

# タングステンニッケル銅合金とは

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

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

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

## CTIA GROUP の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD は、インダストリアルインターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造の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 タングステン - ニッケル - 銅合金の概要

- 1.1 タングステン - ニッケル - 銅合金の定義と分類
  - 1.1.1 三元系の組成範囲
  - 1.1.2 密度による分類と応用の関連性
- 1.2 タングステン - ニッケル - 銅合金の発展史
  - 1.2.1 起源と初期の研究
  - 1.2.2 軍事応用が主導した時期
  - 1.2.3 現代電子産業における大規模な応用

### 第 2 章 タングステン - ニッケル - 銅合金の微細組織

- 2.1 タングステン - ニッケル - 銅合金の微細組織特性
  - 2.1.1 タングステン粒子の分布
  - 2.1.2 Ni - Cu 結合相の分布
  - 2.1.3 焼結ネックの形成メカニズム
- 2.2 タングステン - ニッケル - 銅合金の微細組織と界面特性
  - 2.2.1 タングステン - 結合相界面の結合強度
  - 2.2.2 微量元素の界面に対する影響
- 2.3 W - Ni - Cu 合金の微細組織の進化
  - 2.3.1 焼結中の結晶粒成長則
  - 2.3.2 熱処理による微細組織の制御

### 第 3 章 タングステン - ニッケル - 銅合金の物理的・化学的特性

- 3.1 タングステン - ニッケル - 銅合金の機械的特性
  - 3.1.1 常温引張強さ
  - 3.1.2 伸び率
  - 3.1.3 耐高温性
  - 3.1.4 衝撃靱性
- 3.2 タングステン - ニッケル - 銅合金の熱的・電気的特性
  - 3.2.1 熱伝導率
  - 3.2.2 導電率
  - 3.2.3 熱膨張係数
  - 3.2.4 放熱性能
- 3.3 タングステン - ニッケル - 銅合金の化学的安定性
  - 3.3.1 耐食性
  - 3.3.2 抗氧化特性
- 3.4 CTIA GROUP LTD のタングステン - ニッケル - 銅合金 MSDS

### 第 4 章 タングステン - ニッケル - 銅合金の性能試験と規格

- 4.1 タングステン - ニッケル - 銅合金の成分分析方法
  - 4.1.1 分光分析技術

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.2 不純物元素の検出
- 4.2 タングステン - ニッケル - 銅合金の性能試験方法
  - 4.2.1 密度と緻密性試験
  - 4.2.2 引張強さと降伏強さ試験
  - 4.2.3 延性試験
  - 4.2.4 靱性試験
  - 4.2.5 熱的性能試験
  - 4.2.6 電気的性能試験
  - 4.2.7 化学的性能試験
- 4.3 タングステン - ニッケル - 銅合金の規格体系
  - 4.3.1 タングステン - ニッケル - 銅合金の中国国家标准
  - 4.3.2 タングステン - ニッケル - 銅合金の国際規格
  - 4.3.3 欧米日本韓国など世界各国のタングステン - ニッケル - 銅合金規格

## 第 5 章 タングステン - ニッケル - 銅合金の製造技術

- 5.1 原材料の前処理
  - 5.1.1 タングステン粉末の球状化と粒径制御
  - 5.1.2 ニッケル - 銅粉末の表面処理
- 5.2 粉末冶金プロセス
  - 5.2.1 粉末混合プロセスパラメータ
  - 5.2.2 加圧技術
  - 5.2.3 液相焼結プロセス
- 5.3 先進的な製造技術
  - 5.3.1 金属射出成形
  - 5.3.2 熱間等方圧加圧技術
- 5.4 後処理と加工
  - 5.4.1 精密加工
  - 5.4.2 表面処理プロセス

## 第 6 章 電子情報分野におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の応用

- 6.1 チップパッケージングと放熱
  - 6.1.1 高電力デバイス放熱基板
  - 6.1.2 5G RF モジュールのカウンターウェイトヒートシンク
- 6.2 マイクロ波レーダ機器
  - 6.2.1 アンテナウェイトアセンブリ
  - 6.2.2 レーダ遮蔽部品
- 6.3 微小電気機械システム
  - 6.3.1 慣性センサのカウンターウェイト
  - 6.3.2 微小バランス部品

## 第 7 章 エネルギー産業分野におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の応用

- 7.1 新エネルギー自動車分野

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.1 モーターローターウェイト
- 7.1.2 バッテリーパック放熱基板
- 7.2 産業用冷却ソリューション
- 7.2.1 サーバー冷却ベース
- 7.2.2 電力半導体パッケージング基板

## 第 8 章 国防軍事産業分野におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の応用

- 8.1 電子対抗機器
- 8.1.1 対抗ウェイトアSEMBリ
- 8.1.2 レーダデコイ部品
- 8.2 弾薬システム
- 8.2.1 発射体弾頭のカウンターウェイト
- 8.2.2 ミサイル弾頭のバランス部品
- 8.3 装甲防護機器
- 8.3.1 軽量装甲板補強材
- 8.3.2 装甲車防護ライニング
- 8.4 宇宙兵器
- 8.4.1 ロケットエンジンノズル部品
- 8.4.2 宇宙船姿勢制御カウンターウェイト

## 第 9 章 医療分野におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の応用

- 9.1 放射線治療機器
- 9.1.1 放射線治療遮蔽アSEMBリ
- 9.1.2 放射線コリメータ部品
- 9.2 診断画像機器
- 9.2.1 CT 検出器保護部品
- 9.2.2 MRI 機器のカウンターウェイト
- 9.3 手術器具
- 9.3.1 高精度手術ナビゲーション位置決め部品
- 9.3.2 低侵襲介入デバイスガイド部品
- 9.4 リハビリテーション補助機器
- 9.4.1 義足関節ウェイト部品
- 9.4.2 リハビリ機器のバランス調整部品

## 第 10 章 タングステン - ニッケル - 銅合金と他の材料の比較

- 10.1 タングステン - ニッケル - 銅合金の競合材料分析
- 10.1.1 タングステン - ニッケル - 鉄合金との比較
- 10.1.2 銅 - タングステン合金との比較
- 10.2 タングステン - ニッケル - 銅合金の先端技術研究開発
- 10.2.1 ナノ構造合金
- 10.2.2 機能性傾斜材料
- 10.3 タングステン - ニッケル - 銅合金のグリーン製造技術

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.3.1 環境にやさしい製造プロセス

10.3.2 廃棄物リサイクル技術

## 第 11 章 タングステン - ニッケル - 銅合金の一般的な問題と解決策

11.1 タングステン - ニッケル - 銅合金の製造プロセス

11.1.1 焼結欠陥の解決策

11.1.2 成分均一性の制御

11.2 タングステン - ニッケル - 銅合金の応用失敗分析

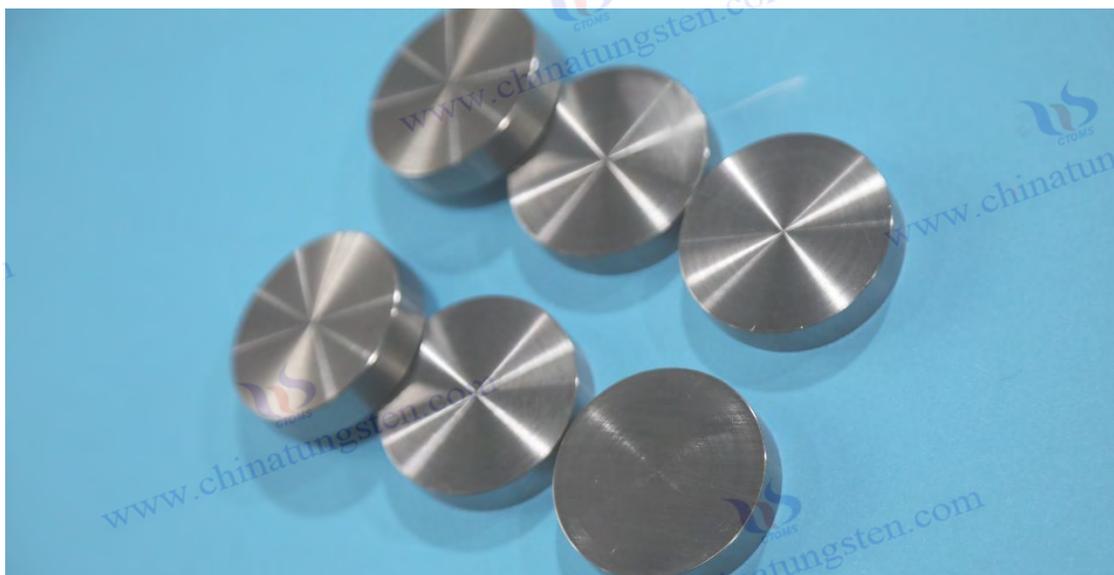
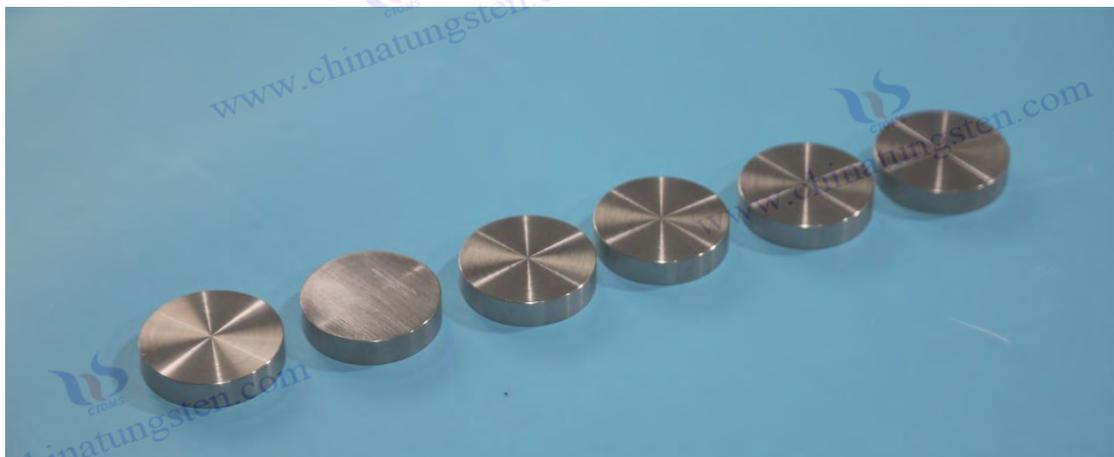
11.2.1 熱サイクル失敗の解決策

11.2.2 環境腐食防護

### 付録:

タングステン - ニッケル - 銅合金用語集

参考文献



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

#### 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 Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第 1 章 タングステンニッケル銅合金の概要

タングステン-ニッケル-銅合金は、タングステンを主成分とし、ニッケルと銅を結合相とする高密度合金です。高密度（ $16.5\sim 18.5\text{ g/cm}^3$ ）、優れた機械的特性（引張強度  $700\sim 900\text{ MPa}$ 、伸び率  $5\sim 15\%$ ）、非磁性、耐食性などから、航空宇宙、医療、精密機器、軍事産業などで広く使用されています。タングステン-ニッケル-鉄合金と比較すると、タングステン-ニッケル-銅合金は銅の添加により非磁性特性を有しており、高密度と加工性を維持しながら、電磁波に敏感な環境でも優れた性能を発揮します。

### 1.1 タングステン-ニッケル-銅合金の定義と分類

タングステン - ニッケル - 銅合金は、粉末冶金法で製造される高密度タングステン基合金です。タングステンを主成分とし（通常、質量比  $85\%\sim 97\%$ ）、ニッケルと銅を結合相として含むため、高密度、高強度、優れた加工性を備えています。主な特徴は、非磁性、優れた熱伝導率（ $120\sim 150\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、低熱膨張係数（ $4.5\sim 6.0\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）で、高密度のカウンターウェイトや放射線遮蔽が必要な用途で優れた性能を発揮します。タングステン - ニッケル - 銅合金は、タングステン含有量、ニッケル銅比、性能要件に応じてさまざまなタイプに分けられ、通常は密度または応用分野によって分類されます。以下では、その三元系の組成範囲と、密度の分類と用途の相関関係を詳細に分析します。

#### 1.1.1 三成分系の構成範囲

タングステン- ニッケル - 銅合金は、主にタングステン（W）、ニッケル（Ni）、銅（Cu）で構成されています。この3つの比率は、合金の密度、機械的性質、および応用特性に直接影響します。タングステンは高密度元素（ $19.25\text{ g/cm}^3$ ）として合金の主成分であり、通常、質量分率の  $85\%\sim 97\%$  を占めます。ニッケルと銅は結合相として、タングステン粒子間の隙間を埋め、合金の靱性と加工性を向上させ、硬度を低下させます（ピッカース硬度  $250\sim 350\text{ HV}$ ）。これにより、純粋なタングステン（硬度  $> 400\text{ HV}$ ）よりも加工が容易になります。タングステン - ニッケル - 銅合金の典型的な成分範囲は、タングステン  $85\%\sim 97\%$ 、ニッケル  $2\%\sim 10\%$ 、銅  $1\%\sim 8\%$  です。具体的な比率は、アプリケーションの要件に応じて調整されます。

実際の生産においては、タングステン含有量が合金の密度と強度を決定します。例えば、 $90\text{W}-7\text{Ni}-3\text{Cu}$ （タングステン  $90\%$ 、ニッケル  $7\%$ 、銅  $3\%$ ）は一般的な配合で、密度は約  $17.0\text{ g/cm}^3$ 、引張強度は約  $750\sim 850\text{ MPa}$  であり、航空宇宙用カウンターウェイトに適しています。タングステン含有量を  $95\text{W}-3.5\text{Ni}-1.5\text{Cu}$  に増やすと、密度は  $18.0\text{ g/cm}^3$ 、強度は  $800\sim 900\text{ MPa}$  に達し、医療用放射線遮蔽に適しています。ニッケルの役割は、靱性と耐食性を高めることです。また、耐酸化性（NiO 保護層を形成）により、合金は湿気の多い環境や化学環境でも良好な性能を発揮します。銅を添加することで、靱性がさらに向上するだけでなく、合金は非磁性と

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

なり（銅は常磁性体）、電磁波に敏感な環境（MRI 装置など）において、タングステン-ニッケル-鉄合金よりも優れた特性を発揮します。銅の熱伝導率（約 400 W/ m・K）も合金の熱伝導率を向上させ、急速な放熱が求められる用途（フォトリソグラフィ装置のバランスブロックなど）において優位性を発揮します。

組成比の選択は、性能とコストのバランスをとる必要があります。タングステンの含有量が多いほど、密度と強度が高くなりますが、加工の難しさが増し、タングステン資源の希少性がコストを押し上げます。ニッケルと銅の比率は正確に制御する必要があります。ニッケル含有量が高すぎると感作のリスクが高まる可能性があり（医療用途では ISO 10993 生体適合性試験に合格する必要があります）、銅含有量が高すぎると強度が低下する可能性があります。製造では、合金は粉末冶金によって製造されます。焼結プロセス中にニッケルと銅が液相を形成し、タングステン粒子の結合が促進され、密度は 99.5%以上に達することがあります。品質管理では、X線蛍光分光法（XRF）または誘導結合プラズマ発光分光法（ICP-AES）を使用して組成を分析し、タングステン±0.5%、ニッケル±0.2%、銅±0.2%の精度を確保しています。微細構造分析（SEM-EDS）により、タングステン粒子の均一な分布と結合相の完全性をさらに検証し、性能に影響を与える気孔や介在物を回避します。組成範囲を調整することで（例えば、靱性を向上させるためにニッケルを8%に増やすなど）、精密機器のカウンターウェイトや軍事用シールド部品などの特定の用途要件を満たすことができます。

### 1.1.2 密度の分類と適用範囲

タングステン-ニッケル-銅合金は、その分類と応用において重要な基礎となります。通常、タングステン含有量に応じて異なるグレードに分類され、密度は 16.5 g/cm<sup>3</sup> から 18.5 g/cm<sup>3</sup> の範囲で、様々な用途に対応しています。密度の分類は、合金の重量効果、遮蔽性能、機械的特性に直接影響し、航空宇宙、医療、精密機器、軍事分野の特定のニーズと密接に関連しています。ASTM B777 や ISO 20886 などの国際規格では、タングステン系合金を密度に応じて複数のグレードに分類しています。タングステン-ニッケル-銅合金は通常、クラス 1（16.5～17.0 g/cm<sup>3</sup>）、クラス 2（17.0～17.5 g/cm<sup>3</sup>）、クラス 3（17.5～18.0 g/cm<sup>3</sup>）、クラス 4（18.0～18.5 g/cm<sup>3</sup>）に分けられ、各グレードは特定の性能と用途に対応しています。

低密度グレード（標準組成 90W-7Ni-3Cu）は、航空宇宙用カウンターウェイト（航空機のエルロンやヘリコプターのローター）など、中程度の密度と高い靱性が求められる用途に適しています。高タングステン合金と比較して密度が低いため、750～850MPa の引張強度と 10～15%の伸びを維持しながら材料コストを削減でき、振動や衝撃を受ける部品に適しています。加工工程では、クラス 1 合金は液相焼結と機械加工（CNC または EDM）によって成形され、航空宇宙産業の高精度要件を満たします。

中密度グレード（標準配合 93W-5Ni-2Cu または 95W-3.5Ni-1.5Cu）は、医療および精密機器分野で広く使用されています。医療用 CT / MRI 機器では、クラス 2/3 合金が遮蔽部品に使用され、X線とガンマ線を効率的に吸収して（タングステンは高い原子番号  $Z = 74$ ）、人員と機器

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を保護します。非磁性であるため、MRI 磁場を妨害せず、タングステンニッケル鉄合金よりも優れています。引張強度 800~900 MPa、熱伝導率（120~140 W / m · K ）により、放射線治療機器コリメータなどの高温または動的環境に適しています。処理では熱間静水圧プレスを使用して密度 > 99.5% を確保し、表面コーティング（PVD TiN など）により耐腐食性と耐摩耗性が向上します。

高密度グレード（標準組成 97W-2Ni-1Cu）は、徹甲弾の弾頭コアやフォトリソグラフィプラットフォームのバランスブロックなど、軍事用およびハイエンドの精密機器に使用されています。高密度は極めて高い運動エネルギーまたはカウンターウェイト効果をもたらし、850~900MPa の引張強度は極めて高い耐応力性を保証します。加工はより困難で、CBN 工具またはレーザー微細加工が必要です。品質管理では、ASTM B777 規格に基づいて密度偏差と気孔率を検証し、性能の一貫性を確保しています。

密度分類と用途の関連付けを最適化するには、コストと性能のバランスを考慮する必要があります。高密度グレードは高価（タングステン含有量が高い）ですが、高性能要件に適しています。低密度グレードはより経済的で、大規模生産に適しています。積層造形（SLM など）は、複雑な形状のカスタマイズ生産を可能にし、加工コストを削減します。将来的には、新たなニッケル銅比の開発や微量元素（コバルトなど）の添加により、密度と靱性をさらに最適化し、適用範囲を拡大することができます。

## 1.2 タングステン-ニッケル-銅合金の開発の歴史

タングステンニッケル銅合金は、その優れた物理的・化学的性質から、航空宇宙、軍事、医療、電子産業などで広く利用されています。その発展は、基礎研究から軍事応用への推進、そして現代電子産業における大規模応用へと、複数の段階を経てきました。各段階における技術革新と市場の需要は、タングステンニッケル銅合金の性能最適化と用途拡大を促進し、ハイテク分野に欠かせない材料となっています。本章では、タングステンニッケル銅合金の起源と初期の研究、軍事応用推進期、そして現代電子産業における大規模応用の発展過程について、信頼できる技術と歴史的背景に基づき、不確かなデータに惑わされることなく、詳細に解説します。

### 1.2.1 起源と初期の研究

タングステン-ニッケル-銅合金の歴史は、タングステンをベースとした高密度合金の研究が始まった 20 世紀初頭にまで遡ります。タングステンは、その高密度（19.25 g/cm<sup>3</sup>）と高融点（3422° C）から、高性能材料の製造に最適な選択肢と考えられていますが、純粋なタングステンは脆く加工が難しいため、その用途は限られています。初期の研究では、バインダー相を加えることでタングステンの機械的特性と加工性を向上させることに重点が置かれていました。バインダー相としてニッケルと銅が導入されたのは、高温で液相を形成する能力があるためです。これにより、タングステン粒子の結合が促進され、合金の硬度が低下し、靱性が向上

