

タングステン銅合金とは

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**

## 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](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

## 目次

### 第 1 章 序論

- 1.1 タングステン銅合金の概要
  - 1.1.1 タングステン銅合金の定義
  - 1.1.2 合金組成
- 1.2 タングステン銅合金の歴史的起源と発展過程
  - 1.2.1 初期の探索
  - 1.2.2 重要技術の突破ノード
  - 1.2.3 現代的な発展傾向

### 第 2 章 タングステン銅合金の特性

- 2.1 タングステン銅合金の特性分析
  - 2.1.1 高硬度の形成機構と利点
    - 2.1.1.1 微細組織機構
    - 2.1.1.2 耐摩耗性用途における利点
    - 2.1.1.3 他の合金との硬度比較及び利点
  - 2.1.2 耐アーク浸食性の原理と性能
    - 2.1.2.1 アーク浸食機構
    - 2.1.2.2 耐アーク浸食性の本質的原理
    - 2.1.2.3 異なる使用環境における性能差異
    - 2.1.2.4 性能向上の方法
  - 2.1.3 耐付着性と耐溶接性の分析
    - 2.1.3.1 付着と溶接の原因
    - 2.1.3.2 耐付着性能
    - 2.1.3.3 耐付着性と耐溶接性に影響を与える要因
  - 2.1.4 優れた導電性の原理と応用
    - 2.1.4.1 導電性の物理的性質と伝導機構
    - 2.1.4.2 異なる成分比における導電性の変化
    - 2.1.4.3 電気機器における導電性用途の利点
  - 2.1.5 良好な熱伝導性
    - 2.1.5.1 熱伝導性の基本原理と熱伝導機構
    - 2.1.5.2 熱伝導性と放熱効果の関係
    - 2.1.5.3 高温作業環境における熱伝導性の応用価値
  - 2.1.6 耐食性とその機構
    - 2.1.6.1 異なる腐食環境の影響
    - 2.1.6.2 耐食性の内部機構
    - 2.1.6.3 耐食性向上の技術的手段
- 2.2 成分比がタングステン銅合金の特性に及ぼす影響
  - 2.2.1 機械的特性に対する影響
    - 2.2.1.1 硬度に対する影響
    - 2.2.1.2 強度に対する影響

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.2.1.3 韌性に対する影響
- 2.2.2 物理的特性に対する影響
  - 2.2.2.1 密度に対する影響
  - 2.2.2.2 融点に対する影響
  - 2.2.2.3 熱膨張係数に対する影響
  - 2.2.2.4 導電性に対する影響
  - 2.2.2.5 熱伝導性に対する影響
- 2.2.3 化学的特性に対する影響
  - 2.2.3.1 耐食性に対する影響
  - 2.2.3.2 高温酸化耐性に対する影響
- 2.3 CTIA GROUP LTD タングステン銅合金の MSDS

### 第 3 章 タングステン銅合金の微細組織と特性の相関関係

- 3.1 タングステン銅合金の微細組織特性の洞察
  - 3.1.1 結晶粒形態とサイズ
  - 3.1.2 相分布と界面
  - 3.1.3 多孔性と欠陥の発現
  - 3.1.4 異なる製造工程における組織的差異
- 3.2 タングステン銅合金の微細組織と性能の本質的關係
  - 3.2.1 結晶組織が強度に及ぼす影響の機構
  - 3.2.2 結晶組織が韌性に及ぼす影響の機構
  - 3.2.3 相分布と導電性の相関関係
  - 3.2.4 相分布と熱伝導性の相関関係
  - 3.2.5 気孔と欠陥が硬度に及ぼす影響
  - 3.2.6 気孔と欠陥が耐食性に及ぼす影響
- 3.3 タングステン銅合金の微細組織の進化
  - 3.3.1 成分比の変化による進化
  - 3.3.2 熱処理中の組織変態
  - 3.3.3 使用環境の組織に対するフィードバック
  - 3.3.4 使用環境の性能に対するフィードバック
- 3.4 タングステン銅合金微細組織の制御戦略
  - 3.4.1 製造工程に基づく制御方法
  - 3.4.2 合金元素添加の最適化方法
  - 3.4.3 組織調整と性能の關係

### 第 4 章 タングステン銅合金の製造技術

- 4.1 真空浸透法によるタングステン銅合金の製造
  - 4.1.1 溶融浸透原理と設備要件
  - 4.1.2 工程ステップとパラメータ最適化
  - 4.1.3 該当工程の利点と限界

### 第 5 章 タングステン銅合金の性能試験と特性評価方法

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1 タングステン銅合金の物理的特性試験
  - 5.1.1 密度試験方法
  - 5.1.2 硬度試験基準と操作
  - 5.1.3 導電性試験方法
  - 5.1.4 熱伝導性試験方法
- 5.2 タングステン銅合金の化学的特性評価
  - 5.2.1 耐食性試験環境と方法
  - 5.2.2 酸化耐性試験方法
- 5.3 タングステン銅合金微細組織の特性評価技術
  - 5.3.1 金属顕微鏡観察法
  - 5.3.2 走査型電子顕微鏡分析の応用
  - 5.3.3 X線回折構造分析

## 第6章 タングステン銅合金の複数の応用分野

- 6.1 電気分野におけるタングステン銅合金の応用
  - 6.1.1 低圧電力スイッチにおける応用
    - 6.1.1.1 低圧電力スイッチの核心部品の材料性能要件
    - 6.1.1.2 接点部品におけるタングステン銅合金の応用
    - 6.1.1.3 応用が低圧電力スイッチの使用寿命に及ぼす影響
  - 6.1.2 高圧スイッチにおける応用
    - 6.1.2.1 高圧スイッチの作業環境と核心部品の材料許容基準
    - 6.1.2.2 タングステン銅合金は高圧スイッチの性能要件を満たす
    - 6.1.2.3 異なる電圧レベルの高圧スイッチにおけるタングステン銅合金の応用差異
  - 6.1.3 リレーと空気遮断器の応用
    - 6.1.3.1 リレー材料の耐摩耗性要件とタングステン銅合金の適合性
    - 6.1.3.2 リレーにおけるタングステン銅合金の取付位置と機能実現
    - 6.1.3.3 空気遮断器の消弧システムに対する材料性能要件
    - 6.1.3.4 空気遮断器の消弧室におけるタングステン銅合金の応用原理
    - 6.1.3.5 リレーと空気遮断器におけるタングステン銅合金の選択基準
  - 6.1.4 断路器と接地開閉器における応用
    - 6.1.4.1 長期暴露環境における断路器の材料の耐候性要件
    - 6.1.4.2 断路器の導電接点部におけるタングステン銅合金の応用設計
    - 6.1.4.3 短絡電流を受ける際の接地開閉器の材料強度と導電性要件
    - 6.1.4.4 タングステン銅合金が接地開閉器の安全運行を保障する機構
    - 6.1.4.5 断路器と接地開閉器におけるタングステン銅合金の選択基準
- 6.2 電子分野におけるタングステン銅合金の応用
  - 6.2.1 EDM 電極の性能要件とタングステン銅合金の利点
    - 6.2.1.1 EDM プロセスに対する電極材料の性能指標要件
    - 6.2.1.2 異なる加工シナリオにおける異なる電極性能要件
    - 6.2.1.3 導電性と耐摩耗性の観点からのタングステン銅合金の適合性分析
    - 6.2.1.4 従来の電極材料と比較した性能優位性
    - 6.2.1.5 一般的な EDM 機器におけるタングステン銅合金電極の選択基準

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.2.2 マイクロエレクトロニクスにおける役割
  - 6.2.2.1 マイクロエレクトロニクスデバイスに対する材料の精度と安定性の要件
  - 6.2.2.2 マイクロエレクトロニクスパッケージングにおけるタングステン銅合金の応用
  - 6.2.2.3 マイクロエレクトロニクスデバイスの放熱効率と使用寿命を向上させる機構
  - 6.2.2.4 チップパッケージモジュールにおける取付構造の設計
  - 6.2.2.5 マイクロエレクトロニクス分野におけるタングステン銅合金純度と微細組織の要件
- 6.2.3 センサー分野における応用
  - 6.2.3.1 センサー作業環境に対する材料性能要件
  - 6.2.3.2 センサー感知素子におけるタングステン銅合金の潜在的応用
  - 6.2.3.3 高い熱伝導性に基づくセンサー放熱部品の応用設計
- 6.3 航空宇宙分野におけるタングステン銅合金の応用
  - 6.3.1 固体ロケットノズルスロートライニングの応用
    - 6.3.1.1 固体ロケットノズルスロートライナーの作業環境
    - 6.3.1.2 ノズルスロートライニングの材料特性要件
    - 6.3.1.3 ノズルスロートライニングの要件を満たすタングステン銅合金の性能
    - 6.3.1.4 ノズルスロートライニングにおけるタングステン銅合金の成形プロセスと構造設計
    - 6.3.1.5 タングステン銅合金使用後のノズルスロートライニングの使用寿命の向上
  - 6.3.2 航空機エンジン部品における潜在的応用
    - 6.3.2.1 航空機エンジンの主要部品の作業環境の特性
    - 6.3.2.2 航空機エンジン部品の材料特性要件
    - 6.3.2.3 航空機エンジン的高温部品におけるタングステン銅合金の応用
    - 6.3.2.4 航空エンジン応用のためのタングステン銅合金の性能最適化方向
  - 6.3.3 宇宙機電気システムにおける応用
    - 6.3.3.1 宇宙機電気システムの作業環境と信頼性要件
    - 6.3.3.2 宇宙機電気システムの核心部品の材料特性要件
    - 6.3.3.3 宇宙機接触器接点におけるタングステン銅合金の応用
    - 6.3.3.4 宇宙機遮断器の消弧部品におけるタングステン銅合金の応用
    - 6.3.3.5 タングステン銅合金は宇宙機電気システムの安定性と寿命を保证する上で重要な役割を果たす
    - 6.3.3.6 宇宙機応用におけるタングステン銅合金の材料選択基準と品質管理要件
- 6.4 その他の分野における応用
  - 6.4.1 冶金業における応用シナリオ
  - 6.4.2 スポーツ用具における使用事例
  - 6.4.3 医療機器分野における探索
  - 6.4.4 原子力分野における応用展望

## 第 7 章 タングステン銅合金の将来的な発展傾向

- 7.1 タングステン銅合金の新しい製造技術の探索
  - 7.1.1 積層造形技術の潜在的応用
  - 7.1.2 その他の先端製造技術の展望
- 7.2 タングステン銅合金の性能最適化の研究方向
  - 7.2.1 総合性能向上のための研究方向

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.2.2 特定の応用シナリオにおける性能強化

### 付録

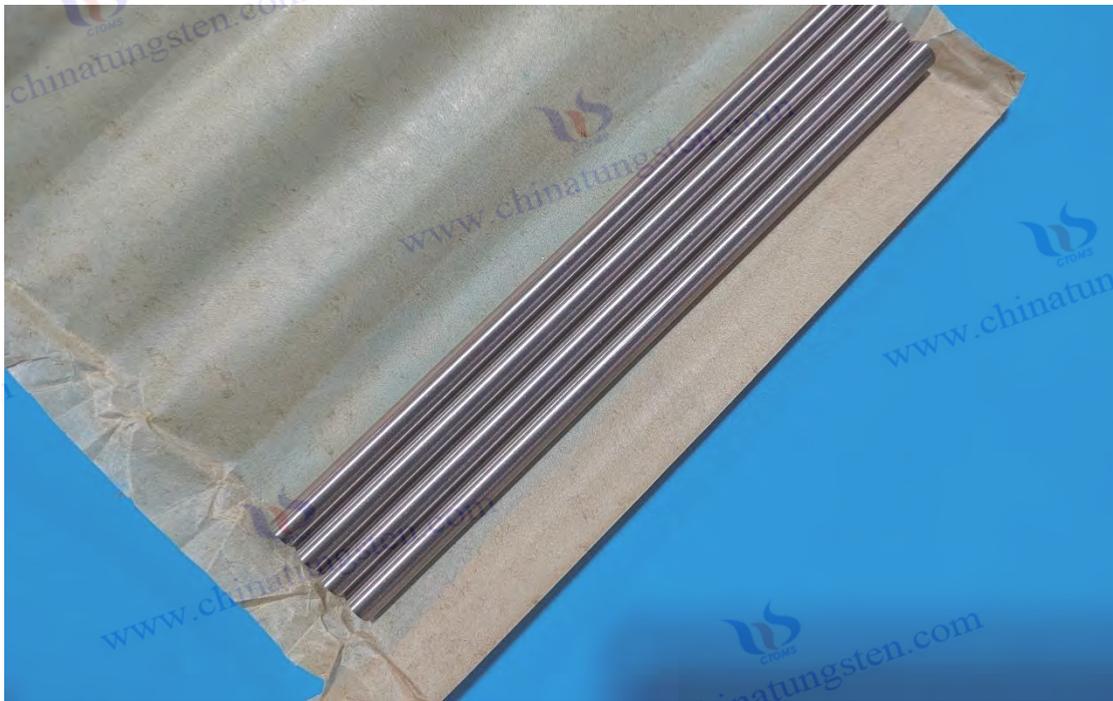
付録 A 中国のタングステン銅合金国家标准

付録 B 国際的なタングステン銅合金標準

付録 C 欧米、日本、韓国などの国におけるタングステン銅合金標準

付録 D タングステン銅合金用語の詳細な説明

### 参考文献



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD  
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	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 Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第1章 はじめに

### 1.1 タングステン銅合金の概要

銅の複合材料であるタングステン銅合金は、両金属の核心的な長所を兼ね備え、産業分野において不可欠な地位を占めています。タングステンの高融点（3422°C）、高強度、高硬度、優れた耐摩耗性は、銅の高い導電性、高熱伝導性、優れた可塑性と相まって、高温環境の試験にも耐え、安定した導電性と熱伝導性を維持します。そのため、電子、電力、航空宇宙、国防など、多くの重要分野で広く使用されています。

材料特性の観点から見ると、タングステン銅合金の性能は「タングステン+銅」の単純な組み合わせではなく、適切な配合比と製造プロセスによって、性能が最適化され、バランスが取れています。例えば、高温環境下では、タングステンの骨格構造が合金を支え、高温変形に耐えます。一方、銅は自身の熱伝導率によって熱を素早く伝導し、局所的な過熱を回避します。導電性の場面では、銅の導電性の利点を活かし、さらにタングステンの添加によって合金全体の強度が向上し、純銅の摩耗や変形の問題を回避できます。この「強固な組み合わせ」という特性により、タングステン銅合金は複雑な作業条件に対応する理想的な材料となっています。

産業技術の継続的な発展に伴い、材料に対する性能要求はますます厳しくなり、タングステン銅合金の研究と応用も深化を続けています。当初の基本モデルから、様々な用途に合わせてカスタマイズされた特殊比率合金まで、その応用範囲は絶えず拡大し、その性能は様々な産業ニーズをよりの確に満たしています。次に、この特殊合金について、定義と組成という2つの側面からより深く理解していきます。

#### 1.1.1 タングステン銅合金の定義

タングステン銅合金とは、粉末冶金などのプロセスを経てタングステン（W）と銅（Cu）を主成分とする擬似合金（固体状態では混ざり合わない2つの金属が機械的に結合した複合材料）を指します。従来の単一金属や完全に混和する合金とは異なり、タングステン銅合金では、タングステンと銅が物理的に混合した状態で存在しています。タングステンは連続した骨格構造を形成し、銅はタングステン骨格の空隙を埋め、界面を介して結合して一体を形成します。そのため、タングステンの高融点、高強度、高硬度、耐摩耗性を維持しながら、銅の高い導電性、高熱伝導性、優れた可塑性を備え、「耐高温性と導電性・熱伝導性」、「高強度と加工性のバランス」といった特性を実現しています。定義の核心から見れば、タングステン銅合金の鍵は「複合的な利点」と「プロセス依存性」にあります。一方で、その性能はタングステンと銅の相乗効果によって決まります。例えば、放電加工においては、タングステン銅合金の高い導電性が電極の効率的な電流伝導を保証し、同時にタングステンの高融点が高温度放電による電極の溶融を防ぎます。放熱部品においては、銅の熱伝導性が迅速な放熱を担い、タングステンの高強度が部品の取り付け・使用時に容易に変形しないことを保証します。他方、その定義には製造プロセスの方向性も含まれています。タングステンと銅は固体状態で混和しないた

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

め、製錬法では製造できず、粉末冶金法（プレス、焼結、溶浸など）を用いる必要があります。これは、タングステン銅合金を他の合金と区別する重要な特性の 1 つにもなっています。

この定義は、タングステン銅合金の組成と構造を明確にするだけでなく、その「オーダーメイド」特性も明らかにしています。タングステンと銅の含有量比率を調整することで、異なる特性を持つ合金（例えば、耐熱性と高強度を重視した高タングステン合金、導電性と熱伝導性を重視した高銅合金など）を調製できるため、電子パッケージ、高電圧スイッチ、航空宇宙エンジンなど、さまざまな分野の個別のニーズを満たすことができます。したがって、タングステン銅合金の定義は、その材料組成の説明であるだけでなく、「構造が性能を決定し、性能がシーンに適応する」というその核心的な特徴の要約でもあります。

### 1.1.2 合金組成

（Cu）をベースとし、タングステンの含有量は通常 50%～90%（質量分率）、銅の含有量は 10%～50%です。具体的な比率は、用途の性能要件に応じて決定する必要があります。タングステンと銅の 2 つの主成分に加えて、一部の特殊用途のタングステン銅合金では、成形性能や材料の特定の機能を最適化するために、微量の他の元素を補助成分として添加しますが、これらの補助元素の含有量は通常 1%を超えないため、「タングステン銅」のコア成分構造は変化しません。

主要成分の役割から見ると、タングステンは高融点金属（融点 3422°C）として、合金の強度、硬度、耐高温性、耐摩耗性の主な担い手です。タングステンの含有量が多いほど、合金の融点が高くなり、強度と硬度が高まり、耐高温性が優れています。例えば、タングステン含有量が 90%のタングステン銅合金は、800MPa 以上の圧縮強度を持ち、1000°C以上の高温環境でも構造安定性を維持できるため、航空宇宙エンジンの高温部品に適しています。銅は、高伝導性と高熱伝導性の金属として、合金に導電性、熱伝導性、一定の可塑性を与える主な役割を担っています。銅の含有量が多いほど、合金の導電性と熱伝導性が向上し、加工性能も向上します。例えば、銅含有量が 50% のタングステン銅合金は、導電率が  $40 \times 10^6$  S/m を超えており、電子パッケージの放熱電極として適しています。補助成分の添加は、工程の性能を向上させたり、主成分の不足を補ったりするために使用されます。例えば、微量のニッケル（Ni）を添加すると、タングステン粒子と銅相との結合力が強化され、合金が力を受けたときにタングステン骨格と銅相が分離する問題を回避できます。また、少量の鉄（Fe）またはコバルト（Co）を添加すると、タングステン粉末のプレス性能が向上し、成形プロセス中に合金が緻密な構造を得やすくなります。ただし、補助成分の添加量は厳密に比例制御する必要があります。そうでないと主成分の性能に影響を与える可能性があります。例えば、ニッケルが多すぎると合金の電気伝導性や熱伝導性が低下し、鉄が多すぎると合金の脆さが増す可能性があります。

一般的に、タングステン銅合金の組成は「主成分がコア性能を決定し、補助成分がプロセスと細部を最適化する」という典型的な例です。タングステン銅比を調整することで、合金の強度、電気伝導性、熱伝導性、耐高温性などを精密に制御でき、電子パッケージングから国防・軍事産業まで、さまざまな用途に適しています。また、微量の補助元素を添加することで、合金の

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実用性と安定性がさらに向上し、この複合材料は業界の複雑なニーズにより適切に対応できるようになります。

## 1.2 タングステン銅合金の歴史的起源と発展過程

### 1.2.1 初期探査

タングステン銅合金の歴史は 19 世紀後半から 20 世紀初頭に遡ります。この段階の研究は「タングステン銅合金」そのものを目的としたものではなく、タングステンと銅のそれぞれの金属特性を個別に研究し、複合材料の初期の試みに端を発していました。当時、産業革命を背景に、高強度・高伝導性材料の需要が高まりました。タングstenは高融点と高強度（特に白熱電球のフィラメント分野）で注目され、銅は優れた導電性と熱伝導性から電気産業の中核材料となりました。しかし、両金属の欠点が徐々に顕在化しました。純タングstenは脆くて加工が難しく、純銅は強度が低く耐熱性にも劣るという点です。そこで人々は、「両金属の長所を複合化することで両立できるのではないか」と考えるようになりました。

初期の探究は主に小規模な実験室実験であり、技術的手段は比較的原始的でした。1900 年頃、ドイツとアメリカの材料研究者は、タングsten粉末と銅粉末を機械的に混合し、単純な加圧焼結によって「タングsten銅複合ブロック」を初めて製造しました。安定したプロセスは確立されていませんでしたが、「タングsten銅複合材料」の実現可能性は検証されました。しかし、この段階での製品性能は非常に低く、タングstenと銅の結合が緩く、機械的強度が不十分で、電気伝導性と熱伝導性も期待に応えられませんでした。さらに、粉末の粒径と焼結温度を正確に制御できなかったため、歩留まりが極めて低く、理論検証レベルにとどまり、実用化には至りませんでした。

初期の探究を実用化へと真に推進したのは、軍事産業と電気産業のニーズでした。1920 年代、無線技術と砲兵製造の発展に伴い、瞬間的な高温に耐え、同時に電気を伝導する材料が必要とされました（例えば、砲兵の電気点火装置の電極など）。純銅は高温で容易に溶け、純タングstenは導電性が不十分でした。研究者たちは再びタングsten銅複合材料に注目しました。

1925 年頃、米国ゼネラル・エレクトリック社は、粉末混合プロセス（例えば、粉末を精製するためのボールミル処理時間を延長する）の改良により、シンプルな電極に使用できる最初のタングsten銅製品を製造しました。性能はまだ不安定でしたが、「特定の状況において純タングstenまたは純銅を代替」できる初めての製品であり、タングsten銅合金が研究室から実用化へと移行する出発点となりました。この段階での探究は体系的な技術体系を形成するには至らなかったものの、その後の研究に 2 つの基礎を築きました。

### 1.2.2 主要な技術ブレークスルーノード

タングsten銅合金は、数々の重要な技術革新と切り離すことのできないものであり、それによって「実験室サンプル」から「工業材料」への変革が推進されてきました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

最初の鍵となる節目は 1940 年代に現れました。浸透プロセスの成熟により、「タングステンと銅の結合が緩い」という核心問題が解決されました。従来の焼結プロセスではタングステンと銅の完全な結合が困難でしたが、浸透プロセス（タングステン骨格を仮焼結し、その細孔に溶融銅を浸透させるプロセス）によって材料の密度が大幅に向上しました。1943 年、航空機機関銃点火電極の耐高温問題を解決するため、米軍は科学研究機関と共同で浸透プロセスの最適化を行いました。タングステン骨格の多孔度（20%～30%に調整）と銅の融点（1100～1200℃に正確に調整）を制御することで、タングステン銅合金の密度は 95%以上に向上し、強度と導電性は従来比 40%向上しました。航空機機関銃の点火システムに採用され、成功を収めました。これはタングステン銅合金が初めて大規模に実用化された事例でした。

第二の重要な節目は、1960 年代の粉末冶金技術の洗練でした。電子顕微鏡と精密温度制御装置の登場により、研究者はタングステン粉末と銅粉末の粒径（100 メッシュ初代から 500 メッシュ超まで）と焼結雰囲気（酸化防止のための不活性ガス導入）を正確に制御できるようになりました。1962 年、日本の住友金属は「超微粉+真空焼結」プロセスを開発し、タングステン銅合金中のタングステン粒子の均一分散と銅相の完全充填を実現しました。機械的特性（圧縮強度 600MPa 超）と導電率（導電率は純銅の 60%以上）が安定しているだけでなく、薄板や特殊形状電極などの複雑形状製品の加工も可能となり、軍事分野から電子産業（初期のトランジスタのヒートシンクなど）への展開を促進しました。

3 つ目の重要な節目は、1980 年代に「機能カスタマイズ」という概念が導入されたことです。それ以前のタングステン銅合金は主に単一の比率に基づいており、分野によってニーズが大きく異なっていました。航空宇宙分野ではタングステン含有量の高い（80%以上）耐熱タイプが求められ、電子分野では銅含有量の高い（50%以上）高導電性タイプが求められていました。1985 年、中国北京市非鉄金属研究所は、需要に応じたカスタマイズ組成を実現するために、「タングステン銅比率性能対応モデル」を確立しました。タングステン含有量の勾配比率を 50%から 90%まで調整し、対応するプロセスパラメータと組み合わせることで、合金の強度、導電性、耐熱性を正確に制御できるようになりました。この画期的な進歩により、タングステン銅合金は「汎用材料」から「シナリオ適応型材料」へと変貌を遂げ、その応用範囲は急速に拡大しました。

### 1.2.3 現代の開発動向

21 世紀に入り、タングステン銅合金の発展は「極限性能、多様な用途、インテリジェントプロセス」という 3 つの大きな潮流を示し、ハイエンド製造分野の主要材料の一つとなっています。極限性能は現代の発展の中核的な方向です。チップ、航空宇宙、新エネルギー分野の材料に対する要求が「基本ニーズの充足」から「性能限界の突破」へと移行するにつれ、タングステン銅合金の性能指標も絶えず更新されてきました。ナノ粉末製造技術（プラズマボールミル処理など）により、タングステン粉末の粒径を 100 ナノメートル以内に制御できるようになり、銅との界面がより近接しています。最新製品の導電率は純銅の 85%以上に達し、圧縮強度は 1000MPa を超え、20 世紀の水準をはるかに上回っています。耐高温性に関しては、タングステン含有量の高い（90%）タングステン銅合金は 1200℃でも構造安定性を維持でき、グラ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

フェンなどの強化相を追加することで耐摩耗性が 30%以上向上し、第 5 世代移動通信基地局や航空宇宙エンジン燃焼室などの過酷なシナリオのニーズを満たします。

用途の多様化は、伝統分野からハイエンドの新興分野への拡大に反映されています。従来、タングステン銅合金は主に電気接点や電極などに使用されていますが、現在では、チップパッケージング（高出力チップの放熱基板として、高い熱伝導率で熱を素早く除去）、新エネルギー車（車載高電圧リレーの導電接点として、大電流とアーク浸食に耐えることができます）、核融合実験装置（高温プラズマ浸食に耐えるダイバータ材料として）などにも用途が拡大しています。業界データによると、2020 年以降、半導体分野におけるタングステン銅合金の世界需要の年間成長率は 25%を超え、新たな成長の柱となっています。

インテリジェント技術は現代の発展を支える技術基盤です。従来のタングステン銅合金の生産は手作業による経験に頼っていましたが、現在では「デジタルツイン」と自動化された生産ラインによって全工程を制御可能になりました。粉末混合段階におけるオンライン粒度モニタリングから、焼結工程におけるリアルタイムの温度・圧力制御、完成品の性能の非破壊検査まで、すべてがインテリジェントシステムによって完結します。3D プリント技術の導入は成形の限界を打ち破り、2022 年にはドイツのフラウンホーファー研究所が金属 3D プリント技術を用いて、複雑な内部流路を持つタングステン銅放熱部品を直接印刷しました。従来のプロセスでは実現できなかった構造を量産できるようになり、特殊形状や集積部品の新たなソリューションを提供しています。

同時に、現代の発展は課題にも直面しています。戦略資源であるタングステンは価格変動が大きく、「タングステン銅合金のリサイクル・リユース」技術の発展を促進してきました（現在のリサイクル率は 80%以上に達しています）。また、代替材料（炭化ケイ素セラミックスや銅アルミニウム複合材料など）との競争により、タングステン銅合金は性能向上を通じて優位性を維持せざるを得なくなりました。一般的に、ハイエンド製造の需要に牽引され、タングステン銅合金は「補助材料」から「コア材料」へと変化を遂げつつあり、その発展は最先端科学技術の革新と深く結びついており、今後も大きな飛躍の余地が残されています。



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 第2章 タングステン銅合金の特性

### 2.1 タングステン銅合金の特性分析

タングステン銅合金は、その独特な複合構造と組成に由来しています。タングステンと銅の個々の特性を単に継承するのではなく、両者の相乗効果によって、バランスの取れた実用的な特性を複数形成します。マクロ的な視点から見ると、金属に匹敵する優れた導電性と熱伝導性、そして複雑な使用条件にも耐える十分な機械的強度を備えています。一方、応用面では、その特性の核心は「バランス」にあります。硬度と靱性、耐高温性と導電性・熱伝導性の間の臨界点を見出し、産業ニーズに適応することで、厳しい材料特性が求められる様々な用途に対応しています。

#### 2.1.1 高硬度形成メカニズムと利点

タングステン銅合金は、純銅や多くの銅合金とは異なる独特の特性を持っています。この特性の形成は内部構造の相乗効果と密接に関連しており、耐摩耗性を必要とする用途の基盤にもなっています。純銅の柔らかな特性とは異なり、タングステン銅合金の硬度は単一部品の強化ではなく、構造設計による性能最適化によって実現されています。これにより、一定の可塑性を維持しながら、外部摩擦や押し出しによる変形にも抵抗することができ、実用性と耐久性を兼ね備えた材料となっています。

##### 2.1.1.1 微細構造メカニズム

タングステン銅合金は、「骨格充填型」微細構造を特徴としています。合金内部では、タングステンは連続した骨格構造をしており、高い固有硬度を有しています。これらのタングステン粒子は相互に連結し、建物の鉄骨構造のように、材料全体に強固な支持ネットワークを形成し、合金の基本的な硬度を支えています。銅は充填相として、タングステン骨格の細孔に均一に分布しています。銅自体は硬度が低いものの、その存在によってタングステン骨格の完全性が損なわれることはありません。むしろ、銅はタングステン粒子間の隙間を埋め、骨格構造の「弱点」を軽減し、銅相を介して外圧をタングステン骨格に伝達することで、局所的な応力集中による構造損傷を回避します。さらに、タングステンと銅の界面結合も硬度に重要な影響を与えます。製造工程において、適切な加工処理を施すことで、タングステン粒子と銅相との間に安定した結合界面が形成されます。この結合は、力が加わった際にタングステン粒子同士が滑るのを防ぎ、全体の構造剛性をさらに強化します。したがって、タングステン銅合金の高硬度は、単一の成分の作用によるものではなく、タングステンの強固な骨格、銅の充填強化、そして界面結合の複合作用によるものです。この微細構造により、外部摩擦や押し出しを受けても構造の完全性を維持できます。

##### 2.1.1.2 耐摩耗性アプリケーションの利点

タングステン銅合金は、耐摩耗用途において明らかな利点を発揮します。その核心は、長期摩

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

擦による表面の損失を防ぎ、部品の耐用年数を延ばすことです。頻繁な接触や相対運動を必要とする場面では、材料表面は摩擦によって徐々に摩耗し、最終的には部品の寸法変化や機能不全につながります。タングステン銅合金の高い硬度は、この摩耗を軽減します。他の物体と接触しても、表面に傷やへこみが生じにくく、長期間にわたって元の形状と寸法安定性を維持します。同時に、その耐摩耗性の利点は、「摩擦条件の変動」への適応性にも反映されています。実際の用途では、摩擦環境は必ずしも一定ではなく、荷重変化や温度変動などが生じる可能性があります。タングステン銅合金の硬度は、わずかな温度上昇や荷重変化によって大きく低下することはなく、複雑な条件下でも耐摩耗性を維持し続けることができます。例えば、一部の機械伝動部品では、長期間にわたって異なるレベルの摩擦衝撃を受けても、表面は平坦な状態を維持し、過度の摩耗による伝動精度への影響を抑えることができます。これにより、関連機器のメンテナンスサイクルが延長され、部品交換によるコストとダウンタイムの損失が削減されます。

### 2.1.1.3 他の合金との硬度の比較と利点

純銅や一般的な銅合金と比較すると、タングステン銅合金の硬度における優位性は明らかです。純銅は組織が柔らかく、わずかな外部摩擦でも表面が変形しやすいという性質があります。多くの銅合金は他の元素を添加することで硬度を高めていますが、それでも全体的な硬度は「中～低」であり、高強度摩擦の状況に対応するのは困難です。タングステン銅合金は、タングステン骨格の存在により、これらの材料よりもはるかに高い硬度を有しており、同じ摩擦条件下でも表面摩耗度が大幅に低くなります。

