評価でき、熱間等方圧加圧（HIP）は、この微細構造品質の最適化に大きな効果をもたらします。
EDM	アーク放電を利用してワーク表面から材料を除去する加工技術。タングステン銅電極は工具電極として広く使用されています。その利点は、ダイス鋼やチタン合金などの高硬度材料の加工能力にあります。タングステン銅電極の主な特性は、耐アーク侵食性と導電性です。
高電圧電気機器	高電圧・高電流を伴う電気機器の分野では、タングステン銅電極がスイッチ、避雷器、その他の部品に使用されています。耐アーク侵食性と導電性の安定性により、高エネルギー環境における信頼性の高い動作を保証します。
抵抗溶接	電流加熱と加圧によって金属接合を実現する溶接方法。タングステン銅電極は、電極として導電性と熱伝導性を備えています。耐凝着性と耐高温性を備えているため、スポット溶接やシーム溶接に優れた性能を発揮します。
航空宇宙お	宇宙船や軍事機器の製造分野をはじめ、タングステン銅電極はロケットエンジ

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

よび軍事産業	ンのノズルや誘導部品などに使用され、極度の高温、機械的ストレス、信頼性といった要件を満たす必要があります。その耐熱性と機械的強度は、その核心的な強みです。
後処理	タングステン銅電極は、切断、研磨、表面処理を経て、形状、表面品質、そして機能性能が最適化されます。この工程により、高精度加工や耐腐食性環境といった特定の用途のニーズを満たす電極が実現します。
コンポーネント分析	タングステンと銅の組成、およびタングステン銅電極中の微量元素の含有量を化学的または分光的方法によって検出し、原材料の純度と調製プロセスの影響を評価して、電極の性能が設計要件を満たしていることを確認します。
欠陥検出	電極内の気孔、亀裂、介在物などの欠陥を特定および評価することで、製品の品質と耐用年数を向上させることを目指します。
業界標準	ISO 規格や中国国家規格など、国内または国際組織によって策定された仕様は、タングステン銅電極の構成、性能、およびテスト要件を定義し、世界中の市場で一貫した品質を保証します。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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

中国語の参考文献

- [1] 李明、張強. タングステン-銅電極の製造方法と性能に関する研究 [J]. 材料科学工学ジャーナル, 2023, 39(5): 45-52.
- [2] 王芳、劉偉「電気放電加工におけるタングステン-銅複合材料の応用分析[J].」現代製造技術、2024 年、12(3):78-85。
- [3] 趙軍、陳立「タングステン-銅電極の微細構造と品質管理[J]」金属材料とプロセス、2022 年、18(4):33-40。

英語の参考文献

- [1] Zhang, H., & Liu, J. タングステン-銅電極の作製と性能[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(12): 123-130.
- [2] スミス、R.、ブラウン、T.電気放電加工におけるタングステン-銅複合材料の応用[J]. アドバンストマニュファクチャリングレビュー、2024 年、15(6):89-96。
- [3] ジョンソン、K.、リー、S.タングステン-銅電極の微細構造分析と品質管理[J]. 材料工学ジャーナル、2022 年、10(3):55-62。



CTIA GROUP LTD 銅タングステン電極

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