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

します。1930年代から1950年代にかけて、粉末冶金技術の進歩がタングステン・ニッケル・銅合金の開発の基盤を築きました。研究者たちは、液相焼結により、ニッケルと銅がタングステン粒子間に均一な結合相を形成し、合金の密度（99.5%以上）と機械的特性が大幅に向上することを発見しました。初期の実験では、主にニッケルと銅の比率の違いが合金の特性に及ぼす影響を調査しました。例えば、90W-7Ni-3Cuの配合は、密度が約17.0 g/cm<sup>3</sup>、引張強度が約750 MPaであり、カウンターウェイトやシールド用途に適しています。タングステン・ニッケル・鉄合金とは異なり、銅を添加することで合金は非磁性となり、電磁波に敏感な環境での使用が可能になります。この研究では合金の微細構造にも焦点を当てており、金属組織顕微鏡とX線回折（XRD）を通じてタングステン粒子の分布と相構造を分析し、焼結プロセスのパラメータを最適化しています。

この時期の開発は主に実験室や小規模試験に集中しており、応用範囲は限定的で、主に基礎科学研究や産業実験に用いられました。例えば、タングステンニッケル銅合金は、鉛や鋼鉄よりも優れた高密度と非磁性特性を持つことから、初期の航空機器のカウンターウェイト部品に採用されました。製造工程は単純な粉末成形と焼結炉に依存しており、加工精度が低い（許容差±0.1mm）ため、複雑な形状の部品の製造には限界がありました。しかしながら、初期の研究はタングステンニッケル銅合金の性能最適化とその後の応用のための理論的基礎を築き、高密度合金分野におけるその地位を確立しました。

### 1.2.2 軍事アプリケーション主導期間

1960年代から1990年代にかけて、タングステン・ニッケル・銅合金の開発は軍事需要によって大きく牽引されました。冷戦期における軍備拡張競争の激化に伴い、兵器システムにおける高性能材料の需要が急増し、特に弾薬や防護具に使用される高密度、非磁性、高強度の材料が求められました。タングステン・ニッケル・銅合金は、その優れた特性から、特に電磁波に敏感な機器や高精度機器において、軍事産業にとって理想的な選択肢となっています。

軍事用途では、タングステン - ニッケル - 銅合金は、徹甲弾のコアやシールド部品の製造に広く使用されています。タングステン - ニッケル - 鉄合金（弱い強磁性を持つ）と比較して、タングステン - ニッケル - 銅合金は非磁性であるため、レーダーや電磁ナビゲーションシステムのコンポーネントに使用して干渉を回避するのに適しています。93W-5Ni-2Cu（密度17.5 g/cm<sup>3</sup>）などの典型的な配合は、運動エネルギー徹甲弾（APFSDS）のコアに使用され、優れた靱性を維持しながら高い貫通力を提供し、高速衝撃に耐えます。この合金は、ミサイルや船舶のシールド部品の製造にも使用され、レーダー波や放射線を吸収し、電子機器を保護します。粉末冶金プロセスの進歩、特に熱間静水圧プレスの導入により、合金の密度と機械的特性が大幅に向上し、軍事基準を満たすようになりました。この時期に生産技術は飛躍的に向上しました。高度な焼結炉と雰囲気制御（高純度アルゴン）により、気孔率が低減し、微細構造

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

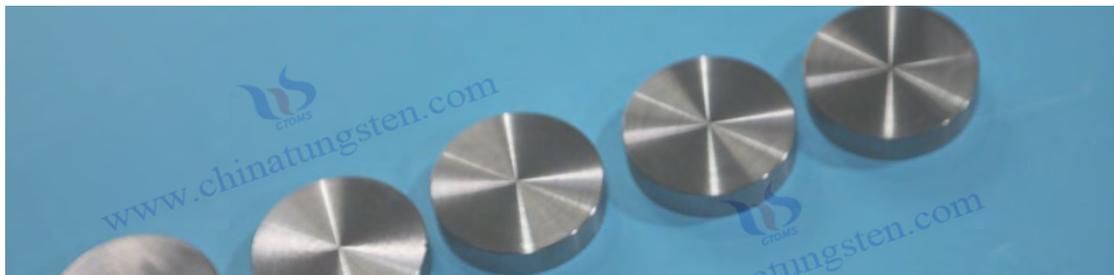
の均一性が向上しました。CNC や EDM などの機械加工技術は高精度を実現し、複雑な形状の部品の製造を可能にしました。品質管理では、蛍光 X 線分光法 (XRF) と走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) を用いて組成 (タングステン±0.5%) と組織を検証し、性能の一貫性を確保しました。軍事需要の高まりを受け、タングステン-ニッケル-銅合金は研究室から工業生産へと移行し、生産量が増加しコストは若干低下しましたが、タングステン資源の不足により、大規模用途への展開は依然として制限されていました。

### 1.2.3 現代のエレクトロニクス産業における大規模な応用

21 世紀に入り、タングステン-ニッケル-銅合金のエレクトロニクス産業への大規模な応用は、その発展の新たな原動力となっています。半導体、光学機器、医療機器産業の急速な発展に伴い、高密度、非磁性、高熱伝導性材料への需要が急増しています。タングステン-ニッケル-銅合金は、その非磁性、高熱伝導性、低熱膨張係数により、エレクトロニクス産業のキーマテリアルとなっており、特にリソグラフィー装置、医療用画像機器、精密機器の分野でその重要性が高まっています。

半導体製造において、タングステン・ニッケル・銅合金は、リソグラフィープラットフォームのバランスブロックや振動減衰部品に使用されています。例えば、極端紫外線リソグラフィー (EUV) では、95W-3.5Ni-1.5Cu (密度 18.0 g/cm<sup>3</sup>) 製のバランスブロックが、プラットフォームの動的安定性を最適化し、サブナノメートルの振動を抑制し、パターン彫刻精度を確保します。非磁性のため、高精度電磁システムとの干渉を回避し、熱伝導性によりレーザーによって発生した熱を素早く分散させます。医療分野では、この合金は CT/MRI 装置の遮蔽部品に使用され、X 線やガンマ線 (タングステン原子番号 Z=74) を効率的に吸収して、人や機器を保護します。生体適合性 (ISO 10993 でテスト済み) により医療用途に適しており、表面コーティング (PVD TiN など) により耐食性と安全性がさらに向上します。

生産技術面では、積層造形 (SLM) 技術の導入により、複雑な部品の製造能力が大幅に向上し、材料の無駄も削減されました。マイクロ波焼結や廃熱回収などのグリーン製造技術は、エネルギー消費量を削減し、ISO 14001 環境保護基準を満たしています。化学溶解や電気化学分離などのリサイクル技術は、スクラップ合金の再利用率を高め、タングステン資源の枯渇圧力を軽減します。品質管理では、ASTM B777 規格に基づき、密度、強度、多孔度を検証し、振動試験やスペクトル分析を組み合わせることで、部品の性能を確保しています。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第2章 タングステン-ニッケル-銅合金の微細組織

タングステン-ニッケル-銅合金は、タングステンを主成分とし（通常、質量比 85%~97%）、ニッケルと銅を結合相とする高密度合金です。その微細構造は、高密度（16.5~18.5 g/cm<sup>3</sup>）、引張強度（700~900 MPa）、伸び（5%~15%）、非磁性、良好な熱伝導率（120~150 W/m·K）など、優れた物理的・化学的特性を直接的に決定します。微細構造は主にタングステン粒子とニッケル-銅結合相で構成され、液相焼結や熱間静水圧加圧などの粉末冶金プロセスによって均一で緻密な組織が形成されます。タングステン粒子は高密度と高強度をもたらし、ニッケル-銅結合相は靱性と加工性を高めるとともに、合金に非磁性特性を与えます。

### 2.1 タングステン-ニッケル-銅合金の微細構造特性

タングステン-ニッケル-銅合金の微細構造特性は、その特性の基礎であり、マイクロメートルスケールにおけるタングステン粒子とニッケル-銅バインダー相の分布と相互作用に表れています。主相であるタングステン粒子（体心立方構造、BCC）は合金体積の 80%~95%を占め、高密度と高硬度（ピッカース硬度 250~350 HV）を実現します。ニッケル-銅バインダー相（面心立方構造、FCC）は、タングステン粒子間の隙間を埋めて連続マトリックスを形成し、靱性と耐食性を向上させます。微細構造は、走査型電子顕微鏡（SEM）、エネルギー分散分光法（EDS）、X線回折（XRD）によって特徴付けられ、タングステン粒子の均一な分布とニッケル-銅相のネットワーク状構造が示されます。液相焼結により、ニッケルと銅は高温で液体マトリックスを形成し、タングステン粒子の再配列と結合を促進します。密度は 99.5%以上に達します。さらに、熱間静水圧プレスによりマイクロ気孔が除去され、構造の均質性が確保されます。これらの特性により、この合金は航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、電子産業用バランスウェイトなどにおいて優れた性能を発揮します。タングステン粒子の分布とニッケル-銅バインダー相の分布については、以下で詳細に分析します。

#### 2.1.1 タングステン粒子の分布

タングステン粒子はタングステン-ニッケル-銅合金の微細構造の中核であり、合金の密度、強度、熱安定性に直接影響を及ぼします。タングステン粒子は通常、多角形またはほぼ球形であり、粒子サイズは 10~50 μm の範囲で、具体的なサイズは原料粉末の粒子サイズと焼結プロセスのパラメータに依存します。典型的な配合（90W-7Ni-3Cu や 95W-3.5Ni-1.5Cu など）では、タングステン粒子は体積率の 80%~95%を占め、高密度の骨格構造を形成し、合金の主要な質量（密度 16.5~18.5 g/cm<sup>3</sup>）と硬度（ピッカース硬度 250~350 HV）を提供します。SEM 観察によると、タングステン粒子は均一に分布しており、明らかな凝集や気孔は見られず、粒子間の接触は密で境界は明瞭です。この均一な分布は、液相焼結中にニッケル-銅液相の濡れ効果によってタングステン粒子が再配列し、緻密な構造を形成することによって生じています。

タングステン粒子は多くの要因の影響を受けます。まず、原料粉末の品質が重要です。高純度タングステン粉末（純度 > 99.9%）は、焼結後の粒子サイズを均一にするために、噴霧法または還元法で製造されます。粉末の粒子サイズが大きすぎると、粒子間の隙間が広がり、密度が

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

低下する可能性があります。一方、小さすぎると焼結収縮が増加し、変形や亀裂が発生する可能性があります。次に、焼結プロセスのパラメータは粒子分布に大きな影響を与えます。適切な焼結温度は、ニッケル銅液相がタングステン粒子を十分に濡らし、粒子の再配列を促進します。温度が高すぎると、タングステン粒子が過度に成長し、靱性が低下する可能性があります。熱間静水圧加圧（HIP）は、高圧高温によって粒子をさらに圧縮し、微細孔を除去し、粒子間の接触強度を向上させます。XRD 分析により、タングステン粒子は BCC 構造を維持し、ニッケル銅相と顕著に固溶せず、高い硬度と熱安定性を保持していることがわかりました。

タングステンの粒子分布は合金の性能にとって極めて重要です。均一な粒子分布は密度の一貫性を確保し、航空宇宙用カウンターウェイトの重心制御を安定化させます。高密度は引張強度を高め、高い衝撃荷重に耐える軍用徹甲弾コアに適しています。SEM-EDS 分析により粒子分布の均一性を検証し、介在物や偏析がないことを確認します。品質管理は ASTM B777 規格に準拠しており、密度試験と金属組織分析により粒子分布が要件を満たしていることを確認しています。

### 2.1.2 Ni-Cu 結合相の分布

ニッケル - 銅結合相は、タングステン - ニッケル - 銅合金において重要な役割を果たし、タングステン粒子間の隙間を埋め、連続的なマトリックス構造を形成し、合金の靱性、加工性、非磁性を大幅に向上させます。ニッケル - 銅相は面心立方（FCC）構造で存在し、通常、体積分率の 5%~20% を占め、具体的な割合は合金配合に依存します（例：90W-7Ni-3Cu ではニッケル - 銅の質量分率 10%）。SEM 観察によると、ニッケル - 銅相はネットワーク状に分布し、タングステン粒子を包み込み、均一な結合マトリックスを形成しています。EDS 分析によると、結合相ではニッケルと銅が明らかな相分離を起こさずに固溶体（Ni-Cu 合金）を形成し、ニッケル - 銅の原子比は設計比（例：7:3 または 3.5:1.5）に近いことが示されています。この均一な分布は、液相焼結プロセス中にニッケル（融点 1455° C）と銅（融点 1085° C）の低融点特性によるもので、液相を形成してタングステン粒子を濡らし、隙間を埋めて緻密化を促進します。

ニッケル-銅バインダー相の分布特性は、合金の特性に重要な影響を及ぼします。ニッケルは優れた耐食性（NiO 保護層を形成）を備え、湿気や化学薬品を含む環境（医療機器の滅菌環境など）でも合金の安定性を維持します。銅を添加することで熱伝導性が向上し、電子産業における急速な放熱が求められるバランスブロックやシールド部品に適しています。ニッケル-銅相の最大の利点は非磁性です。ニッケルと銅はどちらも常磁性体であるため、強磁性干渉が回避され、MRI 装置やフトリソグラフィ装置などの電磁波に敏感な用途に適しています。ニッケル-銅相の靱性はタングステン粒子の脆さを補い、加工（CNC 旋削、フライス加工など）や動的負荷（航空宇宙の振動環境など）による割れが発生しにくくなります。均一な分布を実現するには、焼結プロセスの最適化が鍵となります。液相焼結では、ニッケル-銅液相の過剰な流動と偏析を防ぐため、温度と雰囲気（高純度アルゴン）の制御が必要です。熱間等方圧加圧（HIP）により、バインダー相がさらに圧縮され、微細孔が除去され、マトリックスの連続性が確保されます。ニッケル銅相の分布にも課題があります。ニッケル含有量が多すぎると感作リスクが高まる可能性があり、医療用途では ISO 10993 生体適合性試験が必要になりま

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。銅含有量が多すぎると、Ni-Cu 固溶体の強度がタングステン粒子の強度よりも低いため、強度が低下する可能性があります。加工中は、ニッケル銅相の延性により、固着や表面バリが発生する可能性があります。切削パラメータ（低速切削、CBN 工具など）を最適化する必要があります。品質管理では、SEM-EDS および XRD によってニッケル銅相の分布と組成を分析し、固溶体の均一性を検証します。表面処理（PVD TiN または DLC コーティングなど）は、耐食性と耐摩耗性を向上させ、部品寿命を延ばすことができます。将来的には、積層造形技術により、粉末比率と印刷パラメータ（レーザー出力など）を精密に制御することで、ニッケル銅相のカスタマイズされた分布を実現し、医療用シールド部品や電子バランスウェイトにおける合金の性能をさらに最適化することができます。

### 2.1.3 焼結ネック形成メカニズム

焼結ネックの形成は、液相焼結中のタングステン-ニッケル-銅合金の緻密化における重要なメカニズムであり、合金の微細構造、機械的特性、密度 (> 99.5%) に直接影響します。タングステン-ニッケル-銅合金は粉末冶金プロセスで製造され、液相焼結が中核工程です。液相焼結では、ニッケル（融点 1455℃）と銅（融点 1085℃）が高温で液体マトリックスを形成し、タングステン粒子（融点 3422℃、固体のまま）を濡らし、粒子間の結合を促進して焼結ネックを形成します。焼結ネックは、タングステン粒子間の液相ブリッジによって形成される接続領域であり、合金の構造的完全性と強度を高めます。

の初期段階では、タングステン粉末（粒径 10~ 50 μm）、ニッケル粉末、銅粉末を混合し、ブランクにプレスします。初期の接触点は点接触で、粒子間の隙間は大きいです。温度が一定のレベルまで上昇すると、ニッケルと銅が溶けて Ni-Cu 液相を形成します。液相は表面張力が低く、タングステンに対する濡れ性が優れているため（接触角 < 30°）、タングステン粒子間の隙間を素早く埋め、毛細管現象で粒子表面を濡らします。液相の濡れにより粒子の再配置が促進され、タングステン粒子が移動して接近し、よりコンパクトな積層構造を形成します。保持時間が長くなるにつれて、液相は拡散と溶解-再沈殿のメカニズムを通じてタングステン粒子にさらに作用します。少量のタングステン原子が液相に溶解し、粒子の接触点で再沈殿して焼結ネックを形成します。焼結ネックの成長により粒子間の結合力が強化され、合金の密度が大幅に向上します。

焼結後期には、液相が残留気孔を満たし続け、拡散と物質移動によって微細気孔が除去されます。熱間等方加圧により構造がさらに圧縮され、残留気孔が除去され、密度は 99.5% に達することがあります。SEM 観察によると、焼結ネック部分は弧状または橋状の構造で、隣接するタングステン粒子を連結して三次元骨格ネットワークを形成しています。XRD 分析により、タングステン粒子は顕著な固溶体のない体心立方（BCC）構造を維持し、液相中の Ni-Cu 固溶体は面心立方（FCC）構造であることが確認されました。焼結ネックの形成はプロセスパラメータの影響を受けます。温度が高すぎると液相の過剰な流動を引き起こし、ニッケル銅の偏析やタングステン粒子の過剰な成長を引き起こし、靱性が低下します。温度が低すぎると液相が不十分になり、焼結ネックが不完全になり、密度が低下します。ニッケルと銅の比率（通常は 7:3 または 3.5:1.5）も液相の量に影響します。ニッケル含有量が高いと液相の流動性が向上し、焼結ネックの成長が促進されますが、強度が低下する可能性があります。銅含有量が高いと液

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

相の融点が低下し、焼結には有利ですが、偏析を引き起こす可能性があります。

焼結ネックの形成は性能にとって極めて重要です。タイトな焼結ネックは粒子間の結合を強化し、引張強度（700~900MPa）と靱性を向上させるため、航空宇宙用カウンターウェイトや高応力に耐える軍事用装甲貫通コアに適しています。均一な焼結ネックの分布は密度の一貫性を確保し、医療用遮蔽部品における安定した放射線吸収を提供します。品質管理では、金属組織顕微鏡と SEM-EDS を用いて焼結ネックの形態と組成を分析し、多孔性と液相分布を検証します。将来的には、ナノスケールのタングステン粉末や急速焼結技術（放電プラズマ焼結、SPS など）の使用により、焼結ネックの形成を最適化し、焼結時間を短縮し、効率を向上させ、性能を維持することができます。

## 2.2 タングステン-ニッケル-銅合金の微細構造と界面特性

タングステン-ニッケル-銅合金、特にタングステン粒子とニッケル-銅結合相との界面結合強度は、合金の機械的特性、熱安定性、耐久性に決定的な役割を果たします。界面結合強度は、動的荷重（振動や衝撃など）や高温環境下における合金の信頼性を決定づけ、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、電子産業用バランスブロックなどへの応用性能に直接影響を及ぼします。タングステン粒子（BCC 構造）とニッケル-銅結合相（FCC 構造）の界面は、液相焼結と熱間静水圧加圧によって強固に結合され、優れた機械的・化学的安定性を示します。

### 2.2.1 タングステン-バインダー相界面の結合強度

タングステン-バインダー相界面の結合強度は、タングステン-ニッケル-銅合金の微細構造の重要な特性であり、合金の引張強度、靱性、疲労抵抗を決定します。界面結合は、液相焼結プロセス中のニッケル-銅液相の濡れと拡散によって形成されます。タングステン粒子の表面は、Ni-Cu 固溶体と半整合または非整合界面を形成します。結合強度は主に機械的インターカレーション、化学結合、拡散によって生じます。SEM 観察によると、界面は約 0.1-1  $\mu\text{m}$  の厚さの連続した滑らかな遷移層であり、明らかな亀裂や気孔はありません。EDS 分析によると、界面でわずかな元素拡散があり、少量のタングステン原子がニッケル-銅相に溶解して遷移層を形成し、結合力を高めています。界面の結合強度は引張試験（ASTM E8）と破面分析によって評価され、通常は高いせん断強度と良好な破壊靱性が示されます。