純タングステンと比較すると、タングステン銅合金の硬度はわずかに低いですが、実用上はより多くの利点があります。純タングステンは硬度が非常に高いものの、脆く、摩擦時にわずかな衝撃を受けると容易に破損したり剥離したりするため、耐摩耗性に影響を与えます。タングステン銅合金中の銅相は、ある種の「緩衝材」としての役割を果たしています。高い硬度を維持しながら、衝撃エネルギーの一部を吸収し、脆性破壊のリスクを低減します。実際の作業環境で遭遇する可能性のある「摩擦+衝撃」の複合シナリオに適しています。

一部の鉄系合金と比較すると、タングステン銅合金の硬度は必ずしも絶対的な優位性を持つわけではありませんが、硬度以外の性能においてはより競争力があります。鉄系合金は導電性と熱伝導性が低い傾向がありますが、タングステン銅合金は高い硬度を維持しながら優れた導電性と熱伝導性も備えているため、耐摩耗性と導電性（または熱伝導性）の両方が求められる用途において、タングステン銅合金はかけがえのない選択肢となります。例えば、接触摩擦に耐えながら電流を伝導する必要がある一部の電気部品では、鉄系合金では導電性の要件を満たすことができませんが、タングステン銅合金は両方の要件を満たすことができます。

### 2.1.2 アーク浸食抵抗の原理と性能

耐アーク侵食性は、電気分野で広く使用されているタングステン銅合金の中核特性の一つです。高電圧スイッチ、リレーなどの機器では、電流のオン/オフ時に必然的にアークが発生します。アークの高温とエネルギーは接点材料を腐食させ、部品の故障を引き起こします。タン

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン銅合金は、その独特な組成と構造により、この侵食に効果的に抵抗し、部品の長期安定動作を維持します。その耐アーク侵食性は単一の要因によるものではなく、材料組成、微細構造、アーク作用機構の複合的な影響の現れです。また、使用環境の違いによっても性能が異なり、性能を最適化する明確な方向性があります。

### 2.1.2.1 アーク侵食のメカニズム

アークエロージョンとは、アークの作用によって材料の表面が損傷し、消失するプロセスを指します。その核心的な原動力は、アークによって放出される高温とエネルギーです。アークが発生すると、局所的な温度が急激に上昇し、材料の表面が熔融または蒸発するほどになります。同時に、アークによって発生した電気力によって熔融した材料粒子が表面から押し出され、スプラッシュロスが発生します。さらに、高温環境では、材料が周囲の媒体（空気中の酸素など）と化学反応を起こし、酸化物などの脆い物質を生成することがあります。これらの物質は、その後のアークや機械的作用によって容易に剥離し、エロージョンをさらに悪化させます。

プロセスの観点から見ると、アーク侵食は「熱損傷-機械的剥離-化学的劣化」の複合効果です。高温はまず材料表面の完全性を破壊し、表面材料を不安定にします。次に、電気力と気流によってこれらの不安定な物質が剥離します。そして、化学反応によって材料表面の結合力が弱まり、侵食が進行しやすくなります。このメカニズムにより、材料表面に徐々にピット、クラック、または変形が生じ、最終的には部品の導電性と構造安定性に影響を与えます。

### 2.1.2.2 アーク侵食抵抗の本質的原理

タングステン銅合金は、タングステンと銅の相乗効果によって実現されます。その内部原理は、という三重のメカニズムに起因しています。高融点成分であるタングstenは、合金の強固な骨格を構成します。アークの高温によって容易に溶解することはありません。アークの作用下でも構造の健全性を維持し、表面への大規模な損傷を防ぎます。同時に、タングstenの存在は材料全体の蒸発速度を低下させ、高温による材料損失を低減します。

銅は優れた熱伝導性を有し、アークによって発生した熱を作用部から素早く伝導し、局所的な過度の温度上昇を防ぎ、熔融と蒸発の程度を低下させます。さらに重要なのは、アーク温度が非常に高い場合、銅がタングstenよりも先に熔融し、熔融した銅が表面の微細な穴を埋めることで一時的な「緩衝層」を形成し、アークエネルギーの一部を吸収することで、タングsten骨格がアークに直接さらされる面積を減らすことで、保護的な役割を果たすことです。さらに、タングstenと銅の界面結合強度は比較的高く、アークの電気力による引き裂き効果に抵抗し、材料粒子の飛散損失を低減します。この「タングstenの耐熔融性、銅の放熱性、そして相乗的な耐剥離性」という内部メカニズムにより、タングsten銅合金は繰り返しのアーク作用下でも良好な表面品質を維持します。

### 2.1.2.3 使用環境の違いによるパフォーマンスの違い

タングsten銅合金は静的なものではなく、使用環境によって大きく変化します。主に周囲温

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

度、雰囲気組成、アークエネルギー密度、機械的負荷などの要因によって影響を受けます。

高温環境では、周囲の環境のベース温度がすでに比較的高いため、銅の放熱効率が低下し、アーク作用領域の熱が急速に拡散しにくくなり、材料の溶融と蒸発が激しくなり、侵食速度が加速される可能性があります。

酸素含有量の高い環境、または腐食性ガス（二酸化硫黄や硫化水素など）が存在する環境では、アークの高温により材料とガス間で化学反応がより激しくなり、より脆い酸化物や硫化物が生成され、剥離しやすくなり、侵食が加速されます。不活性ガスで保護された環境では、化学反応が抑制され、侵食は主に物理的損失（溶融、飛散）となり、性能はより安定します。

アークエネルギー密度が高い場合（高電流スイッチングシナリオなど）、タングステンの高融点でも瞬間的な高温に完全に耐えることができず、タングステン骨格が部分的に溶融する可能性があります。このとき、銅の緩衝効果は高まりますが、全体的な侵食度は低エネルギーアークシナリオよりも依然として高くなります。同時に機械的な振動や圧力が加わると、材料表面の侵食生成物（溶融後の凝固層など）が外力によって剥離しやすくなり、損傷領域がさらに拡大し、アーク侵食耐性が低下します。

#### 2.1.2.4 パフォーマンスを向上させる方法

合金の耐アーク侵食性については、材料設計、プロセスの最適化、機能強化という3つの側面から検討し、的を絞った改善によってアーク損傷に対する耐性を高めることができます。材料設計では、タングステンと銅の比率を調整することで性能バランスを最適化できます。タングステン含有量を適切に増やすと、耐高温骨格の安定性が向上し、高温溶融が低減します。一方、銅含有量を適度に抑えると、放熱効率が確保され、局所的な過熱を回避できます。特定の高エネルギーアーク発生状況では、少量の高融点の抗酸化元素をタングステン骨格に添加することもできます。この元素をタングステン骨格に組み込むことで、銅の熱伝導率を大幅に低下させることなく、耐溶融性や耐酸化性を向上させることができます。

プロセスの最適化は、性能向上の重要な手段です。タングステン粉末と銅粉末の粒子径を微細化することで、両者が微細構造内でより均一に分散し、局所的な成分偏析による弱点を軽減できます。真空焼結または雰囲気保護焼結プロセスを用いることで、材料内部の多孔性を低減し、タングステンと銅の界面の接合強度を高め、アーク作用による粒子飛散を低減できます。さらに、完成品の表面強化処理（耐摩耗コーティングのプラズマ溶射など）により、表面に追加の保護バリアを形成し、アークによる基材の侵食を遅らせることができます。

機能強化の面では、実際のアーク加工条件をシミュレーションすることで、「傾斜構造」を持つタングステン銅合金を設計できます。表面のタングステン含有量を高くすることで耐溶融性を高め、内部の銅含有量を高くすることで放熱性を確保することで、材料が様々な深さで狙い通りの役割を果たせるようになります。同時に、合金のリサイクル・再利用技術も開発し、腐食された表面を修復することで部品の耐用年数を延ばし、間接的に材料の耐アーク腐食性

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

をライフサイクル全体にわたって向上させます。

### 2.1.3 耐凝着性および耐溶着性の分析

タングステン銅合金の機械的接触および電気的接続における重要な特性として、耐凝着性と耐溶着性があります。凝着とは、二つの接触面が圧力や温度の作用下で部分的に結合し、分離しにくくなる現象を指します。一方、溶着はより深刻な接着であり、接触面が高温で溶融し、その後冷却・凝固することで永久的な接続を形成することを意味します。これらの状況はいずれも部品の固着や故障の原因となりますが、タングステン銅合金は独自の特性により、こうした問題に対する明確な耐性を発揮します。その性能の核心は、接触面のを低減することであり、圧力による機械的凝着を回避するだけでなく、高温による溶融溶着も防止します。

#### 2.1.3.1 接着と溶着の原因

凝着の原因は主に「表面接触状態」と「機械的作用」に関係しています。2つの部品の表面が密着し、圧力がかかると、接触面の微細突起が互いに食い込みます。材料自体の塑性が強い場合、突起が局所的に変形して嵌合することがあります。同時に、表面の酸化層や不純物が圧縮されて破壊されると、新鮮な金属表面が直接接触し、原子間の拡散による吸着力が生じ、最終的に接触面の局所的な凝着につながります。このような状況は、長時間の圧力や低速の相対運動を伴う場合に発生しやすくなります。

溶接は「高温溶融」と「冷却凝固」の複合効果によって起こります。接触面にアークや高温摩擦などの熱源がある場合、材料表面が溶融状態まで加熱され、2つの接触面の溶融金属が混ざり合います。温度が低下すると、混合された溶融金属が凝固し、接触面に溶接と同様の接合が形成されます。さらに、接触面に不純物（燃焼油の残留物など）がある場合、高温で低融点の共晶組織が形成され、溶融金属の接合がさらに促進され、溶接現象が強まります。

#### 2.1.3.2 抗癒着性能

タングステン銅合金は、主に接触状態で他の部品と安定した結合を形成しにくいという特徴があります。たとえ短時間の接触が発生しても、分離時の表面損傷を軽減できます。機械的な接触状況では、タングステンが形成する剛性骨格が材料表面の変形抵抗を向上させ、接触面の微細突起が押しつぶされたり埋め込まれたりしにくく、機械的な噛み込みによる付着の基盤を弱めます。同時に、銅の存在により、表面は一定の潤滑性（純タングステンに対して）を維持し、接触時の摩擦係数を低減し、摩擦熱による表面吸着の悪化を回避します。そのため、長期間の圧力接触を伴う部品では、タングステン銅合金の表面は相手材との付着痕を形成しにくく、分離に必要な力も小さく、接触面の完全性を維持できます。

電気接点において、たとえわずかなアーク放電によって局所的な温度上昇が生じたとしても、タングステン銅合金は表面溶融による凝着を起こしにくい構造となっています。これは、銅の熱伝導性により熱が素早く拡散し、表面の溶融が進行するのを防ぐためです。一方、タングス

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

テンは融点が高いため、広範囲の溶融が抑制され、接触面が安定した接合層を形成しにくくなり、分離時に「引き裂き」のような損傷が発生することはありません。

### 2.1.3.3 耐凝着性および耐溶着性に影響を与える要因

タングステン銅合金は固定されておらず、材料自体の状態、接触条件、環境要因によって影響を受けます。

材料自体の表面状態は重要な要素です。表面に酸化膜や油汚れなどの不純物があると、表面仕上げが低下します。不純物は圧力や高温下で接着の「接合点」となり、耐凝着性を弱める可能性があります。一方、研磨された滑らかな表面は微細な突起が少なく、接触面積が小さく、耐凝着性に優れています。さらに、タングステン銅合金の密度も影響を与えます。内部に多くの気孔を持つ材料は表面に微細なピットを形成しやすく、不純物が堆積しやすく、局所的な凝着が発生しやすくなります。

接触条件の影響は、主に圧力、温度、相対運動に反映されます。過度の圧力は接触面の微視的な食い込みを増大させ、凝着を促進します。過度の温度（融点に達しない場合でも）は原子の拡散速度を増大させ、表面吸着を促進します。また、潤滑油なしでの高速相対運動は、摩擦熱の発生による表面損傷を悪化させ、間接的に凝着のリスクを高めます。

環境要因の中で、湿度と媒体組成はより重要です。湿度の高い環境では表面の酸化が促進され、接触時に剥がれやすい緩い酸化層が形成され、接着媒体となります。環境中に腐食性ガスが存在する場合、表面に脆い化合物が形成され、剥がれ落ちる際に表面の金属を削り取り、接着力を低下させるだけでなく、表面の完全性を損ない、間接的に溶接抵抗にも影響を与えます。

### 2.1.4 優れた導電性の原理と応用

タングステン銅合金の優れた導電性は、純タングステンやほとんどの耐熱合金と一線を画す核心的な利点の一つです。この性能は、構成部品自体の特性に由来するだけでなく、複合構造の相乗効果も享受しています。「究極の導電性」を追求するのではなく、一定の機械的強度と耐熱性を維持した上で「十分かつ安定した」導電性を実現することで、電流伝導と複雑な動作条件の両方に対応する必要がある用途において、その役割を担います。原理的には、その導電性は金属内部の電子移動によるものであり、応用面では、この特性により「電気的機能」と「構造的支持」を繋ぐ重要な材料となっています。

#### 2.1.4.1 導電性の物理的性質と伝導機構

導電性の物理的な本質は、物質内の自由電子が電界の作用下で方向性を持って移動する能力です。外部電界が存在すると、物質内の自由電子は原子核の束縛から解放され、電界の方向に沿って移動し、電流を形成します。電子の移動を妨げる障害（原子振動、不純物散乱など）が少ないほど、導電性は向上します。タングステン銅合金は、主に銅相の役割に依存しています。銅は典型的な良導体であり、内部に多数の自由電子を保有し、原子が規則的に配列しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

電子の移動時の散乱効果が弱いいため、電流を効率的に伝導します。タングステン銅合金では、銅がタングステン骨格の細孔に連続または半連続的に充填され、「導電チャネル」を形成しています。電流が合金を通過する際、電子は主に銅相チャネルを流れます。タングステン自体の導電性は銅よりもはるかに低いですが、骨格として銅相の連続性を阻害することなく、支持構造を介して銅相チャネルの安定性を維持します。さらに、タングステンと銅の界面は強固に結合しているため、界面における電子の散乱損失が低減され、導電効率がさらに確保されます。この「銅相優位の導電性とタングステン相安定化構造」のメカニズムにより、合金は機械的特性を維持しながら優れた導電性を維持できます。

#### 2.1.4.2 異なる成分比における導電率の変化

銅の組成比の変化に伴って、明確な規則性を示します。その主な傾向は、「銅含有量が高いほど導電性は向上し、タングステン含有量が高いほど導電性は低下する」というものです。この変化は、両者の導電性の本質的な違いに起因しています。

銅含有量が多いほど、合金中の銅相によって形成される導電チャネルはより完全で高密度になり、電子の流れの経路はよりスムーズで障害が少なくなるため、全体的な導電性は純銅のレベルに近づきます。このとき、タングステン相は分散粒子の形で存在し、銅相の連続性にわずかな影響を与えますが、含有量が少ないため、導電チャネルを遮断するほどではなく、依然として高い導電性を維持できます。

タングステン含有量が増加すると、タングステン骨格の割合が徐々に増加し、銅相の分布がタングステン粒子によって分割され、一部の導電チャネルが遮断または狭くなる可能性があります。電子は流れる際にタングステン粒子を迂回する必要があり、経路が長くなり、散乱が増加し、導電性が低下します。タングステン含有量が高すぎると、銅相は連続したチャネルを形成できず、孤立した小さな領域にしか存在できません。このとき、合金内部の電子の自由な移動が困難になり、導電性が著しく低下します。

この変化は直線的な「単調減少」ではなく、銅相の連続性と密接に関係しています。銅相が基本的に連続している限り、タングステン含有量が増加しても導電性の低下は比較的緩やかですが、銅相が完全に分割されると、導電性は大幅に低下します。

#### 2.1.4.3 電気機器における導電性アプリケーションの利点

電気機器において、タングステン銅合金の導電性の応用上の利点は主に「導電性と作業条件への適応性の両方を考慮」していることに反映されており、特定のシナリオにおいて純銅と純タングステン間の性能ギャップを埋めることができます。

高電圧スイッチ、リレーなど、頻繁に電流のオン/オフを切り替える必要がある機器では、接点材料は電流を伝導し、スイッチング中のアーク温度や機械的衝撃に耐える必要があります。純銅は導電性に優れていますが、高温で溶けやすく、機械的強度が不足しています。長期間使用すると変形したり、アブレーションで故障したりしやすくなります。一方、純タングステン

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は耐高温性と高強度を備えていますが、導電性が低く、大電流伝導のニーズを満たすのが困難です。タングステン銅合金は、この両方に対応できます。銅相は効率的な電流の流れを確保し、接点の過熱を回避します。タングステン相はアーク温度や機械的衝撃に耐え、接点の寿命を延ばし、機器の故障を減らします。

モーターブラシや導電性スライダーなど、摺動接触を必要とする部品では、電流を伝導しながらも摩擦や摩耗に耐える材料が求められます。純銅は耐摩耗性が低く、長期間の摺動では摩耗により導電性が不安定になります。一般的な銅合金は耐摩耗性に限界があり、添加元素によって導電性が低下する可能性があります。タングステン銅合金のタングステン相は表面の耐摩耗性を向上させ、摺動時の損失を低減します。一方、銅相は安定した導電性を維持します。表面にわずかな摩耗が生じて、内部の銅相の連続性により電流伝導が確保され、機器の動作安定性が確保されます。さらに、「導電性+放熱性」という二重の機能を必要とする部品（高出力デバイスの電極など）では、タングステン銅合金の導電性と銅相の熱伝導性が相乗効果を発揮し、電流を伝導するだけでなく、デバイスの動作時に発生する熱を放散することで、局所的な過熱を回避し、性能への影響を軽減します。この「一つの材料で多用途に使える」という利点により、電気機器における応用価値がさらに高まります。

### 2.1.5 優れた熱伝導性

タングステン銅合金は、高温・高出力環境における中核的な支持材料の一つです。この性能は特定の部品だけに依存するものではなく、タングステンと銅の構造と特性の相乗効果によって実現されます。銅の効率的な熱伝導性を維持するだけでなく、タングステンの骨格構造を通して熱伝導プロセスの安定性を確保します。純銅と比較すると熱伝導率は若干劣りますが、その代わりに機械的支持が強化され、純タングステンと比較して熱伝導効率が大幅に向上し、熱蓄積の問題に対処できます。この「バランスの取れた」熱伝導特性は、熱伝達と構造的な負荷支持を同時に処理する必要がある状況において、かけがえのない存在となっています。

#### 2.1.5.1 熱伝導の基本原則と熱伝導メカニズム

熱伝導の基本原則は、物質内部の微細な運動を通して、高温領域から低温領域へ熱が伝達されるというものです。その本質は、分子、原子、あるいは電子の運動エネルギー伝達にあります。高温領域の粒子はより激しく振動し、衝突を通して低温領域の隣接する粒子にエネルギーを伝達し、徐々に熱拡散を実現します。

タングステン銅合金の熱伝導機構は、主に銅相の「電子熱伝導」を基盤とし、タングステン相の「フォノン熱伝導」を補完する。銅は金属として、内部に多数の自由電子を持つ。これらの電子は高温部でエネルギーを得ると運動が活発化し、衝突によって低温部へ急速に熱を伝達する。これは効率的な熱伝導方式である。一方、タングステンの熱伝導は主に格子振動（いわゆる「フォノン」）に依存しており、平衡位置付近の原子の振動が格子を介して熱を伝達する。銅の電子熱伝導よりも効率は低いものの、より安定している。合金構造において、銅相は連続した熱伝導経路を形成し、熱はまず銅相を急速に拡散する。タングステン骨格は「熱伝達の補

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

助経路」として機能し、同時に銅相チャネルの健全性を維持し、高温変形による熱伝導経路の破壊を回避します。この「銅相優位、タングステン相補助」のメカニズムにより、合金は効率的に熱を伝達すると同時に、熱衝撃下でも熱伝導構造の安定性を維持します。

#### 2.1.5.2 熱伝導率と放熱効果の関係

熱伝導率は放熱効果の中核であり、両者は「正の相関関係」を示しています。つまり、材料の熱伝導率が高いほど、熱源から外部への熱の伝達速度が速くなり、放熱効果も大きくなります。しかし、放熱効果は熱伝導率だけで決まるのではなく、材料の放熱面積や放熱媒体との接触状態などにも左右されます。タングステン銅合金のメリットは、「効率的な熱伝導によって、他の放熱条件の効果を増幅する」ことです。熱源が発熱すると、優れた熱伝導率を持つタングステン銅合金は、熱源表面から熱を素早く伝導し、局所的な熱の蓄積を回避します。伝導された熱は、材料表面を通過して空気や冷媒などの放熱媒体に伝達されます。このとき、材料自体の熱伝導率が不十分だと、放熱面積が大きくても熱が表面に到達しにくくなり、放熱効果が大幅に低下します。また、タングステン銅合金は熱伝導率が良好で、材料内部に熱が「ホットスポット」（局所的な高温部）を形成するのを防ぐことができます。ホットスポットは、過熱による部品故障の原因となることがよくあります。したがって、均一な熱伝導率は、間接的に全体の放熱の信頼性を向上させます。タングステン銅合金の熱伝導率は、放熱効果の「基礎力」を提供し、放熱設計をより効果的に機能させると言えます。

#### 2.1.5.3 高温作業環境における熱伝導率の応用値

高温作業環境においては、材料の熱伝導率は「効率的」であるだけでなく、「安定的」であることも必要です。つまり、周囲温度の上昇によって熱伝導率が大幅に低下しないことです。タングステン銅合金の熱伝導率の応用価値は、この点に反映されています。航空宇宙エンジンの燃焼室付近の部品は、周囲温度が非常に高く、作業によっても発熱します。熱伝導率が不安定だと、熱が蓄積して部品が許容温度を超える可能性があります。タングステン銅合金中の銅相は高温で軟化する可能性があります。融点に達しない限り熱伝導率が大幅に低下することはありません。また、タングステン骨格は構造安定性を維持し、銅相が高温によって変形して熱伝導経路を遮断するのを防ぎ、継続的に熱を伝導することで、高温下でも部品の安全な動作を確保します。

高出力半導体デバイスの放熱基板では、デバイスの動作時に大量の熱が発生し、動作時間とともに周囲温度が上昇します。一般的な熱伝導性材料（純アルミニウムなど）の温度が一定範囲を超えると、熱伝導率が著しく低下し、放熱不良が発生します。タングステン銅合金は、高温でも安定した熱伝導率を維持し、デバイスから発生した熱を放熱デバイスに継続的に伝達することで、過熱によるデバイスの性能低下や損傷を回避します。

さらに、アーク溶接の電極部品において、電極は電流を伝導するだけでなく、アークによって発生する瞬間的な高温にも耐えなければなりません。熱伝導率が悪いと、放熱できずに電極自体がすぐに焼損してしまいます。タングステン銅合金は、効率的な熱伝導率によりアークの熱を適時に伝導し、電極自体の温度を下げ、寿命を延ばし、溶接プロセスの安定性を確保します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

この「高温でも熱伝導効率を維持する」という特性は、高温環境における「発熱」と「放熱」を繋ぐ重要な材料となっています。

### 2.1.6 耐食性とメカニズム

タングステン銅合金は、その最も優れた特性ではありませんが、湿潤環境や軽度の腐食性媒体において実用的な価値を発揮します。その耐食性は単一の成分によって達成されるのではなく、タングステンと銅の構造的相乗効果と、腐食プロセスに対する「受動的な抵抗」によって実現されます。特定の環境下における純銅の急速な酸化を防ぐだけでなく、複雑な媒体における純タングステンの局所的な腐食欠陥を補い、様々な産業環境において構造と性能の安定性を維持します。

#### 2.1.6.1 異なる腐食環境の影響

腐食環境の違いはタングステン銅合金の腐食度合いに影響を及ぼし、主に媒体の種類、湿度、温度の3つの側面に反映されます。湿度の高い大気環境では、水蒸気が合金の表面に水膜を形成します。空気中に少量の汚染物質（二酸化硫黄や塩分など）が存在する場合、水膜は弱い電解質となり、軽度の電気化学的腐食を引き起こします。銅相が酸化され、表面に酸化膜が形成されることがありますが、この酸化膜は緻密であるため、ある程度まで腐食の拡大を防ぐことができます。タングステンはこのような環境に対して耐性が高く、ほとんど腐食されないため、全体的な腐食速度は遅くなります。

酸性またはアルカリ性の媒体では、腐食の程度が著しく悪化します。酸性環境では銅表面の酸化膜が破壊され、銅相が溶解し続けます。アルカリ性環境では銅と化学反応を起こして可溶性物質が生成され、銅相の損失が加速されます。このとき、タングステン相は酸やアルカリの腐食に耐えることができますが、銅相が失われ続けると、合金構造が徐々に緩み、最終的に全体的な性能に影響を与えます。高温乾燥環境では、腐食は主に酸化です。高温は銅の酸化反応を加速し、表面に厚い酸化層が形成される可能性があります。酸化層が剥がれると、新しい銅表面が露出して酸化が継続します。タングステンは高温でゆっくりと酸化され、生成された酸化層は表面に付着して内部を保護するため、全体的な腐食レベルは湿気や酸性またはアルカリ性の環境よりも低くなります。

#### 2.1.6.2 耐食性の内部メカニズム

タングステン銅合金は、「タングステン相の耐腐食骨格+銅相の酸化自己保護+構造密度バリア」の相乗効果と要約できます。

タングステン相自体は化学的に非常に安定しており、一般的な腐食環境のほとんどにおいて媒体と反応しにくい性質を持っています。タングステン相が形成する連続的な骨格が、合金の耐食性を支える基盤となっています。銅相がわずかに腐食した場合でも、タングステン骨格は構造的完全性を維持し、合金全体の損傷を回避します。湿度の高い環境、またはわずかに酸化性のある環境では、銅の表面に酸化膜が形成されます。この膜は表面の色を変化させますが、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

比較的緻密な組織であるため、媒体が銅内部に接触するのを防ぎます。これは、腐食の進行を遅らせる「天然のバリア」を形成するのと同等の効果があります。さらに、合金の緻密な構造は耐食性も向上させます。製造プロセスを最適化することで、タングステン銅合金内部の多孔性が低くなり、腐食媒体が内部に浸透する経路が減少します。同時に、タングステンと銅の界面は強固に結合し、媒体が界面に集まって局部腐食点を形成するのを防ぎ、腐食リスクをさらに低減します。このというメカニズムにより、合金は極度ではない腐食環境において良好な安定性を維持します。

### 2.1.6.3 耐食性を向上させる技術的手段

合金の耐食性を向上させるには、「腐食経路の遮断」、「表面保護の強化」、「内部構造の最適化」という3つの方向から着手し、標的を絞った技術的手段によって腐食性媒体が材料に与える影響を低減する必要があります。表面処理は最も直接的な技術的手段です。電気めっき（クロムめっきやニッケルめっきなど）によって合金表面に耐食性コーティングが形成されます。このコーティングは化学的に高い安定性を有し、合金マトリックスを腐食性媒体から完全に隔離することができます。同時に、コーティング自体は酸化や溶解を受けにくいいため、腐食の可能性を大幅に低減します。また、化学不動態化処理によって、特定の溶液を用いて銅相表面に緻密で安定した酸化膜を形成することで、「自己保護」能力を高めることができ、導電性などの合金のコア特性に影響を与えることなく、その効果を高めることができます。

内部構造の最適化は、耐食性を根本から向上させます。タングステン粉末と銅粉末の粒子径を微細化し、混合均一性を向上させることで、合金内部の成分偏析や気孔率を低減し、腐食性媒体の局所的な凝集を回避できます。高度な焼結プロセス（熱間静水圧プレスなど）の適用により、合金の密度を向上させ、内部の微小亀裂や空隙を排除し、腐食性媒体が内部に浸透する経路を遮断することで、構造的な観点から耐食性を向上させることができます。耐食性補助元素の添加も効果的な技術的アプローチです。耐食性の強い元素（クロムやシリコンなど）を合金に少量添加することで、銅相またはタングステンと銅の界面にこれらの元素が豊富に存在し、銅の導電性やタングステンの骨格効果に影響を与えません。

## 2.2 タングステン銅合金の特性に対する組成比の影響

タングステン銅合金は、タングステン（高硬度、高融点、脆性）と銅（良好な可塑性、導電性、熱伝導性）で構成されています。両者の組成比（通常はタングステン含有量で表され、例えばW70Cu30はタングステンが70%、銅が30%であることを意味します）が、その性能を決定する核心要素です。タングステンと銅の機械的・物理的特性には大きな差があるため、組成比の変化は合金の機械的特性（硬度、強度、靱性）の規則的な変化に直接つながります。

### 2.2.1 機械的特性への影響

タングステン銅合金は、タングステンの高強度・高硬度と銅の塑性・靱性のバランスを体現し

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

たものです。タングステン含有量が増加すると、合金は「銅を母相とし、タングステンを強化相とする」から「タングステンを骨格とし、銅を充填相とする」へと徐々に変化し、機械的特性も「塑性優位」から「剛性優位」へと変化します。逆に、銅含有量が増加すると、合金の塑性・靱性は大幅に向上しますが、硬度と強度は低下します。

### 2.2.1.1 硬度への影響

タングステン銅合金は、その成分の割合と密接に関係しており、その中でタングステン元素は硬度の向上に主導的な役割を果たしています。合金中のタングステン含有量が低い場合、銅相が優位を占め、少量の分散タングステン粒子が埋め込まれた連続マトリックスを形成します。このとき、合金は全体的に柔らかくなり、その硬度は純銅の硬度に近くなります。これは、銅の組織が比較的柔らかく、へこみや傷などの外部変形に耐える能力が限られているためです。

たとえば、10%～20%のタングステンを含むタングステン銅合金のブリネル硬度は約 80～120HB で、高い硬度は必要としないが、優れた加工性やその他の特性（導電性など）が求められるシナリオに適しています。

タングステン含有量が徐々に増加し、例えば 50%程度になると、合金の内部構造が大きく変化します。タングステン粒子は互いに接近し、ある程度の骨格構造を形成し始めます。銅相は依然として存在し、タングステン骨格の隙間を埋めますが、この時点からタングステン相のサポート役が顕著になり始めます。タングステン自体は非常に高い硬度を持つため、それが形成する骨格は合金の変形抵抗を大幅に高め、合金の硬度は 200～250HB まで大幅に増加します。この硬度レベルにより、合金は中程度の摩擦および摩耗環境に直面しても表面の完全性を効果的に維持することができ、機械伝達部品など、ある程度の摩擦を受ける部品に適しています。

タングステン含有量をさらに 70%～80%以上に増やすと、タングステン相は連続した強固な骨格を形成し、銅相はタングステン骨格の微細な気孔にのみ充填されます。このとき、合金の硬度は純粋なタングステンに近くなり、300HB を超えることもあります。高タングステン含有量のタングステン銅合金は、高応力、高摩耗の過酷な作業条件下でも優れた性能を発揮します。たとえば、EDM 電極は、動作中に放電によって発生する高温高圧の衝撃に頻繁にさらされるため、電極の形状精度と耐用年数を確保するには、材料に非常に高い硬度が必要です。また、高電圧放電接点では、頻繁な開閉時のアーク浸食や機械的摩耗に耐える高硬度の材料が必要です。高タングステン含有量のタングステン銅合金は、これらニーズに十分に対応できます。

### 2.2.1.2 強度への影響

強度面では、タングステン銅合金の引張強度と圧縮強度は、組成比の影響により異なる変化を示します。引張強度については、タングステン含有量が低い場合（例えば、50%以下）、銅相が連続マトリックスとして主な引張力を担います。このとき、合金の引張強度は主に銅の塑性支持力に依存します。銅の強度は比較的強く、その中に分散したタングステン粒子の補強効果は限られているため、合金の引張強度の増加は緩やかです。例えば、タングステンを 30%含

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

むタングステン銅合金の引張強度は約 300～350MPa です。

タングステン含有量が 50%～80%に増加すると、タングステン相は徐々に半連続、さらには連続的な骨格構造を形成し、銅相はタングステン骨格の隙間を埋めて結合および応力伝達の役割を果たします。この時点で、合金が応力を受けると、応力はタングステン骨格を介してより効果的に伝達および分散され、引張強度が大幅に向上します。タングステン自体は高強度であるため、その骨格構造は合金全体の支持力を大幅に向上させます。同時に、銅相は局所的な応力集中の問題を緩和します。たとえば、タングステンを 60%含むタングステン銅合金の引張強度は 450～550MPa に達することがあります。タングステンを 70%～80%含むと、引張強度はさらに約 600～700MPa に増加します。