液相焼結は、界面接合を形成するための重要なプロセスです。1450~1550°C でニッケルと銅が溶融し、Ni-Cu 液相を形成します。この液相はタングステン粒子を濡らし（濡れ角 $<30^\circ$ ）、毛細管現象によって粒子間の隙間を埋めます。液相は表面張力が低く拡散係数が高いため、タングステン表面のミクロ溶解（溶解度 $<2\text{wt}\%$ ）が促進され、化学結合が形成されます。焼結後期には、液相が凝固して FCC 構造の Ni-Cu 固溶体を形成し、タングステン粒子を包み込みます。機械的な連結により、界面接合がさらに強化されます。熱間静水圧加圧（HIP）は、高圧下で界面を圧縮し、微細孔を除去し、接触面積を増加させ、接合強度を向上させます。界面接合強度の品質は、合金の性能に直接影響します。航空宇宙用カウンターウェイトでは、高い接合強度により、高周波振動下でも部品の界面剥離が発生しません。また、医療用シールド部品では、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

安定した界面により、性能低下のない長期使用が保証されます。界面接合強度は多くの要因の影響を受けます。タングステン粉末の純度 (> 99.9%) と表面状態 (酸化物含有量 < 0.1% など) は、濡れ性に極めて重要です。酸化物は界面欠陥を引き起こし、接合強度を低下させる可能性があります。ニッケルと銅の比率 (通常 7:3) は、液相の量と固溶体の特性に影響します。ニッケル含有量が高すぎると、界面に過剰な液相が生じ、偏析を引き起こす可能性があります。銅含有量が高すぎると (> 8%)、固溶体の強度が低下します。焼結パラメータは正確に制御する必要があります。温度が高すぎると、タングステン粒子が過剰に溶解し、界面が広がりますが、強度が低下します。温度が低すぎると、液相が不十分になり、界面接合が不完全になる可能性があります。品質管理では、TEM と EBSD を用いて界面の微細構造を分析し、結晶学的整合と欠陥分布を検証します。破壊解析の結果、強固な界面の破壊モードは主に延性破壊であり、ディンプル特性を示すことが示されました。

界面接合強度を最適化するには、プロセスの改善が必要です。ナノスケールのタングステン粉末を使用することで、界面接触面積が増加し、接合強度 (600MPa 以上) を向上させることができます。急速焼結技術 (SPS など) は、短時間の高温処理によって界面の過剰な拡散を抑制し、構造安定性を維持します。表面処理 (PVD TiN コーティングなど) は、界面の耐腐食性を高め、医療機器や電子部品の寿命を延ばします。

### 2.2.2 微量元素の界面への影響

タングステン - ニッケル - 銅合金のタングステン - バインダー界面の結合強度は、その機械的特性と信頼性を決定する重要な要素であり、微量元素の導入は界面特性に大きな影響を及ぼします。微量元素 (コバルト、モリブデン、クロム、炭素、酸素など、通常 0.5 wt % 未満) は、原料粉末の不純物に由来するか、界面結合、機械的特性、耐食性を最適化するために意図的に添加されます。これらの元素は、ニッケル - 銅液相の濡れ性、拡散挙動、界面微細構造を変更することにより、タングステン粒子と Ni-Cu 固溶体 (FCC 構造) 間の結合強度 (せん断強度 > 500 MPa) に影響を及ぼします。航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、電子産業用バランスブロックでは、界面強度の最適化は、部品の長期安定性と疲労耐性に直接関係しています。

ニッケルとより安定した FCC 固溶体を形成し、結合相の強度と靱性を高めるため、添加剤としてよく使用されます。SEM-EDS 分析では、コバルトがニッケル銅相に均一に分散し、液相焼結中に液相の濡れ性が向上し (接触角が 25° 未満に低下)、焼結ネックの成長が促進され、界面結合強度が向上します (550~600 MPa まで増加可能)。コバルトはまた、界面でのタングステンの溶解を抑制し、界面遷移層の厚さを減らし、界面を透明に保ち、亀裂のリスクを減らします。ただし、コバルト含有量が多すぎると、界面の偏析を引き起こし、靱性が低下する可能性があります。モリブデンは、高い融点 (2623°C) とタングステンに類似した結晶構造 (BCC) を有するため、微量でも界面における化学結合を強化し、耐高温性を向上させることができます。そのため、軍用徹甲弾の弾頭コアや高温電子部品に適しています。モリブデンは固溶体を通してニッケル-銅相を強化し、界面せん断強度を高めませんが、過剰に添加すると界面脆化を引き起こす可能性があります。通常、微量の炭素と酸素が不純物として存在し、これらはタングステン粉末の酸化物または焼結雰囲気 (不十分なアルゴン純度) に由来する場合があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭素は界面で炭化物（WC または Ni-C 化合物など）を形成し、局所的な硬度を高める可能性があります（ピッカース硬度は 400 HV まで増加します）が、界面応力集中を引き起こし、破壊靱性が低下する場合があります。酸素は酸化物介在物（ $WO_3$  または NiO など）を形成し、界面結合を弱め、医療用シールドまたは航空宇宙部品が動的荷重下で破損する原因となります。不純物含有量を制御するには、高純度の原材料と高純度のアルゴン雰囲気が必要です。微量のクロムはニッケル銅相の耐食性を高めることができますが（ $Cr_2O_3$  保護層を形成）、その溶解度が限られているため、界面結合にはほとんど影響がありません。透過型電子顕微鏡（TEM）および電子後方散乱回折（EBSD）分析により、微量元素の分布と界面の結晶学的特性を検証し、界面効果の特性評価を行いました。引張試験（ASTM E8）および破壊解析の結果、微量元素含有量が最適化された界面は延性破壊特性（デンプル）を示し、不純物含有量が過剰になると脆性破壊が生じることが示されました。プロセス最適化には、微量元素含有量の厳格な管理（ICP-AES 検出精度  $\pm 0.01\%$ ）と、熱間静水圧プレスによる界面欠陥の除去が不可欠です。

### 2.3 W-Ni-Cu 合金の微細構造の進化

WNiCu 合金の微細構造の変化は、粉末成形から焼結、熱処理に至るまで、製造工程全体を通して起こり、粒成長、相分布、界面構造の動的変化を伴います。これらの変化は合金の密度、強度、靱性に直接影響を及ぼし、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、電子産業用バランスブロックにおける性能を決定づけます。液相焼結と熱処理は、微細構造の変化を制御するための重要なプロセスであり、温度、保持時間、雰囲気などのプロセスパラメータを最適化することで、理想的な微細構造を実現できます。

#### 2.3.1 焼結中の粒成長則

焼結中の粒成長則は、タングステン - ニッケル - 銅合金の微細構造進化の核心であり、タングステンの粒子サイズ、焼結ネックの形成、および合金特性に直接影響を及ぼします。液相焼結が主なプロセスであり、粒子の再配列、溶解-再沈殿、固体拡散の 3 段階を含み、タングステン粒子（BCC 構造、初期粒子サイズ 10-50  $\mu m$ ）の成長と微細構造の緻密化を促進します。焼結の初期段階では、タングステン粉末、ニッケル粉末、銅粉末をピレットに圧縮します。温度が一定のレベルまで上昇すると、ニッケルと銅が溶けて Ni-Cu 液相を形成し、これがタングステン粒子を濡らし、毛细管現象によって粒子の再配列を促進します。この段階では、粒成長は制限されており、粒子は初期サイズを維持します。

焼結の途中（1~2 時間保持）では、液相が溶解-再沈殿機構によって粒成長を促進します。少量のタングステン原子が液相に溶解し、粒子の接触点で再沈殿して焼結ネックを形成します。粒成長はオストワルド成長則に従います。大きな粒子が小さな粒子を飲み込んで成長し、粒度分布が広がります。焼結温度と保持時間は重要な影響要因です。温度が高すぎると、または保持時間が長すぎると、過剰に成長して靱性が低下します。温度が低すぎると、液相が不十分になり、粒成長が遅くなり、密度が低下します。ニッケル銅比（通常 7:3）も液相の量に影響します。ニッケル含有量が多いと、液相の流動性が高まり、粒成長が促進されますが、偏析を引き起こす可能性があります。銅含有量が多いと、液相の粘度が低下し、成長が加速されますが、強度が低下する可能性があります。焼結後期には、固体拡散により構造がさらに緻密化し、気

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

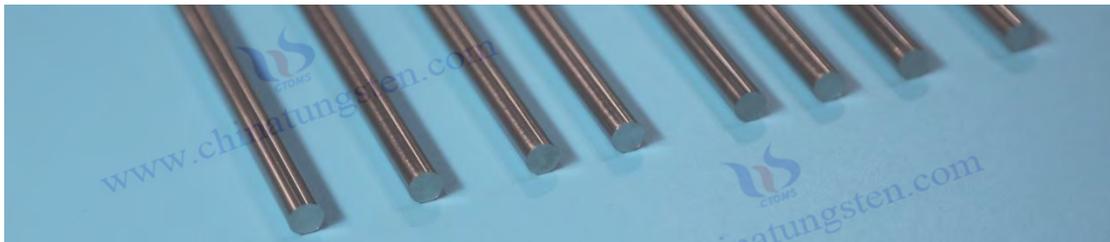
孔率は1%未満に低減されます。熱間静水圧加圧（HIP）により、粒子を高圧下で圧縮することで、過度な粒成長を抑制します。SEM分析では、粒子が多角形またはほぼ球形であり、焼結ネックが均一に分布していることが示されています。XRD分析では、タングステンは大きな相変化を起こさずにBCC構造を維持していることが確認されています。粒成長則の制御は性能向上に不可欠です。適度な粒子サイズは高い強度と靱性を確保し、医療用コリメータに適しています。一方、粒子サイズが大きいくほど高密度となり、軍事用弾頭コアに適しています。

### 2.3.2 熱処理による微細構造の調整

熱処理は、タングステン-ニッケル-銅合金の微細構造を制御する重要な手段です。結晶粒径、界面結合、残留応力を調整することで、機械的特性、耐食性、熱安定性を最適化します。熱処理は通常、焼結後に行われ、焼鈍、時効、焼入れ焼戻しなどの処理が含まれます。具体的な処理は、用途に応じて設計されます。焼鈍は最も一般的に使用される熱処理方法であり、焼結および加工中の残留応力を除去し、合金の高密度および非磁性特性を維持しながら、靱性と加工性を向上させることを目的としています。

焼鈍処理は、拡散と再結晶化によって微細構造を調整します。高温下では、ニッケル-銅結合相（FCC構造）における結晶欠陥（転位や粒界など）が拡散によって修復され、内部応力が低減されます。タングステン粒子（BCC構造）は融点が高い（3422℃）ため、大きな再結晶化は起こりませんが、界面に溶解した微量のタングステンは界面をさらに滑らかにし、接合強度（せん断強度>550MPa）を高めます。焼鈍温度が高すぎるとニッケル-銅相の粒成長が促進され、強度が低下する可能性があります。一方、温度が低すぎると応力緩和が不十分となり、靱性の向上も限定的になります。時効処理により、Ni-Cu固溶体中に微量の第二相（Ni<sub>3</sub>Cuなど）が析出することで接合相の強度が向上しますが、脆化を引き起こすため、過剰な析出は避けるべきです。

熱処理は耐食性と熱伝導性を調整することもできます。アニール処理後、ニッケル銅相の表面に緻密なNiO保護層が形成され、耐食性が向上し（耐酸性が20%~30%向上）、医療機器の長期使用に適しています。また、粒界分布を最適化することで熱伝導性もわずかに向上（5%~10%）し、電子産業の放熱部品に有利です。TEMおよびEBSD分析の結果、熱処理後、界面遷移層がより均一になり、粒界欠陥が減少し、破壊面に靱性特性（ディンプル）が発現していることが示されています。品質管理においては、引張試験（ASTM E8）および硬度試験（ASTM E92）を通じて性能向上を確認しています。酸化物介在物の発生を防ぐため、熱処理は高純度アルゴン雰囲気中で実施する必要があります。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 第3章 タングステン-ニッケル-銅合金の物理的・化学的性質

タングステン-ニッケル-銅合金は、その独特な物理的・化学的特性により、航空宇宙、医療、電子工学、軍事分野で広く使用されている高性能・高密度材料です。この合金は主にタングステンで構成され、結合相としてニッケルと銅が添加されており、高密度で優れた機械的特性と非磁性構造を形成しています。高密度であるため、限られた空間内で効率的な質量分布が確保され、ニッケル-銅結合相は合金に優れた靱性と加工性を与え、非磁性特性により電磁波に敏感な環境でも優れた性能を発揮します。

#### 3.1 タングステン-ニッケル-銅合金の機械的性質

タングステン-ニッケル-銅合金は、高性能アプリケーション、特に航空宇宙用カウンターウェイト、医療用コリメータ、軍事用徹甲弾コアなど、機械的ストレス、振動、衝撃に耐える必要があるシナリオにおける中核的な利点です。機械的特性は主に引張強度、伸び、硬度、耐疲労性などであり、これらはタングステン粒子の高硬度とニッケル-銅結合相の靱性の相乗効果から生まれます。この合金は粉末冶金で製造され、液相焼結および熱間静水圧プレスプロセスによって緻密な微細組織が確保され、動的環境でも構造的完全性を維持できます。純タングステンの脆さと比較して、ニッケル-銅結合相は合金の可塑性と機械加工性を大幅に向上させ、複雑な形状と高精度の製造要件を満たすことができます。

##### 3.1.1 室温引張強度

室温でのタングステン-ニッケル-銅合金はその機械的性質の中核的な指標であり、引張荷重下での破壊に耐える合金の能力を反映しています。この特性により、航空宇宙のカウンターウェイト、軍事用発射体のコア、電子産業のバランスブロックでの高い応力に耐えることができ、部品の構造的安定性と信頼性が確保されます。引張強度における優れた性能は、タングステン粒子の高い硬度とニッケル-銅結合相の強化効果に由来します。主成分であるタングステンは強固な骨格構造を提供し、その体心立方結晶構造は合金に非常に高い硬度と変形抵抗を与えます。ニッケル-銅結合相は、液相焼結により連続マトリックスを形成し、タングステン粒子間の隙間を埋め、粒子間の結合力を高め、合金が伸張中に応力を効果的に分散させ、局所的な破壊を回避できるようにします。

引張強度の性能は、合金の組成とプロセス条件によって共同で影響を受けます。タングステン含有量が多い合金（タングステン 95%など）は、タングステン粒子の密度と硬度が主な支持となるため、一般に引張強度が高くなります。ニッケルと銅の比率も強度に重要な影響を与えます。ニッケルは結合相の靱性と耐食性を高め、銅は熱伝導性と非磁性性を高めます。適切なニッケルと銅の比率（7:3または3.5:1.5など）は、結合相とタングステン粒子との良好な結合を保証し、均一な微細構造を形成し、応力集中を回避します。液相焼結プロセスは、高温でニッケルと銅の液体マトリックスを形成し、タングステン粒子を濡らし、焼結ネックの形成を

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

促進し、さらに粒子間の結合力を高めます。用途においては、タングステン・ニッケル・銅合金の引張強度は、航空宇宙部品の高周波振動や軍事用弾頭コアの高速衝撃に耐えることを可能にします。例えば、航空機のエルロンカウンターウェイトでは、飛行中の動荷重に耐える必要があり、高い引張強度により部品の変形や破損を防ぎます。医療分野の放射線治療装置では、コリメータは長期使用による機械的ストレスや疲労に耐える必要があり、高い引張強度により精度と耐久性を確保します。引張強度を向上させるには、焼結温度と保持時間を制御し、タングステン粒子の過度な成長やニッケル銅相の偏析を回避し、微細構造の均一性を確保するなど、プロセスの最適化が鍵となります。

### 3.1.2 伸長

伸びは、タングステン - ニッケル - 銅合金の可塑性と靱性を測る重要な指標であり、引張破壊に至るまでに合金がどの程度塑性変形できるかを反映しています。純タングステンの脆さと比較して、タングステン - ニッケル - 銅合金の伸びは大幅に向上しており、衝撃や振動を受けても脆性破壊を起こしにくく、手術用ロボットのカウンターウェイトや電子機器の振動低減部品など、ある程度の靱性が求められる用途に適しています。伸びにおける優れた性能は、主にニッケル - 銅結合相の靱性に起因しています。ニッケルは面心立方結晶構造によって優れた塑性変形能力を発揮し、銅は結合相の延性をさらに高めることで、合金が応力を受けると塑性変形によってエネルギーを吸収し、突然の破壊を回避します。この特性により、合金は動的環境において優れた耐疲労性を発揮します。

伸びは、合金の組成、微細構造、製造プロセスによって影響を受けます。ニッケル含有量を増やすと、通常、伸びが増加します。これは、ニッケルがタングステンよりも靱性に優れ、応力を効果的に分散させ、変形プロセスを長くすることができるためです。しかし、ニッケル含有量が多すぎると全体的な強度が低下する可能性があるため、靱性と強度のバランスを見つける必要があります。銅を添加すると、その高い延性により結合相の硬度が低下し、合金が伸張時に塑性流動を起こしやすくなるため、伸びがさらに向上します。液相焼結プロセスは、高温で均一なニッケル-銅マトリックスを形成し、タングステン粒子間の隙間を埋めて連続的なネットワーク構造を形成し、応力伝達と塑性変形を促進します。熱間静水圧プレスプロセスは、微細孔を除去し、界面結合を最適化することで、合金の靱性と伸びをさらに向上させます。焼鈍などの熱処理プロセスも、残留応力を除去し、粒界構造を最適化することで、合金の塑性特性を向上させることができます。

応用場面において、伸びは合金の適用性に直接影響します。航空宇宙分野では、カウンターウェイトは高周波の振動や衝撃に耐える必要があります。伸び率が高いほど、動的荷重下で部品が脆く破損することがなくなり、耐用年数が長くなります。電子産業では、リソグラフィープラットフォームのバランスブロックは微小な振動に耐える必要があり、適度な伸びは部品の長期使用における安定性を保証します。医療分野のシールド部品は主に高密度に依存していますが、適切な伸びは加工や設置中に割れる可能性が低くなります。プロセスの最適化では、微量元素と不純物の制御に重点を置く必要があります。たとえば、酸素や炭素などの不純物が脆い相を形成して伸びを低下させることを避けます。表面処理（研磨やコーティングなど）も

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面欠陥を減らし、塑性変形能力を向上させることができます。将来的には、ニッケルと銅の比率を正確に制御し、高度な製造技術（積層造形など）を導入することで、伸びをさらに最適化し、高い靱性が求められるシナリオで合金の性能を向上させることができます。

### 3.1.3 高温耐性

タングステン- ニッケル - 銅合金は、高温環境下における重要な機械的特性であり、高温応力下における合金の強度保持および構造安定性を反映しています。この特性により、ミサイル部品、ターボチャージャーのカウンターウェイト、高温電子機器のバランスブロックなど、高温環境に耐える必要のある航空宇宙、軍事産業、電子産業などの分野で優れています。優れた耐高温性能は、タングステンの高い融点とニッケル - 銅バインダー相の熱安定性の相乗効果によるものです。主成分のタングステンは、非常に高い融点を持ち、高温でも結晶構造の完全性を維持し、熱変形や軟化に抵抗します。ニッケル - 銅バインダー相は、安定した固溶体を形成することにより、高温での合金の機械的特性と耐酸化性をさらに向上させ、高温環境で長期間の性能維持を可能にします。