しかし、タングステン含有量が増加し続けると（80%以上）、引張強度はピーク値に達した後、わずかに低下します。これは、銅相の割合が低すぎるため、タングステン粒子間の隙間を完全に埋めることができず、タングステン-タングステンの界面結合が弱まるためです。引張力を受けると、これらの弱い界面にまず亀裂が生じやすく、それが全体の破損を引き起こし、合金の引張強度を低下させます。例えば、タングステン含有量が 90%のタングステン銅合金の引張強度は約 600～650MPa で、タングステン含有量が 80%の合金よりもわずかに低くなります。

圧縮強度に関しては、その法則は比較的単純かつ明確です。タングステン含有量が増加すると、圧縮強度は継続的に上昇します。これは、圧縮過程において、合金は主にタングステン相によって形成される骨格構造に依存して圧縮変形に抵抗するからです。タングステン含有量が高いほど、骨格が強固になり、より大きな圧力に耐えることができます。例えば、タングステン含有量が 90%のタングステン銅合金の圧縮強度は 1000MPa を超えますが、タングステン含有量が 50%の合金の圧縮強度は 600～700MPa 程度に過ぎません。

### 2.2.1.3 韌性への影響

タングステン銅合金の韌性は主に銅相によって決定され、タングステン含有量と著しく負の相関関係にあります。タングステン含有量が低い場合（ $\leq 50\%$ ）、銅相は連続マトリックスの形で存在し、合金に優れた韌性を与えます。衝撃や外力を受けると、銅相は塑性変形により大量のエネルギーを吸収し、応力を分散させ、亀裂の発生と拡大の可能性を低減します。このとき、分散した少量のタングステン粒子は銅相の連続性に一定の影響を与えますが、合金全体のエネルギー吸収モードである主に塑性変形には変化がありません。合金は優れた衝撃韌性を備えています。たとえば、タングステン 30%を含むタングステン銅合金の衝撃韌性は約 15～20J / cm<sup>2</sup>で、純銅の韌性レベルに近いです。一定の衝撃を受ける環境でも構造の完全性を維持でき、一定の耐衝撃性が求められる一部の構造部品に適しています。

合金内部の構造において徐々に骨格を形成し、銅相はタングステン骨格の隙間を埋める分散相に変化します。この構造変化により、銅相の塑性変形空間が大幅に減少します。外力を受けても、銅相が以前のように十分に變形してエネルギーを吸収することが困難になります。タングステンと銅の界面に応力が集中しやすく、界面に亀裂が生じやすくなります。そのため、タ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ングステン含有量の増加に伴い、合金の靱性は著しく低下します。例えば、タングステン含有量が 60%のタングステン銅合金の衝撃靱性は 5~10J/cm<sup>2</sup>に低下し、衝撃を受けた際に合金が損傷を受けやすくなります。

タングステン含有量がさらに 80%以上に増加すると、連続したタングステン骨格の塑性変形能力はほとんどなくなり、銅相は微細な隙間を埋めるだけになり、応力集中を効果的に緩和できなくなります。衝撃荷重下では、タングステン骨格が直接破壊されやすく、合金が吸収するエネルギーは非常に少なく、明らかな脆性を示し、衝撃靱性は極めて低くなります。例えば、タングステン 90%を含むタングステン銅合金の衝撃靱性はわずか 1~3J / cm<sup>2</sup>で、純粋なタングステンの脆い状態に近いです。この高タングステン含有量合金は、使用中に大きな衝撃を受けることを避け、主に硬度と強度に対する要求が高く、靱性に対する要求が低い場面で使用されます。

## 2.2.2 物理的特性への影響

タングステン銅合金の特性は固定されておらず、タングステンと銅の組成比の変化に応じて定期的に変化します。これは、タングステンと銅自体の物理的性質が明らかに異なるためです。合金中の 2 つの成分の割合が増減すると、合金は 2 つの金属の特性を組み合わせる新しい物理的性質を形成します。密度や融点などの材料固有の特性に関するものであれ、熱膨張係数などの温度変化に関する特性に関するものであれ、組成比の影響は明確に見られ、この影響により、タングステン銅合金は組成を調整することで、さまざまなシナリオの物理的性能要件に適応することができます。

### 2.2.2.1 密度への影響

タングステン-銅合金は、その成分の割合と密接な関係があり、明確な変化パターンを示しています。高密度金属であるタングステンは、原子量が大きく、原子が密に配置されているため、非常に高い密度特性を持っています。銅の密度は金属の中では中程度ですが、タングステンよりもはるかに低いです。合金系中のタングステン含有量が低い場合、銅相が合金構造の主な位置を占め、連続分布状態を示します。このとき、合金の密度特性は主に銅相の影響を受け、全体の密度は純銅の密度値に近くなります。この場合、合金は重量に敏感であり、他の材料特性（優れた導電性、特定の加工性能など）も備えているいくつかのシナリオで有利です。例えば、重量制限が厳しい電子機器の一部の内部接続部品では、タングステン含有量の少ないタングステン銅合金を使用することで、全体の重量を可能な限り軽減しながら電気性能要件を満たすことができます。

合金中のタングステン含有量が徐々に増加すると、合金内部構造における高密度タングステン相の割合が増加し続け、合金全体の密度への寄与がますます顕著になります。この過程で、元々銅相が支配的であった連続構造が徐々に破壊され、タングステン粒子は互いに接近し始め、徐々に骨格構造を形成し、銅相がタングステン骨格の隙間を埋めていきます。タングステン相の密度は銅相の密度よりもはるかに高いため、タングステン含有量の増加に伴い、合金の

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

密度は着実に増加します。この密度が徐々に増加する特性により、この合金は、より大きな衝撃力に耐える必要がある用途や、安定したカウンターウェイトを必要とする用途において、その役割を果たすことができます。例えば、複雑な振動環境を持つ一部の機械装置では、タングステン銅合金中のタングステン含有量を適切に増加させ、密度を高めることで、振動環境における部品の安定性を高め、振動による変位や損傷のリスクを低減することができます。

合金中のタングステン含有量が高くなると、タングステン相は合金中に連続的で安定した骨格構造を形成し、銅相はタングステン骨格の微細な空隙にのみ充填されます。このとき、合金の密度特性はほぼ完全にタングステン相によって支配され、合金密度も純粋なタングステンの密度に近くなります。タングステン含有量の高いタングステン銅合金は、いくつかの特殊な分野で独特の価値を示しています。たとえば、航空宇宙分野の特定の部品の製造では、材料は極度の圧力と高速気流の衝撃を受けても構造的完全性を維持する必要があります。高密度タングステン銅合金は、高密度とタングステン相によってもたらされる高強度と高硬度により、これらの過酷な作業条件に効果的に対応できます。高エネルギー粒子の衝撃を吸収したり、高エネルギーの衝撃に耐えたりする必要がある原子力産業関連のシナリオでは、タングステン含有量が高く高密度のタングステン銅合金も重要な役割を果たすことができ、高密度を利用して衝撃エネルギーを吸収・分散し、機器の安全な動作を確保します。

#### 2.2.2.2 融点への影響

合金の融点の変化パターンは複雑で、成分の比率と密接に関係しています。タングステンは融点が非常に高く、一般的な金属の中で最も高いランクにランクされています。これは、原子間の強い結合力和複雑な結晶構造によるものです。銅の融点はタングステンの融点よりもはるかに低く、2つの融点の差は顕著です。合金中のタングステン含有量が低い場合、合金の微細構造は連続したマトリックスとしての銅相に基づいています。このとき、合金の融点は主に銅相の特性によって決定され、全体的な融点は純銅の融点に近くなります。ただし、合金中には少量のタングステン粒子が分散しているため、これらの高融点タングステン粒子は合金の融点をある程度上昇させます。この改善効果はタングステン含有量が少ない段階ではそれほど大きくありませんが、純銅と比較して合金の融点はすでにある程度上昇しています。この融点特性により、タングステン含有量の低いタングステン銅合金は、特に高い融点は必要としないものの、ある程度の耐高温性や、優れた電気伝導性、熱伝導性などの他の特性が求められる用途に使用することができます。例えば、一部の電子機器の放熱部品の製造において、このタイプの合金は、機器の通常動作中に一定量の熱が発生する環境下でも、構造安定性を維持し、良好な放熱機能を発揮することができます。

合金中のタングステン含有量が徐々に増加すると、合金の内部構造が大きく変化し、タングステン相は徐々に骨格構造を形成し始めます。このとき、高融点タングステン相が合金系の融点に与える影響はますます顕著になります。タングステン相の融点は銅相の融点よりもはるかに高いため、それが形成する骨格構造により、加熱プロセス中の銅相の流動性と原子拡散がある程度制限され、合金全体が熔融状態に達するためにより多くのエネルギーを吸収する必要があり、それによって合金の融点が大幅に上昇します。この段階では、タングステン含有量の

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

増加とともに合金の融点の上昇が徐々に増加し、比較的明らかな上昇傾向を示しています。この特性により、中温および高温環境で動作する一部の部品の製造において合金に利点もたらされます。例えば、一部の工業炉の内部接続部品や高温センサーの保護シールの製造において、タングステン銅合金中のタングステン含有量を適切に高め、融点を上昇させることで、部品が高温環境下でも長期間安定して動作し、温度上昇による溶融や変形を起こさず、機器の正常な動作を確保することができます。合金中のタングステン含有量が高いレベルに達すると、連続的で安定したタングステン骨格構造が優勢となり、銅相はタングステン骨格の微細な空隙を埋めるだけになります。この時点で、合金の融点は大幅に上昇し、タングステンの融点に近づきます。この場合、合金は極めて高温の環境下でも顕著な安定性を示します。例えば、航空機エンジンの燃焼室部品や宇宙船の大気圏再突入時の熱保護部品の製造において、これらの部品は動作中に数千度の高温環境に晒されます。タングステン含有量の高いタングステン銅合金は、その高融点特性により、このような極度の高温にも耐えることができ、高温下での部品の溶融や変形を効果的に防止し、航空機やエンジンの安全な作動を確保します。同時に、銅相の存在は合金に一定の優れた熱伝導性を与え、高温で発生した熱を放散させるのに役立ち、高温環境における合金の信頼性をさらに向上させます。

### 2.2.2.3 熱膨張係数への影響

熱膨張係数は、温度変化時の材料の寸法安定性を測る重要な指標です。タングステン銅合金の熱膨張係数と合金成分の割合には密接な関係があります。銅は比較的大きな熱膨張係数を持っています。これは、温度が変化すると銅原子の熱運動が激しくなり、原子間の距離が広がるため、銅材料全体のサイズがより顕著に膨張または収縮することを意味します。タングステンの熱膨張係数は比較的小さく、原子構造は比較的安定しており、温度変化による原子間距離の変化は比較的小さいです。合金中のタングステン含有量が低い場合、銅相が合金構造を支配し、連続分布状態を示します。このとき、合金の熱膨張特性は主に銅相によって決定され、合金の熱膨張係数は純銅の熱膨張係数値に近くなります。この場合、合金の周囲温度が変化すると、合金は大きな体積変化を生じます。例えば、一部の電子機器の初期設計において、タングステン含有量の少ないタングステン銅合金を接続部品として使用した場合、機器が長時間稼働して加熱されたり、周囲温度が大きく変動したりすると、合金の熱膨張係数が大きいため、熱膨張と収縮によって接続部品が緩んでしまい、電気接続の安定性や機器全体の性能に影響を与える可能性があります。

合金中のタングステン含有量が徐々に増加するにつれて、合金内部構造における低膨張係数のタングステン相の割合が増加し続け、合金全体の熱膨張に対するその抑制効果が徐々に顕著になります。この過程で、もともと銅相が優勢であった連続構造が徐々に破壊され、タングステン相は一定の骨格構造を形成し始め、銅相はタングステン骨格の隙間を埋めます。タングステン相の熱膨張係数は銅相の熱膨張係数よりもはるかに小さいため、構造を安定化させ、合金全体の熱膨張を制限する役割を果たします。タングステン含有量がさらに増加すると、合金の熱膨張係数は徐々に減少します。タングステン含有量に応じて熱膨張係数が変化するという特性により、熱膨張係数のマッチングに対する要求が高いいくつかのシナリオにおいて、この合金は幅広い応用可能性を持っています。たとえば、電子パッケージの分野では、さまざまな電子部品がさまざまな異なる材料から構成されていることが多く、各材料の熱膨

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

張係数は異なります。

機器の動作中に、異なる部品間の接続部分が温度変化による熱膨張と収縮の差によって応力集中を起し、接続不良や破損が発生しないようにするためには、他の部品材料と熱膨張係数が一致するパッケージ材料を選択する必要があります。タングステン銅合金中のタングステン含有量を調整することで、熱膨張係数を一定の範囲内で精密に調整することができ、さまざまな電子部品材料（セラミック基板、半導体チップなど）の熱膨張係数マッチング要件を満たし、電子機器がさまざまな温度環境下で安定して確実に動作することを保証します。

合金中のタングステン含有量が高くなると、連続的で安定したタングステン骨格構造が合金を支配し、銅相はタングステン骨格の微細な細孔にのみ充填されます。このとき、合金の熱膨張係数はタングステンの熱膨張係数に近づいています。温度が変化すると、合金の寸法安定性が大幅に向上し、熱膨張と収縮の振幅が非常に小さくなります。この特性により、高タングステン含有量のタングステン銅合金は、非常に高い寸法安定性が要求される精密機器製造や航空宇宙などの高精度分野でかけがえのない役割を果たしています。たとえば、宇宙船の光学機器部品の製造では、これらの機器は宇宙の極寒の深宇宙から太陽に近い高温環境まで、非常に複雑で劇的に変化する温度環境に直面し、温度範囲は数百°Cに達することがあります。タングステン含有量が高く、熱膨張係数が低いタングステン銅合金は、極端な温度変化下でも光学機器の構造寸法がほとんど変化しないことを保証し、光学機器の高精度な光学性能に影響を与えないことを保証し、宇宙探査ミッションに安定した信頼性の高い観測データサポートを提供します。

#### 2.2.2.4 導電性への影響

タングステン銅合金は組成比と密接な関係があります。銅は導電性に優れた金属であり、高い導電性を示しますが、タングステンは比較的低い導電性を示します。合金中のタングステン含有量が増加すると、導電性は徐々に低下します。これは、タングステンの原子間距離が大きく、電子雲密度が低いためです。銅マトリックスに添加すると、分散相と積層構造を形成し、粒界および粒内での電子の流れを阻害し、イオン欠陥や不純物原子を増加させ、格子内の電子の自由な伝達を阻害します。タングステン含有量が一定の割合を超えると、導電性の低下速度が鈍化し始めます。これは、タングステン含有量の増加によって形成される電子障壁が相互作用し始め、より多くの電子の流れを制限するためと考えられます。逆に、銅含有量を増やすと、銅の高い導電性により電流をよりよく伝導できるため、合金の導電性が向上します。

#### 2.2.2.5 熱伝導率への影響

熱伝導率の面では、銅はタングステンよりもはるかに高い熱伝導率を持っています。そのため、一般に、タングステン銅合金中の銅含有量が多いほど、熱伝導率が高くなります。これは、純金属は主に自由電子によって熱を伝導しますが、銅は比較的高い自由電子濃度を持っているため、より効率的に熱を伝達できるためです。しかし、銅の含有量が多すぎるとタングステン含有量が減少し、熱膨張係数の増加など、合金の他の特性に悪影響を与える可能性があります。同時に、合金の熱伝導率は、密度などの他の要因によっても影響を受けます。ガスは熱の運搬

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が貧弱です。材料に気孔がある場合、気孔率の増加に伴って熱伝導率が低下するため、高密度のタングステン銅合金は通常、より高い熱伝導率を持ちます。

### 2.2.3 化学的性質への影響

タングステン銅合金は化学的安定性に優れています。耐酸化性に関しては、タングステンは融点が高く、耐酸化性に優れています。タングステンの含有量が増えると、合金の耐酸化性はある程度向上します。しかし、合金中の銅は高温で酸化されやすいため、合金の耐酸化性は、タングステンと銅の比率や使用環境などの要因を総合的に考慮する必要があります。耐食性に関しては、タングステンと銅自体に一定の耐食性があり、タングステン銅合金は一般的な化学物質や環境に対して優れた耐性を持っています。しかし、強酸化酸などの特定の化学媒体では、銅が腐食反応を起こす可能性があります。このとき、タングステン含有量を増やすことで、合金の耐食性のある程度向上させることができます。さらに、不純物含有量や製造プロセスもタングステン銅合金の化学的性質に影響を与えます。例えば、酸素含有量が高すぎると、タングステン銅合金が酸化され、合金の強度と導電性が低下します。

#### 2.2.3.1 耐食性への影響

タングステン銅合金は、その組成比に大きく影響され、様々な腐食環境において多様な性能を発揮します。タングステン自体は優れた化学的安定性を有し、多くの一般的な腐食媒体において容易に腐食されない構造を維持できます。合金中のタングステン含有量が比較的高い場合、タングステン相によって形成される骨格構造が、合金がある程度耐腐食性を発揮するための基盤となります。例えば、一部の弱酸性環境において、タングステン含有量の高いタングステン銅合金は、タングステンの化学的安定性により、合金全体の腐食速度を効果的に抑制することができます。これは、腐食媒体が合金表面を貫通して内部に到達するには、まずタングステン相によって形成される比較的安定した「バリア」を突破する必要があります。タングステン原子間の強い結合力と比較的安定した電子構造により、腐食媒体中のイオンはタングステンと化学反応を起こしにくくなり、腐食のさらなる浸透を阻害します。

しかし、銅は特定の腐食環境において比較的活性が高い。硝酸などの酸化力の強い酸性溶液中では、銅は硝酸と容易に酸化還元反応を起こし、対応する銅塩を生成し、窒素酸化物ガスを放出する。合金中の銅含有量が高い場合、この活性が合金の耐食性に及ぼす悪影響は顕著になる。このような環境では、銅相が合金の腐食の主な「突破口」となり、腐食性媒体が銅と優先的に反応し、合金表面に腐食ピット、錆などの現象を引き起こし、合金全体の構造を破壊し、性能を低下させる。

しかし、中性または弱アルカリ性の水溶液環境では状況異なります。このとき、銅含有量が一定範囲内であれば、銅は合金表面に薄い不動態膜を形成する可能性があります。この不動態膜の主成分は、ある種の銅酸化物または水酸化物です。この不動態膜は一定の密度を持ち、溶液中の溶存酸素やその他の腐食性イオンが合金内部にさらに接触するのを防ぎ、合金の耐食性のある程度向上させます。例えば、一部の工業用水道管のライニング材の選定において、適度な銅含有量のタングステン銅合金を使用すると、この銅の不動態化特性を利用して、長期間

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の水との接触における管ライニングの健全性を維持し、腐食による穿孔などの問題の発生を低減することができます。同時に、タングステン相の存在は合金全体の構造強度を高め、水流衝撃などの外力を受けても不動態膜が容易に破壊されないようにすることで、合金の耐食性をさらに確保します。

### 2.2.3.2 高温酸化耐性への影響

耐高温酸化性は、高温酸素環境におけるタングステン銅合金の性能を測る重要な指標であり、その組成比と密接な関係があります。タングステンは融点が 3410°C と非常に高く、高温では表面に比較的安定した酸化膜が形成されます。この酸化膜の主成分は  $WO_3$  などの酸化物で、密度と安定性に優れ、合金への酸素のさらなる拡散を防ぎ、合金を保護します。合金中のタングステン含有量が多い場合、高温酸素環境下では、主に酸化タングステンからなる酸化膜が合金の表面に優先的に形成されます。温度が上昇し、時間が経つにつれて、この酸化膜は厚くなり続け、その安定した構造により、酸素と合金内部とのさらなる反応を効果的に防ぎ、合金の耐高温酸化性を大幅に向上させます。例えば、一部の高温炉の内部構造部品に高タングステン銅合金を使用すると、1000°C 以上の高温でも長時間使用できます。合金表面に形成される安定した酸化膜により、構造部品が長期間にわたって過度に酸化されることを防ぎ、機械的特性と構造健全性を維持できます。

一方、銅の融点は 1080°C と比較的 low、高温では比較的速く酸化されます。合金中の銅含有量が多い場合、高温の好気性環境では銅は  $Cu_2O$  や  $CuO$  などの酸化物に酸化されやすくなります。これらの銅酸化物は、タングステン酸化物と比較して比較的緩い構造をしており、タングステン酸化物膜のような有効なバリア層を形成できません。酸化プロセスが続くと、銅酸化物が蓄積し続け、合金中の銅元素が消費されるだけでなく、酸化膜に亀裂や剥離が発生し、酸素が酸化膜を透過して合金内部の他の成分と反応しやすくなり、合金の高温酸化耐性が低下します。高温好気環境下で長期間安定動作が求められる電気接点材料において、銅含有量が高すぎるタングステン銅合金を使用すると、頻繁な電源オン・オフによる温度上昇により接点が急速に酸化します。表面に形成される緩い酸化銅膜は、接点の導電性と接触安定性に影響を与え、ひどい場合には接点の固着や故障を引き起こすこともあります。

しかし、特定の組成比と温度範囲では、タングステンと銅の酸化物の間に相互作用が生じ、合金の耐高温酸化性に複雑な影響を及ぼす可能性があります。例えば、中温域 (800°C~1200°C) では、合金中のタングステンと銅の含有率が適切であれば、銅の酸化物がタングステン酸化物とある程度結合して、比較的安定した複合酸化膜構造を形成することがあります。この複合酸化膜は一定の密度と柔軟性を有しており、タングステンのバリア特性を活かすだけでなく、銅の酸化物が酸化膜の微細な亀裂をある程度埋めることで、この温度範囲における合金の耐高温酸化性をある程度向上させることができます。

## 2.3 CTIA GROUP LTD タングステン銅合金 MSDS

(Cu) から製造される複合材料で、通常 70%~90% のタングステンと 10%~30% の銅を含

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

み、電気接点、高電圧スイッチ、電気加工電極などに広く使用されています。製品の用途は科学研究や工業製造などであり、具体的な用途としてはヒートシンク、電極などがあります。MSDS（安全データシート）の目的は、作業員や緊急救助隊員に、化学組成、潜在的な危険性、取り扱いに関する推奨事項など、安全な使用に関するガイダンスを提供することです。

一般的なタングステン銅合金の MSDS によると、タングステン銅合金は一般に危険物として分類されていないため (OSHA 29 CFR 1910.1200 に準拠)、特定の注意語や危険有害性情報はありません。

タングステン銅合金には、タングステン (CAS 番号: 7440-33-7、含有量 70%~90%) と銅 (CAS 番号: 7440-50-8、含有量 10%~30%) が含まれます。

タングステン銅合金は通常の条件下では燃えにくいですが、加工中に発生する粉塵が火災を引き起こす可能性があります。粉末消火剤、泡消火剤、または二酸化炭素消火剤の使用をお勧めします。金属粉末の火災には、水を直接噴射して消火しないでください。水は反応を激化させる可能性があります。加熱中に金属酸化物の煙が発生する場合があります。消防士は、有毒ガスの吸入を防ぐため、自給式呼吸器を着用する必要があります。

タングステン銅合金は TSCA インベントリーの要件を満たしており、重大な生態学的有害性はありませんが、廃棄物の処理により環境に軽微な影響を与える可能性があります。化学物質安全性評価は完全に完了していないため、注意を払い、現地の規制を遵守することが推奨されます。



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

CTIA GROUP LTD  
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	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 Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 第3章 タングステン銅合金の微細組織と特性の相関

タングステン銅合金は、優れた導電性、熱伝導性、耐高温性、耐アーク腐食性を有し、電気、電子、防衛、工業分野など幅広い応用可能性を秘めています。この合金は粉末冶金法によって製造され、タングステン(W)をマトリックス相または強化相として高い融点と硬度を提供し、銅(Cu)を結合相として高い導電性と熱伝導性をもたらし、高電流、高温、高摩耗環境などの厳しい要求を満たすことができます。タングステン銅合金の性能は、その微細構造と密接に関連しています。結晶粒の形態、相分布、界面特性は、機械的特性、導電性、耐久性に直接影響します。

#### 3.1 タングステン銅合金の微細構造特性に関する考察

タングステン銅合金はその性能の基礎であり、粉末冶金プロセスにおける混合、加圧、焼結、および後処理プロセスを反映しています。微細構造特性には、粒子の形態とサイズ、相分布、界面などがあり、顕微鏡（走査型電子顕微鏡 SEM、透過型電子顕微鏡 TEM など）で分析されます。タングstenは融点が高いため（3422℃）、焼結中に固体のままであり、銅は融点が高いため（1085℃）、液相を形成し、タングsten粒子を濡らして隙間を埋め、独特の複合構造を形成します。この構造は、合金の電気伝導性、熱伝導性、硬度、および耐アーク浸食性に直接影響します。以下では、粒子の形態とサイズ、相分布、界面について詳細に分析します。

##### 3.1.1 粒子の形態と大きさ

タングsten銅合金は、合金の機械的特性と熱的特性を決定する微細構造特性の中核を成しています。結晶粒の形態は主にタングsten粒子で構成されています。タングstenは焼結過程においても固体のままであるため、その形態は粉末の初期特性を保持し、通常は多面体またはほぼ球形です。銅相は液体結合相として、高温でタングsten粒子間の隙間に浸透し、冷却後に不規則な網目構造または充填相を形成します。結晶粒形態の均一性は、性能の安定性に直接影響します。タングsten粒子の規則的な分布は応力分散に役立ちますが、不規則な形態は局所的な弱点につながる可能性があります。

粒径は製造プロセスに大きく影響されます。初期のタングsten粉末の粒径は通常 1~10 ミクロンですが、高エネルギーボールミル処理によってナノメートルスケールまでさらに微細化できます。焼結温度と時間は粒径に重要な役割を果たし、低温ではより微細な粒子が保持され、高温では粒成長が促進される可能性があります。液相焼結プロセスでは、銅液相の流動性がタングsten粒子の再配列と成長を促進し、粒径は通常 5~20 ミクロンの範囲で、タングsten含有量とプロセスパラメータに依存します。ナノスケールのタングsten粉末を使用することで、粒径をサブミクロンレベルまで制御でき、性能を大幅に向上させることができます。結晶粒の形態とサイズは性能に大きな影響を与えます。結晶粒が小さいほど、ホールページ効果によって合金の強度と硬度が向上し、微細な結晶粒は粒界密度を高め、転位の動きをブロックし、変形抵抗を改善します。たとえば、タングstenの粒子サイズをナノメートルレベルまで小さくすると、硬度は 20%~30%増加し、電気加工電極などの摩耗の激しい用途に適しています。結晶粒サイズは、電気伝導率と熱伝導率にも影響します。結晶粒が小さすぎると、粒

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

界抵抗が増加し、電子と熱の伝達効率が低下する可能性があります。銅相のネットワーク構造がこの欠陥を補うことができます。均一な結晶粒形態は、特に熱サイクルや機械的衝撃環境において、応力集中点を減らし、疲労耐性を高めます。

製造プロセスの最適化は、結晶粒の形態とサイズを制御する鍵となります。放電プラズマ焼結（SPS）は、急速加熱と高圧により過剰な結晶粒成長を抑制し、微細な結晶構造を維持します。熱間等方圧加圧（HIP）は、全方向圧力により気孔を除去し、結晶粒分布の均一性を向上させます。微量元素（ニッケルや鉄など）を添加することで、粒界エネルギーを調整し、微細構造を安定化させることができます。また、結晶粒サイズの縮小により、合金のアーケ浸食耐性も向上します。微細なタングステン粒子はアーケエネルギーを分散させ、表面溶融のリスクを低減します。最適化の方向性としては、超微細ナノ粉末の開発や、より正確な結晶粒制御を実現するための積層造形技術の使用などが挙げられます。つまり、タングステン銅合金の結晶粒の形態とサイズは、特に強度と導電性の両方を考慮する必要があるシナリオにおいて、その性能を基本的に支えているのです。

### 3.1.2 相分布と界面

タングステン銅合金は、微細構造特性の重要な構成要素であり、合金の機械的特性と機能特性に直接影響を及ぼします。相分布とは、合金中のタングステン相と銅相の空間的な配置を指し、界面とは、両者の結合領域を指します。高融点相であるタングステンは分散粒子状に分布し、低融点相である銅は連続または半連続の結合ネットワークを形成します。相分布の均一性は性能の一貫性を決定し、界面の品質は荷重伝達と熱拡散に影響を与えます。

相分布の形成は焼結プロセスに依存します。液相焼結が重要なステップです。銅は 1085°C 以上で熔融し、タングステン粒子を濡らし、毛細管現象で隙間を埋めます。タングステン含有量が高い場合（W80/Cu20 など）、銅相は不連続に分布し、孤立したタングステン粒子を囲みます。銅含有量が高い場合（W60/Cu40 など）、銅相はタングステン粒子が埋め込まれた連続ネットワークを形成します。相分布の均一性は、高エネルギーボールミル処理と粉末混合プロセスによって制御されます。ボールミル処理時間が短すぎるとタングステンの凝集を引き起こす可能性があり、ボールミル処理時間が長すぎると不純物が導入される可能性があります。焼結後、銅相の冷却と凝固によって相分布構造が固定され、熱間静水圧プレスによって均一性をさらに最適化できます。

界面の品質は、相分布と性能の相関関係を左右する重要な要素です。タングステンと銅の界面は、液相焼結によって化学的かつ機械的に結合します。液相焼結では、銅の液相がタングステン粒子の表面に浸透し、界面の密着性を高めます。界面における冶金結合により、ボイドや欠陥が減少し、荷重伝達効率が向上します。また、界面は電気伝導性と熱伝導性にも影響を与え、銅の連続ネットワークが界面を介してタングステンに接続され、効率的な電子および熱伝達経路を形成します。界面強度の向上は、濡れ性を向上させ、界面結合を強化するニッケルなどの微量元素を添加することで実現されます。界面が弱いと、特にアーケや熱応力下では、剥離や割れが生じる可能性があります。相分布と界面は性能に大きな影響を与えます。均一な相分布は合金の総合的な特性を向上させ、タングステン相は硬度と耐高温性を、銅相は導電性と熱

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

伝導性を確保します。界面の品質は耐アーク侵食性に直接影響を及ぼし、強固な界面は相境界におけるアークエネルギーの集中的なアブレーションを低減します。銅含有量の高い合金（W70/Cu30 など）は、銅相の連続性が良好で、導電性と熱伝導性に優れているため、放熱基板に適しています。タングステン含有量の高い合金（W90/Cu10 など）は、タングステン相が優勢で、硬度が強く、耐摩耗性に優れているため、電極用途に適しています。ボイドや非濡れ領域などの界面欠陥は性能を低下させる可能性があるため、プロセスの最適化によって排除する必要があります。

相分布と界面を最適化する鍵は、製造プロセスの改善です。真空焼結は酸化を抑え、界面を清浄に保ちます。段階的な加熱は銅の液相の流れを制御し、相分布を改善します。ナノスケールの粉末を用いることで、界面の接触面積が拡大し、接合強度が向上します。最適化の方向性としては、機能性傾斜材料の開発、タングステンと銅の相分布の段階的な変化、あるいはインテリジェントモニタリング技術を用いた界面品質のリアルタイム評価などが挙げられます。つまり、タングステン銅合金の相分布と界面は、特に導電性、耐熱性、機械的強度が求められる用途において、その性能を支えている重要な要素です。

### 3.1.3 気孔率と欠陥の発現

タングステン銅合金は微細構造の重要な特徴であり、合金の機械的特性、導電性、耐久性に直接影響を及ぼします。気孔とは、焼結工程において銅の液相によって完全に満たされない微細な隙間を指し、欠陥には亀裂、未濡れ粒子、不純物の凝集などがあります。これらの構造欠陥は通常、顕微鏡観察または密度試験（アルキメデス法など）によって特定されます。気孔率は製造工程と密接に関連しており、過剰な気孔は密度を低下させ、性能の安定性に影響を与える可能性があります。

気孔の形成メカニズムは、主に粉末特性、粉末混合の均一性、および焼結条件に関係しています。初期のタングステン粉末の粒子サイズが不均一であったり、凝集していたりすると、局所的な銅液相が不十分になり、微細気孔が残る可能性があります。加圧時の圧力不足や粉末の流動性が悪いと、初期の空隙が発生する可能性があります。また、焼結温度が低すぎる（例えば 1100°C未満）場合や焼結時間が不十分な場合、これらの空隙を完全に除去できない可能性があります。銅液相の濡れ性も重要な役割を果たします。銅とタングステンの間の濡れ角は比較的高く（約 30°~40°）、焼結雰囲気（酸化環境など）に不純物が混入すると、濡れ効果が弱まり、気孔率が上昇します。典型的な気孔サイズは 1~10 ミクロンの範囲で、不均一な分布はマクロ気孔（> 20 ミクロン）の形成につながり、性能を大幅に低下させる可能性があります。