耐高温性は、合金の組成と微細構造に大きく影響されます。タングステン含有量が多い合金は、タングステンの体心立方結晶構造が非常に高い熱安定性を持ち、高温による粒界滑りや転位運動に抵抗できるため、高温での軟化に対する耐性が強くなります。ニッケルはバインダー相に抗酸化保護を提供し、その表面に形成される酸化物は酸素侵食を効果的に防止し、合金の構造的完全性を維持します。銅を添加するとバインダー相の融点が低下しますが、その高い熱伝導性は熱を素早く分散させ、局所的な過熱による性能低下を軽減するのに役立ちます。液相焼結プロセスは高温で均一な微細構造を形成し、タングステン粒子は焼結ネックを介してニッケル-銅バインダー相と緊密に結合され、高温での界面結合強度を高めます。熱間静水圧加圧プロセスは、さらに微細気孔を除去するため、高温での気孔拡大による合金の破損リスクを低減します。アニールなどの熱処理プロセスは、残留応力を除去し、粒界構造を最適化することで、高温での機械的安定性をさらに向上させます。実際の用途では、耐高温性により、タングステン - ニッケル - 銅合金は高温環境に最適な選択肢となります。例えば、航空宇宙分野では、ターボチャージャーやミサイルのカウンターウェイトは、高温ガスや摩擦によって発生する熱に耐える必要があります。合金の耐高温性により、部品は過酷な条件下でも形状と強度を維持できます。エレクトロニクス業界では、高温電子機器（リソグラフィ装置の熱管理部品など）には、高温でも寸法安定性を維持できる材料が必要です。合金の低熱膨張特性と耐高温性の組み合わせは、この要求を満たしています。耐高温性を向上させるには、プロセスの最適化が不可欠です。例えば、焼結温度と雰囲気を制御し、酸化物介在物や過度の粒成長を回避し、微細構造の安定性を維持します。微量元素（モリブデンなど）を添加することで高温強度をさらに高めることができますが、界面脆化を防ぐため、過剰な添加は避けるべきです。品質管理では、高温引張試験および熱サイクル試験を通じて合金の性能安定性を検証し、高温環境における信頼性を確保しています。

### 3.1.4 衝撃靱性

衝撃靱性は、タングステン - ニッケル - 銅合金が突然の衝撃や動的荷重を受けたときに破

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

壊に耐える能力であり、高応力環境におけるその靱性と信頼性を反映しています。この特性は、航空宇宙用カウンターウェイト、軍用徹甲弾コア、医療機器コリメータなどの用途で特に重要であり、振動、衝撃、または過渡的荷重下で部品が脆性破壊を起こさないことを保証します。純粋なタングステンの脆さと比較して、タングステン - ニッケル - 銅合金の衝撃靱性は、主にニッケル - 銅結合相の塑性効果により大幅に改善されています。ニッケルの靱性により、衝撃時にエネルギーを吸収し、塑性変形によって応力を分散できます。また、銅の高い延性により、結合相の耐亀裂性がさらに向上し、合金は衝撃を受けたときに優れた靱性破壊挙動を示します。

衝撃靱性の性能は、合金の組成、微細構造、製造プロセスによって影響を受けます。タングステン粒子は高い硬度と強度を有し、合金の強固な骨格を形成しますが、その脆さはニッケル-銅結合相によって補われます。ニッケル-銅相は、タングステン粒子を包み込む連続マトリックスを形成し、界面結合を介して衝撃エネルギーを効果的に伝達・分散させます。ニッケル含有量を増やすと、通常、衝撃靱性が向上します。これは、ニッケルの面心立方構造が優れた塑性変形能を持ち、衝撃時にディンプルを形成してエネルギーを吸収するためです。銅を添加すると靱性はさらに向上し、その延性により結合相の硬度が低下するため、衝撃時に脆性破壊ではなく塑性流動を起こしやすくなります。液相焼結プロセスは、均一な焼結ネックと緻密な微細構造（気孔率<1%）を形成することで、粒子間の結合力を高め、衝撃時の界面剥離を防止します。熱間静水圧プレスプロセスにより、衝撃靱性がさらに向上し、構造が圧縮されて微小亀裂の発生点が減少します。

応用分野において、衝撃靱性は合金の信頼性と耐久性を直接的に決定づけます。航空宇宙分野では、航空機やヘリコプターのカウンターウェイトは、離着陸や乱気流による振動や衝撃に耐える必要があります。高い衝撃靱性は、部品が過渡的な負荷によって破損するのを防ぎます。軍事的徹甲弾のコアでは、合金は高速衝撃（初速度 1500~1800 m/s）に耐える必要があり、優れた衝撃靱性はコアが装甲を貫通した際に健全性を維持することを保証します。医療機器では、コリメータや手術用ロボットの部品が偶発的に衝撃を受ける可能性があり、衝撃靱性はそれらの精度と機能に影響を与えないことを保証します。プロセスの最適化では、靱性を低下させる脆性相の形成を回避するために、微量不純物（炭素や酸素など）の制御に重点を置く必要があります。表面処理（研磨やコーティングなど）は、表面欠陥を低減し、耐衝撃性をさらに向上させます。

### 3.2 タングステン-ニッケル-銅合金の熱的および電気的特性

タングステン-ニッケル-銅合金の熱特性と電気特性は、ハイテク分野、特に電子産業におけるリソグラフィ装置のバランスブロック、医療用 CT/MRI シールド部品、航空宇宙における高温部品など、効率的な熱管理や電磁両立性が求められる用途において重要な基盤となっています。熱特性は主に熱伝導率と熱膨張特性から成り、高温環境における合金の放熱能力と寸法安定性を決定します。電気特性は主に導電性と非磁性に反映され、電磁波に敏感な環境において合金が干渉を引き起こさないことを保証します。これらの特性は、タングステンの高い熱安

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

定性とニッケル-銅結合相の優れた熱伝導性・電気伝導性に由来し、粉末冶金プロセスの最適化によって相乗的に実現されています。熱特性の観点から見ると、タングステン-ニッケル-銅合金は高い熱伝導率を有し、熱を素早く分散させ、局所的な過熱を防止します。これは、銅の高い熱伝導性とニッケル銅固溶体の均一な分布によるものです。タングステン粒子の高い熱安定性は、高温下でも合金の構造的完全性をさらに確保します。熱膨張係数が低いため、温度変化下でも寸法安定性を維持し、熱応力による変形を回避できます。特に、リソグラフィーマシンプラットフォームや医療機器など、極めて高い精度が求められる用途に適しています。製造工程では、液相焼結と熱間静水圧加圧により、微細構造の緻密性を確保し、熱伝導における粒界抵抗を低減します。熱処理工程では、粒界構造を最適化することで、低熱膨張特性を維持しながら熱伝導性をさらに向上させます。

電気的特性の面では、タングステン - ニッケル - 銅合金の非磁性が最大の利点です。これはニッケルと銅の常磁性によるもので、電磁干渉を回避し、MRI 装置、リソグラフィ装置、レーザー システムなどの電磁気に敏感な環境で良好な性能を発揮します。合金の電気伝導率は純銅よりも低いですが、特に高密度と電磁両立性を考慮する必要があるシナリオでは、ほとんどの電子アプリケーションのニーズを満たすのに十分です。ニッケル - 銅バインダー相の導電性は合金に安定した電気的特性を提供し、タングステン粒子の低い導電性は微細構造の最適化によって補われています。プロセス制御では、導電性や非磁性に影響を与える酸化物介在物や偏析を回避する必要があります。表面コーティング (PVD TiN など) は、合金を環境腐食からさらに保護し、電気的特性の安定性を維持します。

### 3.2.1 熱伝導率

タングステン-ニッケル-銅合金は、その熱性能の中核となる指標であり、合金が熱をすばやく伝導および分散する能力を反映しています。この特性により、電子産業のリソグラフィ装置のバランスブロック、医療機器の放射線遮蔽、高温航空宇宙部品など、効率的な熱管理を必要とする用途で大きな利点が得られます。優れた熱伝導性は、主に銅の高い熱伝導率とニッケル-銅結合相の相乗効果によるものです。銅は高熱伝導性金属として、熱源から他の領域に熱をすばやく伝導して局所的な過熱を防ぎ、ニッケルを添加すると安定した固溶体が形成され、結合相の熱伝導率が向上します。タングステンの熱伝導率は銅よりも低いですが、その高い熱安定性により、合金は高温でも構造的完全性を維持し、熱応力による変形や破損を回避できます。

熱伝導率は合金の組成と微細構造に大きく影響されます。ニッケルと銅の結合相の割合は、熱伝導率の性能を直接的に決定します。銅の熱伝導率はタングステンやニッケルの熱伝導率をはるかに上回っているため、銅含有量が多い合金は一般的に熱伝導率が優れています。しかし、銅含有量が多すぎると合金全体の強度が低下する可能性があるため、熱伝導率と機械的特性のバランスをとる必要があります。液相焼結プロセスは、高温で均一なニッケル-銅マトリックスを形成し、タングステン粒子間の隙間を埋め、粒界や気孔の熱伝導抵抗を低減することで、熱伝導率を向上させます。熱間静水圧プレスプロセスは、微細気孔を除去することで微細構造の密度をさらに最適化し、熱伝達をよりスムーズにします。アニールなどの熱処理プロセスも、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

結晶欠陥の修復や粒界構造の最適化によって熱伝導率を効果的に向上させ、高温環境における合金の性能安定性を確保します。

実用分野において、熱伝導率のレベルはハイテク分野における合金の性能に直接影響します。例えば、リソグラフィプラットフォームでは、合金はレーザーやモーターから発生する熱を素早く放散させ、サブナノメートルの精度を維持する必要があります。優れた熱伝導率は、プラットフォームの熱安定性を保証します。医療用CT装置では、遮蔽部品は高エネルギー放射線の下で発熱します。高い熱伝導率は、熱を素早く放散させ、装置の過熱や性能低下を防ぐのに役立ちます。航空宇宙分野では、ミサイルやタービン部品は高温ガス環境で動作します。合金の熱伝導率は、部品の熱管理能力を保証し、その耐用年数を延ばします。プロセスを最適化するには、原料の純度と焼結パラメータに注意を払い、熱伝導率を低下させる酸化物介在物や偏析を回避する必要があります。

### 3.2.2 導電率

タングステン- ニッケル - 銅合金は、その電気的特性の重要な指標であり、合金の電流伝導能力を反映しています。その電気伝導率は純銅よりも低いですが、特に高密度と電磁両立性を考慮する必要があるシナリオでは、ほとんどの電子および医療用途のニーズを満たすのに十分です。適度な電気伝導性は、ニッケル - 銅結合相の導電性とタングステン粒子の比較的低い導電性とのバランスから生じます。銅は導電性の高い金属として、合金の主な電流伝導経路を提供し、ニッケルを添加すると安定した Ni-Cu 固溶体が形成され、適度な電気伝導性が維持されます。タングステンの高抵抗特性は全体的な導電性を低下させますが、その高密度と非磁性は、電磁干渉を完全に回避し、電磁気に敏感な環境で独自の利点をもたらします。

電気伝導性は、合金組成、微細構造、製造プロセスによって影響を受けます。銅の電気伝導性はニッケルやタングステンよりもはるかに高いため、銅含有量が多い合金は一般的に電気伝導性も高くなります。しかし、銅含有量が高すぎると強度が低下する可能性があるため、ニッケルと銅の比率（7:3 または 3.5:1.5 など）を最適化することで、電気伝導性と機械的特性のバランスをとる必要があります。液相焼結プロセスは、連続したニッケルと銅のマトリックスを形成することで粒界抵抗を低減し、スムーズな電流伝達を促進します。熱間静水圧プレスプロセスは、微細構造の密度をさらに向上させ、気孔や介在物による導電性への悪影響を排除します。不純物管理は非常に重要です。

例えば、酸素や炭素などの不純物は、非導電性の酸化物や炭化物を形成し、導電性を低下させる可能性があります。そのため、焼結には高純度の原材料（タングステン>99.9%）と高純度アルゴン雰囲気が必要です。応用分野において、適度な導電性と非磁性により、タングステンニッケル銅合金は電子産業や医療分野で優れた性能を発揮します。例えば、MRI 装置では、合金のシールド部品は磁場干渉を回避する必要があり、適度な導電性と非磁性を組み合わせることで、装置の高い感度と精度を確保します。リソグラフィ装置では、バランスブロックの導電性が電磁環境下での正常な動作をサポートし、静電気の蓄積や干渉を回避します。プロセス最適化においては、導電性を低下させる偏析や欠陥を回避するため、微細構造の均一性に重点を置く必要があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.2.3 熱膨張係数

タングステン-ニッケル-銅合金は、その熱性能における重要な特性であり、温度変化下における合金の寸法安定性を反映しています。低い熱膨張係数は、リソグラフィープラットフォーム、医療用コリメータ、航空宇宙用カウンターウェイトなど、高精度と熱安定性が求められる用途において大きな利点となります。この低熱膨張性能は、主にタングステン本来の低熱膨張特性と、ニッケル-銅結合相の適度な延性によるもので、温度変動下でも合金の形状と寸法安定性を維持し、熱応力による変形や割れを回避します。

熱膨張係数は、合金の組成と微細構造の両方によって影響を受けます。タングステンは融点が高く、体心立方構造であるため、熱膨張率が非常に低く、これが合金の全体的な熱膨張特性を左右します。ニッケルと銅はタングステンよりも熱膨張率が高いですが、適切な比率設計により、結合相の熱膨張への寄与は最小限に抑えられます。液相焼結プロセスは均一な微細構造を形成し、タングステン粒子は焼結ネックを介してニッケル銅マトリックスにしっかりと結合し、粒界滑りや熱応力集中を低減します。熱間静水圧プレスプロセスは、マイクロ多孔性を排除することで、構造の密度と熱安定性をさらに向上させます。アニーリングなどの熱処理プロセスは、粒界構造を最適化し、残留応力を排除することで、温度変化による微小亀裂を回避し、熱サイクル中の合金の寸法安定性を高めます。

実用分野では、低熱膨張係数のタングステンニッケル銅合金は高精度機器に理想的な選択肢です。例えば、フォトリソグラフィ装置では、レーザー加熱・冷却サイクル中にプラットフォームはサブナノメートルの精度を維持する必要があります。低熱膨張係数はプラットフォームの安定性を確保し、パターン彫刻に影響を与える熱変形を回避します。航空宇宙分野では、カウンターウェイトは高温ガスまたは低温環境で動作しますが、低熱膨張係数は重心の安定性を確保します。医療機器のコリメータは、放射線によって発生する熱下で形状を維持する必要があり、低熱膨張特性はその精度と信頼性を保証します。プロセスを最適化することで、不純物（酸素や炭素など）が全体的な性能に影響を与える高膨張相を形成するのを防ぐ必要があります。

### 3.2.4 放熱性能

タングステンニッケル銅合金は、その熱性能を総合的に反映しています。高い熱伝導性と低い熱膨張係数の利点を兼ね備えており、熱を素早く分散させ、寸法安定性を維持できます。この性能により、電子産業におけるフォトリソグラフィ装置の熱管理部品、医療機器の放射線遮蔽、航空宇宙における高温部品など、効率的な熱管理を必要とする用途に最適です。優れた放熱性能は、銅の高い熱伝導性とニッケル銅マトリックスの均一な分布によるもので、熱源から外部への熱の伝達を迅速に行い、局所的な過熱を防ぎます。同時に、低熱膨張特性により、熱サイクル中に部品が変形したり故障したりすることはありません。

放熱性能は、合金組成、微細構造、製造プロセスによって相互に影響されます。銅の熱伝導率はタングステンやニッケルよりもはるかに高く、熱を素早く伝達できるため、銅含有量の増加

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は放熱効率を大幅に向上させます。ニッケルを添加すると、安定した Ni-Cu 固溶体が形成され、接合相の熱伝導性が向上し、酸化防止保護が提供され、高温酸化による放熱性能の低下を防ぎます。タングステン粒子の高い熱安定性は、高温における合金の構造的完全性を保証し、熱軟化や性能低下を回避します。液相焼結プロセスは、連続したニッケル-銅マトリックスを形成することで、粒界や細孔からの熱伝導の障害を低減します。熱間静水圧プレスプロセスは、微細構造の密度をさらに向上させ、熱伝導における細孔抵抗を排除します。表面処理（高熱伝導コーティングや Ra<0.4 μm への研磨など）は、表面の放熱効率を高め、熱を周囲に伝達することを加速します。

実用分野において、放熱性能は合金のハイテク分野への適用性を直接的に決定づけます。フォトリソグラフィ装置では、バランスブロックはレーザーやモーターから発生する熱を迅速に分散させる必要があり、優れた放熱性能はプラットフォームの熱安定性と精度を保証します。医療用 CT 装置では、遮蔽部品が高エネルギー放射線下で発熱するため、効率的な放熱は装置の過熱を防ぎ、耐用年数を延ばします。航空宇宙分野では、タービンやミサイルの部品は高温ガス環境で動作するため、放熱性能は部品の信頼性と耐久性を保証します。プロセス最適化では、原料の純度と焼結パラメータに注意を払い、放熱効率を低下させる酸化物介在物や偏析を回避する必要があります。

### 3.3 タングステン-ニッケル-銅合金の化学的安定性

タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、優れた機械的特性、非磁性、そして卓越した熱的・電気的特性により、航空宇宙、医療、電子、軍事分野で広く使用されています。この合金は粉末冶金プロセスで製造され、タングステンを主成分とし、ニッケルと銅を結合相として添加することで、緻密な微細組織を形成し、優れた化学的安定性を示します。その化学的安定性は主に耐食性と耐酸化性に反映されており、湿度、酸性、高温などの過酷な環境下でも長期間性能を維持できます。この安定性は、タングステンの化学的不活性とニッケル-銅結合相の保護効果によるもので、高信頼性が求められる用途のニーズを満たしています。

#### 3.3.1 耐食性

タングステン-ニッケル-銅合金は、その化学的安定性の重要な現れであり、湿気、酸、塩水噴霧などの腐食環境における化学的侵食に耐える合金の能力を反映しています。この特性により、医療機器、海洋工学、電子産業など、長期の安定動作が求められるシナリオで良好な性能を発揮できます。医療用 CT シールド、船舶のカウンターウェイト、電子機器のハウジングなどです。優れた耐食性は、主にタングステンの化学的不活性とニッケルの耐食性の相乗効果によるものです。主成分であるタングステンは化学的安定性が極めて高く、ほとんどの酸性またはアルカリ性環境で反応しにくく、合金の耐食性の基礎となっています。ニッケルは結合相で安定した保護層を形成し、外部化学物質の侵食に効果的に抵抗し、合金の耐用年数を延ばします。

耐食性は、合金の組成、微細構造、表面状態によって左右されます。ニッケルはニッケルと銅

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の結合相において主導的な役割を果たしています。ニッケルは面心立方構造と抗酸化特性を有し、湿気や酸性環境において緻密な酸化物保護層を形成し、腐食性媒体の浸透を防ぎます。銅を添加すると熱伝導性や非磁性が向上しますが、耐食性はニッケルよりもわずかに劣ります。一部の酸性環境（硝酸など）では、わずかに腐食が発生する可能性があります。そのため、ニッケルと銅の適切な比率（7: 3、3.5: 1.5 など）を調整することで、全体的な耐食性を最適化する必要があります。液相焼結プロセスは、高温で均一なニッケルと銅のマトリックスを形成し、タングステン粒子間の隙間を埋め、微細孔や粒界の露出を減らし、腐食性媒体の浸透経路を短縮します。熱間静水圧プレスプロセスは、微細組織の密度をさらに向上させ、合金表面をより滑らかにし、腐食の開始点を低減します。研磨や化学不動態化などの表面処理プロセスは、耐食性をさらに向上させ、より緻密な保護層を形成できるため、滅菌環境における医療機器の長期使用に特に適しています。

実用分野において、耐食性は合金の信頼性と耐久性を直接的に決定づけます。医療分野では、CT 装置や MRI 装置のシールド部品は、消毒剤や高湿度環境に長期間さらされる必要があります。優れた耐食性は、部品の表面品質と機能安定性を確保します。海洋工学分野では、船舶のカウンターウェイトが海水や塩水噴霧にさらされる可能性があります。合金の耐食性は材料の劣化を防ぎ、耐用年数を延ばします。エレクトロニクス業界では、ハウジングやバランスウェイトは製造環境中の化学物質に耐える必要があります。耐食性は、装置の長期運用を保証します。プロセスの最適化には、酸素や硫黄などの不純物が容易に腐食する相を形成するのを防ぐため、原料の純度を厳密に管理する必要があります。表面コーティング（PVD TiN や DLC など）は、特に過酷な化学環境において、耐食性をさらに向上させることができます。品質管理では、塩水噴霧試験や浸漬試験を通じて耐食性を検証し、合金が業界規格（ISO 9227 など）を満たしていることを確認します。

### 3.3.2 抗酸化作用

タングステン- ニッケル - 銅合金のもう一つの重要な特性は化学的安定性であり、これは合金が高温または酸化性雰囲気下での酸化反応に耐える能力を反映しています。この特性により、高温航空宇宙部品、電子産業の熱管理部品、タービンカウンターウェイト、フォトリソグラフィ装置のヒートシンク、ミサイルシールドなどの軍事機器において大きな利点が得られます。耐酸化性に優れているのは、主にニッケルの耐酸化性とタングステンの熱安定性によるものです。ニッケルは高温で緻密な酸化物保護層を形成し、酸素による内部構造のさらなる腐食を防ぎます。一方、タングステンは融点が高く化学的に不活性であるため、高温でも構造的完全性を維持し、酸化による性能低下を回避できます。銅は耐酸化性が弱いですが、ニッケルの保護下でその悪影響は最小限に抑えられます。

耐酸化性は、合金組成、微細構造、およびプロセス条件によって大きく左右されます。ニッケルは、ニッケル銅バインダー相において主要な抗酸化剤として機能します。その酸化物層（NiO）は高温（<1000° C）での拡散速度が低いため、酸素の浸透を効果的に遮断し、内部のタングステン粒子とニッケル銅マトリックスを保護します。タングステンは高い熱安定性を持ち、耐酸化性をさらに高めます。高温環境下でも、体心立方構造は安定しており、酸化腐食に耐えます。銅は酸化雰囲気下で銅酸化物（CuO または Cu<sub>2</sub>O）を形成する可能性があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

すが、ニッケルの保護効果により、適切なニッケル銅比（7:3 など）により銅の酸化を効果的に抑制できます。液相焼結プロセスは、高温で緻密な微細構造を形成し、気孔と粒界の露出を減らし、酸素の浸透経路を減らします。熱間静水圧加圧プロセスは、微細気孔を除去することで構造密度をさらに向上させ、合金表面の酸化に対する耐性を高めます。

実用分野において、耐酸化性は高温環境における合金の信頼性と寿命に直接影響します。航空宇宙分野では、タービンやミサイルの部品は高温ガス環境で動作します。優れた耐酸化性は、カウンターウェイトやシールド部品の表面品質を確保し、酸化による変形や故障を回避します。電子産業では、フォトリソグラフィ装置の放熱部品は、レーザーやモーターの発熱に耐える必要があります。耐酸化性は長期の高温動作における安定性を確保します。軍事機器では、シールド部品が高温の酸化雰囲気さらされる可能性があり、合金の耐酸化性は電磁シールド機能を維持します。プロセス最適化では、炭素や硫黄などの不純物が酸化しやすい相を形成するのを防ぐため、不純物制御に重点を置く必要があります。表面処理（化学不動態化や酸化防止コーティングなど）は、特に高温サイクル環境において、耐酸化性をさらに高めることができます。品質管理では、高温酸化試験と熱重量分析（TGA）を通じて耐酸化性を検証し、合金が航空宇宙産業や電子産業の基準を満たしていることを確認します。

### 3.4 CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金 MSDS

製品安全データシートは、タングステン-ニッケル-銅合金の物理的・化学的特性と安全な使用方法を記載した重要な文書であり、ユーザーとオペレーターに安全な取り扱いと緊急時の対応に関するガイダンスを提供します。CTIA GROUP LTD が製造するタングステン-ニッケル-銅合金（W-Ni-Cu）は、航空宇宙、医療、電子機器、軍事産業で広く使用されている高密度合金です。高密度、優れた機械的特性、非磁性、優れた熱伝導性により、高い評価を得ています。

#### 1. 製品情報

**製品名:** タングステンニッケル銅合金（W-Ni-Cu 合金）

**別名:** 高密度タングステン合金、タングステン重合金

**用途:** 航空宇宙用カウンターウェイト、医療用放射線遮蔽部品、電子産業用ヒートシンク、バランスブロックなどに使用されます。

#### 2. 危険の特定

タングステンニッケル銅合金は、通常使用条件下（プレート、バー、機械加工部品などの固体）では一般的に危険物質とはみなされず、分類および表示に関する世界調和システム（GHS）によれば危険物質として分類されていません。

#### 3. 組成/成分情報

タングステンニッケル銅合金は複合材料であり、その成分は次のとおりです。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **タングステン (W)** : 主成分の 90%~97% を占め、高密度、高硬度を実現します。
- **ニッケル (Ni)** : 結合相で、2%~7% を占め、靱性と耐食性を高めます。
- **銅 (Cu)** : 結合相は 1% ~ 5% を占め、熱伝導性と非磁性を向上させます。
- **微量元素**: 製造プロセスに応じて、微量のコバルト、モリブデン、またはその他の不純物 (<0.5%) が含まれる場合があります。

## 5. 消火対策

タングステン-ニッケル-銅合金は爆発の危険のない不燃性材料です。

## 6. 漏れの緊急処置

タングステン - ニッケル - 銅合金は、漏れの危険がない固体材料です。

## 7. 取り扱いと保管

- **安全な操作**: 処理は換気のよい環境で実施する必要があり、作業者は保護メガネと手袋を着用する必要があります。
- **保管条件**: 乾燥した涼しい場所に保管し、湿気や高温を避けてください。輸送中および保管中の損傷を防ぐため、製品の梱包は衝撃に強いもの（木箱やクッション材など）にしてください。

## 8. 物理的および化学的性質

- **外観**: 滑らかな表面を持つ銀灰色の金属固体、または特定の形状(プレート、ロッド、ブロックなど)に加工されています。
- **臭い**: 無臭。
- **融点**: タングstenは融点が非常に高く(約 3422°C)、ニッケルと銅の結合相の融点は約 1300~1450°C です。
- **密度**: 高密度、標準値は 16.5 ~ 18.5 g/cm<sup>3</sup>。
- **溶解性**: 水に不溶、酸およびアルカリ腐食に耐性がありますが、一部の酸性環境(硝酸など)では銅がわずかに腐食する可能性があります。
- **化学的安定性**: 室温では安定。高温ではニッケルが保護酸化層を形成し、耐酸化性を高めます。

## 9. 安定性と反応性

- **安定性**: 通常の使用および保管条件下では安定しており、分解の危険はありません。
- **反応性**: 水、空気、一般的な化学物質と激しく反応しません。
- **避けるべき条件**: 銅をわずかに腐食する可能性のある高温の酸化環境や強酸(濃硝酸など)との長期接触を避けてください。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 10. 廃棄に関する考慮事項

- **廃棄物処理:** 地域の環境規制（中国 GB 5085 または国際有害廃棄物基準など）に従って分類・リサイクルしてください。タングステン、ニッケル、銅のリサイクルには、化学溶解または電気化学分離の使用が推奨されます。
- **梱包材の廃棄:** 梱包材（木箱やプラスチックなど）は、地域の規制に従ってリサイクルまたは廃棄する必要があります。

## 11. 配送情報

- **輸送分類:** 非危険物、特別な輸送要件はありません。
- **梱包要件:** 輸送中に損傷が発生しないように、耐衝撃性と防湿性のある梱包材（木箱や発泡スチロールの詰め物など）を使用してください。

## 12. 規制情報

- **国際規制:** OSHA 危険物周知基準 (29CFR1910.1200) および GHS 要件に準拠します。
- **中国の規制:** 危険化学品安全管理規則および GB/T 26038-2010（タングステン合金規格）に準拠します。
- **その他:** ニッケルは REACH 規制の対象であり、含有量を申告する必要がありますが、合金全体としては特別な化学物質の登録は必要ありません。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 第4章 タングステン-ニッケル-銅合金の性能試験と規格

高密度材料であるタングステン - ニッケル - 銅合金は、その優れた機械的特性（引張強度 700~900 MPa、伸び 5%~15%）、非磁性、優れた熱伝導率（120~150 W/ m・K）、化学的安定性により、航空宇宙、医療、電子、軍事分野で広く使用されています。その性能が厳しい用途要件（航空宇宙用カウンターウェイトや医療用シールド部品など）を満たすことを保証するために、正確な性能試験方法と国際標準による品質管理を実施する必要があります。組成分析は性能試験の中核であり、合金の密度、機械的特性、非磁性特性に直接影響します。組成分析では、主要元素（タングステン、ニッケル、銅）の割合を検証するだけでなく、微量不純物を検出して合金の純度と性能の一貫性を保証します。

### 4.1 タングステン-ニッケル-銅合金の組成分析方法

タングステン-ニッケル-銅合金は品質管理の基礎です。主要元素の比率（タングステン 85%~97%、ニッケル 2%~10%、銅 1%~8%）が設計要件を満たしているかどうかを検証し、微量不純物（酸素、炭素、硫黄など）が性能に影響を与えないことを確認するために使用されます。組成分析方法には、主にスペクトル分析、化学分析、表面分析技術が含まれますが、その中でスペクトル分析は、高精度、迅速、非破壊性から第一選択です。分析結果は、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用コリメータ、電子産業用バランスブロックにおける合金の信頼性を確保するために、国際規格（ASTM B777 または GB / T 26038 など）に準拠する必要があります。検出プロセスはクリーンな環境で実行する必要があり、結果の精度を確保するために高純度の校正サンプルを使用する必要があります。

#### 4.1.1 スペクトル分析技術

スペクトル分析技術は、タングステン・ニッケル・銅合金の組成分析における中核的な手法です。特定の波長において試料から放出または吸収されるスペクトルを測定することで、元素の種類と含有量を特定します。この手法は、高感度（検出限界は ppm レベルに達する）、迅速性（1回の分析は5分未満）、そして複数の元素を同時に検出できることから、合金製造および品質管理において広く利用されています。スペクトル分析技術には、蛍光 X 線分析法（XRF）、誘導結合プラズマ発光分光法、原子吸光分光法（AAS）などがあり、中でも XRF と ICP-AES はタングステン、ニッケル、銅の含有量や微量元素の分布を確認するのに適しています。

蛍光 X 線分光法（XRF）は、X 線を用いて試料表面の原子を励起し、特徴的な蛍光を発生させ、その波長と強度を分析して元素含有量を決定する非破壊分析技術です。XRF は固体合金試料（板、棒、加工部品など）に適しており、複雑な前処理を必要とせず、タングステン、ニッケル、銅の割合を迅速に検出できます（精度±0.2%）。操作が簡単で、生産現場でのリアルタイム品質管理に適しているという利点があります。例えば、航空宇宙用カウンターウェイトの製造において、XRF は合金組成が ASTM B777 規格に適合しているかどうかを迅速に検証し、密度と非磁性特性が規格に適合していることを確認できます。XRF の制限は、軽元素（炭素や酸素など）の検出感度が低いため、他の方法と組み合わせて補助分析を行う必要があることです。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

誘導結合プラズマ発光分析法は、試料を溶解し、プラズマ励起を導入し、発光スペクトルを測定することで元素含有量を決定する高精度分析技術である。ICP-AES は、タングステン-ニッケル-銅合金中の主要元素および微量元素の検出に適しており、検出限界は ppb レベルまでである。試料は酸溶解（硝酸または王水など）で前処理し、分析溶液に溶解する必要がある。ICP-AES は複数の元素を同時に検出できるため、実験室環境での包括的な成分分析に適している。例えば、医療用シールド部品の製造において、ICP-AES はニッケル含有量が ISO 10993 生体適合性要件を満たしているかどうかを確認し、過剰なニッケルによるアレルギーのリスクを回避できる。欠点は、試料の前処理が複雑で、現場での迅速な検出には適していないことである。

スペクトル分析技術の選択は、アプリケーション要件と機器の状態に応じて決定する必要があります。XRF は迅速で非破壊的なオンサイト試験に適しており、ICP-AES は高精度なラボ分析に適しています。分析中は、マトリックス効果や機器のドリフトによる結果への影響を避けるため、高純度標準サンプル（99.99%以上）を使用して校正する必要があります。環境管理（クリーンルームや恒温恒湿など）は、ほこりや湿度による影響を軽減します。品質管理では、繰り返し試験と標準偏差分析を通じて結果の信頼性を検証します。

#### 4.1.2 不純物元素の検出

不純物元素の検出は、タングステン-ニッケル-銅合金の組成分析において重要な部分です。微量不純物（酸素、炭素、硫黄、窒素、鉄など、通常 0.5%未満）を識別・定量化し、合金の機械的特性、熱伝導率、化学的安定性に影響を与えないことを確認することを目的としています。不純物は、原料粉末（タングステン、ニッケル、銅）、焼結雰囲気、または加工環境に由来する可能性があります。含有量が基準を超えると、微細構造欠陥（酸化物介在物や炭化物など）を引き起こし、靱性、耐食性、または非磁性特性を低下させる可能性があります。不純物検出方法には、スペクトル分析、化学分析、特殊機器分析などがあり、航空宇宙、医療、電子産業の要件を満たすために、高感度（ppb~ppm レベル）を実現する必要があります。

酸素と炭素は、タングステン - ニッケル - 銅合金で最も一般的な不純物であり、特別な分析技術で検出する必要があります。酸素分析では通常、不活性ガス熔融法（Inert Gas Fusion）が使用され、サンプルは高純度ヘリウムまたはアルゴンで 2000° C 以上に加熱され、酸素が放出され、炭素と反応して CO または CO<sub>2</sub> を形成し、酸素含有量は赤外線検出器で測定されます。酸素含有量が多いと酸化物介在物（WO<sub>3</sub> や NiO など）が形成される可能性があり、これが界面結合強度を低下させ、医療用シールド部品の耐腐食性に影響を与えます。炭素分析では燃焼法（Combustion Analysis）が使用され、サンプルは酸素中で燃焼して CO<sub>2</sub> を生成し、炭素含有量は赤外線検出器で測定されます。炭素含有量が多いと炭化物（WC など）が形成される可能性があり、これにより硬度は上がりますが靱性が低下し、航空宇宙用カウンターウェイトの耐衝撃性に影響を与えます。

硫黄や窒素などの不純物は、グロー放電質量分析（GD-MS）や ICP-AES によって検出されます。GD-MS は、グロー放電でサンプル表面を励起し、イオン質量スペクトルを分析します。検出限界は ppb レベルに達することができ、多元素不純物分析に適しています。硫黄含有量が高すぎ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ると硫化物介在物が形成され、耐食性が低下する可能性があります。窒素含有量が高すぎると、粒界脆化を引き起こし、電子産業のバランスウェイトの安定性に影響を与える可能性があります。鉄は、潜在的な不純物（原材料または加工ツールに由来）として、弱い磁性を導入し、合金の非磁性を破壊し、MRI 装置のシールド部品の性能に影響を与える可能性があるため、特別な注意が必要です。ICP-AES は、サンプルを酸で溶解して分析することにより、鉄含有量を正確に検出できます。

不純物試験では、サンプルの準備と環境条件を厳密に管理する必要があります。サンプル表面は、汚染を防ぐため、研磨し、エタノールで洗浄します。分析機器は定期的に校正し、高純度の標準サンプルを用いて精度を確保します。焼結プロセスの最適化により、酸素と窒素の混入を削減できます。また、原料のスクリーニングにより、初期の不純物を制御できます。品質管理では、多点サンプリングと統計分析を通じて、不純物分布の均一性を検証します。試験結果は、合金の性能の一貫性を確保するために、ASTM B777 または GB/T 26038 規格に準拠する必要があります。

## 4.2 タングステン-ニッケル-銅合金の性能試験方法

タングステンニッケル銅合金は、対象用途における合金の性能を保証するために、物理的特性と機械的特性を包括的に評価するように設計されています。試験方法には、密度および緻密性試験、機械的特性試験、熱的特性試験、微細構造分析などがあり、それぞれが特定の特性に関する正確なデータを提供します。密度および緻密性試験は合金の質量分布と構造的完全性を検証し、機械的特性試験は応力下での強度と靱性を評価します。これらの試験は通常、標準化された装置とプロセスを用いて実験室または生産現場で実施され、結果が航空宇宙、医療、またはエレクトロニクス業界の厳しい要件を満たすことが保証されます。試験環境の管理は、結果の精度にとって非常に重要です。

### 4.2.1 密度とコンパクト性テスト

密度と緻密性試験は、タングステンニッケル銅合金の性能試験の基礎です。これらの試験は、合金の質量分布と微細構造の緻密性を評価するために用いられ、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、電子産業用バランスブロックなどの性能に直接影響を及ぼします。密度は合金の単位体積あたりの質量を反映し、高密度特性の中核指標であり、部品が限られた空間内で効率的な質量分布を実現することを保証します。密度は合金内部の気孔含有量を測定し、製造プロセス（液相焼結や熱間静水圧プレスなど）の影響を反映します。緻密な微細構造は、合金の強度、靱性、耐食性を向上させることができます。

密度試験では通常、アルキメデスの原理を用いて、空気中と液体（水やエタノールなど）中の合金サンプルの質量差を測定することで密度を計算します。この方法はシンプルで効率的であり、固体サンプル（棒、板、機械加工部品など）に適しており、合金が設計密度に達し、航空宇宙用カウンターウェイトや医療用遮蔽部品の高密度要件を満たしているかどうかを迅速に確認できます。試験中は、測定精度を確保するために、サンプルの表面を洗浄して研磨し、油や酸化物層を除去する必要があります。液体の選択では、表面反応が結果に影響しないよ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

うに、合金に対する非腐食性を考慮する必要があります。密度試験の結果は、タングステン含有量の割合を直接反映します。タングステン含有量が多い合金は一般に密度が高く、軍用徹甲弾の芯など、極めて高い質量分布を必要とする用途に適しています。

密度試験は、通常、密度測定と微細構造分析を組み合わせた、より複雑な方法で合金内の多孔性を評価します。一般的な方法は、測定された密度と理論密度を比較して多孔性を推測することです。別の方法では、顕微鏡を使用してサンプルの断面を観察し、金属組織顕微鏡または走査型電子顕微鏡でタングステン粒子とニッケル銅バインダー相の分布を分析し、微細孔または介在物の存在を特定します。高密度合金は、より優れた機械的特性と化学的安定性を提供でき、動的環境または腐食性環境での長期使用に特に適しています。液相焼結プロセスは、高温で均一なニッケル銅マトリックスを形成してタングステン粒子間の隙間を埋め、熱間静水圧プレスプロセスは構造をさらに圧縮して密度を大幅に向上させ、多孔性が性能に及ぼす悪影響を軽減します。

実用分野においては、密度とコンパクト性の試験が、高精度が求められる用途における合金の信頼性を確保します。例えば、フォトリソグラフィ装置のバランスブロックでは、高密度によって重心の安定性が確保され、緻密な微細構造によって振動による微小亀裂の発生が抑制されます。医療用コリメータでは、高密度合金は放射線を効率的に吸収しながら、長期使用においても構造的完全性を維持します。試験の最適化においては、表面欠陥や内部介在物が試験結果に影響を与えるのを防ぐため、サンプル調製の均一性に重点を置く必要があります。環境制御と高精度な機器校正も重要です。

#### 4.2.2 引張強度および降伏強度試験

引張強度試験と降伏強度試験は、タングステン - ニッケル - 銅合金の機械的特性を評価するための中核的な方法であり、引張荷重下での合金の破壊および塑性変形に対する抵抗力を測定するために使用されます。これらの特性は、航空宇宙用カウンターウェイト、軍事用発射体コア、および電子産業における振動減衰部品における合金の信頼性と耐久性を直接的に決定します。引張強度は、最大引張応力下での合金の破壊抵抗を反映し、高応力環境における性能評価に適しています。降伏強度は、合金が不可逆的な塑性変形を起こし始める応力レベルを示し、荷重下での変形抵抗を反映します。タングステン - ニッケル - 銅合金の優れた機械的特性は、タングステン粒子の高硬度とニッケル - 銅結合相の靱性の相乗効果に由来し、動的環境または衝撃環境下でも構造的完全性を維持できます。

引張強度試験は通常、引張試験機を用いて行われます。サンプルは標準形状（ダンベル型試験片など）に加工され、制御された条件下でサンプルが破断するまで徐々に増加する引張力が適用されます。試験中、サンプルの応力-ひずみ曲線を記録し、引張プロセス中の挙動を分析します。タングステン - ニッケル - 銅合金の高い引張強度は、タングステン粒子の強固な骨格とニッケル - 銅マトリックスの均一な分布によるものです。ニッケル - 銅相は焼結ネックを介してタングステン粒子をしっかりと接続し、応力を効果的に分散させ、局所的な破損を回避します。試験は、温度が機械的特性に及ぼす影響を排除するために、一定の温度環境（通常は室温）で実施する必要があります。サンプルの準備には、結果の偏差につながる応力集中