欠陥は様々な形で現れることがあります。クラックは、加圧または冷却時の熱応力や相変化応力によって引き起こされる可能性があります。特にタングステン含有量が高い場合、銅相の不均一な収縮により、界面クラックが発生しやすくなります。非濡れ粒子とは、表面に銅液相が完全に浸透していないタングステン粒子のことで、通常は焼結温度が不十分であるか銅含有量が低すぎるのが原因で、孤立したタングステン粒子として現れます。不純物の凝集体（酸化物や炭化物など）は、原材料または加工プロセスに由来し、粒界または界面に集中して、荷重伝達と熱拡散に影響を与えます。気孔と欠陥の密度は、熱間等方圧加圧（HIP）または放電

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プラズマ焼結（SPS）によって大幅に低減でき、密度は 98%以上に達することがあります。

気孔率と欠陥は性能に大きな影響を与えます。気孔率が高いと、特に電極などの摩耗の激しい用途では、空隙が応力集中点となり、簡単に破損する可能性があるため、合金の曲げ強度と硬度が低下します。電気伝導性と熱伝導性も低下し、気孔によって電気抵抗と熱抵抗が増加し、電流と熱の伝達効率が低下します。耐アーク侵食性も低下し、気孔はアークエネルギーの集中点になりやすく、表面の溶融が促進されます。亀裂などの欠陥は、熱サイクルや機械的衝撃を受けて伝播し、耐用年数を短くする可能性があります。最適化の方向性としては、ナノスケールの粉末を使用して粒子の均一性を向上させる、焼結パラメータ（段階加熱など）を最適化して気孔率を低減する、または表面コーティングによって欠陥を埋めるなどがあります。つまり、気孔と欠陥の制御がタングステン銅合金の性能を向上させる鍵となります。

### 3.1.4 異なる調製プロセスにおける構造の違い

タングステン銅合金は、製造プロセスの違いにより大きく異なります。一般的なプロセスとしては、従来の粉末冶金、銅浸透法、放電プラズマ焼結（SPS）、積層造形（3D プリンティング）などが挙げられます。それぞれの方法は、結晶粒の形態、相分布、多孔度、界面品質に独自の影響を与えます。プロセスの選択は合金の性能を直接左右するため、用途に応じて最適化する必要があります。

従来の粉末冶金法は、粉末の混合、加圧、焼結を伴う広く用いられているプロセスです。タングステン粉末と銅粉末を高エネルギーボールミルで混合し、成形した後、焼結します。構造的な特徴としては、タングステン粒子の多面体分布、銅相の不連続ネットワーク、そして典型的には 5%~10%の多孔度が挙げられます。界面の結合は銅液相の濡れ性に依存し、品質は焼結温度と時間によって制御されます。焼結温度が高いと粒成長が起こり、均一性が低下する可能性があります。電気伝導性と熱伝導性に対する要求が高い放熱基板に適しています。

銅浸透法は、まずタングステン骨格を焼結し、次に液体銅を浸透させて合金を作製します。タングステン骨格は高温で多孔質構造を形成し、銅が浸透して充填されます。構造上の特徴は、タングステン相が連続骨格であり、銅相が均一に分布していることです。また、気孔率は 2%~5%に低減できます。界面の結合が強く、未濡れ粒子の数が少なくなりますが、プロセスが複雑でエネルギー消費量が多いという欠点があります。高密度化が求められる電極用途に適しています。

放電プラズマ焼結（SPS）は、パルス電流と機械的圧力を用いて焼結するため、焼結時間が短く（数分）、構造上の特徴は、タングステン粒子が微細で、銅相の分布が均一で、気孔率が 2%未満で、粒界が明瞭であることです。急速加熱により粒成長が抑制され、界面の結合力が強く、接点などの高硬度・耐アーク侵食用途に適しています。欠点は、設備コストが高く、適用範囲が限られていることです。

積層造形（選択的レーザー溶融法 SLM など）では、粉末を層ごとに堆積させることで合金を

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製造します。構造上の特徴は、タングステンと銅の相の勾配分布、制御可能な粒径、およびレーザーパラメータに依存し、最適化された条件下では 3% 未満になる可能性がある気孔率です。インターフェース品質は高く、複雑な形状がサポートされていますが、熱応力によって微小亀裂が発生する可能性があります。カスタマイズされた航空宇宙部品に適しています。プロセスの違いはパフォーマンスに影響します。従来の粉末冶金は経済的ですが気孔率が高く、大規模生産に適しています。銅浸透は密度は良好ですがコストが高くなります。SPS は高性能を提供しますが小ロットに適しています。積層造形は柔軟性がありますが、熱応力の最適化が必要です。最適化の方向性としては、複数のプロセス（SPS + 銅浸透など）を組み合わせることで密度を向上させるか、インテリジェントな監視技術を使用してパラメータをリアルタイムで調整することが含まれます。つまり、製造プロセスにおける構造の違いにより、パフォーマンスの最適化にさまざまなオプションが提供されます。

### 3.2 タングステン銅合金の微細構造と性能の本質的な関係

タングステン銅合金の微細構造と性能の間には、本質的な関係があります。結晶粒の形態、相分布、気孔率、欠陥、そして製造プロセスは、その電気伝導性、熱伝導性、機械強度、耐久性を共同で決定します。微細構造の最適化は、界面結合の強化、欠陥の低減、そして相比の制御によって実現され、様々な用途の要件を満たします。

粒径が性能に与える影響は、ホールページ効果に反映されます。微細粒子は粒界密度を高め、強度と硬度を向上させますが、抵抗の増加や導電性の低下を招く可能性があります。相分布は電気伝導と熱伝導の経路を決定し、銅相の連続ネットワークは性能を向上させ、タングステン相は耐高温性を高めます。多孔性や欠陥は密度を低下させ、曲げ強度と耐アーク浸食性に影響を与えます。一方、緻密な構造は性能を大幅に向上させます。界面品質は荷重伝達と熱拡散に影響を与え、強固な界面は全体的な性能を向上させます。

微細構造の最適化は、アプリケーションシナリオと組み合わせる必要があります。放熱基板には高い銅相の連続性が求められ、電極には高いタングステン相密度が求められます。今後の研究では、ナノ複合構造や機能傾斜設計を検討することで、微細構造と性能の本質的な関連性をさらに明らかにすることができます。

#### 3.2.1 結晶構造が強度に及ぼす影響のメカニズム

粒構造は、主に粒界のバリア効果と応力分散能力に反映されます。強度とは、合金が変形や破壊に抵抗する能力であり、粒径と形態に直接関係しています。粒度が小さくなると、粒界密度が高まり、転位の運動が制限されます。これは重要な強化メカニズムです。粒界は転位のバリアとして機能し、転位が積み重なったり絡み合ったりすることで、移動し続けるためのエネルギー消費量が増加し、合金の変形抵抗が大幅に向上します。均一な粒分布は、この効果をさらに最適化し、局所的な応力集中点を減らし、構造全体の支持力を高めます。

結晶粒の形態も強度に重要な影響を与えます。正多面体または球形に近い結晶粒は、荷重をより効果的に分散させ、特定方向への過剰な応力の蓄積を回避します。一方、不規則な形状や扁

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

平な形状の結晶粒は、応力分布の不均一性を引き起こし、破損のリスクを高める可能性があります。焼結過程においては、温度と圧力によって結晶粒の再配列と成長が制御され、微細結晶粒の形成は急速冷却または短時間焼結プロセスに依存し、これにより結晶粒界の密な分布が維持されます。タングステン相は高硬度の骨格として機能し、その結晶粒構造は合金を強固に支えます。また、銅相の結合効果により、結晶粒間の結合強度がさらに向上します。

この作用メカニズムにより、タングステン銅合金は高強度が求められる用途において優れた性能を発揮します。例えば、機械的衝撃や高負荷環境下において、微細粒構造は変形に効果的に抵抗し、部品の耐用年数を延ばします。粒界強化の効果は微細構造の密度にも関連しており、気孔や欠陥の減少は強度をさらに向上させます。粒界構造を最適化するには、焼結パラメータの制御や微量元素の導入によって粒界を安定化させ、合金の総合的な機械的特性を向上させる必要があります。これにより、高信頼性が求められる用途において、より大きな潜在能力を発揮することができます。

### 3.2.2 結晶構造が靱性に及ぼす影響のメカニズム

粒構造は、主に粒界のエネルギー吸収能力と塑性変形の協調に反映されます。靱性とは、合金がエネルギーを吸収し、破壊に抵抗する能力であり、粒径や界面特性と密接に関連しています。一般的に、粒度が大きいほど塑性が高く、転位滑りや双晶変形によってエネルギーを吸収できるため、靱性が向上します。しかし、粒度が大きすぎると強度が低下し、性能バランスが崩れる可能性があります。粒度が小さいほど、粒界密度が高まり、ひび割れ成長に対する耐性が向上しますが、塑性はある程度犠牲になる可能性があるため、強度と靱性のバランスをとる必要があります。

結晶粒の形態が靱性に与える影響も重要です。規則的な結晶粒形態は、応力を均一に伝達し、亀裂の発生および伝播のリスクを低減するのに役立ちます。銅相は低融点の結合相として機能し、その延性は結晶粒間のエネルギー吸収経路を追加します。外部荷重が加わると、銅相は塑性変形を起こし、タングステン相の脆性効果を緩和します。また、結晶粒界における微小変形は、転位吸収および再分配メカニズムを通じて局所的な応力集中を緩和します。焼結プロセスにおいては、銅液相の流動性が結晶粒間の緊密な結合を促進し、靱性基盤を強化するとともに、急速冷却プロセスによって微細結晶粒の塑性特性を維持します。

この作用メカニズムにより、タングステン銅合金は動的荷重や衝撃環境において優れた靱性を発揮します。例えば、アーク作用や機械的振動といった状況において、結晶粒組織の協調的な変形能力は脆性破壊を効果的に防止し、部品の寿命を延ばします。靱性の向上は、微細組織の均一性にも依存します。気孔や非接液領域の減少は、荷重伝達効率を高めます。

### 3.2.3 相分布と導電率の相関

タングステン銅合金の相分布と電気伝導性の関係は、主に銅相の連続性とタングステン相の分散性に反映されます。電気伝導性は合金の電流搬送能力の尺度であり、相分布の均一性に直接関係しています。銅は導電性の高い相であり、その連続ネットワークが電気伝導性の基礎と

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

なっています。銅相が貫通経路を形成すると、電子が効率的に伝達され、合金の導電性が大幅に向上します。低導電性増強相としてのタングステン相の分散分布は、電流の流れを著しく妨げることはありませんが、タングステン含有量が多すぎると抵抗が増加し、全体的な導電性が低下する可能性があります。

相分布の均一性は導電性にとって非常に重要です。銅相の連続性は、液相焼結プロセス中の銅の完全な濡れと充填に依存します。タングステン粒子が凝集したり、銅の液相が不十分な場合、不連続領域が形成され、接触抵抗が増加する可能性があります。タングステン相の均一な分散は、粉末混合プロセスによって制御されます。ボールミルの時間と混合の均一性は、相分布の品質に直接影響します。焼結温度の適切な上昇は、銅液相の流れを促進し、相間の接続を強化し、導電性を最適化します。インターフェースの品質も補助的な役割を果たします。タングステンと銅の良好な組み合わせは、電子散乱を低減し、高い導電性を維持します。

この組み合わせにより、タングステン銅合金は高い導電性が求められる用途において優れた性能を発揮します。例えば、電気接点や放熱基板においては、銅相の連続ネットワークが効率的な電流伝送を保証し、高電流密度のニーズを満たします。相分布の最適化は、耐アーク侵食性にも影響を与えます。均一な銅相分布は、アークエネルギーの集中点を低減し、間接的に導電性の安定性をサポートします。相分布を最適化するには、銅含有量を調整するか、多段階焼結プロセスを用いて銅相のネットワーク構造を強化することで導電性を向上させ、高性能電気用途の要件を満たす必要があります。

### 3.2.4 相分布と熱伝導率の相関

相分布と熱伝導率は、主に銅相の連結性とタングステン相の分散性に反映されます。熱伝導率は合金の熱伝達能力であり、相分布の均一性に直接関係しています。銅は熱伝導率の高い相であり、その連続ネットワークが熱伝導の基礎となります。銅相が貫通路を形成すると、熱が効率的に伝達され、合金の放熱性能が大幅に向上します。タングステン相は熱伝導率の低い増強相であるため、分散分布しても熱の流れが大幅に妨げられることはありませんが、タングステン含有量が多すぎると、銅よりも熱伝導率が劣るため、全体の熱伝導率が低下する可能性があります。熱伝導率には相分布の均一性が重要です。銅相の連続性は、液相焼結プロセス中の銅の完全な流れと浸透に依存します。タングステン粒子が凝集したり、銅液相が不均一に分布したりすると、熱抵抗点が形成され、熱伝達が妨げられる可能性があります。タングステン相の均一な分散は、粉末混合プロセスによって実現されます。良好な混合は相間のシームレスな接続を確保し、熱伝導経路を最適化します。焼結温度を適切に調整することで、銅液相の濡れと充填が促進され、相間の熱伝達効率が向上します。インターフェース品質もこれに重要な役割を果たします。タングステンと銅の良好な組み合わせは、熱散乱を低減し、効率的な熱拡散を維持します。

この関係により、タングステン銅合金は高い放熱性能が求められる用途において優れた性能を発揮します。例えば、パワーエレクトロニクスや高温機器においては、銅相の連続ネットワークが熱を素早く分散させ、過熱による性能低下を防ぎます。相分布の最適化は耐アーク侵食性にも影響を与えます。均一な銅相分布は、熱を均一に拡散させ、アークによる局所的な高温

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

損傷を軽減するのに役立ちます。相分布を調整するには、銅含有量を最適化するか、多段階焼結プロセスを採用することで、銅相が効果的な熱伝導ネットワークを形成するようにする必要があります。これにより、熱伝導率が向上し、高性能な熱管理要件を満たすことができます。

### 3.2.5 気孔と欠陥の硬度への影響

タングステン銅合金の硬度に対する気孔や欠陥は、主に構造密度と応力分布に反映されます。硬度とは、合金が表面の圧痕や摩耗に抵抗する能力であり、微細構造の完全性に直接関係しています。気孔は微細な隙間であるため、材料全体の密度を低下させ、変形抵抗を弱めます。亀裂や未濡れ粒子などの欠陥は応力集中点となり、局所的な破損を引き起こしやすく、硬度を低下させます。微細構造の均一性は硬度の性能に重要な役割を果たし、気孔や欠陥の存在は合金の機械的強度を直接的に弱めます。

気孔の形成は、通常、焼結中の充填不足または材料収縮に関連しています。銅の液相がタングステン粒子間の隙間に完全に浸透しない場合、残留空隙が合金内部に分散します。これらの気孔は、外部荷重下で応力集中を引き起こしやすく、低下下で材料が変形または破損する原因となります。特に相変化領域や温度勾配が大きい領域では、加圧または冷却時の熱応力によって亀裂などの欠陥が発生する可能性があります。亀裂の拡大は硬度をさらに低下させます。濡れていない粒子は銅相との有効な結合がないため孤立して存在し、全体の支持力を弱めます。これらの要因が相まって、合金の表面抵抗を低下させます。

気孔や欠陥が硬度に及ぼす影響は、機械的特性の安定性にも反映されます。気孔率が高いと硬度分布が不均一になり、局所的に顕著な軟化が生じる可能性があります。特に摩耗の激しい環境では、気孔が摩耗の起点となりやすくなります。欠陥の存在はこの影響を悪化させ、繰り返し荷重を受けると亀裂が進展し、材料の破損を加速させる可能性があります。微細構造の最適化は、焼結プロセスの改善や後処理技術を用いた材料密度の向上など、気孔の除去や欠陥の修復によって硬度を高めることができます。微細構造の最適化は、機械的衝撃や表面接触のシナリオにおける合金の耐久性を大幅に向上させ、電極や切削工具など、高硬度が求められる用途により適したものになります。

### 3.2.6 気孔と欠陥の耐食性への影響

気孔や欠陥は、主に表面保護と媒体浸透性に反映されます。耐食性は、合金が環境媒体（酸素、湿気、化学物質など）による侵食に耐える能力であり、微細構造の健全性に直接関係しています。気孔は、開いた隙間または閉じた隙間として、腐食性媒体が内部に侵入する経路となり、材料の劣化を加速させます。亀裂や不純物などの欠陥は腐食の起点となり、局部腐食や応力腐食割れを引き起こしやすく、耐食性を低下させます。微細構造の緻密さは、耐食性において決定的な役割を果たします。

気孔が存在すると、腐食性媒体が合金に浸透しやすくなり、特に湿気や酸性環境においては、気孔に蓄積した液体が電気化学的腐食を引き起こす可能性があります。結合相である銅相は腐食性媒体の影響を受けやすく、気孔の存在は銅の酸化または溶解を激化させ、合金全体の安

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

定性を弱めます。亀裂などの欠陥は腐食の拡大経路となり、亀裂先端の高応力状態は腐食反応を加速させます。特に高温またはアーク作用下では、欠陥が急速に深刻な損傷へと発展する可能性があります。不純物の凝集によって電気化学的に活性な部位が新たに生成され、耐食性がさらに低下する可能性もあります。

気孔や欠陥が耐食性に与える影響は、長期使用時の性能にも反映されます。多孔度が高いと、特に腐食性ガスや液体にさらされた場合、表面保護能力が低下します。気孔内の腐食生成物はチャンネルを塞ぐ可能性があります、さらなる侵食を防ぐことはできません。欠陥が存在すると、局所的な腐食速度が全体の速度よりも高くなります。特に応力腐食や疲労腐食のシナリオでは、欠陥によって材料に亀裂が生じる可能性があります。マイクロ組織の最適化は、真空焼結による酸化の低減、表面コーティングによる腐食性媒体の隔離など、気孔や欠陥を減らすことで耐食性を高めます。最適化された合金は、過酷な環境でも長期安定性を維持でき、海洋機器や化学処理部品など、高い耐食性が求められる用途に適しています。

### 3.3 タングステン銅合金の微細構造の進化

タングステン銅合金は、製造および使用プロセスにおいて動的に変化します。その変化の法則は複数の要因によって駆動され、合金の性能に直接影響を及ぼします。微細構造の変化は、結晶粒形態、相分布、欠陥特性の調整を伴い、様々な条件下での材料の適応性と安定性を反映しています。以下では、成分比の変化、熱処理中の構造変化、そして使用環境からの構造へのフィードバックによって引き起こされる微細構造の変化について詳しく説明します。テキストによる説明は、変化のメカニズム、プロセス特性、性能への影響を強調し、合金アプリケーションの最適化における重要性を強調しています。

#### 3.3.1 構成比の変化による進化

構成比の変化は、タングステン - 銅合金の微細構造の進化における重要な駆動要因です。タングステンと銅の比率を調整することで、粒分布、相界面、気孔特性が影響を受けます。タングステンの含有量が増加すると、その粒子が合金を支配し、より高密度の骨格構造を呈し、銅相は連続ネットワークから分散充填相へと徐々に変化します。この変化により、粒界が規則的になり、界面面積が減少し、銅液相の不足により気孔率が上昇します。逆に、銅の含有量が増加すると、銅液相の流動性が高まり、タングステン粒子が濡れて隙間が埋まり、相分布がより均一になり、粒界が徐々にぼやけ、銅の充填効果により気孔率が減少します。

組成比の調整も相界面の進化を促します。タングステン含有量が多い場合、界面は主にタングステン粒子間の直接接触として現れ、結合強度は焼結条件に依存します。銅含有量が増加すると、界面は銅相によって支配され、濡れ効果が高まり、界面結合力が向上しますが、熱応力が導入される可能性があります。粒径も比率の変化に伴って調整されます。タングステン比率が高い場合、粒子のサイズは大きいままですが、銅比率が高い場合は、液相再配列により粒子が微細化されます。この進化は微細組織の密度に直接影響を及ぼし、合金の機械的および電気的特性を調整します。この進化の法則により、タングステン銅合金は様々な用途要件に適応することができます。例えば、タングステン比を高めると耐高温性と耐アーク侵食性が向上し、摩

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耗の激しい環境に適しています。一方、銅比を高めると電気伝導性と熱伝導性が向上し、放熱基板に適しています。この進化を制御するには、粉末混合プロセスと焼結パラメータを最適化し、組成比と微細構造の調和のとれた発達を確保する必要があります。

### 3.3.2 熱処理中の構造変化

熱処理プロセスは、タングステン銅合金の微細構造の進化において重要な段階です。温度、時間、雰囲気調節により、粒成長、相再結合、欠陥除去などの変化を引き起こします。加熱初期には、融点が高い銅相が最初に溶融し、タングステン粒子を濡らして気孔を埋め、相分布が均一になる傾向があります。温度が上昇すると、粒子が再配置され、成長し始めます。タングステン粒子は熱拡散により形態を調整し、粒界は徐々に明確になったり融合したりします。長時間の熱処理は、粒子が大きくなりすぎたり、界面に熱応力が生じたり、材料収縮により気孔が縮小または再分布したりする可能性があります。

熱処理は相構造の変化も引き起こします。銅液相の流動性はタングステン粒子間の結合を強化し、濡れていない部分が充填され、界面結合力が向上します。しかし、温度が高すぎると銅が揮発または酸化され、相分布の安定性に影響を与える可能性があります。特に圧力下での熱処理では、亀裂や不純物の凝集などの欠陥が消失または移動し、微細構造が緻密になる傾向があります。これらの変化は冷却プロセスによって修正されます。急速冷却は微細粒を維持し、緩やかな冷却は粒成長と相安定化を促進します。

この構造変化により、タングステン銅合金の特性を調整することができます。例えば、適切な熱処理は材料の均一性と強度を向上させ、高い信頼性が求められる接点用途に適しています。一方、過熱は靱性の低下を招く可能性があるため、パラメータを慎重に管理する必要があります。熱処理の最適化は、段階加熱や不活性雰囲気保護などの特定のプロセスと組み合わせることで、理想的な微細構造の変化を実現できます。

### 3.3.3 使用環境の構造へのフィードバック

使用環境は、温度、湿度、電流、機械的応力などの外部条件によって引き起こされる構造調整と劣化に反映されます。高温環境では、銅相が軟化または部分的に溶融し、タングステン粒子間の接続が熱応力の影響を受け、界面に微小亀裂や剥離が発生する可能性があります。湿気や腐食性の環境に長期間さらされると、銅相は酸化や侵食を受けやすくなり、気孔が腐食性媒体の侵入経路となり、構造劣化が加速されます。アークの作用下では、高温アブレーションにより表面粒子が再形成され、気孔や欠陥の拡大が微細構造の破壊を悪化させます。

機械的応力環境は構造に大きなフィードバックを与えます。繰り返し荷重を受けると、結晶粒の変形や破壊、界面における新たな亀裂の形成、応力集中による気孔の拡大などが生じる可能性があります。電流が流れると、局所的な高温により相再結合が誘発され、銅相が移動または揮発し、タングステン骨格構造が徐々に露出します。熱サイクルやアークスイッチングなどの使用環境の周期的な変化は、微細構造の徐々に順応または劣化を引き起こし、粒界や相分布が動的に調整され、長期的な性能に影響を与える可能性があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

このフィードバックにより、タングステン銅合金は異なる環境で異なる耐久性を示します。例えば、高温アーク環境では構造調整によって耐食性が向上しますが、湿度の高い環境では劣化によって寿命が短縮されます。環境フィードバックは設計の最適化の基盤となり、表面コーティングや環境制御によって構造劣化を軽減することができます。

### 3.4 タングステン-銅合金の微細構造制御戦略

タングステン銅合金は、様々な技術的手段を用いて、結晶粒の形態、相分布、細孔特性、界面品質を最適化することで、合金の電気伝導性、熱伝導性、機械的強度、耐久性を向上させることを目指しています。微細構造の制御は、高性能アプリケーションを実現するための鍵であり、製造プロセスの改良、合金元素添加の最適化、そして構造と性能の関係の徹底的な探究にまで及びます。これらの戦略は、プロセスパラメータの調整と材料組成の設計を通じて、電気接点、溶接電極、高信頼性部品などの多様なニーズに適応します。

#### 3.4.1 調製工程に基づく管理方法

製造プロセスに基づく制御方法は、タングステン銅合金の微細構造を制御するための基礎です。混合、プレス、焼結、後処理の各工程を最適化することで、微細特性を精密に調整できます。粉末混合プロセスは制御の出発点です。タングステン粉末と銅粉末の均一な混合は、高エネルギーボールミル処理やメカニカルアロイング技術によって実現されます。良好な粉末混合効果は粒子の凝集を減らし、タングステン相と銅相の均一な分布を確保し、その後の性能の基礎を築きます。粉砕時間や媒体の選択など、粉末混合プロセス中のパラメータ調整は、粉末の粒子サイズと形態に影響を与えます。細かい粒子は強度を高めるのに役立ち、大きな粒子は靱性を向上させることができます。適切な粉末粒子サイズの範囲を選択することが粒径制御の鍵であり、目標性能に応じてプロセス設計をカスタマイズする必要があります。

プレス工程では、圧力を加えて粉末を成形し、粒子の配列と気孔分布を予備的に決定します。圧力の均一性は、グリーン体の緻密性に直接影響します。圧力が低すぎると構造が緩み、気孔率が増加する可能性があります。圧力が高すぎると粒子の破裂や応力集中を引き起こす可能性があります。プレス金型の設計とプロセスパラメータの最適化により、グリーン体の密度と形状精度を効果的に制御し、焼結のための安定した基盤を提供します。プレス後のグリーン体の微細構造は、タングステンと銅の分布特性を予備的に反映し、銅相は濡れ性を示し始め、液相焼結の準備を整えます。プレス工程の改良は、初期欠陥を低減し、その後の構造の最適化のための良好な基盤を築くのに役立ちます。

焼結プロセスは、微細構造制御の中核段階です。高温処理は相結合を達成し、気孔率を低減するために使用されます。液相焼結は一般的な方法です。銅は高温で溶融し、タングステン粒子を濡らして隙間を埋め、界面結合を強化します。焼結温度と時間の制御が重要です。低温は微粒子の保持に役立ち、高温は銅の液相の完全な流れを促進し、濡れていない領域を減らします。真空または不活性ガス環境などの焼結雰囲気を選択することで、酸化不純物の導入を防ぎ、タングステンと銅の純度を維持し、相分布を最適化できます。段階加熱または圧力アシスト焼結技術は、微細構造をさらに改善し、気孔率を低減し、密度を高め、特に高強度と耐食性を必要

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

とす用途に適しています。焼結プロセスの最適化は、微細構造の均一性と安定性を保証します。

後処理プロセスは、微細構造を微調整するための補完的な手段となります。熱間静水圧プレスは、全方向の圧力によって残留気孔を除去し、結晶粒分布の均一性を向上させ、材料全体の性能を向上させます。研磨やコーティングなどの表面処理は、欠陥を修復し、耐食性と耐アーク浸食性を向上させることができます。熱処理プロセスは、温度と冷却速度を調整することで、結晶粒の成長と相安定性を制御し、強度と靱性のバランスをとります。後処理方法の選択は、具体的な用途要件によって異なります。例えば、高導電性の用途では表面洗浄が優先され、耐磨耗性の高い用途では硬化処理が必要になる場合があります。準備プロセスに基づく制御方法により、タングステン銅合金の微細構造は多様な性能要件に適応し、高信頼性部品をしっかりと支えることができます。

### 3.4.2 合金元素添加の最適化手法

添加元素の種類と含有量は、結晶粒の形態、相分布、界面結合、欠陥特性に直接影響を及ぼし、電気伝導性、熱伝導性、機械的強度、耐食性の向上を目的としています。一般的な添加元素にはニッケル、鉄、コバルトなどがあり、これらはタングステンや銅と化学的親和性または物理的作用によって相互作用し、微細構造を最適化します。

ニッケルは一般的な添加元素として、銅とタングステンとの濡れ性を大幅に向上させることができます。ニッケルを添加すると、液相焼結中の銅液相の流動性が向上し、タングステン粒子間の界面が密着し、濡れていない領域と気孔が減少します。この濡れ性改善効果により相分布の均一性が向上し、材料の密度と強度が向上します。また、ニッケルは粒界で安定した化合物を形成し、粒成長を抑制し、微細粒組織を維持し、合金の変形抵抗を向上させるのに役立ちます。鉄の添加は主に焼結中の拡散速度を高め、タングステンと銅の相互浸透を促進し、界面品質を向上させ、荷重伝達効率を高めます。コバルトは延性があるため、微細構造にさらなる靱性サポートを提供し、タングステン相の脆性効果を緩和します。

添加元素の最適化には、それらの分布と含有量の制御も含まれます。過剰な添加は不純物の凝集や相分離を引き起こし、微細構造の安定性を弱める可能性があるため、正確な比率とプロセス調整によってバランスをとる必要があります。添加元素の導入は通常、粉末混合段階で完了し、タングステン粉末や銅粉末と混合することで均一な分散を確保します。焼結プロセス中、添加元素は銅と低融点の共晶相を形成し、液相の形成を促進し、微細構造をさらに最適化します。その後の熱処理や表面処理により、添加元素の効果をさらに安定化させ、性能への寄与を高めることができます。

この最適化手法により、タングステン銅合金の微細構造を特定の用途要件に適応させることができます。例えば、高強度が求められる電極では、ニッケルを添加することで界面の結合力と密度が向上し、高靱性が求められる接点では、コバルトを添加することで耐衝撃性が向上します。添加元素の調整は、耐食性と耐アーク浸食性の向上にもつながり、欠陥の低減と相分布の最適化により寿命を延ばします。今後の開発方向としては、新たな添加元素や複合相の探索、インテリジェント設計技術の融合、微細構造の動的最適化などがあり、タングステン銅合金の

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

総合的な性能をさらに向上させていきます。

### 3.4.3 構造規制とパフォーマンスの関係

タングステン銅合金の構造的規制と性能は、微細構造の最適化が電気伝導性、熱伝導性、機械的強度、耐久性に直接影響を与えるという事実に反映されています。この関係は、粒子の形態、相分布、気孔特性、界面品質の調整を通じて実現され、微細構造がマクロ的な性能に決定的な役割を果たしていることを反映しています。粒子構造の微細化は、粒界密度の増加によって材料の変形抵抗を高め、強度と硬度を向上させ、靱性にも一定の影響を与える可能性があります。相分布の均一性は、電気および熱伝導経路の効率を決定します。銅相の連続ネットワークは電子と熱の伝達を最適化し、タングステン相の分散は耐高温性と耐摩耗性をサポートします。

気孔と欠陥の制御は、構造制御と性能の関係において重要な鍵となります。気孔の減少は材料の密度を向上させ、曲げ強度と表面抵抗を高めると同時に、熱抵抗と電気抵抗を低減し、電気伝導性と熱伝導性を向上させます。亀裂や未濡れ粒子などの欠陥を除去することで、応力集中点が減少し、耐疲労性と耐腐食性が向上します。界面品質の向上は、相間の結合力を高め、荷重伝達と熱拡散効率を最適化することで、間接的に機械的特性と耐アーク侵食性を向上させます。構造制御の包括性は、これらの特性間の相互制約をバランスよく調整し、多様な用途のニーズを満たす能力にあります。

この関係により、タングステン銅合金の特性は、微細構造の調整に基づいて最適化することが可能になります。例えば、高い導電性が求められる放熱基板では、銅相の連続的な分散と気孔率の低減によって性能が大幅に向上します。また、耐摩耗性が求められる電極では、微細な結晶粒と緻密なタングステン骨格によって耐久性が向上します。しかし、組織制御戦略は性能の限界も明らかにします。結晶粒が細かすぎると靱性が低下し、タングステン含有量が多すぎると脆性が増加する可能性があります。性能のバランスをとるには、包括的な制御が必要です。