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を避けるために、滑らかで欠陥のない表面が必要です。試験結果は、合金が航空宇宙産業や軍事産業の基準を満たしているかどうかを確認し、高いストレスや振動に耐えられるかどうかを確認するために使用されます。

降伏強度試験は引張強度試験と同時に実施され、応力-ひずみ曲線を解析することで、合金が塑性変形を開始する点を決定します。ニッケル-銅バインダー相の靱性により、合金は降伏前に一定量の塑性変形に耐え、エネルギーを吸収し、脆性破壊を回避します。降伏強度の性能は、合金の組成と微細構造によって影響を受けます。タングステン含有量が多い合金は、タングステン粒子が変形に対する主な抵抗となるため、一般的に降伏強度が高くなります。ニッケル-銅比（7:3または3.5:1.5など）を最適化することで、バインダー相の靱性と強度のバランスが確保され、強度を低下させる過剰なニッケル含有量や硬度を低下させる過剰な銅含有量を回避できます。液相焼結および熱間静水圧プレスプロセスは、緻密な微細構造を形成することで、気孔率と粒界欠陥を低減し、降伏強度を向上させます。焼鈍などの熱処理プロセスは、残留応力を除去することで合金の塑性挙動をさらに最適化します。

実用分野において、引張強度と降伏強度の試験結果は、合金の選定と設計に直接影響します。例えば、航空宇宙用カウンターウェイトでは、高い引張強度によって高周波振動や衝撃を受けても部品が破損しないことが保証され、降伏強度によって荷重下でも形状安定性が維持されます。軍用徹甲弾のコアでは、高速衝撃に耐えるために合金に高い引張強度が求められ、降伏強度によって装甲を貫通する際のコアの構造的完全性が保証されます。試験の最適化では、標準化された試験片サイズと試験手順（ASTM E8など）を用いて、サンプルの一貫性に重点を置く必要があります。破壊解析では、SEMを通して延性破壊または脆性破壊特性を観察することで、試験結果の信頼性をさらに検証できます。

#### 4.2.3 延性試験

延性試験は、タングステン-ニッケル-銅合金の引張荷重下での塑性変形能力を評価する重要な方法であり、応力を受けた際に塑性流動によって破壊を回避する合金の能力を反映しています。延性は合金の靱性と加工性を測る重要な指標であり、特に航空宇宙用カウンターウェイト、医療用コリメータ、電子産業における振動低減部品など、振動、衝撃、複雑な加工に耐える必要がある部品にとって重要です。純タングステンの脆性と比較して、タングステン-ニッケル-銅合金の延性は大幅に向上しており、これは主にニッケル-銅結合相の塑性効果によるものです。ニッケルの面心立方構造は優れた延性を提供し、伸張時にエネルギーを吸収することができます。また、銅の添加により結合相の延性と加工性がさらに向上し、応力を受けた際に合金が優れた塑性変形能力を発揮します。

延性試験は通常、引張試験によって行われます。ダンベル型などの標準化された試験片を用いて、引張試験機で徐々に増加する引張力を試験片が破断するまで加えます。試験中、試験片の伸びと断面収縮を記録し、破断前の塑性変形の程度を評価します。タングステン-ニッケル-銅合金の延性は、タングステン粒子とニッケル-銅結合相の相乗効果によって生じます。タングステン粒子は高い硬度と強度を提供し、ニッケル-銅マトリックスは焼結ネックを通して連続的なネットワークを形成し、応力を分散させて塑性流動を促進します。試験結果は、合金が引

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

張時にエネルギーを吸収する能力を反映しており、動的環境における信頼性の検証に適しています。試験は、外部要因による結果への影響を排除するために、制御された環境（室温、一定湿度など）で実施する必要があります。試験片を準備する際には、応力集中による早期破断を防ぐため、滑らかで欠陥のない表面が必要です。

延性は合金の組成と微細構造に大きく影響されます。ニッケル含有量の増加は、ニッケルの靱性により伸張時により大きな塑性変形を可能にするため、一般的に延性を向上させます。銅を添加すると延性はさらに向上し、その高い延性によりバインダー相の硬度が低下し、応力がかかった際に合金が塑性流動を起こしやすくなります。しかし、ニッケルと銅の比率は適切に設計する必要があります。ニッケルまたは銅の含有量が多すぎると強度が低下し、全体的な性能に影響を与える可能性があります。液相焼結プロセスは、高温で均一なニッケル-銅マトリクスを形成し、タングステン粒子間の隙間を埋め、粒子間の結合力を高め、塑性変形能力を高めます。熱間静水圧プレスプロセスは、マイクロ気孔を除去し、界面結合を最適化することで、延性をさらに向上させ、破損のリスクを低減します。焼鈍などの熱処理プロセスは、残留応力を除去し、粒界構造を最適化することで、伸張時に合金がより均一な変形挙動を示すようにします。

実用分野において、延性試験の結果は、需要の高いシナリオにおける合金の適用性に直接影響します。例えば、航空宇宙分野では、カウンターウェイトは離着陸や乱気流による振動に耐える必要があります。高い延性は、部品が動荷重を受けても脆性破壊を起こさないことを保証します。電子産業では、リソグラフィプラットフォームの振動低減部品は微小な振動に耐える必要があります。良好な延性は部品の変形能力と長期安定性を保証します。医療分野では、コリメータや手術用ロボット部品は加工時や設置時に伸張を受ける可能性があり、延性は割れにくくします。試験の最適化では、標準化された試験片サイズと試験手順（ASTM E8 など）を用いて、サンプルの一貫性に重点を置く必要があります。破壊解析では、延性破壊の特徴（ディンプルなど）を観察することで、延性性能をさらに検証できます。

#### 4.2.4 靱性試験

靱性試験は、タングステン - ニッケル - 銅合金が衝撃または急激な負荷条件下でエネルギーを吸収し、破壊に抵抗する能力を評価する重要な方法であり、動的環境における合金の耐亀裂性と信頼性を反映しています。靱性は、航空宇宙用カウンターウェイト、軍用徹甲弾コア、医療機器コリメータなどの用途における合金の重要な特性であり、振動、衝撃、または過渡的負荷の下で部品の構造的完全性を維持することを保証します。タングステン - ニッケル - 銅合金の靱性は、主にニッケル - 銅結合相の塑性効果により、純粋なタングステンよりも優れています。ニッケルの面心立方構造は優れたエネルギー吸収能力を提供し、衝撃時に塑性変形によってエネルギーを分散できます。一方、銅の高い延性は結合相の耐亀裂性をさらに高め、合金が衝撃下で延性破壊特性を示すようにします。

靱性試験は通常、衝撃試験によって行われます。一般的な方法には、シャルピー衝撃試験とドロップハンマー試験があります。シャルピー衝撃試験では、標準試験片（通常は V ノッチ付き）を用いて振り子衝撃試験機で試験を行い、試験片が破損したときに吸収されるエネルギーを記録します。ドロップハンマー試験では、重い物体を特定の高さから自由落下させて試験片

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に衝撃を与え、破壊抵抗を評価します。タングステン - ニッケル - 銅合金の靱性は、タングステン粒子とニッケル - 銅結合相の相乗効果によって生じます。タングステン粒子は高い硬度と強度を提供し、ニッケル - 銅マトリックスは連続した焼結ネックネットワークを通して衝撃エネルギーを分散させ、脆性破壊を回避します。試験結果の再現性を確保するために、試験は制御された温度（室温など）で実施する必要があります。試験片は標準サイズに加工する必要があります。欠陥の影響を減らすために表面を研磨する必要があります。

靱性は、合金の組成、微細構造、製造プロセスの影響を受けます。ニッケル含有量の増加は、ニッケルの可塑性により衝撃時により多くのエネルギーを吸収し、延性破壊特性を形成するため、靱性を大幅に向上させます。銅を添加すると靱性がさらに向上し、その延性により結合相の硬度が低下するため、合金は衝撃時に脆性破壊よりも塑性変形を起こしやすくなります。液相焼結プロセスは、緻密な微細構造を形成することでタングステン粒子とニッケル銅マトリックス間の界面結合を強化し、衝撃時の亀裂伝播を抑えます。熱間静水圧プレスプロセスは、構造を圧縮し、マイクロ細孔や粒界欠陥を排除することで、靱性をさらに向上させます。アニーリングなどの熱処理プロセスは、粒界構造を最適化し、残留応力を排除することで、合金が衝撃時により均一なエネルギー吸収能力を発揮できるようにします。

実用分野において、靱性試験の結果は、動的環境における合金の適合性を直接的に決定します。航空宇宙分野では、ヘリコプターのローターや航空機のエルロンカウンターウェイトは、高周波の振動や衝撃に耐える必要があります。靱性が高いほど、部品が過酷な条件下でも脆く破損しないことが保証されます。軍事分野では、徹甲弾のコアは、装甲に高速で衝突する際に膨大なエネルギーを吸収する必要があります。優れた靱性は、コアの完全性を保証します。医療分野では、手術用ロボットの部品が偶発的な衝撃を受ける可能性があります。靱性が高いほど、亀裂を防ぎ、機能を維持できます。試験の最適化では、酸素や炭素などの不純物が脆い相を形成して靱性を低下させるのを防ぐため、不純物制御に重点を置く必要があります。表面処理（研磨やコーティングなど）は、表面欠陥を減らし、耐衝撃性を向上させることができます。品質管理では、破壊解析と繰り返し試験を通じて靱性性能を検証します。

#### 4.2.5 熱性能試験

熱性能試験は、タングステン - ニッケル - 銅合金の熱伝導性と熱安定性を評価するためのもので、高温または熱サイクル環境での性能検証に使用されます。特に、電子産業のフォトリソグラフィ装置のヒートシンク、医療機器の放射線遮蔽、航空宇宙産業の高温部品など、効率的な熱管理や寸法安定性が求められる用途に適しています。熱特性には主に熱伝導率と熱膨張特性があり、これらは合金が熱を素早く分散させる能力と温度変化時の寸法安定性を反映しています。これらの特性は、銅の高い熱伝導率とタングステンの低い熱膨張特性に、ニッケル - 銅結合相の相乗効果を組み合わせることで実現され、高精度で高温の環境でも合金の性能を維持できます。

熱伝導率試験は、通常、レーザーフラッシュ法または熱流計法によって行われます。レーザーフラッシュ法は、試料表面に短いレーザーパルスを照射し、熱が試料を伝播するのにかかる時間を測定することで、合金の熱伝導率を評価します。この方法は、固体試料（板やブロックな

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ど)の迅速な試験に適しており、実際の用途における合金の放熱能力を正確に反映できます。熱流計法は、試料の両面に安定した温度勾配を設定し、熱流束密度を測定することで熱伝導率の性能を評価します。どちらの方法も、外部温度や気流の干渉を避けるため、制御された環境（恒温または真空状態など）で実施する必要があります。試料作製では、均一な熱伝達を確保するために、滑らかな表面と均一な厚さが必要です。試験結果は、ニッケルと銅の接合相における銅の役割を検証しています。銅の高い熱伝導率は、合金が熱を素早く分散することを可能にし、リソグラフィー装置や医療機器などの高熱負荷環境に適しています。液相焼結および熱間静水圧プレスプロセスは、緻密な微細構造を形成して気孔および粒界の熱伝導抵抗を低減し、熱伝導性をさらに向上させます。

熱膨張係数試験は、通常、膨張計または示差走査熱量測定（DSC）を用いて行われます。膨張計は、制御された加熱中のサンプルの長さの変化を測定することで、温度変化に対する寸法安定性を評価します。サンプルを特定の温度範囲までゆっくりと加熱し、その変形を記録することで、合金が熱サイクル試験中に精度を維持できるかどうかを検証します。DSC法は、加熱中のサンプルの熱影響を分析することで、熱膨張特性を間接的に推定します。これらの試験は、厳密に制御された環境で実施する必要があります。サンプル表面は欠陥の影響を除去するために研磨する必要があります。タングステンは熱膨張率が低いため、温度変動下でも安定した寸法を維持でき、フォトリソグラフィープラットフォームなどの高精度用途に適しています。ニッケル-銅バインダー相は均一に分散され、焼結ネックと組み合わせられることで熱応力の集中を低減し、熱安定性を高めます。アニールなどの熱処理プロセスは、粒界構造を最適化することで、熱サイクル試験中の合金の性能をさらに向上させます。

実用分野において、熱性能試験は高温または高精度環境における合金の信頼性を確保します。例えば、フォトリソグラフィー装置では、バランスブロックは熱を迅速に放散し、寸法安定性を維持する必要があります。優れた熱伝導性と低い熱膨張係数は、プラットフォームのサブナノメートル精度を保証します。医療用CT装置では、シールドは放射線によって発生する熱の下で動作し、熱性能は長期的な安定性と安全性を保証します。試験の最適化では、熱伝導率を低下させる不純物（酸素や炭素など）や微細孔を回避するために、サンプル調製と機器の校正の一貫性に重点を置く必要があります。

#### 4.2.6 電気性能試験

電気性能試験は、タングステン - ニッケル - 銅合金の電流伝導性と電磁両立性を評価するためのもので、電磁波に敏感な環境での性能検証に使用されます。特に、医療用MRIシールド、リソグラフィー機械の振動低減部品、レーザーシステム部品などの用途に適しています。電気特性には主に導電性と非磁性があり、合金が電流を伝導し、電磁干渉を回避する能力を反映しています。タングステン - ニッケル - 銅合金の非磁性は最大の利点であり、ニッケルと銅の常磁性に由来し、電磁波に敏感な環境で優れた性能を発揮します。導電率は純銅よりも低いですが、ほとんどの電子アプリケーションのニーズを満たすのに十分です。高密度と非磁性を組み合わせることで、高精度機器に適しています。

導電率試験は通常、四端子法または抵抗率測定法を用いて行われます。四端子法では、試料表

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

面に微小電流を流し、電圧降下を測定して導電率を計算します。この方法は、固体試料（棒状や薄板など）の迅速な試験に適しており、電子機器用途における合金の電流伝導能力を正確に評価できます。抵抗率測定法では、試料の抵抗を測定し、その幾何学的寸法に基づいて導電率を推定します。温度や湿度が抵抗値に及ぼす影響を避けるため、試験は一定の温度・湿度環境で実施する必要があります。試料表面は、酸化被膜や汚れによる干渉を除去するために研磨・洗浄する必要があります。試験結果は、ニッケル-銅接合相における銅の支配的な役割を反映しており、その高い導電性は合金に安定した電流伝導経路を提供します。ニッケルを添加することで均一な Ni-Cu 固溶体が形成され、適度な導電性が維持されます。一方、タングステンの高抵抗特性は、微細構造の最適化によって補われます。液相焼結および熱間静水圧プレスプロセスは、緻密な微細構造を形成して導電性を向上させることにより、粒界抵抗と多孔性の影響を低減します。

非磁性試験は通常、磁力計または振動試料磁力計（VSM）を用いた磁化強度測定または透磁率試験によって行われ、磁場における合金の応答を評価します。タングステン - ニッケル - 銅合金の非磁性は、ニッケルと銅の常磁性特性の恩恵を受けており、強磁性干渉を回避し、MRI 装置やフォトリソグラフィ装置などの電磁気に敏感な用途に適しています。試験は、外部磁場干渉を排除するために、シールドされた磁場環境で実施する必要があります。サンプルは、鉄などの磁性元素（原材料または加工ツール由来）による弱い磁性の導入を避けるために、厳格な不純物管理を受けなければなりません。焼結プロセスでは、酸化物介在物が非磁性特性に影響を与えないように、高純度アルゴン雰囲気を使用します。表面処理（PVD 導電性コーティングなど）は、合金をさらに保護し、電気特性の安定性を維持します。

実用分野においては、電気性能試験は、電磁波に敏感な環境における合金の信頼性を確保します。例えば、MRI 装置では、シールド部品は磁場への干渉を避けるため非磁性である必要があり、適度な導電性は電磁環境における安定した動作をサポートします。リソグラフィ装置では、バランスブロックの導電性と非磁性が、高精度電磁システムにおけるプラットフォームの正常な機能を保証します。試験の最適化においては、酸素や硫黄などの不純物が非導電性相を形成して導電性を低下させないように、不純物管理に重点を置く必要があります。品質管理では、標準サンプルを用いた繰り返し試験と校正を通じて、結果の信頼性を検証します。

#### 4.2.7 化学性能試験

化学的性能試験は、腐食性または酸化性環境におけるタングステン-ニッケル-銅合金の安定性を評価する重要な方法です。この試験は、耐食性と耐酸化性を検証し、湿気、酸性、高温などの過酷な条件下での合金の長期信頼性を確保するために使用されます。この試験は、医療機器のシールド、海洋工学のカウンターウェイト、電子産業のヒートシンクなどの用途において特に重要であり、複雑な環境下でも部品の性能を維持できることを保証します。優れた化学的特性は、タングステンの化学的不活性とニッケル-銅結合相の保護効果によるものです。ニッケルは緻密な酸化物保護層を形成し、腐食性媒体の浸透を防ぎます。一方、タングステンの高い安定性は、合金の化学的侵食に対する耐性を高めます。化学的性能試験は、耐食性と耐酸化

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性の試験を網羅しており、実際の使用条件をシミュレートするために、管理された環境で実施する必要があります。

耐食性試験は通常、浸漬試験または塩水噴霧試験によって行われます。浸漬試験では、合金サンプルを特定の腐食性媒体（希酸、アルカリ溶液、塩水など）に浸し、温度と時間を制御しながら、表面変化、質量減少、または腐食生成物を観察します。この試験は、滅菌環境における医療機器や海中の海洋部品の長期使用条件をシミュレートし、合金の耐食性を評価するように設計されています。試験結果が材料自体の性能を反映するように、サンプルは研磨および洗浄して表面の酸化層や汚れを除去する必要があります。ニッケルと銅の結合相におけるニッケルの耐食性により、合金は湿気や酸性環境、特に耐食性が部品の生体適合性と耐久性を確保する医療用途において優れた性能を発揮します。塩水噴霧試験では、サンプルを塩水噴霧環境（中性塩水噴霧または酸性塩水噴霧など）に曝露することで、海洋環境または産業環境をシミュレートし、腐食斑点や表面劣化を観察します。液相焼結および熱間静水圧プレスプロセスは、緻密な微細構造を形成して気孔と粒界の露出を減らし、腐食性媒体の浸透経路を減らし、耐食性を向上させます。

耐酸化性試験は、通常、高温酸化試験または熱重量分析によって行われます。高温酸化試験では、サンプルを高温の空気または酸素環境に置き、表面酸化層の形成、質量増加、または性能変化を観察します。これは、高温で動作する航空宇宙部品や電子機器のヒートシンクの状況をシミュレートするものです。ニッケルの耐酸化性は、高温で保護酸化層を形成し、酸素によるさらなる侵食を防ぎます。一方、タングステンの高い熱安定性は、合金の構造的完全性を保証します。熱重量分析は、加熱中のサンプルの質量変化を正確に測定することにより、酸化反応の速度と程度を評価するため、高精度な実験室試験に適しています。試験は、精密な温度制御を備えた炉内で実施する必要があります。初期欠陥の影響を低減するためにサンプル表面を滑らかにする必要があります。焼結プロセスでは、酸化物介在物が耐酸化性に影響を与えるのを防ぐため、高純度アルゴン雰囲気を使用します。表面処理（化学不動態化や酸化防止コーティングなど）により、耐酸化性をさらに高め、部品の寿命を延ばすことができます。

実用分野においては、化学的特性試験は過酷な環境下における合金の信頼性を確保します。例えば、医療用CTシールドでは、耐腐食性が滅菌環境における部品の長期安定性を確保し、航空宇宙用タービンカウンターウェイトでは、耐酸化性が高温ガス環境における性能維持を確保します。試験の最適化においては、サンプル調製の一貫性と環境シミュレーションの信頼性に重点を置き、不純物（酸素や硫黄など）や表面欠陥が結果に影響を与えるのを防ぐ必要があります。品質管理では、標準サンプルを用いた繰り返し試験と校正を通じて、結果の信頼性を検証します。