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第4章 タングステン銅合金の製造技術

タングステン銅合金の製造プロセスは、高性能複合材料を製造するための鍵であり、タングステンと銅の均一な組み合わせを実現するための様々な技術的手法が用いられます。タングステン銅合金は、優れた導電性、熱伝導性、耐高温性、耐アーク腐食性を備えているため、電気、電子、産業分野で広く使用されています。製造プロセスの目的は、原材料、プロセスパラメータ、および装置条件を制御することで、合金の微細構造と性能を最適化することです。真空浸透法、粉末冶金法、銅浸透法など、異なる製造方法はそれぞれ独自の特徴を持ち、特定の用途シナリオに適しています。

### 4.1 真空浸透法によるタングステン銅合金の製造

真空浸透法によるタングステン銅合金の製造方法は、高温下で液体銅をタングステン骨格内部に浸透させ、緻密で均一な複合構造を形成することを目指す製造方法である。このプロセスは、タングステンの高融点と銅の低融点を利用して焼結により多孔質のタングステン骨格を作製し、その後、真空環境で銅を熔融して浸透させる。真空環境はこのプロセスの核心であり、空気中の酸素や不純物を除去し、酸化反応を防ぎ、液体銅とタングステン骨格との良好な接着を確保することができる。このプロセスは、タングステン骨格の作製、銅の浸透、冷却・凝固から成り、各段階の制御は合金の微細構造と性能に直接影響を及ぼします。真空浸透は、高密度で均一な相分布を実現できるため、高電圧遮断器の接点や抵抗溶接電極など、高い導電性と高温耐性が求められる部品に特に適しています。プロセスの最適化では、浸透の均一性の向上、多孔性の低減、インターフェース結合の強化に重点が置かれ、さまざまなアプリケーション要件を満たします。

#### 4.1.1 浸透原理と機器要件

製造は、真空環境下における液体銅の浸透特性に基づいています。銅は高温でタングステン骨格内部に浸透し、均一な複合材料を形成します。この浸透プロセスの核心は、銅の低融点が増熱によって液体に変化し、毛細管現象と重力効果を利用してタングステン多孔質骨格の微細な細孔に浸透することです。高融点材料であるタングステンは固体のまま、安定した骨格を形成し、銅の浸透を支えます。真空環境は空気中の酸素や不純物を除去し、酸化反応を防ぎ、銅液がタングステン表面を完全に濡らすことを保証します。浸透プロセス中の温度と真空度は、銅液の流動性と浸透深さを制御し、合金の微細構造と特性に直接影響を及ぼします。このプロセスの成功の鍵は、銅液とタングステン骨格間の良好な界面結合と浸透均一性にあります。インターフェースの品質と細孔の分布は、パフォーマンスを決定する重要な要素になります。このプロセスを実現するには、特殊な設備が必要です。中核設備は、高温加熱システムと高効率真空ポンプを備えた真空浸透炉です。安定した真空環境を維持し、酸化やガス残留を防ぎます。加熱システムは抵抗加熱または誘導加熱技術を採用し、均一に加熱し、正確に温度を制御する能力を備えていなければなりません。これにより、銅が完全に熔融し、タングステン骨格の隅々まで浸透することが保証されます。真空ポンプは、低圧状態を実現し、不純物の干渉を回避するために、高い排気速度と低いリーク率を備えていなければなりません。鋳型ま

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

たはるつぼは、タングステン骨格を支え、液体銅を封入するために使用されます。材料は高温に耐え、タングステンや銅と化学反応を起こさないものでなければなりません。これにより、汚染や構造損傷を防ぐことができます。温度センサーや圧力監視システムなどの補助設備は、プロセスパラメータをリアルタイムで監視し、操作の一貫性を確保します。これらの装置を組み合わせることで、真空浸透プロセスの効率と信頼性が確保され、合金の微細構造が期待される性能要件を満たすことが保証されます。

#### 4.1.2 プロセスステップとパラメータの最適化

製造は、合金の微細構造と特性が期待どおりであることを保証するため、複数の段階で協調操作を伴う体系的なプロセスです。このプロセスは、タングステン粉末の準備と成形から始まり、加圧または予備焼結によって多孔質のタングステン骨格を形成します。この段階では、骨格の多孔性と機械的強度に注意を払い、後続の銅浸透に適したチャンネルを提供する必要があります。次に、準備されたタングステン骨格を真空浸透炉に入れ、適量の銅材料を追加し、炉体を密閉して真空システムを起動し、空気中の酸素と不純物を除去して、浸透のための純粋な環境を作り出します。加熱段階はプロセスの中核です。温度を徐々に銅の融点以上に上げ、銅液体が溶けて真空環境で自然に浸透できるようにする必要があります。断熱段階では、処理時間を延長することで銅液がタングステン骨格の細孔を完全に充填し、相分布と界面結合を最適化します。冷却段階では、冷却速度を制御することで微細構造を固定し、熱応力による欠陥や不均一性の発生を防ぎます。各工程の円滑な進行は、プロセスパラメータの正確な制御にかかっており、最終製品の品質を確保します。

パラメータ最適化の焦点は、温度、真空、時間の調整にあります。温度制御は段階的に行う必要があります。低温予熱段階では熱衝撃を軽減し、高温段階では銅の完全な溶解を確保し、中間遷移段階では熱分布のバランスを取り、局所的な過熱を回避します。真空度の調整は、銅液の濡れ効果と不純物含有量に直接影響します。真空度が低すぎると、残留ガスが浸透に影響を与える可能性があります。真空度が高すぎる場合は、装置の複雑さとプロセス効率のバランスをとる必要があります、実際のニーズに応じて動的に調整する必要があります。時間最適化は、加熱、断熱、冷却の各段階に時間を割り当てることです。時間が短すぎると浸透不足や残留気孔が発生する可能性があり、長すぎると粒径が大きくなりすぎたり、銅が揮発して性能に影響を与える可能性があります。プロセスフローでは、銅の浸透性を高めるために、表面洗浄や気孔調整などのタングステン骨格の前処理も考慮する必要があります。パラメータの動的調整は、プロセスシミュレーションと実験検証を通じて実現され、微細構造の密度と均一性を確保し、性能向上をサポートします。

プロセスステップの最適化は、合金の性能に大きく影響します。均一な温度分布と十分な浸透時間により、電気伝導性と熱伝導性が向上し、放熱基板の用途に適しています。安定した真空環境と適切な冷却速度により、機械的強度と耐腐食性が向上し、電極部品に適しています。プロセスの各ステップは、前の段階と密接にリンクされている必要があります。いずれかのリンクで制御が失われると、欠陥が増加したり、相分布が不均一になったりする可能性があります。将来の開発方向としては、温度、真空レベル、浸透深さをリアルタイムで追跡してパラメータを動的に最適化し、プロセス効率と製品品質を向上させるインテリジェント監視システムの

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

導入が挙げられます。この方法は、タングステン銅合金の工業生産に信頼性の高い保証を提供します。

#### 4.1.3 プロセスの利点と限界

の製造は、その独特なプロセス特性により大きな利点を有する一方で、一定の限界も存在します。これらの特性が相乗的に作用し、その適用範囲と最適化の方向性を決定します。その利点の一つは、その高い密度です。真空環境下で銅溶液を完全に浸透させることで、気孔率が大幅に低減し、材料全体の強度と安定性が向上します。この緻密な構造は、合金に優れた機械的特性と耐久性を与え、特に高負荷がかかる用途に適しています。もう一つの利点は、均一な相分布です。タングステン骨格と銅相の良好な組み合わせは、電気伝導性と熱伝導性を最適化し、高電流・高温環境下でも優れた性能を発揮します。真空環境の保護により、酸化不純物の混入が抑制され、材料の純度が維持され、長期使用における信頼性の高い基盤が築かれます。さらに、プロセスの制御性により、複雑な形状や大型部品の製造が可能になり、多様な加工ニーズに対応し、その柔軟性を発揮します。

しかし、このプロセスにもいくつかの制限があります。設備が複雑で運用コストが高く、真空炉と関連補助装置のメンテナンス要件が厳しいため、生産投入量が増加し、コストに敏感なシナリオへの適用が制限されます。プロセスサイクルは長く、多段階の操作が含まれます。タングステン骨格の準備から銅の浸透まで多くの時間がかかり、大量生産の効率に影響を与える可能性があります。特定の条件下では、特にタングステン骨格の多孔性が一致していないか真空度が不十分な場合、銅の揮発や浸透の不均一性のリスクがあり、製品品質の安定性に影響を与えます。さらに、このプロセスは原料の純度と前処理に大きく依存します。原料の欠陥や不均一性は最終製品に伝わる可能性があり、追加の品質管理とプロセス調整が必要になります。

これらの利点と限界が相まって、真空含浸法で製造されたタングステン銅合金の応用シナリオを形成しています。これらの利点は、高電圧遮断器の接点など、高性能が求められる分野で優位性を発揮します。合金の高密度と導電性は、信頼性の高いスイッチング性能を保証します。抵抗溶接電極では、均一な相分布と耐高温性が長期使用をサポートします。航空宇宙分野では、ヒートシンクや電気接点などの複雑な形状のタングステン銅部品にもこのプロセスが活用されています。限界は、コスト削減や効率向上のために、粉末冶金などの他の手法を補完する必要があります。



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第5章 タングステン銅合金の性能試験および特性評価方法

タングステン銅合金は、その電気伝導率、熱伝導率、機械的強度、耐久性を評価するための重要な手段であり、電気・電子・工業分野における応用効果を直接的に決定づけるものです。この試験方法は、物理的特性、機械的特性、電気的特性の測定を網羅し、標準化された操作と高度な特性評価技術を通じて、合金の微細構造とマクロ特性の関係を明らかにします。

### 5.1 タングステン銅合金の物理的特性試験

タングステン銅合金は、密度、電気伝導率、熱伝導率など、微細構造や製造プロセスに密接に関連する基本的な物理的特性を評価することを目的としています。密度試験は合金の緻密性を反映し、電気伝導率と機械的強度に直接影響します。電気伝導率試験は、電気接点に適した電子伝達能力を評価します。熱伝導率試験は、放熱用途の鍵となる熱分散効率を測定します。物理的特性試験は、サンプルの完全性を確保しながら信頼性の高いデータサポートを提供するために、非破壊または最小限の破壊方法で実施されます。試験結果は、プロセスの最適化と性能向上の基礎となります。このセクションでは、密度試験方法と硬度試験の標準と操作に焦点を当てます。

#### 5.1.1 密度試験方法

合金の単位体積質量を測定するために使用され、これはその微細構造の緻密さと多孔度含有量を反映し、調製の品質を評価するための重要な指標です。試験原理はアルキメデスの原理に基づいています。空気中と液体中のサンプルの重量差を測定することにより、その真の密度を計算します。操作プロセスでは、まず、規則的な形状または明らかな欠陥のないサンプルを準備し、次に表面の不純物を取り除くために洗浄と乾燥を行う必要があります。次に、サンプルを精密天秤に吊りし、空気中の重量を記録し、次に密度がわかっている液体（蒸留水など）に浸して、液体中の浮上重量を測定します。重量差と液体の密度を組み合わせてサンプルの体積を取得し、最後に質量を体積で割って密度を計算します。

この試験方法では、精度を確保するために厳格な実験条件が必要です。熱膨張が密度値に影響を与えないように、液体の温度を一定に保つ必要があります。天秤の精度は、小さな重量変化を検出し、測定誤差を減らすのに十分でなければなりません。サンプルの表面に気泡が付着してはなりません。これは、真空脱気または表面処理によって実現できます。試験中は、複数の測定が行われ、平均が取られて偶発的な誤差が排除されます。密度試験は、準備プロセスにおける多孔性と均一性を検出するのに適しています。密度が低いほど多孔性が高いことを示し、密度が高いほど緻密性が高いことを示します。試験結果は、焼結プロセスを最適化し、欠陥を減らすための直接的な根拠を提供し、品質管理と性能評価に広く使用されています。

#### 5.1.2 硬度試験の基準と操作

硬度試験の規格と操作は、タングステン銅合金の表面のへこみや摩耗に耐える能力を評価す

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

るために使用され、機械的特性と耐久性を反映します。試験の原理は、標準化された圧子を使用してサンプル表面に特定の荷重を適用し、圧子の深さまたは面積を測定し、材料の変形に対する抵抗能力を間接的に示すことに基づいています。一般的な試験規格には、ブリネル硬度、ロックウェル硬度、ピッカース硬度があり、さまざまな硬度範囲とサンプル特性に適しています。ブリネル硬度は、柔らかいまたは均一な材料に適した鋼球圧子を通して大きな荷重を適用します。ロックウェル硬度は、ダイヤモンドコーンまたは鋼球を使用して、薄いサンプルまたは表面硬度をすばやく測定します。ピッカース硬度は、小さな領域または複雑な構造に適したダイヤモンド四角錐圧子を使用します。

操作プロセスでは、まず平坦なサンプル表面を準備し、研磨または研削によって粗さを取り除き、圧子が表面に完全に接触していることを確認する必要があります。適切な試験規格と圧子の種類を選択し、サンプルサイズと予想される硬度の範囲に応じて荷重と圧入時間を決定します。荷重を加えた後、圧子を取り外し、直径や対角線の長さなどの圧痕の幾何学的特性を測定し、顕微鏡または専用の機器を使用して正確な読み取りを行います。表面の不均一性の影響を排除するために、複数のポイントで試験を繰り返し、平均値を計算して代表的な結果を得る必要があります。操作中は、測定精度に影響を与える外部要因を回避するために、周囲の温度と湿度に注意する必要があります。硬度試験は性能評価において非常に重要です。高硬度は通常、微細な粒子と緻密な構造に関連しており、合金の耐摩耗性を反映しており、電極や切削工具の用途に適しています。試験結果は、局所的な硬度低下につながる可能性のある気孔や未浸潤部など、準備工程における欠陥の検出にも使用できます。標準化された操作により、試験結果の比較可能性が確保され、材料選定とプロセス改善のための科学的根拠が得られます。

### 5.1.3 導電率試験方法

導電率試験法は、タンクステン銅合金の電流伝導能力を評価するために使用されます。これは、微細構造における銅相の連結性と導電経路の有効性を反映しており、合金の電気的特性を測定するための重要な指標です。試験原理はオームの法則に基づいています。特定の電圧でサンプルの電流を測定することにより、導電率を計算します。操作手順は、まず規則的な形状のサンプルを準備する必要があります。接触抵抗の影響を減らすために表面を研磨する必要があります。測定には、4端子法または2端子法を使用します。4端子法は、サンプルの表面に4つの電極を配置し、それぞれ電流を印加して電圧を測定することで、接触抵抗の干渉を排除します。2端子法は、両端の電圧と電流を直接測定するため、長いサンプルに適しています。試験装置には、測定精度を確保するために、高精度電源、電流計、電圧計が含まれています。

環境要因が導電性に影響を与えるのを避けるため、試験プロセスは一定の温度と湿度の環境で実施する必要があります。サンプルは電極にしっかりと接触する必要があります。クランプまたは導電性ペーストによって良好な接続を実現できます。安定した電流を流した後、電圧と電流の値を記録し、抵抗率を計算し、サンプルの形状に基づいて導電率に変換します。結果の代表性を確保し、局所的な不均一性を排除するために、異なるポイントの平均値を複数回測定します。導電率試験は、準備プロセスが銅相の分布に及ぼす影響を検出するのに適しています。通常、導電率が高いほど銅相の連続ネットワークに関連しており、良好な微細構造を反映しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 5.1.4 熱伝導率試験方法

熱伝導率試験法は、タングステン銅合金の熱伝達能力を評価するために使用されます。これは、微細構造における相分布と界面品質が熱伝導に及ぼす影響を反映しており、放熱性能を測定するための重要な指標です。試験原理はフーリエの法則に基づいています。熱伝導率は、サンプル内の熱伝達率を測定することによって計算されます。操作プロセスでは、まず規則的な形状のサンプルを準備します。良好な熱接触を確保するために、表面は平らでなければなりません。一般的に使用される方法には、定常法と過渡法があります。定常法では、サンプルの両端に一定の熱流束を適用して温度勾配を測定します。過渡法では、サンプル表面を短時間加熱し、時間の経過に伴う温度変化を記録して熱拡散率を推定します。

試験プロセスは、熱源と熱電対または赤外線センサーを用いて温度分布を測定する、制御された温度環境で実施する必要があります。定常法では、サンプル両端の温度が安定し、熱流が均一であること、そして横方向の熱放散を抑えるために断熱材が必須です。過渡法では、温度変化を捉えるためにレーザーフラッシュメーターなどの高速応答機器が必要です。サンプルの幾何学的寸法と接触面は、明確な熱伝達経路を確保するために試験装置と一致する必要があります。実験誤差を排除するために、複数の試験の平均値を取得します。熱伝導率試験は、銅配線の接続性に対する準備プロセスの影響を評価するのに適しています。高い熱伝導率は通常、均一な相分布と低い多孔度と関連しており、放熱基板用途に適しています。試験結果は、熱管理性能を最適化するための科学的根拠を提供し、将来的には熱画像技術と組み合わせることで測定精度を向上させることができます。

#### 5.2 タングステン銅合金の化学的性質の評価

タングステン銅合金は、さまざまな環境での耐食性と化学的安定性を研究することを目的としています。これは、マイクロ組織が環境適応性に与える影響を反映しており、長期的な信頼性を確保するための鍵となります。評価方法には、浸漬試験、腐食速度測定、表面分析などがあり、使用環境をシミュレートして合金の化学反応と劣化挙動を観察できます。操作プロセスでは、まずサンプルを準備し、表面を洗浄して不純物を除去してから、酸、塩、または湿気の多い環境に置いて使用条件をシミュレートします。浸漬試験では、サンプルを長時間さらすことで表面の変化を観察します。腐食速度測定では、重量減少または厚さ減少から反応速度を計算します。走査型電子顕微鏡や X 線光電子分光法などの表面分析は、腐食生成物の組成と分布を検出するために使用されます。

評価プロセスでは、外部からの干渉を避けるため、温度、湿度、媒体濃度などの環境パラメータを管理する必要があります。定期的にサンプルを採取し、洗浄・乾燥を行い、重量または表面を観察し、変化の傾向を記録します。複数の試験の平均値をとることで、偶発的な要因を排除します。化学的性質評価は、銅の腐食感受性の検出に適しています。多孔性や欠陥は、媒体の浸透を加速させ、安定性を低下させる可能性があります。評価結果は、表面処理の最適化や耐腐食コーティングの選択の基礎となり、海洋機器や化学処理部品に広く使用されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.2.1 耐食性試験環境および方法

耐食性試験環境と方法は、タングステン銅合金の異なる媒体における耐食性を評価するために使用され、その微細構造と組成の化学環境への適応性を反映し、長期安定性を確保するための鍵となります。試験環境は、湿気、酸性、塩分などの実際の使用条件をシミュレートし、起こり得る腐食シナリオを再現する必要があります。作業プロセスでは、まず平面サンプルを準備し、表面を洗浄して不純物を取り除き、試験結果が汚染の影響を受けないようにします。一般的に使用される試験環境には、塩水噴霧チャンバー、酸性溶液浸漬タンク、湿熱チャンバーなどがあります。塩水噴霧チャンバーは海洋または工業環境をシミュレートし、硫酸や塩酸などの酸性溶液は化学処理条件をシミュレートし、湿熱チャンバーは高湿度と高温の複合影響をシミュレートします。サンプルをこれらの環境に配置し、一定期間曝露させ、定期的に表面の変化を観察します。

試験方法には、重量減少法と電気化学的方法があります。重量減少法は、浸漬前後のサンプルの重量変化から腐食速度を計算し、正確な計量と時間の記録が必要です。電気化学的方法は、電位差計を介して腐食電位と電流密度を測定し、腐食プロセスの動的挙動を評価します。温度、媒体濃度、暴露時間などの環境パラメータは、外部要因による干渉を避けるために、試験中に制御する必要があります。偶発的なエラーを排除するために、複数の試験から平均値を取得し、顕微鏡で腐食形態を観察します。耐食性試験は、銅の相対腐食に対する感受性を検出するのに適しています。多孔性や欠陥は媒体の浸透を加速し、安定性に影響を与える可能性があります。試験結果は、表面保護を最適化し、耐食用途を選択するための基礎となります。将来的には、多因子カップリング環境を開発し、試験の実用的意義を高めることができます。

### 5.2.2 抗酸化性能試験方法

耐酸化性試験方法は、高温または酸素含有環境におけるタングステン銅合金の耐酸化性を評価するために使用され、微細構造の酸化に対する耐性を反映し、高信頼性アプリケーションの重要な指標です。試験原理は、サンプルを酸化雰囲気さらして、表面酸化層の形成と材料の劣化の程度を観察することに基づいています。操作プロセスは、まずサンプルを準備し、表面を研磨して酸化物を除去し、初期状態の一貫性を確保します。一般的な方法には、高温酸化試験とサイクリック酸化試験があります。高温酸化試験では、サンプルを高温炉に入れ、空気または酸素を通過させ、連続的に加熱して酸化挙動を観察します。サイクリック酸化試験は、熱サイクル条件をシミュレートし、加熱と冷却を交互に繰り返して、耐酸化安定性を評価します。試験装置は、精密な温度制御とガス供給機能を備えている必要があります。

試験中は、加熱時間、温度、酸化層の厚さを記録し、定期的にサンプルを取り出し、洗浄・計量し、質量増加または表面変化を計算する必要があります。顕微鏡または X 線回折分析を用いて、酸化生成物の組成と分布を検出できます。試験環境では、他のガスの干渉を避けるために安定した酸素濃度を維持する必要があります。実験誤差を排除するために、複数の試験の平均値を取得します。抗酸化性能試験は、高温における銅相の酸化傾向を検出するのに適しています。タングステン相の安定性は保護的な役割を果たし、細孔は酸化を悪化させる可能性があ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ります。試験結果は、高温プロセスの最適化と抗酸化コーティングの選択のための指針となります。将来的には、リアルタイムモニタリング技術を組み合わせることで、試験精度と応用価値を向上させることができます。

### 5.3 タングステン銅合金の微細組織評価技術

特性評価技術には、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡などがあります。光学顕微鏡はマクロな表面特徴の観察に使用され、走査型電子顕微鏡は高解像度の形態および組成分析を提供し、透過型電子顕微鏡は粒界および相界面の詳細な研究に使用されます。操作プロセスでは、まず試料を準備します。試料は切断、研磨、そして研磨する必要があります。一部の技術では、コントラストを高めるために薄片化やエッチングが必要になります。

試験プロセスでは、技術に応じて適切な条件を選択する必要があります。光学顕微鏡観察には適切な染色が必要であり、走査型電子顕微鏡には真空環境と電子ビーム調整が必要であり、透過型電子顕微鏡には高精度のサンプル調製が必要です。分析結果は、画像処理ソフトウェアを介して粒径と細孔分布を定量化し、エネルギースペクトル分析と組み合わせて相組成を決定します。特性評価技術は、調製プロセスが微細構造に与える影響を検出するのに適しており、結晶粒微細化と相分布の均一性は性能を向上させます。これらの結果は、プロセスの最適化と欠陥制御のための科学的根拠を提供し、将来的には 3 次元イメージング技術と組み合わせて微細構造を完全に特性評価することができます。

#### 5.3.1 金属顕微鏡観察法

金属組織顕微鏡観察法は、タングステン銅合金の結晶粒形態、相分布、多孔度などの微細構造特性を観察し、作製プロセスが微細構造に与える影響を明らかにするために使用されます。試験原理は、試料表面を透過する可視光の反射または透過を利用して、微細構造を拡大観察することです。操作手順は、まず試料を準備し、切断、研削、研磨して平坦な表面を得た後、化学エッチングまたは電解研磨を施してタングステンと銅の相間のコントラストを高め、粒界と相境界をより明瞭に観察します。試料はステージ上に固定され、顕微鏡の焦点と光源を調整することで、異なる倍率で微細構造を観察します。試験中は、特定の特徴の視認性を高めるために、明視野または暗視野などの適切な照明モードを選択する必要があります。オペレータは、接眼レンズまたはデジタル画像システムを介して画像を記録し、粒径、相分布の均一性、および欠陥を分析します。代表性を確保し、局所的な不均一性の影響を排除するために、異なる領域を複数回観察します。金属組織顕微鏡観察は、準備プロセスの効果の予備評価に適しています。結晶粒の微細化や相分布の最適化は、通常、性能向上につながります。

#### 5.3.2 走査型電子顕微鏡分析アプリケーション

走査型電子顕微鏡（SEM）分析は、タングステン銅合金の微細構造と組成分布を高解像度で評価するために用いられ、結晶粒界、相界面、欠陥といった微細な特徴を明らかにします。試験原理は、電子ビームを試料表面に照射し、二次電子と反射電子を発生させることで、形態学および組成学的情報を得るというものです。操作手順は、まず試料を準備します。試料は切断、

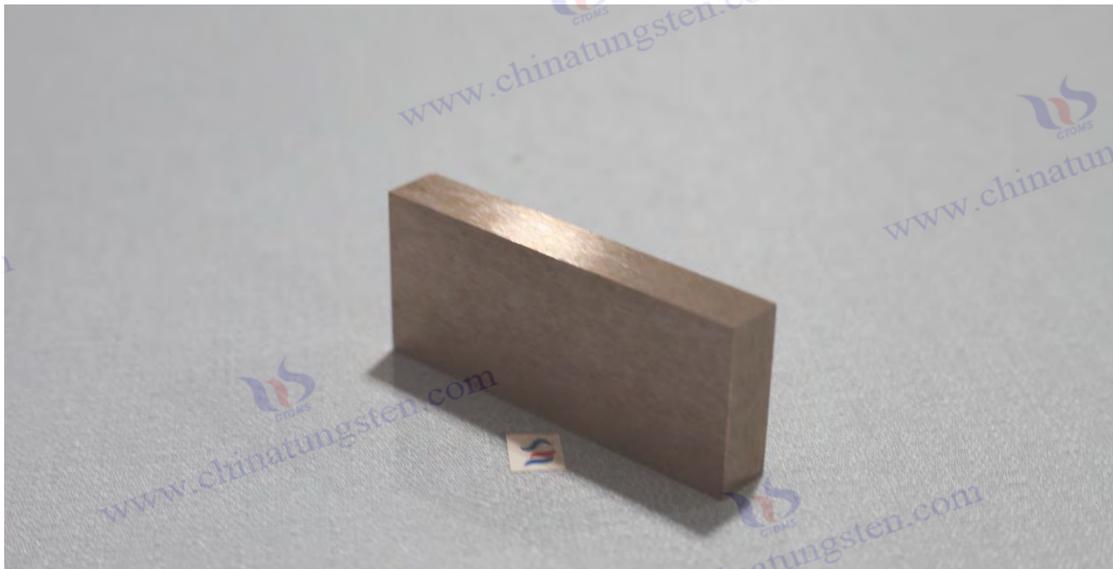
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

研磨、研磨し、帯電防止のため金メッキやカーボンコーティングなどの導電処理を施す必要があります。試料は真空チャンバー内に設置され、加速電圧や作動距離などの電子ビームパラメータを調整して試料表面を走査します。試験中、二次電子像は表面形態の詳細を提供し、反射電子像は異なる相のコントラストを強調し、エネルギー分散型スペクトル（EDS）分析は元素分布を決定します。オペレータは倍率と検出器モードを調整することで、粒界、細孔、相分布を観察できます。網羅性を確保するために、異なる領域を複数回走査し、ソフトウェアと組み合わせてデータを処理します。走査型電子顕微鏡分析は、細孔の減少や界面の改善など、準備プロセスによって引き起こされる微視的变化を検出するのに適しており、関連する結果はパフォーマンスの最適化に役立ちます。

### 5.3.3 X 線回折構造解析

X 線回折構造分析は、タングステン銅合金の結晶構造、相組成、格子定数を決定し、微細構造と性能の関係を調査するために使用されます。試験原理は、試料の結晶面における X 線のブラッグ回折に基づいており、材料内部の原子配列を反映する特徴的なスペクトル線を生成します。操作手順：粉末または平板状の試料を準備し、適切な粒径に研磨するか、表面を研磨してテクスチャの影響を回避します。試料を X 線回折計にセットし、X 線源と検出器の角度を調整し、2θ 角度の一定範囲をスキャンします。

試験中、回折ピークの位置と強度が記録され、タングステンと銅の結晶相特性が分析され、不純物や酸化物の可能性が検出されます。オペレーターはソフトウェアを使用してピーク形状をフィッティングし、粒径とひずみを決定できます。複数の測定値は平均化され、機器の誤差が排除されます。X 線回折分析は、焼結プロセスが結晶相に与える影響を評価するのに適しています。ピークの鋭さは粒径を反映し、ピークのオフセットは応力状態を示します。これらの結果は、微細構造の最適化と性能予測の基礎となり、将来的にはシンクロトロン放射技術と組み合わせることで精度を向上させることができます。



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD  
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	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 Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第6章 タングステン銅合金の多様な応用分野

タングステン銅合金は、その独自の物理的・化学的特性を活かし、電気、航空、電子、工業製造など、様々な産業分野で利用されています。優れた導電性、熱伝導性、耐高温性、耐アーク腐食性により、高性能部品に最適な選択肢となっています。その応用分野は、低電圧電力スイッチ、高電圧回路遮断器、ヒートシンク、放電加工用電極など、着実に拡大しています。タングステン銅合金は、様々な製造プロセスと構造設計によって、多様な性能要件を満たします。

### 6.1 タングステン銅合金の電気分野への応用

タングステン銅合金は電気分野で広く使用されており、特に高い導電性と耐アーク腐食性が求められる場面で使用されています。電気分野には、低電圧電力スイッチ、高電圧遮断器、電気接点などが含まれます。タングステン銅合金は、タングステンの高融点と銅の高い導電性により、高電流、高電圧、高頻度スイッチングの要件を満たしています。合金の微細構造は、粉末冶金法または真空浸透法によって最適化されており、相分布と密度は性能に直接影響します。低電圧電力スイッチにおいて、タングステン銅合金は機器の信頼性と耐久性を大幅に向上させる重要な部品です。

#### 6.1.1 低電圧電力スイッチへの応用

タングステン銅合金は、電気分野、特に接点部品におけるタングステン銅合金の重要な応用例です。低電圧電力スイッチは、回路のオン/オフを制御するために使用されます。頻繁なスイッチング動作とアーク発生は、材料に厳しい要件を課します。タングステン銅合金は、高い耐アーク侵食性と導電性によりこれらの要件を満たし、家電製品、産業用制御システム、配電システムに広く使用されています。可動接点、静止接点、電極部品など、さまざまな用途があり、プロセスの最適化により性能の安定性が保証されます。このセクションでは、コア部品の性能要件、用途、および寿命向上の効果について詳しく説明します。

##### 6.1.1.1 低電圧電力スイッチのコア部品の材料に対する性能要件

低電圧電力スイッチのコア部品（接点や電極など）の材料に対する性能要件は、機器の安全性と信頼性を確保するために、多岐にわたります。まず、優れた導電性を備え、電流を効率的に伝送し、エネルギー損失と発熱を低減する必要があります。優れた熱伝導性も重要な要件の一つで、アークや大電流によって発生する熱を素早く分散させ、局所的な過熱を防ぎます。次に、長期使用における安定性を確保するため、スイッチング時のアークによる表面アブレーションを防止するために、高い耐アーク侵食性も備えていなければなりません。さらに、耐高温性も極めて重要であり、コア部品は大電流の遮断時に変形や熔融することなく、極限の温度に耐えなければなりません。頻繁な機械的スイッチング動作を支え、摩耗や破損を防ぐために、機械的強度と耐摩耗性も必要です。耐腐食性は、湿度の高い環境や工業環境における性能維持に役立ちます。最後に、材料は接触圧力に耐える適切な硬度を備えつつ、脆性破壊を回避するの

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に十分な靱性を維持する必要があります。これらの要件は、低電圧電力スイッチ部品の材料選択を共同で決定し、総合的な性能によりタングステン銅合金が第一の選択肢となります。

### 6.1.1.2 接触部品におけるタングステン銅合金の応用

低電圧電力スイッチ接点アセンブリにおけるタングステン銅合金は、設計要件と使用条件によって異なります。一般的な形態の1つは、タングステン銅合金を接点材料にすることです。これは、スイッチの可動接点と静止接点に直接使用され、高い導電性と耐アーク浸食性により、頻繁なオン/オフ操作に耐えます。合金は通常、より高いタングステン含有量比（WCu 70/30 または WCu 80/20 など）で製造されます。タングステンは耐高温性と耐摩耗性を提供し、銅は導電パスの連続性を保証します。もう1つの形態は、タングステン銅合金を接触表面層として使用し、銅や鋼などの他の基板と組み合わせ、溶接または圧入によって一体化することで、コストと性能のバランスを最適化する複合構造です。

タングステン銅合金は、粉末冶金法や真空浸透法などを用いて、円形や長方形の接点など、様々な用途に適応する形状に加工することができます。研磨やコーティングなどの表面処理により、耐食性や耐アーク性をさらに向上させることができます。需要の高い用途では、タングステン銅合金は、耐久性を高めるために内側に高タングステン層を設け、導電性を向上させるために外側に高銅層を設けた多層構造に加工されます。接点アセンブリの取り付け方法は、通常、ボルト締めまたは埋め込み式で、スイッチ本体との安定した接触を確保します。これらの用途は、タングステン銅合金の特性を最大限に活用し、低電圧電力スイッチの多様なニーズに対応しています。

### 6.1.1.3 低電圧電力スイッチの寿命に対するアプリケーションの影響

タングステン銅合金を使用することで、その優れた性能により、機器の耐用年数が大幅に向上します。まず、この合金はアーク浸食に対する高い耐性を備えているため、接点表面のアブレーションや材料損失が低減し、スイッチのオン/オフサイクルが長くなります。また、耐熱性が高いため、大電流での切断時に接点の安定性が確保され、過熱による機械故障や性能低下が軽減されます。さらに、優れた導電性と熱伝導性により、抵抗熱の影響が低減され、接点の劣化速度が遅くなり、長期動作の信頼性が向上します。さらに、機械的強度と耐摩耗性により、頻繁なスイッチング動作をサポートし、接点の摩耗や破損のリスクを低減し、耐用年数をさらに延ばします。

さらに、タングステン銅合金の均一な相分布と低い多孔性により、接点全体の構造的完全性が向上し、微細な欠陥による早期故障が減少します。耐食性も保護的な役割を果たし、特に湿気が多い環境や工業環境において、表面の酸化や侵食による寿命への悪影響を軽減します。適用後、低電圧電源スイッチのメンテナンス間隔が延長され、故障率が低下し、全体的な動作効率が向上します。実際には、特に産業用制御システムや家電製品などの高頻度使用シナリオにおいて、接点部品の交換サイクルが大幅に延長されます。タングステン銅合金の適用は、機器の耐用年数を延ばし、より高い経済的利益をもたらします。将来的には、合金比率と表面処理を最適化することで、寿命延長効果をさらに高めることができます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.1.2 高電圧スイッチへの応用

高電圧スイッチへの応用は、電気分野におけるタングステン銅合金の重要な応用分野であり、特に高電圧および強力なアークの取り扱いが求められる場面で重要な役割を果たしています。高電圧スイッチは、電力システムの回路制御および保護に使用され、高電圧遮断器、断路器、接地開閉器などの機器が含まれます。これらの機器は、高電圧電流のスイッチング時に強力なアークを発生するため、材料性能に対する要求は非常に高くなります。タングステン銅合金は、優れた導電性、耐高温性、耐アーク侵食性を備えているため、高電圧スイッチのコア部品に最適な材料となっています。その微細組織は、粉末冶金法または真空浸透法によって最適化されており、過酷な動作条件下でも安定した性能を確保しています。用途においては、タングステン銅合金は主に接点、可動電極および静止電極、アーク消弧装置に使用され、スイッチの信頼性と寿命を大幅に向上させます。このセクションでは、高電圧スイッチの使用環境とコア部品の材料許容差標準、高電圧スイッチのニーズに適応するタングステン銅合金の性能、およびさまざまな電圧レベルの高電圧スイッチにおけるタングステン銅合金の応用の違いについて詳しく説明します。

### 6.1.2.1 高電圧スイッチの作業環境とコア部品の材料許容基準

高電圧スイッチの動作環境は極めて過酷であり、高温、高圧、強力なアーク、そして機械的ストレスが複合的に作用するため、コア部品の材料公差基準には多くの要件が課せられます。まず、動作環境における高温は主にアークによって発生します。電流が遮断されると瞬時に放出されるエネルギーによって、局所的な温度が急上昇する可能性があります。材料は優れた耐高温性を備え、数千度の高温でも熔融したり変形したりしない必要があります。接点や電極などのコア部品は、構造的完全性を維持しながら、この極度の熱負荷に耐える必要があります。

次に、高電圧環境には高電圧が伴います。アークの持続性と強度を確保するには、材料に極めて高いアーク侵食耐性が求められます。これにより、表面のアブレーションや材料損失を防ぎ、耐用年数を延ばすことができます。さらに、頻繁な機械的なスイッチング動作は、衝撃や振動をもたらします。材料は、摩耗や破損のリスクに耐え、長期的な動作安定性を確保するために、十分な機械的強度と耐摩耗性を備えていなければなりません。耐食性は、特に屋外や産業環境で高電圧スイッチが湿気、塩水噴霧、化学物質にさらされる可能性がある場合、もう一つの重要な許容誤差基準です。材料は酸化と腐食に耐え、電気的性能を維持できなければなりません。電気伝導性と熱伝導性も同様に重要です。

効率的な電流伝送と放熱は、抵抗加熱の影響を軽減し、局所的な過熱のリスクを軽減し、周囲の部品を保護します。材料の硬度は適度で、過度の脆性による亀裂が生じることなく接触圧力に耐えられる必要があります。同時に、衝撃エネルギーを吸収するのに十分な靱性も必要です。これらの要件に対応するため、IEC 62271 や ANSI/IEEE C37.04 などの国際規格および業界規格では、アーク耐性試験、熱安定性試験、機械的耐久性評価を含む、高電圧スイッチ材料の性能ベンチマークが確立されています。高電圧スイッチの複雑な環境において優れた性能を確保するには、これらの厳格な規格によって材料を検証する必要があります。タングステン銅合金は、その総合的な性能によりこれらの要件を満たし、好ましい材料となります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.1.2.2 高電圧スイッチ要件を満たすタングステン銅合金の性能

まず、タングステンが高い融点と硬度を有しており、この合金は優れた耐高温性とアーク浸食性を備えています。高電圧スイッチが高電圧電流を遮断する際、アークによって発生する高熱はタングステン相によって効果的に吸収・分散され、接点の溶融や深刻なアブレーションを防ぎます。銅の高い導電性は、電流の効率的な伝送を保証し、抵抗熱効果を低減し、アーク消弧装置に安定した導電経路を提供します。合金の微細構造は、粉末冶金法または真空浸透法によって最適化されています。

タングステン銅合金は、高電圧スイッチにおいて特に重要です。効率的な放熱能力により、アーク熱を周囲に素早く伝達し、接点の局所温度を下げ、寿命を延ばすことができます。機械的強度と耐摩耗性は、頻繁なスイッチング動作をサポートします。銅相の延性により合金の靱性が向上し、衝撃や振動による亀裂のリスクが低減します。耐食性に関しては、タングステンの化学的安定性が合金を湿気や産業汚染から保護し、銅相の表面処理により耐食性をさらに向上させることができます。高電圧スイッチの実際の用途において、タングステン銅合金は優れた電気接触安定性を示し、接触抵抗と発熱を低減し、機器全体の信頼性を高めます。WCu 70/30 や WCu 80/20 などの異なる比率の場合、合金は特定のニーズに応じて性能を調整できます。WCu 80/20 は高アーク放電のシナリオに適しており、WCu 70/30 はより高い導電性が求められる状況に優れています。これらの性能特性により、タングステン銅合金は高電圧スイッチのコア部品に最適な選択肢となります。

### 6.1.2.3 異なる電圧レベルの高電圧スイッチにおけるタングステン銅合金の用途の違い

タングステン銅合金は、主に電圧、電流、アーク強度の異なる要件に反映され、合金比率、製造プロセス、および部品設計に影響を与えます。高電圧スイッチの電圧レベルは、一般的に中電圧（1kV～35kV）、高電圧（35kV～230kV）、超高電圧（230kV以上）に分けられます。各レベルには、タングステン銅合金に対する適用形態と性能要件が大きく異なります。中電圧スイッチでは、アーク強度が比較的低く、タングステン銅合金は通常、導電性と耐摩耗性の最適化に重点を置いて、WCu 70/30 比率の粉末冶金プロセスで製造されます。接触部品は主に単純な幾何学的形状で、コスト効率と長期安定性を重視しています。合金のアーク浸食に対する耐性は、中電圧環境でのスイッチング操作に対応するのに十分です。

高電圧スイッチ（110kV～230kVなど）は、より強いアークと熱負荷にさらされます。タングステン銅合金は、耐高温性と耐アーク浸食性を高めるため、WCu 80/20 以上のタングステン含有量比を使用する傾向があります。製造工程では、真空含浸と組み合わせることで、より高い密度と均一性を確保できます。接点設計は、多くの場合、多層構造または複合構造を採用し、内部の高タングステン層でアーク耐性を高め、外部の高銅層で導電性を最適化します。部品のサイズと重量が増加するにつれて、機械的強度と熱管理を考慮する必要があります。耐久性を向上させるために、表面コーティングや熱処理がよく用いられます。超高電圧スイッチには、最高の材料性能が求められます。アークエネルギーは非常に大きいためです。タングステン銅合金は、WCu 90/10 の比率を使用して、積層造形またはプラズマ溶射技術により、複雑な形

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

状の接点やアーク消弧装置を製造する場合があります。合金は、非常に高い耐アーク浸食性と熱伝導性を備えている必要があります。

これらの違いは、電圧レベルがタングステン銅合金の用途に与える影響を反映しています。低電圧シナリオではコストと導電性に重点を置き、中高電圧シナリオでは耐アーク性と熱管理を重視し、超高電圧シナリオでは極限の性能と複雑な構造を追求します。準備プロセスと後処理は、電圧レベルに応じて調整する必要があります。将来的には、インテリジェント設計と複数の技術を組み合わせることで、より高い電圧レベルのニーズに適応し、適用範囲をさらに拡大することができます。

### 6.1.3 リレーと気中遮断器の応用

タングステン銅合金は、電気分野、特に高信頼性の電気制御と保護が求められる場面で、タングステン銅合金の重要な応用例です。低電力信号制御装置であるリレーは、回路のオン/オフを実現するために接点に依存しており、頻繁な機械的動作は材料の耐久性を要求します。気中遮断器は、回路を過負荷または短絡損傷から保護するために使用されます。そのアーク消火システムは、高電流と強力なアークに耐える必要があり、高性能材料が必要です。タングステン銅合金は、優れた導電性、耐摩耗性、耐アーク浸食性を備えているため、リレー接点や気中遮断器の消火室の中核材料となっています。

#### 6.1.3.1 リレー材料の耐摩耗性要件とタングステン銅合金の適合性

リレーの材料に対する耐摩耗性要件は、頻繁な機械的スイッチング動作と接触圧力によるもので、これらは接点の耐用年数と信頼性に直接影響します。リレーが低電力信号を切り替える場合、接点は物理的な接触と分離の繰り返しに耐える必要があるため、耐摩耗性は重要な要件です。長期間の動作は表面の摩耗、材料の移動または付着を引き起こす可能性があり、その結果、接触抵抗の増加または故障の原因となります。材料はまた、過度の硬化によって引き起こされる脆性破壊を防ぐために適切な靱性を維持しながら、へこみに耐えるのに十分な硬度を持っている必要があります。導電性は、信号伝送をサポートするための低抵抗パスを確保するためのもう1つの重要な要件です。耐高温性と耐アーク浸食性は、時折発生する高電流またはアーク状態に対処するのに役立ちます。さらに、耐腐食性は、酸化や汚染が性能に影響するのを防ぐために、湿気の多い環境または産業環境では特に重要です。

タングステン銅合金は、極めて高い適応性を示し、リレーの耐摩耗性要件を満たしています。タングステン相は高い硬度と耐摩耗性を提供し、頻繁な接触による表面摩耗を防ぎ、接点寿命を延ばします。銅相は優れた導電性に貢献し、信号伝送の安定性を確保し、抵抗の熱影響を低減します。合金の微細構造は粉末冶金プロセスによって最適化され、結晶粒の微細化により耐摩耗性が向上し、低気孔率により摩耗时の材料剥離が減少します。真空浸透プロセスにより密度がさらに向上し、タングステンと銅の界面結合が改善され、機械的応力集中点が減少します。耐アーク浸食性は、時折発生する高エネルギースイッチングをサポートし、耐腐食性はタングステンの化学的安定性によって確保されます。実際の用途では、リレー接点にタングステン銅合金（WCu 70/30 など）を使用すると、特に高周波動作や過酷な環境において、摩耗率が

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

幅に低減し、機器の耐用年数が延長されます。将来的には、表面硬化や微量元素の添加により耐摩耗性をさらに高めることができます。

### 6.1.3.2 リレーにおけるタングステン銅合金の設置場所と機能実現

リレー内のタングステン銅合金は主に接点アセンブリに集中しており、特定の位置と機能の実現は設計要件と密接に関連しています。接点はリレーのコアコンポーネントであり、回路のオン/オフを実現する役割を担っています。タングステン銅合金は通常、可動接点または静的接点に加工され、機械駆動機構とリレーベースの間に設置されます。可動接点は、電磁コイルまたは機械レバーによって駆動され、静的接点と接触または分離して信号制御を完了します。設置形態は、主に溶接またはプレスでタングステン銅合金接点を銅または鋼の基板に固定し、電気的接続と機械的安定性を確保しています。設置位置の選択は、接触圧力とアーク分布を考慮する必要があります。接触面は通常、接触面積を最適化し、抵抗を低減するために研磨されています。

機能実現の観点から、タングステン銅合金接点は高い導電性を活かし、低電力信号の信頼性の高い伝送を確保し、銅相は連続した導電経路を提供します。タングステン相の高い硬度と耐摩耗性は、頻繁な機械的スイッチングをサポートし、摩耗や凝着を防ぎ、長期的な接触安定性を維持します。耐アーク侵食性は、高電圧または過負荷条件において役割を果たし、接点へのアーク損傷を軽減し、リレー内部構造を保護します。設置箇所には、補助電極やアーク遮断部品が含まれる場合もあります。タングステン銅合金は、その高い耐熱性により、アークの消弧や放熱を促進します。需要の高いリレーの中には、タングステン銅合金を多層構造に設計したものがあり、内部の高タングステン層は耐久性を高め、外部の高銅層は導電性を最適化します。機能実現の有効性は、溶接品質や表面処理などの設置精度とプロセス最適化の制御にかかっています。将来的には、自動組立技術によって設置の一貫性を向上させることができます。

### 6.1.3.3 空気遮断器の消弧システムの材料性能要件

アーク消火システムは、大電流遮断時の過酷な作動条件から生まれたものであり、多くの面で厳しい要件を満たす必要があります。まず、アーク消火システムは、アーク侵食に対する優れた耐性を備えている必要があります。これは、大電流遮断時に発生する強力なアークが材料の表面を焼き尽くすためであり、材料は複数回のアークショックにも破損なく耐えることができなければなりません。耐高温性が鍵となります。アーク温度は数千度に達することもあります。材料は高温でも構造的完全性を維持し、熔融や変形を防ぐ必要があります。次に、電気伝導性と熱伝導性が重要です。効率的な電流伝送と放熱は、抵抗熱の影響を低減し、局所的な過熱を抑え、周囲の部品を保護します。機械的強度と耐摩耗性は、アーク消火グリッドまたは接点の頻繁な動きをサポートし、機械的なストレスと摩耗に抵抗します。

耐食性は、屋外や工業環境において、湿気や化学物質による材料の腐食を防ぎ、長期的な性能を維持するために特に重要です。材料の硬度は適度でなければならず、過度の脆さによるひび割れが発生せずにアークや機械的圧力に耐えることができます。靱性は衝撃エネルギーを吸収する必要があります。アーク消火システムの設計では、材料がアークをすばやく消火する能

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

力を持ち、空気媒体のアーク吹き出し効果と連携してアークをすばやく遮断することも必要です。IEC 60947 や ANSI / IEEE C37.13 などの国際規格では、アーク耐性テストや熱安定性テストなど、アーク消火材料の性能ベンチマークを確立しています。空気遮断器の複雑な環境で優れた性能を確保するには、これらの規格によって材料を検証する必要があります。タングステン銅合金は、その包括的な性能によりこれらの要件を満たし、アーク消火システムの主な選択肢となっています。

#### 6.1.3.4 空気遮断器の消弧室におけるタングステン銅合金の適用原理

気中遮断器のアーク消弧室に使用されているタングステン銅合金は、大電流での遮断時に優れた性能を発揮することに基づいており、特にアーク制御と熱管理に優れています。応用分野では、タングステン銅合金は主にアーク消弧グリッド、接点、断路器部品に使用されています。アーク浸食に対する耐性と高温耐性が高く、遮断時の過酷な条件に耐えることができます。その原理は、気中遮断器が大電流を遮断すると、接点ギャップにアークが発生し、タングステン相の高い融点と硬度がアークエネルギーを効果的に吸収して、表面の摩耗や材料の損失を防ぐというものです。銅相の高い電気伝導性と熱伝導性は、電流を素早く伝導し、熱を分散させ、局所的な温度を下げ、送風と連携してアーク消弧を促進します。

微細構造の最適化が適用原理の鍵となります。粉末冶金法や真空浸透法によってタングステンと銅が均一に分布し、気孔率が低下し密度が高まるため、アークエネルギーが均一に分布します。消弧室内のタングステン銅合金部品は、セグメント構造になっています。アークはグリッド間で分割され、冷却表面積が拡大し、消弧効率が向上します。合金の機械的強度は頻繁な開閉動作をサポートし、靱性は機械的応力を吸収して亀裂の伝播を防ぎます。耐腐食性は部品を環境の影響から保護し、耐用年数を延ばします。適用原理には、空気媒体との相乗効果も含まれます。タングステン銅合金の表面は、アークの作用下で保護酸化層を形成し、アークの遮断を促進します。産業用配電システムや電力システムなどの高電流シナリオでは、タングステン銅合金の性能により、消弧室の信頼性の高い動作が保証されます。将来的には、機能勾配設計を通じて熱管理と消弧効果を最適化することができます。

#### 6.1.4 絶縁スイッチおよび接地スイッチへの応用

タングステン銅合金は、電気分野、特に電力システムの絶縁・接地操作において、タングステン銅合金の重要な役割を担っています。断路器は、無負荷状態で回路を遮断し、誤通電を防止するために使用されます。一方、接地開閉器は、メンテナンスや故障時に安全な接地を提供するとともに、短絡電流の影響にも耐える必要があります。タングステン銅合金は、優れた導電性、耐高温性、機械的強度を有するため、これらの開閉器の中核材料となっています。合金の微細構造は、粉末冶金法または真空浸透法によって最適化されており、長期間の暴露や極限電流条件下でも安定した性能を発揮します。このセクションでは、長期暴露を受ける断路器の材料の耐候性要件、断路器の導電接触部におけるタングステン銅合金の適用設計、短絡電流にさらされたときの接地スイッチの材料強度と導電性の要件、接地スイッチの安全な操作を確保する

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ためのタングステン銅合金のメカニズム、および断路器と接地スイッチにおけるタングステン銅合金の選択基準について詳しく説明します。

#### 6.1.4.1 長期環境に曝露される断路器の材料に対する耐候性要件

断路器の長期暴露環境における材料の耐候性要件は、通常、屋外または産業環境に設置され、さまざまな自然要因および人的要因の影響に耐える必要があるという事実に起因します。まず、耐候性には耐腐食性が含まれなければなりません。断路器は、雨、塩水噴霧、または産業排気ガスにさらされることがよくあります。材料は、酸化、錆、または化学的侵食に耐え、導電性と機械的完全性を維持する必要があります。次に、紫外線老化に対する耐性は重要な要件です。長期間の日光暴露は材料の表面劣化を引き起こす可能性があり、性能低下を防ぐために光劣化防止特性が必要です。さらに、高温および低温耐性も重要です。周囲温度の変化は熱応力を引き起こす可能性があります。材料は、夏の高温や冬の厳しい寒さなど、極端な気象条件下でも安定した状態を維持する必要があります。耐湿性も考慮する必要があります。湿度の高い環境では、表面絶縁層の破損や電気腐食が発生し、安全な操作に影響を与える可能性があります。

機械的耐久性も重要な要件の一つです。断路器は頻繁に作動したり風荷重にさらされたりすると、振動や摩耗が生じる可能性があります。そのため、材料は亀裂や変形を防ぐために十分な硬度と耐疲労性を備えていなければなりません。また、長期間の暴露下でも電気伝導性と熱伝導性を維持し、遮断動作の信頼性を確保する必要があります。IEC 62271-102などの国際規格では、塩水噴霧試験、紫外線曝露試験、温度サイクル試験など、断路器材料に対する耐候性試験要件が定められています。これらの試験に合格することで、屋外環境における長期安定性が証明されます。

#### 6.1.4.2 断路器の導電性接触部におけるタングステン銅合金の適用設計

タングステン銅合金は、無負荷遮断動作時の性能を重視しています。導電性接触部には、可動接点、静止接点、接続端子が含まれます。タングステン銅合金は通常、WCu 70/30 または WCu 80/20 の比率で製造され、粉末冶金法によって高密度構造を形成します。設計においては、合金を円筒形または板状の接点などの特定の形状に加工し、表面を研磨することで接触面積を最適化し、抵抗と熱を低減します。取り付け形態は、主にボルト締めまたは溶接で、断路器本体との安定した電氣的接続を確保します。また、一定の接触圧力を維持するためのスプリングローディング機構を備えた設計もあります。

アプリケーション設計では、微細構造の最適化も考慮されています。タングステン相は高い硬度と耐摩耗性を提供し、長期的な機械的接触をサポートします。一方、銅相は効率的な電流伝送を確保します。この合金の耐アーク浸食性は、高電圧動作時に表面のアブレーションを防ぐ役割を果たします。設計においては、タングステン銅合金を接触層として銅またはアルミニウム基板と組み合わせた複合構造を採用することで、コストを削減し、全体的な導電性を向上させることができます。銀メッキやコーティングなどの表面処理は、耐腐食性と導電性を向上させ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

せ、屋外環境への適応性を高めることができます。また、設計においては熱膨張係数の整合も考慮する必要があります。

#### 6.1.4.3 短絡電流を受ける接地スイッチの材料強度および導電性の要件

短絡電流にさらされた接地スイッチの材料強度と導電性の要件は、故障状態における重要な保護役割に由来します。短絡電流は数千アンペアに達する可能性があり、瞬間的に放出されるエネルギーは材料に非常に高い要求を課します。まず、材料は優れた機械的強度を備え、短絡電流によって引き起こされる電磁力と衝撃力に耐え、接点の変形や破損を防ぐ必要があります。また、安定した接触を確保するために、接地操作の機械的動作をサポートする強度も必要です。導電性は中核要件であり、効率的な電流伝送は短絡エネルギーを迅速に地面に伝導し、機器の損傷と人員のリスクを軽減します。材料はまた、短絡熱を迅速に分散させ、局所的な過熱による溶融や故障を防ぐために、高い熱伝導性も備えていなければなりません。

耐高温性は非常に重要です。短絡電流は高温アークを引き起こす可能性があり、材料は過酷な熱条件下でも構造的完全性を維持する必要があります。耐アーク侵食性は、複数回の短絡動作をサポートし、耐用年数に影響を与える表面侵食を低減します。耐腐食性は、湿気や塩水噴霧による導電性への影響を防ぐため、屋外接地スイッチでは特に重要です。硬度と靱性のバランスをとる必要があります。硬度は接触圧力に耐え、靱性は衝撃エネルギーを吸収する必要があります。IEC 62271-102 や IEEE C37.41 などの国際規格では、接地スイッチ材料の強度と導電性の試験要件が定められており、短絡耐性試験や熱安定性評価も含まれています。タングステン銅合金は、その高い強度と導電性によりこれらの要件を満たしており、将来的には合金比率の最適化によって性能を向上させることができます。

#### 6.1.4.4 接地スイッチの安全な動作を確保するためのタングステン銅合金のメカニズム

タングステン銅合金は、短絡条件下での総合的な性能に基づいています。そのメカニズムはまず高い導電性に反映されています。銅相は連続的な電流経路を提供し、短絡エネルギーを迅速に大地に伝導し、システム電圧を低下させ、機器を保護します。タングステン相の高い融点と耐アーク侵食性は、短絡アークの作用下でエネルギーを吸収し、接点の溶融や深刻な摩耗を防ぎ、接地接点の信頼性を確保します。合金の微細構造は、真空浸透または粉末冶金プロセスによって最適化されています。密度は多孔性を低減し、耐衝撃性と熱安定性を高め、短絡電流の瞬間的な負荷をサポートします。

機械的強度と靱性機構は、接地操作の機械的作用をサポートします。タングステン相は硬度を提供し、電磁力に抵抗します。銅相は延性を高め、衝撃エネルギーを吸収し、亀裂の伝播を防ぎます。熱伝導機構は、短絡熱を素早く拡散させ、局所的な温度を下げ、周囲の部品を保護します。耐腐食機構は、タングステンの化学的安定性により環境侵食に抵抗し、銅相の表面処理により耐候性がさらに向上します。応用分野では、タングステン銅合金は接点やコネクタによく使用され、多層構造として設計されています。高タングステン層はアークに抵抗し、高銅層は導電性を最適化します。接地スイッチのアーク吹き出し構造やセグメント構造と組み合わせ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

せることで、アークの消弧が速くなります。将来的には、インテリジェントモニタリングを使用して合金の性能をリアルタイムで評価し、安全性を高めることができます。

#### 6.1.4.5 断路器および接地スイッチにおけるタングステン銅合金の選択基準

断路器および接地開閉器に使用されるタングステン銅合金は、用途要件と環境条件を総合的に評価した上で選定されます。まず、導電性が重要な基準となります。合金は効率的な電流伝送を確保する必要があります。銅含有量は通常 20%～40% です。WCu 70/30 または WCu 80/20 が一般的な選択肢です。耐高温性と耐アーク侵食性も重要な基準です。高電圧および短絡が発生する状況では、WCu 90/10 などのより高いタングステン含有量が求められ、製造工程では密度を最適化する必要があります。機械的強度と耐摩耗性を確保するには、合金の粒子が細かく、多孔性が低いことが求められます。これにより、機械的な動作と長期使用に耐えることができます。

耐食性と耐候性は、材料選定において重要な考慮事項です。屋外環境では、表面処理またはコーティング強化された合金を選択する必要があります。熱応力を低減するには、熱膨張係数が基材と適合している必要があります。コストと加工性も選択に影響します。複雑な部品の場合は粉末冶金を優先し、コスト重視のシナリオでは複合構造を採用できます。IEC 62271-102 などの国際規格や業界仕様は性能ベンチマークを提供しており、選定にあたっては耐候性、短絡耐性、導電性試験を通じて検証する必要があります。

## 6.2 エレクトロニクス分野におけるタングステン銅合金の応用

タングステン銅合金は、エレクトロニクス分野で広く使用されており、特に高精度加工と効率的な熱管理が求められる場面で使用されています。エレクトロニクス分野には、放電加工（EDM）電極、電子パッケージングヒートシンク、高周波回路コネクタなどが含まれます。タングステン銅合金は、タングステンの高い耐摩耗性と銅の高い導電性により、精密製造と熱管理のニーズを満たしています。EDM では、この合金は電極材料として使用され、長寿命を維持しながらワークピースの材料を効率的に除去します。電子パッケージングでは、その低い熱膨張係数と熱伝導性により、高密度集積回路の放熱をサポートします。高周波用途では、合金の導電性により信号伝送の安定性が確保されます。このセクションでは、EDM 電極の性能要件とタングステン銅合金の利点を詳しく分析します。

### 6.2.1 EDM 電極の性能要件とタングステン銅合金の利点

EDM 電極の性能要件は、タングステン銅合金の利点と密接に関連しています。この合金の総合的な性能は、高精度加工において重要な位置を占めています。EDM は電気火花放電によってワーク材料を加工するため、電極材料には導電性、耐摩耗性、耐高温性といった厳しい要件が求められます。タングステン銅合金は、タングステンの高硬度と銅の高い導電性により、これらの要件に完璧に適合します。WCu 70/30 と WCu 80/20 の比率は、導電性と耐摩耗性のバランスをそれぞれ実現する一般的な選択肢です。合金の微細構造は、粉末冶金法または真空浸透法によって最適化されており、低気孔率と均一な相分布を確保し、加工精度と耐用年数を向

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

上させます。本セクションでは、放電加工における電極材料の性能指標要件、異なる加工シナリオにおける電極性能の違いに対する要件、導電性と耐摩耗性の観点から見たタングステン銅合金の適応性分析、従来の電極材料との性能優位性の比較、そして一般的な放電加工装置におけるタングステン銅合金電極の選択基準について詳しく説明します。

### 6.2.1.1 EDMプロセス用電極材料の性能指標要件

EDMプロセスにおける電極材料の性能要件は、電気火花放電によってワークピースの材料を除去するというその独特な原理に由来し、これには複数の重要な特性が関係しています。まず、材料は優れた導電性を備え、効率的な電流伝送を確保し、安定した火花放電を発生させ、加工中のエネルギー損失とムラを低減する必要があります。電気伝導性は放電効率に直接影響し、特に微細加工では電極が低抵抗経路を提供することが求められます。熱伝導性はもう一つの重要な指標です。優れた放熱能力は、放電によって発生した熱を電極の外側に素早く伝達し、局所的な過熱による電極の変形やワークピース表面の焼けを防ぐことができます。耐摩耗性は重要な要件です。EDM中の電極とワークピース間の放電は、材料の損失を引き起こします。

耐アーク侵食性も同様に重要です。頻繁な放電は、電極表面にアブレーションや物質移動を引き起こす可能性があります。材料は、急速な劣化を起こさずに高エネルギーアークに耐える必要があります。耐高温性も不可欠です。放電時の局所的な高温は数千度に達する可能性があります。材料は、極端な熱条件下でも熔融や割れを防ぐために構造的完全性を維持する必要があります。機械的強度と加工性も考慮する必要があります。電極は、機械的な締め付けや加工圧力に耐えるだけでなく、深穴や微細構造などの複雑な形状への精密切削を容易にする必要があります。耐腐食性は、化学的に活性なワークピースを加工する際に特に重要です。電極表面の損傷やワーク表面の汚染を防ぐためです。加工精度を確保するには、放電の均一性を確保し、加工欠陥を回避するために、電極の気孔率が低く、微細構造が均一である必要があります。ISO 14132 や JIS B 6402 などの国際規格では、導電性試験、耐摩耗性試験、熱安定性評価など、放電加工用電極材料の性能ベンチマークが確立されています。タングステン銅合金は、その包括的な特性によりこれらの要件を満たし、放電加工に最適な材料となっています。

### 6.2.1.2 異なる処理シナリオにおける異なる電極性能要件

異なる加工シーンにおける電極性能への異なる要求は、ワーク材質、加工精度、加工効率の多様な要件を反映しており、タングステン銅合金の比率と適用形態に直接影響します。金型、マイクロギア、精密電子部品などの精密切削加工シーンでは、電極は極めて高い加工精度と表面品質を備え、放電均一性を確保するために低気孔率と微細粒構造が求められます。微細な電流制御をサポートするために導電性が安定している必要があります。電極の損失を減らして寿命を延ばすために耐摩耗性に優れている必要があります。一般的に使用される WCu 70/30 比率は、適度な銅相の割合を持ち、導電性を確保し、一定の耐摩耗性を維持します。大量の材料を除去したり、粗い金型キャビティを開けたりするような粗加工シーンでは、効率的な放電と迅速な材料除去が重視されます。導電性と耐高温性がより重要であり、耐摩耗性に対する要件は比較的低くなります。WCu 60/40 比率を選択すると、導電性が向上し、加工速度が向上します。は高温およびアーク浸食に対してより高い耐性が必要です。WCu 80/20 またはタングステン含有

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

量の高い合金がより適しています。また、高エネルギー熱を分散させ、ワークピースの熱影響部を減らすために、熱伝導率を向上させる必要があります。深穴または複雑な形状の加工シナリオでは、電極は優れた機械的強度と加工性を備え、細長い構造や複雑な形状をサポートし、耐摩耗性と耐腐食性で複数の用途をサポートする必要があります。表面研磨プロセスと組み合わせた WCu 70/30 比率がよく使用されます。非導電性材料（セラミックなど）を加工する場合は、補助電極の設計が必要であり、導電性要件は補助材料と一致します。銅含有量の高い WCu 60/40 を選択できます。さまざまなシナリオでは、処理速度とコストも関係します。精密切削は高精度・高耐久性材料に重点が置かれ、粗加工はコスト最適化と効率化が図られる傾向があります。将来的には、合金比率とプロセスパラメータを動的に調整することで、多様な加工ニーズに対応し、電極性能をさらに向上させることができます。