#### 4.3 タングステン-ニッケル-銅合金の標準システム

タングステン - ニッケル - 銅合金は、その品質、性能、および用途の一貫性を保証するための重要な枠組みであり、組成要件、性能指標、試験方法、品質管理プロセスを網羅しています。これらの規格は、国際機関、国家機関、または業界団体によって策定され、生産、試験、および応用プロセスを規制して、世界市場における合金のコンプライアンスと競争力を確保して

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

います。標準システムには、国際規格（ASTM B777、ISO 20886 など）、国家規格（中国の GB / T シリーズなど）、業界規格（MIL-T-21014D など）が含まれ、航空宇宙、医療、電子産業に統一された品質ベンチマークを提供しています。中国の国家規格は、タングステン - ニッケル - 銅合金の生産と応用において重要な指導的役割を果たし、国内の技術と市場の需要の特徴を反映しています。

#### 4.3.1 タングステン・ニッケル・銅合金の中国国家規格

中国国家規格（GB/T シリーズ）は、タングステンニッケル銅合金の生産、試験、応用に関する主要な規格です。国家標準化局によって制定され、国内の航空宇宙、医療、電子、軍事分野で広く使用されています。これらの規格は、合金の成分範囲、性能要件、試験方法、品質管理プロセスを規定し、航空機のカウンターウェイト、医療用コリメータ、フォトリソグラフィ装置のバランスブロックなどの高信頼性用途のニーズを満たす製品を保証します。世界有数のタングステン資源国（埋蔵量約 350 万トン）であり、タングステン合金の生産拠点でもある中国は、高密度タングステン合金に関する多くの規格を制定しています。非磁性高密度合金の代表として、タングステンニッケル銅合金は特に注目を集めています。

銅合金を含む高密度タングステン基合金に適用され、組成範囲（例えば、バインダー相としてタングステン、ニッケル、銅が 85%~97%）、密度要件、機械的性質および試験方法を規定している。この規格では、合金はカウンターウェイトやシールドの要件を満たすために高密度である必要があり、同時に MRI 装置のような電磁波に敏感な環境に適した非磁性特性を重視している。組成分析では、分光法（XRF や ICP-AES など）を使用してタングステン、ニッケル、銅の比率を検証する必要があり、性能低下を避けるために不純物（酸素や炭素など）の含有量を厳密に管理する必要がある。機械的性質試験には引張強度と延性が含まれ、高応力下での合金の信頼性を検証するために引張試験が必要である。化学的特性試験では、湿気や高温の環境における合金の安定性を確保するために、耐腐食性と耐酸化性を評価する必要があります。

さらに、GB/T 228.1-2010「金属材料の引張試験 パート 1: 室温での試験方法」は、タングステン-ニッケル-銅合金の機械的特性試験の仕様を規定し、引張強度と降伏強度の測定方法をガイドして、結果が航空宇宙または軍事要件を満たすことを保証しています。GB/T 231.1-2018「金属材料のブリネル硬さ試験 パート 1: 試験方法」は、合金の表面硬度と加工特性を評価するための硬度試験プロセスを規定しています。GB/T 1423-2012「貴金属およびその合金の密度測定方法」は、合金の高密度特性が設計要件を満たすことを保証するための標準化された密度試験方法を提供しています。これらの規格は、タングステン-ニッケル-銅合金の包括的な試験フレームワークを形成しています。

中国国家規格の適用は、国産タングステン-ニッケル-銅合金の品質向上と市場競争力の強化を促進しました。例えば、医療分野では、シールド部品の非磁性および耐腐食性が ISO 生体適合性要件を満たすことを保証しています。また、電子産業では、フォトリソグラフィ装置のバランスブロックの密度および熱伝導率試験を規定し、高精度な性能を確保しています。規格の実施には、液相焼結法や熱間静水圧プレス法の採用による密度向上、原材料と雰囲気との厳格

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

な管理による不純物の低減など、生産プロセスの最適化と組み合わせる必要があります。品質管理は、標準化された多点試験と第三者認証（CNAS ラボなど）によって検証されています。

#### 4.3.2 タングステン-ニッケル-銅合金の国際規格

国際規格は、タングステン-ニッケル-銅合金の品質管理および市場への応用に関する世界的な規格であり、国際標準化機構（ISO）などの権威ある機関によって策定され、航空宇宙、医療、電子産業で広く利用されています。これらの規格は、合金の組成、性能、試験方法、品質認証に関する統一的なガイドラインを提供し、異なる国や産業における製品の一貫性と信頼性を確保しています。高密度非磁性材料であるタングステン-ニッケル-銅合金の国際規格は、主に組成範囲、密度、機械的特性、非磁性特性に焦点を当てており、高精度および電磁波に敏感な用途に適しています。国際標準化機構が策定した高密度タングステン合金の技術仕様 ISO 20886:2004 は、タングステン-ニッケル-銅合金の主要な国際規格の一つで、タングステンベースの高密度合金（W-Ni-Cu、W-Ni-Fe を含む）に適用されます。この規格では、合金の組成範囲（タングステン含有量 85%~97%、結合相としてニッケルと銅）を規定し、密度、機械的特性（引張強度、延性など）、非磁性の検証を要求しています。この規格では、スペクトル分析（XRF、ICP-AES など）による主要元素比の検出、引張試験、衝撃試験による機械的特性の評価、磁化強度試験による非磁性の確認を重視しており、医療用 MRI シールドや電子産業のバランスウェイトのニーズに対応しています。ISO 20886 では、製造プロセス（液相焼結や熱間静水圧プレスなど）では微細構造の緻密さを確保し、気孔や不純物が性能に与える影響を低減する必要もあります。

もう一つの関連国際規格は、医療分野（CT シールドやコリメータなど）におけるタングステン-ニッケル-銅合金の応用に適用可能な ISO 10993 医療機器の生物学的評価シリーズです。この規格では、合金の生体適合性の検証、特にアレルギー反応を避けるためのニッケル含有量の管理が求められています。耐腐食性と耐酸化性試験は、滅菌環境や高湿度環境における合金の長期安定性を確保するために、この規格の要件を満たす必要があります。この国際規格は、ISO 6892-1 金属材料の引張試験にも準拠し、機械的特性試験を規定し、引張強度と降伏強度の測定をガイドし、高応力環境における合金の信頼性を確保しています。これらの規格は、タングステン-ニッケル-銅合金の世界的な応用に技術的なサポートを提供しています。国際規格の導入により、タングステン・ニッケル・銅合金の世界市場における流通が促進されました。

例えば、航空宇宙分野では、カウンターウェイトの高密度性と非磁性特性が設計要件を満たすことが規格によって保証されています。また、医療分野では、シールド部品の生体適合性と耐久性が規格によって保証されています。規格の導入プロセスでは、高精度試験装置と厳格な品質管理プロセスを組み合わせることで、規格要件への適合性を確保しています。

#### 4.3.3 ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国、および世界各国のタングステン-ニッケル-銅合金規格

欧州、米国、日本、韓国などの国々では、国際規格をベースとして、タングステン・ニッケル・

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

銅合金の規格が、現地の技術と市場の需要を勘案し、より具体的かつ詳細な仕様を策定しています。これらの規格は、組成管理、性能要件、試験方法などに一定の差異があり、各国の航空宇宙、医療、電子産業における応用重点を反映しています。以下では、米国、欧州、日本、韓国の関連規格をそれぞれ取り上げ、その特徴と応用シナリオを概説します。

**米国規格:** 米国は、タングステン-ニッケル-銅合金の主な規格として ASTM B777-15 高密度タングステン合金規格を採用しており、これは W-Ni-Cu および W-Ni-Fe 合金に適用されます。

この規格は、タングステン合金を 4 つのカテゴリ（クラス 1~4）に分類し、タングステン含有量（90%~97%）とバインダー相比に基づいて性能要件を定義し、密度、機械的特性（引張強度や硬度など）、非磁性試験をカバーしています。ASTM B777 では、強度は引張試験（ASTM E8 を参照）で検証し、非磁性特性は磁化強度試験で確認することを要求しており、医療用 MRI シールド部品や電子産業のバランスウェイトに適しています。この規格では、微細構造が緻密で気孔率が低減されていることを保証する製造プロセス（粉末冶金など）も要求されています。米国軍規格 MIL-T-21014D タングステン基高密度合金は、軍事用途の要件をさらに厳格化し、徹甲弾コアや航空宇宙用カウンターウェイトの性能指標を規定し、耐衝撃性と高温安定性を重視しています。これらの規格は、合金が高い信頼性要件を満たすことを保証するために、米国の航空宇宙および防衛分野で広く使用されています。

**欧州規格:** 欧州では主に「EN 1982 銅及び銅合金インゴット及び鋳物」をはじめとする高密度合金規格が参照されています。主に銅系合金を対象としていますが、一部の規格はタングステン-ニッケル-銅合金の鋳造・加工にも適用されます。EN 規格は、ニッケルと銅の比率などの組成管理と耐食性試験を重視しており、海洋工学や医療機器への応用に適しています。また、欧州では「EN ISO 6892-1 金属材料の引張試験」を用いて機械的特性試験を標準化し、高応力環境における合金の性能検証を義務付けています。欧州規格は環境保護と生体適合性を重視しており、特に医療用途においては、ニッケル含有量を管理しアレルギーリスクを回避するために「EN ISO 10993」生物学的評価規格への準拠を義務付けています。ヨーロッパのタングステン・ニッケル・銅合金は、海水に対する耐腐食性と非磁性を重視し、船舶のカウンターウェイトや医療用シールド部品に主に使用されています。

**日本規格:** 日本は、航空宇宙、電子工学、医療分野に適したタングステン-ニッケル-銅合金の主要規格として「JIS H 7202 高密度タングステン合金」を採用しています。この規格は、タングステン含有量の範囲（90%~95%）と結合相の組成を規定し、分光分析による組成の検証、引張試験および衝撃試験による機械的特性の評価を義務付けています。この規格は、非磁性試験と熱伝導試験に特に重点を置き、リソグラフィ平衡ブロックや MRI シールド部品などの高精度用途に適しています。「JIS Z 2241 金属材料の引張試験方法」は、結果の一貫性を確保するための機械的特性試験のガイドラインを提供しています。生産技術面では、日本は高純度原材料と真空焼結に重点を置くことで、不純物（酸素や鉄など）が非磁性特性や耐食性に与える影響を低減しています。特にエレクトロニクス産業においては日本規格の適用が顕著

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

で、半導体装置における合金の普及を促進しています。

**韓国規格:** 韓国は、航空宇宙、電子工学、軍事分野に適したタングステン - ニッケル - 銅合金の生産と試験を規制するため、KS D 5201 タングステンおよびタングステン合金を採用しています。この規格では、合金の密度、機械的特性、非磁性の検証が要求されており、スペクトル分析と磁化強度試験により、組成と性能が要件を満たしていることを確認しています。韓国規格は、電子産業のヒートシンクとバランスブロックのニーズを満たすために、熱性能試験（熱伝導率や熱膨張係数など）に重点を置いています。韓国におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の生産では、主に液相焼結と熱間静水圧プレスプロセスを採用し、微細組織の密度を確保しています。この規格では、機械的特性試験についても KS D ISO 6892 金属材料の引張試験を参照し、高応力環境下での合金の信頼性を重視しています。韓国のエレクトロニクスおよび半導体分野における急速な発展により、合金が高精度機器の要件を満たすことを保証するためのこれらの規格の実施が促進されました。

各国の規格の違いは、主に用途の重点と試験内容に反映されています。米国規格は軍事・航空宇宙分野の高強度要件、欧州規格は海洋・医療分野の耐食性、日本規格は電子産業における非磁性と高精度、韓国規格は電子・熱管理分野に重点を置いています。これらの規格の実施には、高精度試験装置と厳格な不純物管理（酸素含有量<0.05%など）を組み合わせることで、合金性能の一貫性を確保する必要があります。品質認証は通常、国際貿易を促進するために第三者機関によって検証されます。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

**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)

## 第5章 タングステン-ニッケル-銅合金の製造技術

タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、高性能の材料であり、優れた機械的特性、熱伝導性、化学的安定性により、航空宇宙、医療、電子、軍事分野で広く使用されています。その製造方法は主に粉末冶金技術に基づいており、原料の前処理、粉末混合、加圧、液相焼結、後処理などの手順を経て、高密度で均一な微細組織を実現します。原料の前処理は製造プロセスの出発点であり、粉末の流動性、混合均一性、焼結特性に直接影響を及ぼし、合金の品質と性能を決定します。タングステン粉末の球状化と粒度制御、およびニッケル-銅粉末の表面処理は、原料の前処理における2つの重要なポイントであり、粉末の高純度、適切な粒度、および表面活性を確保します。

### 5.1 原材料の前処理

タングステン-ニッケル-銅合金の製造では、高純度のタングステン粉末、ニッケル粉末、銅粉末を原料とし、粉末冶金プロセスを経て緻密な合金組織を形成します。原料前処理は、粉末の流動性、混合均一性、焼結活性を向上させるために、粒子サイズ、形態、純度、表面状態などの粉末の物理的・化学的特性を最適化することを目的としています。主成分であるタングステン粉末は、合金の高密度化と機械的特性を確保するために、高純度で適切な粒度分布を有する必要があります。結合相であるニッケル粉末と銅粉末は、液相焼結中にタングステン粒子との結合を促進するために、良好な表面活性と濡れ性を有する必要があります。原料前処理には、粉末調製、ふるい分け、洗浄、表面改質などのステップが含まれ、不純物（酸素や炭素など）による汚染を避けるために、クリーンな環境で実行する必要があります。以下では、タングステン粉末の球状化と粒度制御、およびニッケル銅粉末の表面処理のプロセスと応用について詳しく説明します。

#### 5.1.1 タングステン粉末の球状化と粒度制御

タングステン粉末の球状化と粒度制御は、原料前処理の中核であり、タングステン粉末の形態と粒度分布を最適化し、流動性、嵩密度、焼結性を向上させ、タングステン-ニッケル-銅合金の密度と微細構造の均一性に直接影響を及ぼします。タングステン粉末は通常、水素還元法またはプラズマ法で製造され、初期の形態は主に不規則な多角形または角形で、粒子サイズの範囲は広がっています。球状化処理により、タングステン粉末粒子は球状になりやすく、角や角が少なくなり、流動性（流動時間の短縮）と嵩密度が向上し、粉末の混合とプレスが容易になります。粒度制御により、粉末の粒度分布が適切な範囲内に収まり、焼結中の粒子の再配置と緻密化が促進され、合金特性に影響を与える気孔や偏析を回避できます。球状化処理では、プラズマ球状化技術や高温溶融アトマイゼーション法がよく用いられます。プラズマ球状化法は、タングステン粉末を高温プラズマ炎に投入することで、粒子を瞬時に溶融させ、表面張力の作用で球状の液滴を形成し、その後急速に冷却・固化させます。この方法は、タングステン粉末の球形度を大幅に向上させ、表面欠陥を低減し、粉末の流動性を高めることができるため、フォトリソグラフィ機のバランスブロックなどの高精度用途に適しています。高温溶融

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

アトマイゼーション法は、タングステン原料を溶融させて微細な液滴に噴霧し、不活性ガス（アルゴンなど）中で冷却して球状の粒子を形成するため、大量生産に適しています。球状化されたタングステン粉末は嵩密度が高く、プレスブランクの均一性を高め、焼結収縮の不均一性を低減します。

粒度制御は、通常、ふるい分け、気流分級、または超音波分散技術によって実現されます。ふるい分け法では、標準スクリーンを使用して異なる粒子サイズのタングステン粉末を分離します。これはシンプルで効率的ですが、精度は低いです。気流分級は、気流によって粒子を分離し、粒度分布を正確に制御するため、需要の高い用途に適しています。超音波分散は、超音波を使用して凝集粒子を分解し、粒子サイズの均一性を最適化します。適切な粒度範囲は、焼結活性と構造安定性のバランスをとることができます。粒子が細かいほど、焼結中の溶解-再沈殿効果が向上し、緻密化が促進されます。粗い粒子は安定した骨格構造を提供し、軍用徹甲弾のコアの高強度要件に適しています。粉末の性能に影響を与える酸素や炭素不純物を避けるために、粒度制御は原料の純度管理と組み合わせる必要があります。

製造工程では、タングステン粉末の球状化と粒度制御により、合金の高密度化と機械的特性が確保されます。例えば、航空宇宙用カウンターウェイトでは、球状化されたタングステン粉末はブランクの密度を向上させ、重心の安定性を確保します。医療用遮蔽部品では、均一な粒度分布が気孔率を低減し、放射線吸収効率を向上させます。プロセスの最適化では、装置の高精度化（プラズマ温度制御など）と環境の清浄度（クリーンルーム運転）に重点を置き、粉塵汚染を回避する必要があります。品質管理では、レーザー粒度分布計と SEM 観察により、粒度分布と形態を検証します。

### 5.1.2 ニッケル銅粉末の表面処理

ニッケル銅粉の表面処理は、原料前処理におけるもう一つの重要なステップであり、ニッケル粉と銅粉の表面化学状態、清浄度、活性を最適化し、液相焼結中のタングステン粒子との濡れ性と結合力を向上させることを目的としています。ニッケルと銅は結合相として、焼結中に液相を形成し、タングステン粒子間の隙間を埋め、合金の靱性、非磁性、熱伝導性を高めます。未処理のニッケル銅粉は、表面に酸化物層（NiO や CuO など）、有機汚染物質、または吸着ガスが存在する可能性があり、濡れ性と焼結活性が低下し、界面結合が不良になったり、多孔度が増加したりします。表面処理は、洗浄、化学改質、またはコーティング技術を通じて粉体特性を改善し、合金の緻密さと均一性を確保します。表面洗浄には通常、化学洗浄または超音波洗浄が使用されます。化学洗浄では、希酸（塩酸、硝酸など）またはアルカリ溶液を使用してニッケル銅粉末の表面の酸化物層と不純物を取り除き、その後、脱イオン水ですすぎ、真空または不活性ガス（アルゴンなど）で乾燥させて二次酸化を防ぎます。超音波洗浄は、高周波超音波を使用して洗浄液（エタノールなど）に微細な気泡を発生させ、表面の汚染物質を破裂させて除去するため、高精度アプリケーションに適しています。洗浄プロセスでは、溶液の濃度と時間を制御して、過度の腐食や粉末形態の損傷を回避する必要があります。洗浄後のニッケル銅粉末の表面清浄度が向上し、液相との濡れ性が向上し、焼結ネックの形成に役立ちます。化学改質は、ニッケル銅粉末の表面に活性剤または還元剤を導入することにより、ニッケル銅粉末の焼結性能をさらに向上させます。例えば、微量の還元剤（水素やギ酸など）を用

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

いて粉末表面を処理することで酸化物を還元し、活性金属表面を形成し、タングステン粒子との化学結合を強化します。表面コーティング技術（化学蒸着法、CVD など）は、ニッケルまたは銅粉末の表面に炭素または金属（Ni、Cu など）の薄い層を堆積させることで、耐酸化性と濡れ性を向上させ、高温焼結環境に適しています。改質された粉末は、液相焼結においてより均一な液相分布を形成し、偏析を低減し、タングステン粒子の再配列と結合を促進します。製造工程において、ニッケル銅粉末の表面処理は、合金の微細構造と特性を最適化します。例えば、電子産業用ヒートシンクでは、表面処理されたニッケル銅粉末は熱伝導率と界面接合強度を向上させます。医療用コリメータでは、濡れ性の向上により多孔性が低下し、放射線遮蔽効率が向上します。プロセス最適化においては、洗浄液の環境適合性と処理環境の清浄性を重視し、二次汚染を回避する必要があります。品質管理では、XPS または EDS 分析による表面化学状態の確認に加え、SEM による粉末形態観察を行います。

## 5.2 粉末冶金プロセス

粉末冶金は、タングステン - ニッケル - 銅合金を製造する主な方法です。タングステン粉末、ニッケル粉末、銅粉末を混合し、加圧成形して焼結することで、高密度の合金構造を形成します。このプロセスは、成分比率を正確に制御し、微細構造を最適化し、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、電子産業用バランスブロックなどの高性能要件を満たすことができます。粉末冶金プロセスには、粉末混合、加圧成形、液相焼結、後処理（熱間静水圧成形や熱処理など）などのステップが含まれます。その中でも、粉末混合と加圧成形は、均一なピレットを形成するための鍵であり、焼結プロセス中の粒子の再配列、液相分布、密度に直接影響します。このプロセスは、合金性能の一貫性と信頼性を確保するために、高純度の原材料と精密な設備を用いて、クリーンな環境で実施する必要があります。