### 6.2.1.3 導電性と耐摩耗性の観点から見たタングステン銅合金の適合性の分析

タングステン銅合金の導電性と耐摩耗性に関する適合性分析は、EDM 電極としての独自の利点を反映しています。導電性は主に銅相によって提供されます。銅の高い導電性は、効率的な電流伝送を保証し、安定した電気火花放電を生み出し、処理中のエネルギー損失と不均一性を低減します。合金の微細構造は、粉末冶金または真空浸透プロセスによって最適化されています。銅相の連続ネットワークは抵抗を低減し、放電の均一性を高めます。WCu 70/30 と WCu 60/40 の比率は導電性に優れており、高効率処理が必要なシナリオに適しています。熱伝導率と電気伝導率は互いに補完し合います。銅相の高い熱伝導率は、放電熱を電極の外側に素早く伝え、局所的な温度を下げ、特に精密切断において変形や割れを防ぎます。

耐摩耗性は主にタングステン相に寄与しており、その高硬度と耐摩耗性により、火花放電による材料損失を防ぎます。微粒子と低多孔性構造により表面安定性が向上し、特に高エネルギー加工において電極の摩耗と侵食が軽減されます。タングステン相の高温耐性は高エネルギー放電をサポートします。WCu 80/20 は耐摩耗性と耐アーク侵食性に優れており、高硬度材料の加工に適しています。タングステンと銅の界面結合はプロセスの最適化によって実現され、剥離のリスクを軽減し、長期にわたる耐摩耗性を維持します。適合性分析によると、タングステン銅合金はタングステンと銅の比率を調整することで導電性と耐摩耗性のバランスを実現できます。WCu 70/30 は両方の性能を考慮した一般的な選択肢ですが、WCu 80/20 は高い耐摩耗性の要件に適しています。

### 6.2.1.4 従来の電極材料と比較した性能上の利点

純銅、純タングステン、グラファイトなどの従来の電極材料と比較して、タングステン銅合金は性能上の利点の比較において顕著な優位性を示しています。まず、純銅と比較して、タングステン銅合金は高温およびアーク浸食に対する耐性が強いです。純銅は高エネルギー放電で溶けたり変形したりしやすいですが、タングステン銅合金のタングステン相は熱安定性を向上させ、電極の寿命を延ばします。導電性の点では、純銅がわずかに優れていますが、タングステン銅合金は銅相の分布を最適化することでそのレベルに近づいています。また、耐摩耗性があり、損失が少なく、特に長期処理で顕著です。純タングステンと比較して、タングステン

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

銅合金の電気伝導率と熱伝導率が大幅に向上しています。純タングステンの電気伝導率が低い  
ため、放電効率が制限されますが、タングステン銅合金の銅相がこの欠陥を補い、効率的な  
処理に適しています。

グラファイト電極と比較して、タングステン銅合金は機械的強度と耐摩耗性に優れています。  
グラファイトは複雑な形状の加工中に破損したり摩耗したりしやすいのに対し、タングステ  
ン銅合金は精密切削や深穴加工に対応し、加工精度も高くなっています。グラファイトは導電  
性が高いですが、高温やアーク浸食に対する耐性はタングステン銅合金ほど優れていません。  
高硬度材料の加工時に損失が大きく、表面粗さも劣ります。タングステン銅合金の低気孔率と  
均一な微細構造は加工の一貫性を保証しますが、グラファイトはその気孔率のために放電が  
不均一になる可能性があります。総合的に比較すると、タングステン銅合金は耐久性、精度、  
さまざまなシーンへの適応性に優位性があり、特に高精度、長寿命、複雑な加工の要件におい  
ては、純銅、純タングステン、グラファイトなどの従来の材料では対応が困難です。

### 6.2.1.5 一般的な放電加工装置におけるタングステン銅合金電極の選択基準

一般的な放電加工装置のタングステン - 銅合金電極は、装置の特性と加工要件を総合的に評  
価して選定され、加工品質と効率に直接影響します。まず、導電性が中核となる基準です。合  
金は装置の放電パラメータと一致する必要があります。WCu 60/40 と WCu 80/20 の比率は、電  
流強度と加工精度に応じて選択します。安定した放電を確保するためには、導電性が電力シス  
テムと互換性がある必要があります。耐摩耗性と耐アーク侵食性が重要です。高硬度材料や高  
エネルギーのシナリオを加工する場合は、タングステン含有量を高くする必要があります。  
WCu 80/20 または WCu 90/10 がより適しています。損失を減らすために、準備プロセスでは低  
多孔性を確保する必要があります。耐高温性は高エネルギー放電をサポートし、選択では装置  
の最大放電電力とパルスパラメータを考慮する必要があります。

電極の成形には、機械的強度と加工性が影響します。複雑な形状や細長い構造には、切削しや  
すい合金が求められ、表面粗さは加工精度に適合させる必要があります。これら 2 つの側面の  
バランスをとるために、WCu 70/30 の比率がよく用いられます。化学的に活性なワークピー  
スを加工する場合、耐食性が重要であり、表面めっきやコーティング強化などの選択肢があり  
ます。コストと入手性も考慮する必要があります。WCu 70/30 は経済的な選択肢であり、一般  
的な加工に適しています。ハイエンド機器では、高い耐久性要件を満たすために、高いタング  
ステン比率を使用できます。機器メーカーは技術ガイドラインを提供しており、耐摩耗性試験、  
導電性検証、加工試験などを通じて選定を確認する必要があります。ISO 14132 などの国際規  
格は、性能基準を提供しています。

### 6.2.2 マイクロエレクトロニクス分野における役割

マイクロエレクトロニクス分野では、材料性能に対する要求が極めて厳しく、電子信号と熱を  
効率的に伝送するための優れた導電性と熱伝導性、そしてチップなどのコア部品に適合した  
適切な熱膨張係数が求められます。さらに、精密パッケージングのニーズを満たすために、一  
定の構造強度も求められます。これらの特性を独自に組み合わせたタングステン銅合金は、こ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の分野で重要な役割を果たしており、コアデバイスと外部回路を接続し、放熱問題を解決する鍵となる材料となっています。

### 6.2.2.1 マイクロエレクトロニクスデバイス用材料の精度と安定性に対する要件

マイクロエレクトロニクスデバイスの材料に対する精度と安定性の要件は、高集積化と小型化に起因し、デバイスの性能と信頼性に直接影響します。まず、精度には、材料に極めて高い寸法精度と表面平坦性が求められます。チップやセンサーなどのマイクロエレクトロニクスデバイスは、通常、ミクロンまたはナノメートルレベルです。材料は、電気接続と熱伝導の均一性を確保するために、精密加工によって低い粗さと一貫性を実現する必要があります。電気伝導性は重要な指標です。材料は、高速信号伝送をサポートし、信号の減衰や干渉を回避するために、低抵抗パスを提供する必要があります。熱伝導性も同様に重要です。効率的な放熱は、チップの動作温度を下げ、過熱による性能低下や故障を防ぐことができます。

安定性には、材料が長期動作において一貫した性能を維持することが求められ、耐高温性がその核心です。チップの動作温度は 150°C を超える場合があり、材料は高温でも変形したり酸化したりしてはなりません。耐疲労性と機械的安定性は、頻繁な熱サイクルと機械的応力に耐え、マイクロクラックや層間剥離を防止します。低熱膨張係数は重要な要件であり、シリコンベースの材料（チップ基板など）の熱膨張率と一致させることで、熱応力による反りや破損を低減します。耐腐食性と化学的安定性は、材料の劣化がデバイス寿命に影響するのを防ぐために、湿気や酸性環境で特に重要です。JEDEC JESD22 や IPC-6012 などの国際規格では、熱サイクル試験や信頼性評価など、マイクロエレクトロニクス材料の性能ベンチマークを確立しています。タングステン銅合金は、その包括的な性能によりこれらの要件を満たし、マイクロエレクトロニクス分野で好まれる材料となっています。

### 6.2.2.2 マイクロエレクトロニクスパッケージにおけるタングステン銅合金の応用

タングステン銅合金は、パッケージタイプと熱管理要件に応じてさまざまな形態をとります。一般的な形態の 1 つは、タングステン銅合金をヒートシンク基板にし、チップパッケージングに直接使用することです。WCu 85/15 または WCu 90/10 比は粉末冶金プロセスで製造され、厚さは通常 0.5mm~2mm で、表面は熱接触を最適化するために研磨されています。もう 1 つの形態は複合構造で、タングステン銅合金をヒートシンク層として使用し、セラミック（AlN など）または金属基板と組み合わせ、拡散溶接または圧入で一体化して熱膨張と熱伝導率のバランスをとります。応用面では、この合金は、高密度パッケージのニーズを満たすために、マイクロチャネル付きヒートシンクなどの複雑な形状に加工することもできます。

取り付けフォームは、チップまたはパッケージシェルとの密着を確保するために、主に接着またはボルトで固定されています。ニッケルメッキや金メッキなどの表面処理は、耐食性と溶接性を向上させ、さまざまなパッケージングプロセスに適応できます。一部の高性能アプリケーションでは、タングステン銅合金は機能傾斜材料として設計されており、タングステン含有量は基板から表面に向かって減少し、チップとの熱整合と伝導性を最適化します。パッケージン

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

グでは、合金はリードフレームや相互接続にも使用され、WCu 70/30 比率は信号伝送と放熱をサポートします。アプリケーションフォームは、タングステン銅合金の低熱膨張と熱伝導性を最大限に活用して、マイクロエレクトロニクスパッケージの高精度と信頼性の要件を満たしています。将来的には、3D プリント技術を通じて、より複雑なアプリケーションフォームを開発することができます。

### 6.2.2.3 マイクロエレクトロニクスデバイスの放熱効率と寿命を向上させるメカニズム

タングステン銅合金は、優れた熱管理と構造安定性により、マイクロエレクトロニクスデバイスの放熱効率と耐用年数を向上させます。まず、合金の高い熱伝導率は、チップから発生する熱を放熱面へ素早く伝達し、動作温度を低下させ、熱応力の蓄積による性能低下を防ぎます。また、シリコンベースの材料と同等の低熱膨張係数を有し、熱サイクル時の反りや割れを軽減し、パッケージ構造の機械的安定性を高めます。さらに、タングステン相の高い融点と耐高温性は、150°Cを超える動作環境下でもチップを支え、材料の劣化を防ぎます。

微細構造の最適化により、気孔や欠陥が減少し、熱伝導経路の連続性が向上し、WCu 85/15 比は優れた放熱効率を発揮します。均一な相分布により熱抵抗が低減し、銅相が効率的な熱拡散を実現し、タングステン相が構造健全性を維持します。耐腐食性と耐酸化性により、合金は湿気や化学物質から保護され、耐用年数が延長されます。アプリケーションにおいて、タングステン銅合金の放熱効率は熱の局所化を低減し、チップの劣化を遅らせ、従来材料では数千時間だった耐用年数を1万時間以上に延長します。特に高性能コンピューティングや5Gデバイスにおいては顕著です。

### 6.2.2.4 チップパッケージモジュールの実装構造の設計

チップパッケージモジュールの実装構造の設計では、タングステン銅合金の性能を最大限に活用して、熱管理と電気接続を最適化する必要があります。設計では、タングステン銅合金は放熱基板としてよく使用され、チップの下に配置され、熱伝導性材料(サーマルグリースなど)を介してチップの底面と接触することで、効率的な熱伝導を確保します。取り付け形式は主にボルト締めまたは接着です。基板の厚さはチップの電力に応じて選択され、0.5mm~1.5mmが一般的です。また、設計にはマイクロチャンネルまたはフィン構造が含まれ、放熱面積を増やします。WCu 90/10 比は高出力チップをサポートし、表面コーティングは溶接性を向上させます。

電気接続設計では、リードフレームまたはインターコネクにタングステン銅合金を使用しています。WCu 70/30 比の WCu は、圧入または溶接によって一体化され、チップパッドとドッキングすることで低抵抗経路を確保しています。

構造設計では熱膨張のマッチングを考慮し、タングステン銅合金とセラミックまたはシリコン基板の低熱応力設計によりパッケージの反りを防止しています。設置場所には補助放熱層も設けられ、空冷または液冷システムと組み合わせることで熱流路を最適化しています。設計では有限要素解析を通じて熱応力と機械的安定性を検証する必要があり、JEDEC JESD51 などの国際規格では熱管理のガイドラインが提供されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.2.2.5 マイクロエレクトロニクス分野におけるタングステン銅合金の純度と微細構造の要件

マイクロエレクトロニクス分野におけるタングステン銅合金の純度と微細構造に対する要件は、高精度と高信頼性のニーズに起因しています。まず、純度要件は非常に高く、タングステンと銅の不純物含有量は、導電性の低下や熱伝導の阻害を避けるために 0.1%未満にする必要があります。微細構造に影響を与える酸化物の形成を防ぐため、酸素含有量を低く制御する必要があります。純度には微量元素の制御も含まれます。例えば、鉄やシリコンのドーピングは粒界の弱化を引き起こす可能性があり、これは高純度の原材料と真空プロセスによって確実に実現する必要があります。ASTM B702 などの国際規格では、高純度タングステン銅合金の組成要件が規定されています。微細構造には均一な相分布が必要です。タングステンと銅の粒子径は 5~20 ミクロンの範囲にする必要があります。微粒子は機械的強度と熱伝導性を高めます。熱伝導と電気特性の連続性を確保するには、気孔率を 1%未満にする必要があります。剥離のリスクを低減するには、界面の接合を強固にする必要があります。WCu 85/15 比の微細構造最適化は、需要の高いシナリオでよく使用されます。亀裂や未濡れ領域などの微細欠陥は、走査型電子顕微鏡で検証する必要があります。熱間等方圧加圧(HIP)などの調製プロセスは、構造の均一性を向上させることができます。将来的には、ナノテクノロジーやフェーズドアレイプロセスによって、純度と微細品質をさらに向上させることができます。

### 6.2.3 センサー分野での応用

環境情報を取得するための中核デバイスであるセンサーは、高温の産業現場、湿度の高い屋外環境、振動や衝撃を伴う機械システムなど、複雑な環境で動作することが多く、センサー材料の安定性、適応性、機能性には多くの要件が求められます。タングステン銅合金は、その耐高温性、耐振動性、優れた熱伝導性、構造安定性により、センサー分野における応用価値を徐々に示し、センサーの信頼性向上における重要な材料選択肢となっています。

#### 6.2.3.1 センサ作業環境における材料性能要件

センサーの動作環境における材料の性能要件は、多様な用途シナリオに応じて異なり、センサーの精度と寿命に直接影響します。まず、耐高温性が重要な要件です。高温圧力センサーや熱電対など、多くのセンサーは、200°C~1000°Cを超える環境で動作する必要があります。材料は、熱変形や酸化による性能低下を防ぐために、構造安定性と導電性を維持する必要があります。耐腐食性も重要な要件の 1 つです。センサーは、化学用途や海洋用途など、酸性、アルカリ性、または湿度の多い環境にさらされることがよくあります。表面劣化が測定精度に影響するのを防ぐために、材料は化学侵食に耐える必要があります。機械的強度と耐摩耗性は、振動や機械的ストレス下でのセンサーの長期使用をサポートし、特に産業機器において、部品の摩耗や破損を防ぎます。

電気伝導性は、電気信号センサー（抵抗型センサーや容量型センサーなど）にとって非常に重要です。信号伝送の精度と安定性を確保するため、材料は低抵抗経路を提供する必要があります。熱伝導性は、高温または高出力センサーで重要です。効率的な熱放散は動作温度を下げ、敏感な部品を保護します。低熱膨張係数は基板と一致し、熱サイクル中の応力集中を減らし、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

構造的完全性を高めます。高電圧センサーでは、火花による損傷を防ぐために耐アーク浸食性が求められます。加工性と寸法精度には、マイクロセンサー（MEMS など）のミクロンレベルの構造要件を満たすために、材料が正確に切断しやすいことが求められます。IEC 60751 や ASTM E1137 などの国際規格では、耐熱性テストや信頼性評価など、センサー材料の性能ベンチマークを確立しています。タングステン銅合金は、これらの要件を満たす包括的な性能を備えているため、センサー分野で好まれる材料となっています。

### 6.2.3.2 タングステン銅合金のセンサー素子への応用可能性

タングステン銅合金の用途は、センサーの種類や機能要件によって異なります。一つの可能性として、抵抗温度センサーの感応素子にタングステン銅合金を用いることが挙げられます。WCu 70/30 は粉末冶金法で作製され、薄膜またはフィラメント構造に加工されます。銅相の高い導電性とタングステン相の安定性を利用して、温度変化を正確に測定します。もう一つの用途は、圧力センサーのダイヤフラムや接点に使用することです。WCu 85/15 は真空浸透プロセスによって最適化され、厚さは 0.1mm～0.5mm です。表面研磨により高い接触強度を確保し、高圧環境下での変形検出をサポートします。

タングステン銅合金を電極やコネクタとして使用することができます。WCu 60/40 の比率は、プレスまたは溶接によって一体化され、高い導電性と機械的強度を兼ね備え、動的測定のニーズを満たします。潜在的な用途には、ガスセンサーの発熱体も含まれます。この合金はマイクロヒーティングプレートに加工されます。WCu 80/20 の比率は高温安定性をサポートし、表面コーティングは耐腐食性を高めます。取り付け形態は、主に接着またはマイクロ溶接を採用し、センサー基板と密接に統合されています。設計は、耐久性を高めるために内部の高タングステン層と導電性を最適化するために外部の高銅層を備えた多層構造を採用する場合があります。これらのアプリケーションフォームは、タングステン銅合金の性能を最大限に活用し、敏感なコンポーネントの高精度と信頼性の要件を満たします。将来的には、3D プリント技術を通じて、より複雑なアプリケーション構造を開発することができます。

### 6.2.3.3 高熱伝導率に基づくセンサ放熱部品の応用設計

高熱伝導率をベースとしたセンサー放熱部品の応用設計は、タングステン銅合金の熱管理能力を活用し、高温環境におけるセンサーの性能と寿命を向上させることを目的としています。設計において、タングステン銅合金は放熱基板としてよく使用され、センサー感応素子の下に配置されます。WCu 85/15 または WCu 90/10 は粉末冶金プロセスで製造され、厚さは 1mm～3mm、表面平坦度は 5 $\mu$ m 以上で、感応素子との密着性を確保します。また、マイクロチャネルまたはフィン構造を採用することで放熱面積を拡大し、熱を外部放熱器または周囲の空気へ素早く伝達し、感応素子の温度を下げます。

取り付け方法はボルト固定または熱伝導性接着で、センサーハウジングまたは空冷システムと一体化されており、熱伝導パッドなどの熱伝導性インターフェース材料が接触熱抵抗を最適化します。低熱膨張係数（約 7ppm/°C）はシリコンまたはセラミック基板に合わせて設計されており、熱サイクル中の応力を軽減し、パッケージの亀裂を防ぎます。放熱部品は、アクテ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

イブ冷却システム（マイクロファンなど）と組み合わせることができます。WCu 70/30 比は軽量シナリオに有利であり、表面ニッケルメッキは耐食性を向上させます。アプリケーションでは、放熱効率により、特に高温圧力センサーや赤外線センサーなどで、敏感な部品の動作温度が大幅に低下し、寿命が延びます。設計では、熱シミュレーションを通じて熱流分布を検証する必要があり、JEDEC JESD51 などの国際規格が熱管理のガイドラインを提供しています。

### 6.3 航空宇宙分野におけるタングステン銅合金の応用

航空宇宙分野では、材料の許容誤差に対する要求が非常に厳しく、極度の高温、高圧、高速気流の影響に対応しながら、構造安定性と信頼性の高い機能を確保する必要があります。タングステン銅合金は、タングステンの高融点と高強度、銅の高い熱伝導率と耐熱衝撃性により、この分野の多くの主要部品の中核材料となっています。固体ロケット、宇宙船の熱防護、衛星部品などの分野では、「耐高温性と熱伝導性のバランス」と「強度と耐衝撃性の両立」という特性が十分に活かされています。中でも、固体ロケットノズルスロートライナーは、最も代表的な用途の一つです。

#### 6.3.1 固体ロケットノズルスロートライニングの適用

固体ロケットノズルのスロートライナーは、ロケットエンジンノズルの「喉」部分であり、高温ガスを高速で噴出させて推力を発生させる役割を担っています。その性能は、ロケットの推進効率と打ち上げ安全性を直接的に決定します。作業環境が極めて複雑なため、材料に対する総合的な性能要件は極めて高くなっています。タングステン銅合金は、性能の最適化とプロセスの適応を通じて、この部品に最適な材料選択肢となっています。

##### 6.3.1.1 固体ロケットノズルスロートライナーの作業環境

固体ロケットノズルのスロートライナーの動作環境は「物質の煉獄」とも言えるほどで、複数の極限条件が同時に重なり合う状況に耐える必要があります。ロケット点火後、固体推進剤の燃焼によって発生した高温の燃焼ガスは、超音速でスロートライナーを流れます。燃焼ガスの温度は数千°Cに達することもあり、ほとんどの金属を瞬時に溶解させるほどです。高速気流に運ばれた固体粒子は、極めて高速でスロートライナーの表面に衝突し、継続的な「サンドブラスト」効果を生み出し、材料表面を絶えず摩耗させます。燃焼ガスに含まれる酸化性ガスと腐食性粒子は、スロートライナーの表面と化学反応を起こし、材料の損失をさらに悪化させます。さらに深刻なのは、点火からエンジン停止までの短時間で、スロートライナーの温度が室温から高温へと急激に上昇し、その後急速に冷却されることです。大きな温度変動は強い熱応力を生じ、材料の割れを容易に引き起こします。「高温燃焼+高速研磨+化学腐食+熱衝撃」という複合環境は、材料の耐性に極めて大きな課題をもたらします。

##### 6.3.1.2 ノズルスロートライニングの材料特性に関する要件

ノズルスロートライナーの使用環境は、材料に対する性能要件を包括的かつ厳格に規定しています。第一に、材料は極めて高い耐熱性を備え、数千度の高温でも溶融したり変形したりせ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ず、構造的完全性を維持できなければなりません。第二に、優れた耐侵食性と耐摩耗性を備え、高速気流や粒子の継続的な衝撃に耐え、表面損失を低減できなければなりません。第三に、優れた熱伝導性を備え、表面で吸収された熱を速やかに放出することで、局所的な過熱やアブレーションを回避できなければなりません。同時に、耐熱衝撃性も不可欠です。温度が急激に上昇したり下降したりしても、熱応力の発生を抑え、亀裂の発生を回避できます。最後に、材料は十分な構造強度を備え、高圧ガスの作用を受けても破損したり崩壊したりしてはなりません。これらの要件を同時に満たすことによりのみ、ロケットの運用中にスロートライナーが安定して機能することが保証されます。

### 6.3.1.3 ノズルスロートライニングの要件を満たすタングステン銅合金の性能

タングステン銅合金はノズルスロートライニングの要求に的確に合致し、その核心的な優位性は「タングステンと銅の相乗補完」にあります。タングステンは融点が高いため、高温ガス中でも安定した状態を保ちます。表面が極めて高温にさらされても、タングステン相で形成された骨格は溶融せず、「高温燃焼」に直接抵抗します。タングステンは高い強度と硬度を有し、優れた耐侵食性を発揮します。高速粒子の衝突に耐え、表面摩耗を低減し、「高速侵食」に対応します。銅の高い熱伝導率は重要な役割を果たし、スロートライニング表面から内部または冷却システムへ熱を素早く伝導し、局所的な熱蓄積によるアブレーションを回避し、「熱蓄積」の問題を解決します。同時に、銅の可塑性により、急激な温度変化による熱応力が緩和され、タングステン骨格の脆性割れのリスクが低減し、耐熱衝撃性が向上します。

### 6.3.1.4 ノズルスロートライニングにおけるタングステン銅合金の成形プロセスと構造設計

ノズルスロートライニングに使用されるタングステン銅合金は、その性能を最大限に引き出すために、精密な成形プロセスと構造設計を必要とします。成形プロセスは粉末冶金法に基づいています。まず、タングステン粉末と銅粉末を特定の比率で混合し、金型を通してスロートライニングの初期形状（グリーンピレット）にプレスします。次に、タングステン粒子を高温焼結して結合させ、連続した骨格を形成します。その後、銅を浸透プロセスで骨格の細孔に充填し、材料の密度を確保します。最後に、精密機械加工によって曲面形状を整え、ノズルの他の部品との組み立て精度を確保します。構造設計は「機能適応」を重視しています。スロートライナー表面には、ガス流の軌跡にフィットし、気流の影響による局所的な摩耗を軽減する弧状の曲面設計を採用しています。一部のスロートライナーには内部に微細な冷却チャネルが設けられており、銅の高い熱伝導性と相まって、冷却媒体を通して熱を素早く除去できます。ノズルの他の部分との接続部には、高温のガス漏れを防ぐために段状のシール構造が採用されています。同時に、スロートライナーの厚さは力の分布に応じて調整され、ガスの影響が最も大きい領域を適切に厚くすることで強度を確保し、材料の無駄を減らしています。

### 6.3.1.5 タングステン銅合金の使用によるノズルスロートライニングの耐用年数の改善

タングステン銅合金は、従来の材料（純タングステン、セラミックなど）と比較して、ノズルスロートライナーの耐用年数を大幅に延長し、「使い捨て」から「複数回の衝撃に耐えられる」へとグレードアップしました。従来の純タングステンは高温に強いものの、脆く、耐熱衝撃性

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が低いという欠点があります。急激な温度変化によって割れやすく、一度点火で割れが発生して故障するケースも少なくありません。セラミック材料は耐摩耗性に優れていますが、熱伝導性が低く、表面が熱蓄積によって局所的に摩耗しやすいため、耐用年数が非常に短くなります。

タングステン銅合金は、相乗効果でこれらの問題を解決します。タングステン相は高温と浸食に耐え、表面摩耗率を低減します。銅相は熱を効率的に伝導し、局所的な過熱とアブレーションを回避します。耐熱衝撃性の向上により、亀裂が発生する可能性が低くなります。さらに、高密度成形プロセスと最適化された構造設計を組み合わせることで、スロートライナーは複数回の点火停止サイクルの影響に耐えることができます。実際の用途では、タングステン銅合金製のノズルスロートライナーは、1回の打ち上げミッションを完了するだけでなく、一部のモデルは複数のテストや再利用されたロケットにも使用できるため、交換頻度と故障リスクが大幅に低減され、ロケット打ち上げの経済性と信頼性が向上します。

### 6.3.2 航空機エンジン部品への潜在的な応用

航空機エンジンは航空機の「心臓部」であり、その性能は航空機のパワー、効率、安全性を直接的に決定します。航空業界におけるエンジンの推力重量比と燃費効率に対する要求が高まるにつれ、コア部品の使用環境はますます過酷になり、材料の総合的な性能に対する課題はますます高まっています。タングステン銅合金は、耐高温性、熱伝導性、構造強度のバランスの取れた特性を備えており、航空機エンジンのホットエンド部品などの重要な部位において大きな潜在的な応用価値を示しており、過酷な使用条件下における従来の材料の性能ボトルネックを解決することが期待されています。

#### 6.3.2.1 航空機エンジンの主要部品の作業環境の特性

航空機エンジンの主要部品（特に燃焼室、タービンブレード、ノズルなどの高温部品）の動作環境は、「高温、高圧、高周波振動、腐食」という4つの核心特性を有しています。燃焼室内の燃料燃焼温度は数千°Cに達することもあり、タービンブレードは高温燃焼ガスの噴流下で高速回転（毎分数千回転に達することもあります）し、巨大な遠心力と熱応力に耐えなければなりません。高圧圧縮機とタービン間の隙間部品は、高圧ガス環境下で密閉状態を維持し、気流摩擦によって発生する局所的な高温にも耐えなければなりません。さらに、燃焼ガス中に含まれる硫化物、窒素酸化物などの成分は、部品表面に継続的な腐食を引き起こします。エンジンの始動、加減速過程における温度と圧力の変動も、部品に高周波熱疲労と機械振動を引き起こします。この「持続的な高温+交互応力+腐食浸食+振動衝撃」という複合環境は、材料の安定性と耐久性に厳しい試練を与えます。

#### 6.3.2.2 航空機エンジン部品の材料特性に関する要件

過酷な使用環境下において、航空エンジン部品の材料性能は「万能」を要求されます。第一に、優れた耐高温性を有し、長期間の高温下でも機械的特性（強度、硬度）の大幅な低下を抑制し、軟化による変形や破損を回避しなければなりません。第二に、優れた熱伝導性を有し、部品表面から熱を速やかに放出することで局所的なホットスポットの発生を抑え、熱疲労のリスク

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を低減しなければなりません。第三に、優れた耐熱衝撃性と機械的靱性を有し、温度・圧力変化時の亀裂発生を抑え、振動衝撃にも耐えなければなりません。同時に、耐食性も不可欠であり、ガス中の腐食性成分による浸食を防ぎ、表面剥離や構造強度低下を回避しなければなりません。最後に、部品の精密設計要件を満たすため、一定の加工性を有し、成形プロセスによって複雑な構造（ブレードの曲面、冷却チャネルなど）を成形できなければなりません。これらのパフォーマンスは調整された方法で達成される必要があります、どれも欠落することはできません。

### 6.3.2.3 航空機エンジンのホットエンド部品におけるタングステン銅合金の応用

航空機エンジンのホットエンド部品におけるタングステン銅合金の応用は、主に「熱伝導と耐高温性の両立」という中核的な位置づけに重点が置かれており、部品の異なる機能に応じて適用形態が調整されています。燃焼室ライナーの分野では、高タングステン含有量のタングステン銅合金を用いて薄肉ライナーを製造し、タングステンの耐高温性を利用して直火燃焼を防ぐとともに、銅の熱伝導性を利用して熱を冷却システムに素早く伝達し、ライナーの局所的な過熱を回避します。タービンブレードのエッジまたは先端シール部では、タングステン銅合金を耐摩耗性熱伝導インサートとして使用し、ブレードマトリックスに埋め込みます。高硬度によりケーシングとの摩擦や摩耗に耐え、熱伝導性によりブレードの放熱を助け、熱応力集中を軽減します。燃料ノズルや点火装置部品においては、タングステン銅合金をノズルコアに用いることで、耐高温性を活かして燃料の霧化安定性を確保するとともに、熱伝導性を活かしてカーボン堆積による過熱によるノズル閉塞を防止します。また、エンジンの熱保護ガスケットや高温センサーハウジングなどの補助部品においても、タングステン銅合金はカスタマイズされた構造（例えば、冷却チャネルを備えた複合構造）によってその役割を担っています。

### 6.3.2.4 航空エンジン用途におけるタングステン銅合金の性能最適化の方向性

航空機エンジンのニーズにより良く適応するために、タングステン銅合金の性能最適化は「欠点の改善」と「利点の強化」に重点を置く必要があります。耐高温性に関しては、少量の高融点合金元素（モリブデンやニオブなど）を添加することでタングステン粒子を微細化し、タングステン骨格の高温安定性を向上させ、長期高温下における軟化現象を軽減することができます。耐腐食性に関しては、表面改質技術（プラズマ透過層や酸化防止コーティングなど）を用いて合金表面に緻密な保護層を形成し、熱伝導性に影響を与えずにガス腐食に耐えることができます。機械的靱性に関しては、タングステン銅比の調整（銅含有量の適度な増加など）や焼結プロセスの最適化によってタングステン銅界面の接合強度を高め、脆性破壊のリスクを低減することができます。加工性に関しては、粉末射出成形などの精密プロセスを開発することで、複雑な構造（マイクロ冷却チャネルや特殊形状面など）のニアネット成形を実現し、後続加工の難易度を低減できます。さらに、「傾斜構造タングステン銅合金」も開発可能です。部品表面に高タングステン含有量を付与することで耐高温性と耐摩耗性を高め、内層に高銅含有量を付与することで熱伝導性と靱性を高め、性能ゾーン分けによって部品のさまざまな部位の要求に適応します。これらの最適化の方向性は、タングステン銅合金を「潜在的な

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応用」から「実際の適応」へと移行させ、航空機エンジンの厳しい基準を満たすことを目指しています。

### 6.3.3 宇宙船の電気システムへの応用

宇宙船の電気システムは、宇宙船の正常な動作を維持する「中枢」であり、電力伝送、コマンド制御、機器への電力供給を担っています。その信頼性は、ミッションの成否に直結します。宇宙空間では、電気システムは過酷な環境試験に晒されます。タングステン銅合金は、「優れた導電性と熱伝導性、そして強力な耐アーク腐食性」を特徴とし、接触器や遮断器などのコアコンポーネントに最適な材料となっており、電気システムの安定した動作を支える重要なサポートを提供しています。

#### 6.3.3.1 宇宙船の電気システムの動作環境と信頼性要件

宇宙船の電気システムの動作環境には、「過酷」かつ「メンテナンスが困難」という2つの大きな特徴があります。軌道上での運用中、システムは真空状態と高温・低温が交互に変化する環境に耐える必要があります。真空状態では空気による放熱がないため、部品に熱が蓄積されやすく、急激な温度変化は材料の膨張と収縮を引き起こし、応力疲労を引き起こします。同時に、宇宙には高エネルギー粒子線が存在し、電気信号の伝送に干渉する可能性があります。さらに、打ち上げ段階における激しい振動と衝撃は、部品の構造的完全性を試すこととなります。

これらの環境特性に基づき、システムの信頼性要件は「ゼロ故障」に近づきます。コアコンポーネントは、数日から数年のミッションサイクル内で、接触不良やアーク浸食などの問題が発生することなく安定して動作する必要があります。電気接続は極端な温度と振動下でも導電性を維持し、アーク消火コンポーネントは確実に電流を遮断する必要があります。粒子放射線や微小隕石の衝突が発生した場合でも、突然の故障は回避する必要があります。一度故障が発生すると、軌道上では修理できないため、ミッションの失敗に直結する可能性があります。

#### 6.3.3.2 宇宙船電気システムのコア部品の材料特性に対する要件

宇宙船の電気システムのコアコンポーネント（接触器の接点や遮断器のアーク消弧室など）の材料に対する性能要件は、「電氣的安定性」と「環境適応性」に大きく重点が置かれています。第一に、材料は優れた導電性を備え、効率的な電流伝送を確保し、接触抵抗による発熱を低減する必要があります。第二に、耐アーク侵食性が鍵となります。接点のオン/オフ時に発生するアークは表面を焼損するため、材料は高温アークの熔融や飛散に耐えなければなりません。同時に、優れた熱伝導性を備え、アークによって発生した熱を速やかに放出することで、部品の過熱を回避しなければなりません。さらに、材料は優れた耐熱衝撃性と機械的強度を備え、高温・低温の変化や振動衝撃を受けても亀裂や変形を起こさないようにする必要があります。

最後に、真空環境においては、材料は揮発性物質を放出せず（光学機器の汚染を防ぐため）、周囲の媒体と反応しない強力な化学的安定性を備えていなければなりません。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.3.3.3 宇宙船コンタクタ接点におけるタングステン銅合金の応用

コンタクタは、宇宙船の電気システムにおける回路のオン/オフを制御する「スイッチ」です。その接点は中核的な実行部品であり、タングステン銅合金の適用は機能要件に正確に適合しています。コンタクタの接点は、オン/オフ時に短いアークを発生します。タングステン銅合金中のタングステン相はアークの高温に耐え、接点の溶融や変形を防ぎます。銅相は優れた導電性を確保し、接触抵抗を低減し、導通時の発熱を抑えます。構造設計の観点から、接点は多くの場合「タングステン銅複合層」の形状を採用しています。表面のタングステン含有量が高いことでアーク耐性が向上し、下層の銅含有量がわずかに高いことでベースとの溶接性が向上します。

### 6.3.3.4 宇宙船遮断器のアーク消弧部品におけるタングステン銅合金の応用

遮断器は宇宙船の電気システムの「安全装置」です。回路が過負荷または短絡した場合、電流を迅速に遮断し、アークを消弧する必要があります。タングステン銅合金は、アーク消弧部品（消弧室の壁やアーク接点など）において重要な役割を果たします。アーク消弧時には、アークによって発生した高温が部品の表面を容易に溶かしますが、タングステン銅合金のタングステン相は高温に耐え、表面のアブレーションを低減します。銅相の高い熱伝導率は、アーク熱を冷却構造に素早く伝導し、アーク消弧を促進します。真空消弧環境下において、タングステン銅合金は揮発性成分を放出しないため、アークへの不純物ガスの混入を防ぎ、消弧効率を確保します。同時に、耐熱衝撃性により、高温から低温真空への急激な変化においても部品の割れを防ぎ、構造の完全性を維持します。この性能により、遮断器は緊急時に確実に電流を遮断し、回路の安全性を確保します。

### 6.3.3.5 宇宙船の電気システムの動作安定性と寿命を確保するタングステン銅合金の役割

タングステン銅合金は、コア部品の信頼性を向上させることで、宇宙船電気システムの運用安定性と寿命を直接的に確保します。接触器においては、耐アーク摩耗性により接点摩耗が低減し、オンオフ回数が数千回から数万回に増加し、部品交換サイクルが延長されます。安定した導電性により、接点の発熱による局所的な過熱を回避し、回路故障のリスクを低減します。遮断器においては、タングステン銅合金の効率的な消弧性と耐アブレーション性により、過負荷時に電流を迅速に遮断し、故障の拡大を防止します。同時に、材料の耐熱衝撃性と機械的強度により、長期にわたる高温・低温や振動による部品の故障を防ぎ、宇宙船の数年に及ぶミッションサイクルに適応します。

### 6.3.3.6 宇宙船用途におけるタングステン銅合金の材料選択基準と品質管理要件

宇宙船に使用されるタングステン銅合金は、信頼性を確保するために厳格な材料選定と品質管理を通過する必要があります。材料選定基準としては、まず構成比を明確にする必要があります。接触器の接点は導電性と耐アーク性の両方を考慮する必要があり、通常は W70-Cu30 から W80-Cu20 シリーズが選択されます。アーク消弧部品は、耐高温性を高めるために、より高

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

いたングステン含有量（W85-Cu15 以上）が必要です。同時に、内部の気孔がアーク浸食の弱点となるのを防ぐため、材料密度は 98%以上である必要があります。また、電流伝送効率を確保するために、導電性は 40%IACS（国際軟銅規格）以上である必要があります。

品質管理は全工程にわたって行われます。原材料は純度試験を実施し、不純物が導電性に影響を与えないようにする必要があります。成形工程では真空焼結＋浸透法を用いて酸化と気孔率を低減します。完成品は高温・低温サイクル、振動・衝撃などの環境試験に合格し、性能安定性を検証する必要があります。最後に、アーク放電シミュレーション試験を実施し、数千回のオン・オフサイクルを経ても機能が維持されることを確認する必要があります。

## 6.4 他の分野への応用

タングステン銅合金は、航空宇宙などのハイエンド分野にとどまりません。「耐高温性と電気・熱伝導性のバランス」、そして「制御可能な密度と強度」といった特性は、冶金、スポーツ、医療、原子力などの分野でも独自の価値を発揮しています。様々なシーンのニーズに合わせて組成とプロセスを最適化することで、タングステン銅合金は「特殊材料」から民生・産業シーンへと徐々に広がり、従来の材料の性能ボトルネックを解決するための重要な選択肢となっています。

### 6.4.1 冶金産業における応用シナリオ

冶金産業の高温製錬、鑄造、加工工程では、材料の耐高温性、耐摩耗性、熱伝導性に対する要求が極めて高く、タングステン銅合金は多くの中核シナリオで役割を果たしています。真空製錬用電極材料の中でも、タングステン銅合金は、その高い導電性と耐高温性から、アーク溶解用電極として使用することができます。タングステン相は製錬中の高温アーク浸食に耐え、銅相は安定した電流伝送を確保するとともに、アーク熱を素早く放散して電極の過熱を回避します。連続鑄造晶析装置の耐摩耗部品では、高タングステン含有量のタングステン銅合金を晶析装置の内壁インサートにすることができます。その耐摩耗性は高温溶鋼の浸食に耐え、熱伝導性は溶鋼の急速冷却と成形を助け、鋼の固着現象を軽減します。金属ダイカスト金型の局所インサート（金型ゲート、コア、その他の摩耗しやすい部品など）において、タングステン銅合金は高い強度と耐熱衝撃性を備えており、金型寿命を延ばし、加熱と冷却の繰り返しによる亀裂の発生を防ぎます。

### 6.4.2 スポーツ用品におけるユースケース

スポーツ用品分野におけるタングステン銅合金の応用は、「高密度と衝撃吸収性の両立」というコアニーズに焦点が当てられており、その用途は精密スポーツ用品に集中しています。アーチェリー用品のバランスウェイトにおいて、高タングステン含有タングステン銅合金は、その

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高密度により、小さな体積で十分な重量を確保できます。これにより、アーチャーは矢の重心を調整し、射撃安定性を向上させることができます。同時に、銅相の存在により、ウェイトブロックに一定の靱性を与え、衝突時の破損を防ぎます。ビリヤードキューのウェイトコアにおいて、タングステン銅合金は従来の鉛ブロックの代替品として使用できます。タングステンと銅の比率を調整して重量配分を制御することで、打球時のパワー伝達要件を満たすだけでなく、鉛による有毒汚染を回避することができます。高級釣竿のハンドルウェイト部品においては、その密度と耐腐食性が相まって、重量によるグリップ感を向上させるだけでなく、水環境下での防錆効果も発揮し、機器の寿命を延ばします。これらの使用例はすべて、タングステン銅合金の「制御可能な密度+非毒性+良好な成形性」の利点を活用して、従来の重金属材料を置き換えます。

#### 6.4.3 医療機器分野における探査

医療機器分野では、材料のバイオセーフティ、精度、機能性に対する要求が厳しく、タングステン銅合金の探究と応用は、「高密度と放射線遮蔽の両立」が求められる用途に重点を置いています。放射線治療の線量校正装置では、高タングステン含有量のタングステン銅合金を放射線減衰器として用いることができます。タングステンは X 線やガンマ線に対する遮蔽能力が強く、放射線透過線量を正確に制御できます。銅の存在は材料の加工精度を向上させ、複雑な減衰チャンネルを形成することで校正精度を確保します。同時に、銅は無毒性と化学的安定性を備えており、装置への汚染を防ぎます。介入医療機器の位置決め部品（血管ステントの展開マークなど）において、タングステン銅合金の高密度化により、X 線下で明瞭に展開し、医師がステントの位置を特定しやすくします。また、銅相の加工性により、ステントの柔軟性に影響を与えることなく、展開マークを微細構造に形成できます。現在、これらの応用はまだ探索段階にあります。今後の核心は、表面不動態化処理による生体適合性の更なる向上であり、臨床応用の基盤を築くことです。

#### 6.4.4 原子力分野における応用の見通し

原子力分野における極限環境（高温、放射線、高圧）では、材料に極めて高い耐性が求められます。タングステン銅合金は、「高温耐放射線性+安定した熱伝導性」という特性により、幅広い応用展望を示しています。原子炉の制御棒ガイド部品では、タングステン銅合金をガイドチューブとして使用することができます。タングステンは強い耐放射線性を有し、中性子放射線環境下でも構造安定性を維持できます。銅の熱伝導性は原子炉から熱を逃がし、ガイドチューブの過熱による変形を防ぎ、制御棒のスムーズな動きを確保します。同時に、耐腐食性も備えているため、原子炉冷却材の浸食にも耐えることができます。核廃棄物処理設備の遮蔽部品においては、高タングステン含有量のタングステン銅合金を遮蔽容器に用いることで、タングステンの放射線遮蔽能力を利用して核廃棄物を隔離することができ、銅相が容器の密閉性と加工性を向上させ、複雑な密閉構造の作製を容易にします。今後、耐放射線コーティング技術と粉末冶金プロセスの最適化により、タングステン銅合金は小型モジュール炉の熱交換部品や放射線検出器ハウジングなどの用途で飛躍的な進歩を遂げ、原子力エネルギーの安全運転を支える重要な材料の一つとなることが期待されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD  
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm <sup>3</sup> )	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 Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第7章 タングステン銅合金の今後の発展動向

タングステン銅合金は、高性能用途における継続的な最適化と革新に注力し、新興技術を組み合わせることで、性能向上と用途拡大を推進しています。今後の開発では、電気、航空宇宙、新エネルギー分野の高まるニーズに応えるため、新たな製造技術、性能向上戦略、そして持続可能な設計に注力していきます。

### 7.1 タングステン銅合金の新しい製造技術の探究

タングステン銅合金は、従来のプロセスの限界を打ち破り、微細組織制御と性能を向上させる先進的な製造方法を導入することを目指しています。これらの技術は、革新的な材料加工・成形方法を通じて、タングステンと銅の分布を最適化し、欠陥を低減し、機能性を向上させます。新たな製造技術の開発は、複雑な形状、高精度部品、そしてカスタマイズされた用途における合金の広範な利用を促進するでしょう。

#### 7.1.1 積層造形技術の潜在的な応用

合金の製造における潜在的な応用としての付加製造技術は、材料を層ごとに堆積させることにより複雑な構造を実現する可能性を提供する。コンピュータ支援設計によって駆動されるこの技術は、粉末床溶融結合法または指向性エネルギー堆積法を使用して、タングステンおよび銅の粉末を層ごとに溶融および凝固させ、カスタマイズされた微細構造を持つ合金部品を形成する。潜在的な応用は、タングステンと銅の局所的な分布を正確に制御し、機能的な傾斜材料を作成し、部品のさまざまな領域で導電性と耐高温性の動的なバランスを実現する能力にある。このプロセスにより、内部冷却チャネルや軽量構造などの複雑な形状の設計が可能になり、航空宇宙および電子機器の高い要件を満たすことができる。

付加製造技術には、材料の無駄を削減し、生産サイクルを短縮すること、そしてデジタルモデルを介して直接成形することで、小ロット生産や個別生産のニーズに対応することも含まれます。タングステン銅合金において、この技術は結晶粒の形態と相分布を最適化し、界面の接合を強化し、従来のプロセスにおける気孔率と未濡れ領域を削減することができます。潜在的な応用シナリオとしては、高性能ヒートシンク、精密電気接点、カスタマイズされた溶接電極などが挙げられ、特に複雑な内部構造を必要とする部品に有効です。今後の開発では、粉末の混合均一性、熱応力制御、後処理の最適化といった問題を解決し、部品の信頼性と一貫性を向上させる必要があります。

#### 7.1.2 その他の最先端調製技術の展望

積層造形技術に加えて、他の最先端の製造技術の見通しは、タングステン銅合金の将来の発展に多様な道を提供します。これらの技術には、ナノテクノロジー、プラズマ噴霧、自己組織化法が含まれ、革新的な材料設計と処理方法を通じて合金の性能を向上させることを目的としています。ナノテクノロジーは、超微細タングステンと銅の粉末を使用して、微細構造の均一

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性と密度を高め、導電性と機械的強度を向上させる可能性があります。プラズマ噴霧技術は、高速プラズマを介してタングステンと銅の粒子を溶融して堆積します。これは、コーティングまたは複雑な表面の迅速な準備に適しており、耐摩耗性および耐腐食性の用途に適しています。自己組織化法は、材料自体の化学的または物理的特性を使用して、分子レベルで相分布を制御し、新しい複合構造を探索します。

これらの最先端技術の展望は、従来の粉末冶金法や溶融浸透法の限界を打ち破り、より優れた柔軟性と機能性を提供できることにあります。例えば、ナノテクノロジーはより微細な粒径を実現し、アーク浸食に対する耐性を高めることができます。プラズマ溶射は部品の表面を迅速に修復または強化することができ、自己組織化法はインテリジェントな材料設計の新たな分野を開拓する可能性があります。将来の開発方向としては、ナノ粉末と積層造形の組み合わせ、またはプラズマ溶射と表面処理の相乗効果による微細構造と性能の最適化など、複数の技術統合が挙げられます。課題は、プロセスの複雑さ、コスト管理、そして大規模アプリケーションの実現可能性にあります。これらの技術の進歩は、タングステン銅合金の新たな用途の可能性を切り開くでしょう。

## 7.2 タングステン銅合金の性能最適化の研究方向

タングステン銅合金は、材料設計とプロセス改善の徹底的な探求を通じて、電気伝導性、熱伝導性、機械的強度、耐久性を総合的に向上させ、ますます複雑化する応用要件を満たすことを目指しています。性能最適化の中核は、タングステンと銅の特性をバランスさせ、微細構造を微調整し、特定の用途に合わせたカスタマイズされたソリューションを開発することにあります。研究の方向性は、総合的な性能の向上と特定の応用シナリオの強化を網羅し、革新的な手法が合金開発を促進する役割を重視しています。

### 7.2.1 総合的パフォーマンス向上のための研究の方向性

総合的な性能向上の研究方向は、タングステン銅合金の導電性、熱伝導性、機械的強度、耐食性など、複数の特性を同時に向上させ、全面的な性能最適化を達成することに重点を置いています。研究の核心は、微細構造を細かく制御し、粒径、相分布、界面結合を最適化することで欠陥を減らし、材料密度を向上させることにあります。潜在的な方法としては、新しい粉末混合技術を開発してタングステンと銅の均一な分布を確保し、銅相の連続性を高めて導電性と熱伝導性を向上させると同時に、タングステン相の安定した構造を維持して機械的強度を支えることが挙げられます。中間相の導入や表面改質などの界面強化技術は、タングステンと銅の接着性を向上させ、剥離のリスクを軽減することができます。

もう一つの研究方向は、微量添加剤や第二相材料を導入して微細構造を調整し、強度と靱性のバランスをとる多相複合設計を探求することです。添加剤の選択では、新たな弱点の導入を避けるため、タングステンや銅との化学的適合性を考慮する必要があります。さらに、段階焼結や圧力アシスト処理などのプロセス革新により、気孔率をさらに低減し、材料全体の安定性を高めることができます。耐食性と耐酸化性の向上は、表面処理やコーティング技術によって達成でき、タングステンの耐高温性を維持しながら、銅相を環境侵食から保護することができます。

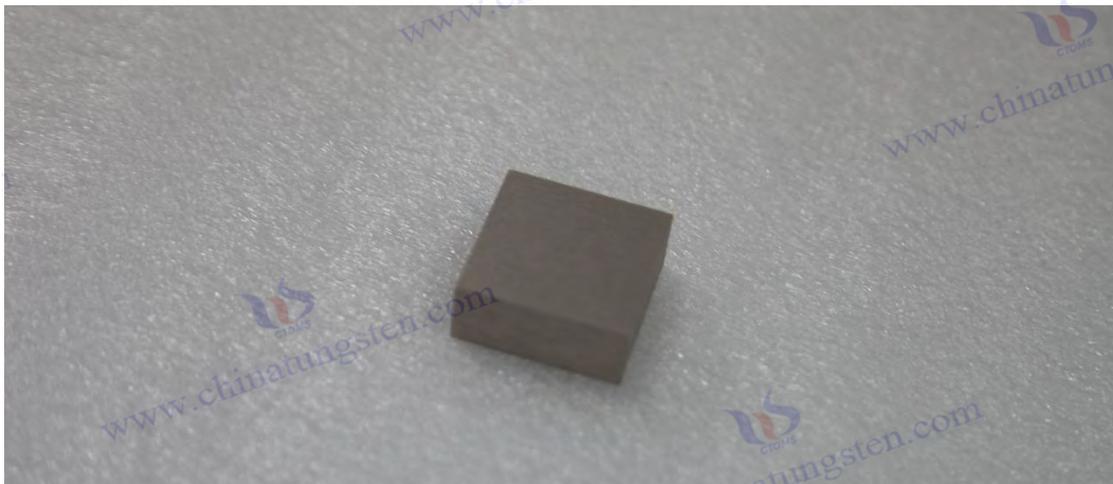
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。将来の研究では、シミュレーション技術と人工知能を組み合わせ、微細構造と性能の関係を予測し、製造パラメータを動的に最適化することもできます。これらの方向の進歩は、さまざまな高性能アプリケーションにおけるタングステン銅合金の総合的な性能を促進するでしょう。

### 7.2.2 特定のアプリケーションシナリオにおけるパフォーマンスの向上

特定の用途シナリオにおける性能向上の研究方向は、電気接点、溶接電極、航空宇宙部品などの特定分野におけるタングステン銅合金の性能をカスタマイズし、最適化することを目指しています。電気接点用途では、導電性と耐アーク浸食性の向上に重点が置かれています。銅相のネットワーク構造を最適化することで電子伝達効率を高め、耐熱コーティングや表面改質を施すことでアーク誘起による表面損傷を低減することができます。また、タングステン含有量を動的に調整することで、高電流環境下における耐摩耗性と安定性を向上させる手法の探求も可能です。

溶接電極用途では、性能向上の方向性として、耐高温性と耐凝着性の向上を目指します。スケルトンの耐溶融性能は、タングステン相の割合を増やすことで向上させ、焼結プロセスを最適化し、気孔率を低減して熱伝導性を向上させることができます。また、高温で銅相がワークピースに付着するのを防ぐには、界面結合を強化することも重要です。研究では、濡れ性向上剤や多層構造設計を導入することができます。ヒートシンクなどの航空宇宙部品のニーズは、熱伝導性と軽量化に重点を置いています。機能傾斜設計により、表面に銅相の高い熱伝導率分布を実現し、タングステン相が内部で構造的サポートを提供します。研究の方向性には、内部の気孔率分布を最適化するための新しい成形技術の開発が含まれます。これらの具体的な強化研究は、温度、機械的応力、使用サイクルなどの実際のアプリケーションシナリオの条件と組み合わせ、ターゲットを絞ったテストおよび検証方法を開発する必要があります。将来の開発では、環境の変化に応じて合金の性能を動的に調整できる適応型材料設計を検討したり、スマート製造技術を使用して性能をリアルタイムで監視および最適化したりできるようになります。



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 付録

## 付録 A タングステン銅合金の中国国家規格

タングステン銅合金に関する国家規格は、中国標準化管理局（SAC）によって策定され、タングステン銅合金の製造方法、性能、応用を規制し、製品の品質と業界の一貫性を確保しています。これらの規格は主に、タングステン銅合金粉末、完成部品、および関連する試験方法を対象としています。タングステン銅合金に特化した単一の国家規格はありませんが、タングステンおよび銅合金の一般仕様から関連規格を導き出すことができます。中国の国家規格システムには GB/T シリーズが含まれており、その一部、例えば GB/T 26055-2022（再生タングステンカーバイド粉末）はタングステンベース材料の製造方法に関する要件を含んでおり、参考として使用できます。GB/T 38470-2023 および GB/T 38471-2023 は、それぞれ二次銅合金および銅原料の品質基準を規定しており、間接的にタングステン銅合金の銅相の品質管理にも適用されます。さらに、GB/T 5242-2006 および GB/T 5243-2006 は、超硬合金製品の検査規則および包装・輸送仕様を規定しており、その一部はタングステン銅合金の検査および輸送にも適用できます。これらの規格は、化学分析、密度測定、微細構造評価を通じて、材料の均質性と性能の一貫性を確保します。

中国規格の特徴は、国内の原材料や工程への適応性、環境保護と品質監督の重視である。近年、2023 年の新関税基準の実施など、スクラップ輸入政策の厳格化に伴い、銅原料の純度や非金属不純物含有量に対する要求がさらに厳しくなり、間接的にタングステン銅合金の生産に影響を与えている。規格の内容には通常、材料組成、物理的特性、加工技術に関する要求が含まれており、電気接点や溶接電極の応用など、国内産業のニーズに対応することを目指している。今後、技術進歩や国際競争への適応のため、新たな製造技術の要求を盛り込むように規格がさらに精緻化される可能性がある。

## 付録 B 国際タングステン銅合金規格

タングステン銅合金の国際規格は、主に国際標準化機構（ISO）やその他の国または地域の標準化団体によって開発され、グローバルサプライチェーンに統一された参照フレームワークを提供しています。タングステン銅合金専用の国際規格はありませんが、タングステン合金および銅合金の一般規格から関連仕様を取得できます。ISO 18119 は、超硬合金製造に使用されるタングステン合金粉末を対象としており、粉末の準備と特性に関する基本要件を提供し、タングステン銅合金原料の基礎として使用できます。JIS H 3201（日本工業規格）などの他の国際規格は、タングステン合金粉末の特性を規定しており、その一部はタングステン銅複合材料に適用できます。ASTM 国際規格と EN 規格はタングステン銅合金を直接対象としていませんが、金属材料の試験方法（密度や硬度試験など）は性能評価に使用できます。

国際規格の特徴は、国境を越えた適用性、材料の一貫性と貿易の利便性を重視していることです。米国、日本、ヨーロッパなど、さまざまな国や地域の工業規格（ASTM、JIS、DIN など）は、相互援助と相互承認を通じて世界的な規格体系を形成しています。タングステン銅合金

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の航空宇宙や電子パッケージングなどの国際的な応用により、これらの規格は高導電性、高熱伝導性、耐高温性に重点を置くようになりました。一部の大手粉末メーカーも、国際規格の欠陥を補い、高品質の供給を確保するために社内規格を開発しています。ただし、国際規格は、積層造形などの新興の製造技術をまだ十分にサポートしておらず、将来、技術開発に適応するために更新する必要がある可能性があります。全体として、国際規格はタングステン銅合金の世界的な貿易と応用に重要なガイダンスを提供しますが、その具体的な実施は各国の実際の状況と組み合わせる必要があります。

## 付録 C ヨーロッパ、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合金規格

欧州、米国、日本、韓国などの国々におけるタングステン銅合金の規格は、それぞれの国または地域の標準化機関によって策定されており、材料特性、製造プロセス、および用途要件を標準化することで、世界的な貿易と産業の発展を支援しています。タングステン銅合金に特化した統一された国際規格は存在しませんが、関連する仕様は通常、タングステン合金、銅合金、または複合材料の一般規格から派生しています。以下は、主要な国と地域における規格の概要です。

欧米では、米国の ASTM 国際規格と欧州の EN 規格が主な参照フレームワークとなっています。ASTM B702 などの ASTM 規格は、密度、導電率、硬度などのパラメータを含むタングステン銅電気接点材料の準備と性能要件をカバーしていますが、すべてのタイプのタングステン銅合金の詳細な仕様を提供していません。EN 規格は主に銅とその合金に焦点を当てており、タングステン銅合金の銅相の品質管理に間接的に適用されます。これらの規格は、材料の一貫性と試験方法の再現性を重視しており、電気接点やヒートシンクの用途で広く使用されています。欧米の規格では、高導電性と高温耐性に対する要件が高く、American Elements や Plansee などの一部の企業は、一般的な規格の欠陥を補うために社内仕様を策定しています。

日本の JIS 規格 (JIS H 3201 など) はタングステン合金粉末の特性を規定しており、その一部はタングステン銅複合材料にも適用可能で、粉末の粒径と化学組成の均一性に重点を置いています。日本の産業界におけるタングステン銅合金の用途は、主に放電加工 (EDM) 電極と高電圧スイッチ接点に集中しており、規格では耐アーク浸食性と導電性が強調されています。韓国の規格は、韓国工業規格 (KS) によって策定されています。KSD 2101 などの仕様はタングステンベースの材料に関係し、タングステン銅合金の粉末冶金プロセスに適用されます。韓国は高精度部品の生産に重点を置いており、規格には微細構造と熱伝導性に関する特定の要件があり、電子パッケージングや航空宇宙分野のニーズを反映しています。

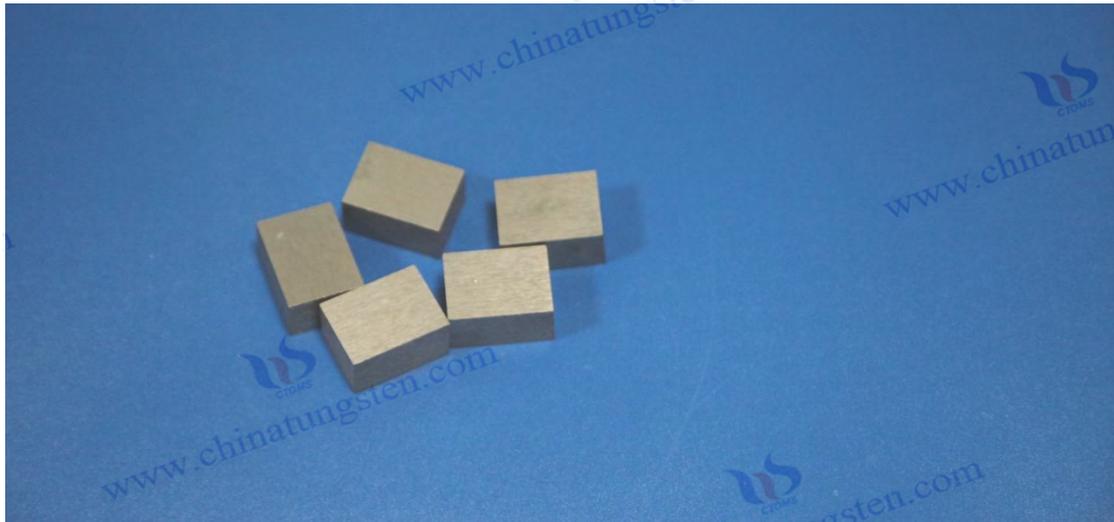
これらの国の規格には違いがあります。ヨーロッパと米国は汎用性と貿易の互換性に重点を置っていますが、日本と韓国は特定の産業用途の技術的な詳細に重点を置いています。異なる規格におけるタングステン銅合金の比率 (WCu 70/30、WCu 80/20 など) の性能要件は異なる場合がありますが、一般的には高密度、低熱膨張、優れた導電性が求められます。現在の規格では、積層造形などの新興技術のサポートが限られており、将来、技術の進歩に適応するために更新が必要になる可能性があります。全体として、これらの規格は、タングステン銅合金

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の国際協力と応用に重要なガイダンスを提供しますが、その実施は各国の産業特性と市場ニーズとを組み合わせる必要があります。

#### 付録 D タングステン銅合金用語集

用語	意味
タングステン銅合金	タングステンと銅を粉末冶金または浸透法で混合し、高い融点と導電性を兼ね備えています。
粉末冶金	金属粉末を混合、圧縮、焼結して合金を製造するプロセスは、タングステン銅合金の均一な分布に適しています。
真空浸透	真空環境下で液体銅をタングステン骨格に浸透させるプロセスは、高密度のタングステン銅合金を製造するために使用されます。
粒度	合金中のタングステンまたは銅粒子の平均サイズ。強度と導電性に影響します。
位相分布	合金中のタングステンと銅の相が電気と熱の伝導経路を決定します。
気孔率	合金内の未充填空隙の割合は、密度と機械的特性に影響します。
インターフェース結合	タングステンと銅の相は荷重伝達と剥離に対する耐性に影響します。
電気伝導性	合金の電流伝導能力は主に銅相の連続性によって決まります。
熱伝導率	合金の熱伝達能力は、銅の相分布と微細構造の均一性に依存します。
アーク浸食耐性	合金のアーク高温アブレーションに対する耐性は、タングステン相の安定性と気孔の分布によって影響を受けます。
液相焼結	銅の液相湿潤とタングステン粒子充填を利用した高温焼結プロセスにより、合金の密度が向上します。
熱間等方圧プレス	合金は、全方向圧力を使用して高温で処理され、多孔性を低減し、微細構造を改善します。



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 参考文献

### 中国文学

- [1] 中国標準化協会 (2023). GB/T 26055-2022 再生タングステンカーバイド粉末. 北京: 中国規格出版社.
- [2] 中国標準化協会 (2023). GB/T 38470-2023 二次銅合金. 北京: 中国規格出版社.
- [3] 中国標準化協会 (2023) GB/T 38471-2023 銅原料の品質要求事項北京: 中国規格出版社
- [4] 中国標準化協会 (2006 年)「GB/T 5242-2006 セメントカーバイド製品の検査規則」北京: 中国標準出版社。
- [5] 中国標準化協会 (2006 年)「GB/T 5243-2006 セメント炭化物製品の包装および輸送仕様」北京: 中国規格出版社。

### 英語文学

- [1] 国際標準化機構 (2020 年)。ISO 18119: 超硬合金用タングステン合金粉末。スイス: ISO。
- [2] 日本工業標準調査会 (2018). JIS H 3201: タングステン合金粉の特性. 東京: 日本規格協会.
- [3] ASTM International (2019). ASTM B702: タングステン-銅電気接点材料の標準仕様. 米国: ASTM.
- [4] 欧州標準化委員会 (2017 年) EN 13601: 銅および銅合金一棒、ブリュッセル: CEN。
- [5] 韓国技術標準院 (2021 年) KSD 2101: タングステンベース材料の粉末冶金仕様、ソウル: KATS。



CTIA GROUP LTD タングステン銅合金

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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