### 5.2.1 粉末混合プロセスパラメータ

粉末混合プロセスは粉末冶金の最初のステップであり、設計された割合に従ってタングステン粉末、ニッケル粉末、銅粉末を均一に混合し、成分が均一に分布した粉末混合物を形成し、その後のプレスおよび焼結の基礎を築くことを目的としています。均一な粉末混合は、合金の微細構造の均一性を確保し、成分の偏析や過度の多孔性を回避し、密度、機械的特性、非磁性特性を向上させることができます。主成分であるタングステン粉末は高密度と高硬度を提供し、結合相であるニッケル粉末と銅粉末は靱性と熱伝導性を高めます。粉末混合プロセスの成功は、粉末粒子のサイズ、形態、混合装置、およびプロセス条件を最適化して、粉末粒子が完全に接触し、均一に分散されることにかかっています。

粉体混合は、通常、機械混合またはボールミル混合技術を採用します。機械混合は、V型ミキサーまたは三次元ミキサーを使用し、容器内の粉体粒子を回転または振動によって転がり混ぜるため、大規模生産に適しています。ミキサーは、粒子形態の損傷やわずかな凝集を引き起こす過剰な混合を避けるために、高精度の速度制御が必要です。ボールミル混合は、ボールミルに粉碎媒体（ジルコニアボールなど）を追加し、衝突と摩擦を利用して粉体の均一な分散を実現するため、高精度の小ロット生産に適しています。ボールミル処理中は、ボールと材料の比率と粉碎時間を制御し、粒子の破損や不純物（酸素や鉄など）の混入を引き起こす過剰な粉

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

碎を回避する必要があります。粉体の酸化を防ぎ、ニッケル銅粉の表面活性を維持するために、混合環境は高純度不活性ガス（アルゴンなど）または真空条件下で行う必要があります。

粉末混合プロセスは、粉末の粒径マッチングと混合均一性を最適化することです。タングステン粉末は通常、粒径が大きく、ニッケル粉末と銅粉末はより微細です。適切な粒径マッチングは、混合物の充填密度を高め、プレスおよび焼結中の緻密化を促進します。粉末の形態も重要です。球状化されたタングステン粉末は高い流動性を有し、均一な混合を促進します。ニッケル粉末と銅粉末の表面処理（化学洗浄など）は、酸化物層を除去し、粒子間の接触と液相焼結の濡れ性を向上させます。プロセス条件の最適化には、混合時間、回転速度、環境制御が含まれます。適切な混合時間は均一性を確保し、混合時間が長すぎると粒子の凝集や表面損傷を引き起こす可能性があります。少量の潤滑剤を添加すると粉末の流動性が向上しますが、焼結前に炭素残留物を避けるために除去する必要があります。

実際の生産において、粉末混合プロセスの均一性は合金の性能に直接影響します。例えば、医療用遮蔽部品では、均一な成分分布が放射線吸収効率と非磁性を確保します。航空宇宙用カウンターウェイトでは、均一な粉末混合が密度の一貫性を向上させ、重心の安定性を確保します。品質管理では、サンプリング分析（XRF または ICP-AES）によって成分比率を検証し、レーザー粒度分布計と SEM によって混合の均一性と粒子形態を観察します。プロセス最適化では、不純物混入を避けるため、装置の清浄度と粉末の純度（>99.9%）に重点を置く必要があります。

## 5.2.2 プレス技術

プレス技術は粉末冶金プロセスにおける重要なステップです。均一に混合されたタングステン、ニッケル、銅の粉末をプレスして、一定の形状と強度を持つブランクを作製し、その後の焼結の基礎を築きます。プレスの品質は、ブランクの密度、形状精度、焼結性能に直接影響し、ひいては合金の最終的な特性（高密度、強度、靱性など）を決定します。プレスでは、ブランクの構造的完全性を維持しながら、粉末粒子を密に充填し、気孔率を低減する必要があります（初期の気孔率は約 20%~30%）。これは、複雑な形状の航空宇宙用カウンターウェイト、医療用コリメータ、または電子産業のヒートシンクに適しています。プレス技術では、ブランクが焼結要件を満たすことを保証するために、粉末特性と対象用途と組み合わせてプロセスパラメータを最適化する必要があります。

プレス成形では、通常、冷間プレスまたは静水圧プレス技術が採用されます。冷間プレスでは、油圧プレスまたは機械プレスを使用して粉末を金型に充填し、高圧下で特定形状のブランクに圧縮します。単純な形状（棒や板など）の部品の製造に適しています。金型設計では、粉末の流動性と圧縮率を考慮して、ブランク内の密度を均一に保ち、ひび割れや剥離を防ぐ必要があります。静水圧プレス（冷間静水圧プレス、CIP）は、粉末を柔軟な金型（ゴム袋など）に充填し、液体媒体中で全方向に均等な圧力をかけることで、高密度のブランクを形成します。複雑な形状や高精度部品に適しています。静水圧プレスは、ブランク内部の応力集中と多孔性を大幅に低減できるため、医療用シールド部品やフォトリソグラフィ装置のバランスブロックの製造に適しています。プレス成形の成功は、粉末特性とプロセス条件の最適化にかかっています。球状化タングステン粉末や表面処理されたニッケル銅粉末は流動性が高く、プレス

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

成形時により緻密な積層構造を形成し、ブランクの初期密度を高めることができます。粉末の粒度分布を適切に調整し、微細粒子が大きな粒子間の隙間を埋めることで、気孔率を低減する必要があります。少量のバインダー（ポリビニルアルコールなど）を添加すると、ブランクの成形強度を高めることができますが、焼結前に脱脂除去する必要があります。プレス圧力は、粉末の種類と目標密度に応じて調整する必要があります。圧力が高すぎると金型の摩耗やブランクの割れが発生する可能性があり、低すぎると密度不足になります。環境管理（クリーンルーム運転など）により、粉塵や不純物の混入を防ぎ、ブランクの純度を維持します。プレス後に脱脂処理を行い、低温加熱によりバインダーと潤滑剤を除去することで、焼結品質に影響を与える炭素残留物を回避します。

実際の生産において、プレス技術は合金の性能と用途に直接影響を及ぼします。例えば、軍用徹甲弾のコアでは、高密度ピレットが焼結後の合金の高密度と高強度を確保します。電子産業のヒートシンクでは、均一なピレット構造が熱伝導率と寸法精度を向上させます。品質管理では、密度測定（アルキメデス法）と顕微鏡観察を通じて、ピレットの均一性と多孔性を検証します。プロセス最適化では、高精度油圧装置や自動静水圧プレスシステムを用いて、金型の耐摩耗性と圧力の精密制御に重点を置く必要があります。

### 5.2.3 液相焼結プロセス

液相焼結プロセスは、タングステン - ニッケル - 銅合金の製造における重要なステップです。高温でニッケルと銅が液相を形成することでタングステン粒子を濡らし、粒子の再配列と緻密化を促進し、高密度で均一な微細構造を形成します。このプロセスは、タングステンの高い融点（約 3422℃）とニッケルと銅の低い融点（約 1300~1450℃）を利用して、液相の作用下でタングステン粒子の緊密な結合を実現し、合金の機械的特性（引張強度、靱性）、熱伝導性、非磁性特性を向上させます。液相焼結は、理論密度に近い合金を製造でき、厳しい品質要件を満たすことができるため、航空宇宙のカウンターウェイト、医療用シールド部品、電子産業のヒートシンクなどの高性能アプリケーションに最適な選択肢です。

液相焼結プロセスは、通常、真空または高純度不活性ガス（アルゴンなど）雰囲気中で行われ、酸化や不純物の混入を防ぎます。このプロセスは、加熱、断熱、冷却の 3 段階に分かれています。加熱段階では、均一に混合されたタングステン、ニッケル、銅のピレットをニッケルと銅の融点以上に加熱し、ニッケルと銅が溶けて液相を形成し、タングステン粒子の表面を濡らします。液相は表面張力が低く、濡れ性が良いため、液体のニッケルと銅はタングステン粒子間の隙間を素早く埋め、毛細管現象によって粒子の再配列を促進し、ピレットの多孔性を大幅に低減します。断熱段階は緻密化の核心です。液相は、溶解-再沈殿機構によってタングステン粒子に作用します。少量のタングステン原子が溶解し、粒子の接触点で再析出して焼結ネックを形成し、粒子間の結合力を高めます。冷却段階では、熱応力による亀裂の発生を防ぐため、冷却速度を制御する必要があります。同時に、ニッケル-銅の熔融相が凝固して安定した面心立方構造を形成し、タングステン粒子との強固な界面結合を形成する必要があります。

液相焼結の成功は、プロセス条件の最適化にかかっています。ニッケルと銅の比率（通常は 7:3 または 3.5:1.5）は、液相の量と流動性に影響します。ニッケル含有量が多いと濡れ性は

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

向上しますが、偏析が発生する可能性があります。銅含有量が多いと液相の融点が低下し、焼結には有利になりますが、強度の低下は避ける必要があります。焼結温度と保持時間を正確に制御することが重要です。温度が高すぎると、タングステン粒子が過度に成長したり、液相が失われたりする可能性があります。一方、温度が低すぎると、液相が不十分になり、密度が低下します。雰囲気制御では、高純度アルゴンまたは真空環境を使用して、非磁性特性や耐食性に影響を与える酸化物（ $WO_3$  や  $NiO$  など）の形成を防止します。ピレットの初期密度（プレスによって最適化）も焼結効果に影響します。高密度ピレットは気孔率を低減し、最終密度を高めることができます。

実際の生産においては、液相焼結法が合金の高性能を保証します。例えば、医療用コリメータでは、高密度で均一な微細構造が優れた放射線遮蔽性能を提供し、航空宇宙用カウンターウェイトでは、焼結ネックの強力な接合力が高い強度と耐振動性を確保します。品質管理では、密度測定（アルキメデス法）、焼結ネック形態の SEM 観察、相構造の XRD 分析を通じてプロセス効果を検証します。プロセスの最適化には、温度曲線と雰囲気純度の精密制御、高精度焼結炉とオンライン監視システムの活用が不可欠です。

### 5.3 高度な調製技術

航空宇宙、医療、エレクトロニクス産業における複雑な形状や高精度部品の需要が高まるにつれ、従来の粉末冶金プロセスでは複雑な形状の製造に限界が生じています。金属射出成形(MIM)、積層造形 (AM)、放電プラズマ焼結 (SPS) といった高度な製造技術は、タングステンニッケル銅合金の製造に新たな選択肢を提供します。これらの技術は、形状の自由度を高め、製造サイクルを短縮し、微細構造を最適化することで、高性能アプリケーションのニーズを満たします。金属射出成形は、小型で複雑な形状の部品を製造できるという利点から、タングステンニッケル銅合金の製造における重要な技術となっており、医療機器、電子機器、軍事部品など、幅広く利用されています。

#### 5.3.1 金属射出成形

金属射出成形 (MIM) は、粉末冶金とプラスチック射出成形を組み合わせた高度な製造技術です。タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、流動性のあるスラリーを形成します。射出成形後、脱脂・焼結することで高密度合金部品を成形します。MIM は、医療用手術器具、電子産業向けコネクタ、航空宇宙向け小型カウンターウェイトなど、小型で複雑な形状の高精度部品の製造に特に適しています。その利点は、形状の自由度が高く、材料利用率が高く、生産効率が高いことです。従来のプレス成形と比較して、MIM は複雑な形状構造（薄壁や内部チャンネルなど）を実現し、後工程の機械加工を減らし、コストを削減できます。

MIM プロセスには、混合、射出成形、脱脂、焼結の 4 つの主要ステップが含まれます。混合段階では、タングステン、ニッケル、銅の粉末（タングステン 85%~97%、ニッケル 2%~10%、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

銅 1%〜8%の比率)をバインダー（ポリプロピレンやワックスベースのバインダーなど）と混合して、均一なスラリーを形成します。タングステン粉末は流動性を向上させるために球状化する必要があり、ニッケル粉末と銅粉末は結合力を高めるために表面洗浄する必要があります。粉末とバインダーが完全に分散されるように、高温攪拌装置で混合を行う必要があります。射出成形段階では、スラリーを精密金型に注入します。目標形状のグリーンボディを形成するために、金型設計では収縮と形状精度を考慮する必要があります。脱脂段階では、熱脱脂または溶剤脱脂によってバインダーが除去されます。通常、ブランクの割れや変形を防ぐため、低温でゆっくり加熱されます。焼結段階では液相焼結法が採用されており、ニッケルと銅が高温で液相を形成してタングステン粒子を濡らし、緻密化を促進し、理論密度に近い合金構造を形成します。

MIM の成功は、プロセスパラメータの最適化にかかっています。スラリーの流動性とブランクの密度を向上させるには、粉末の粒径を細かく均一に分散させる必要があります。バインダーの選択と割合は、射出成形の滑らかさと脱脂効率に影響を及ぼし、流動性と成形体強度のバランスをとる必要があります。焼結プロセスでは、温度と雰囲気とを正確に制御する必要があり、高純度アルゴンまたは真空環境を使用して酸化を防ぎ、非磁性を確保します。MIM 部品の最終的な性能は、後処理（熱間静水圧プレスやアニールなど）によってさらに最適化され、残留気孔と応力が除去され、強度と靱性が向上します。品質管理では、微細構造の SEM 観察、密度測定、機械的特性試験を通じて部品の性能を検証します。これらの試験は、ASTM B777 または GB/T 26036 規格に準拠する必要があります。

実際の生産において、MIM 技術はタングステンニッケル銅合金の製造柔軟性を大幅に向上させました。例えば、医療分野では、MIM で製造された複雑な形状のコリメータは、高精度と放射線遮蔽効率を備えています。また、電子産業では、MIM で製造されたマイクロヒートシンクやコネクタは、高い熱伝導性と非磁性を両立しています。プロセス最適化では、金型設計の高精度とバインダーの環境配慮に重点を置き、環境への影響を低減するために、分解性または無毒のバインダーを使用する必要があります。将来的には、MIM と積層造形（3D プリント金型など）を組み合わせることで、より複雑な形状の迅速な製造が可能になり、タングステンニッケル銅合金のハイテク分野への応用可能性を高めることができます。

### 5.3.2 熱間等方圧プレス技術

熱間静水圧プレス（HIP）は、高温高压の不活性ガス環境でタングステン - ニッケル - 銅合金ピレットに等方性圧力をかけることで微細孔を除去し、密度を高め、微細構造の均一性を改善する高度な粉末冶金後処理プロセスです。この技術は、航空宇宙用カウンターウェイト、医療用シールド部品、電子産業用ヒートシンクなどの高性能部品の製造に特に適しており、合金の密度、機械的特性（引張強度、靱性）、耐食性を大幅に向上させることができます。熱間静水圧プレスは、液相焼結後の構造をさらに圧縮して、従来の焼結で残る可能性のある小さな欠陥を補うため、合金は理論密度に近くなり、高信頼性アプリケーションのニーズを満たします。

熱間静水圧プレス法は、通常、専用の HIP 装置で高純度アルゴンを圧力媒体として用いて行わ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

れます。このプロセスは、加熱、断熱、冷却の3つの主要な段階で構成されています。加熱段階では、焼結タングステン-ニッケル-銅合金ピレットを密閉空洞に入れ、ニッケル-銅結合相の融点（約1200～1400℃）に近い温度まで加熱して材料を可塑性にします。断熱段階では、高静水圧（通常はアルゴン雰囲気）を適用して、ピレット内部の微細孔を全方向に均等な圧力で圧縮し、タングステン粒子とニッケル-銅結合相の密着を促進します。ニッケル-銅相は高温で一定の流動性を持ち、細孔を埋めて界面の結合力を高めます。タングステン粒子は体心立方構造を維持し、安定した骨格を提供します。熱応力による亀裂を回避し、合金構造の安定性と性能の均一性を確保するために、冷却段階はゆっくりと実行する必要があります。

熱間静水圧プレス成功の鍵は、プロセス条件の最適化にかかっています。温度と圧力の正確な制御が鍵となります。温度は、ニッケル銅相に十分な流動性を持たせつつ、タングステン粒子の過剰な溶解を避ける必要があります。圧力は、気孔率をなくすのに十分な圧力であるべきですが、装置の過負荷を避けるために高すぎてもいけません。合金の非磁性または耐腐食性に影響を与える酸化物（ $WO_3$ やNiOなど）の形成を防ぐには、高純度アルゴンが不可欠です。ピレットの初期密度（粉末の混合とプレスによって最適化）は、HIP効果に影響します。初期の気孔率が低いピレットは、理論密度に近い状態に効率的に到達できます。熱間静水圧プレスは、液相焼結と単一のプロセスステップとして組み合わせることも可能で、粉末プレスされたピレットから最終的な高密度部品まで直接製造できるため、生産サイクルを短縮できます。実際の生産では、熱間静水圧プレスにより、タングステン-ニッケル-銅合金の性能が大幅に向上します。例えば、航空宇宙分野では、HIP処理されたカウンターウェイトは密度と耐振性が高く、重心の安定性と長期的な信頼性を確保します。医療用コリメータでは、理論密度に近い構造により、放射線遮蔽効率と耐腐食性が向上します。品質管理では、密度測定（アルキメデス法）、微細構造のSEM観察、機械的特性試験などを通じてHIP効果を検証します。プロセスの最適化では、機器の高圧シールと温度均一性に重点を置き、自動制御システムを用いて精度を向上させる必要があります。

#### 5.4 後処理と加工

後処理と機械加工は、タングステンニッケル銅合金の製造工程における最終段階です。焼結または熱間静水圧プレス後部品の寸法精度、表面品質、性能を最適化し、航空、医療、電子産業の厳しい要件を満たすことを目的としています。後処理プロセスには、熱処理、表面処理、機械加工の各工程が含まれており、残留応力の除去、表面仕上げの向上、複雑な形状の実現を目指しています。タングステンニッケル銅合金は硬度と靱性が高いため、加工は困難ですが、最適化されたプロセスにより、高精度で高品質な最終部品を実現できます。後処理と機械加工は、部品の機能性を向上させるだけでなく、過酷な環境における耐久性と信頼性も向上させます。

熱処理は後加工における重要な工程であり、通常、アニール処理または時効処理を含みます。その目的は、焼結またはHIP処理中に発生する残留応力を除去し、微細組織を最適化し、靱性と耐食性を向上させることです。アニール処理は、低温（約800～1000℃）での絶縁拡散により、ニッケル-銅結合相中の結晶欠陥（転位や粒界応力など）を修復し、タングステン粒子の安定性を維持します。時効処理は、ニッケル-銅相中に微量析出相の形成を促進し、低温での長期絶縁により結合相の強度を高めます。熱処理は、酸化を防ぎ、合金の非磁性および化学的

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

安定性を確保するために、高純度アルゴンまたは真空環境で行う必要があります。熱処理された部品は、より均一な機械的特性と高い耐疲労性を示し、航空宇宙用カウンターウェイトや医療用手術器具に適しています。

表面処理は、研磨、化学不動態化、またはコーティング技術を通じて、部品の表面品質と性能を向上させます。機械研磨または電気化学研磨は、表面を滑らかにし、表面欠陥（傷や微小亀裂など）を低減し、耐食性と美観を向上させ、特に医療用シールドや電子ヒートシンクに適しています。化学不動態化は、酸溶液処理によって保護酸化物層を形成し、耐食性を高め、海洋環境や滅菌環境での用途に適しています。コーティング技術（PVD TiN または DLC コーティングなど）は、表面硬度、耐摩耗性、耐酸化性をさらに向上させ、部品の寿命を延ばすことができます。熱伝導性や非磁性に影響を与える過度に厚いコーティングを避けるため、表面処理はアプリケーションの要件に応じて選択する必要があります。

機械加工には、旋削、フライス加工、研削、放電加工などがあり、複雑な形状や高精度の寸法を実現するために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は硬度が高いため、超硬工具またはダイヤモンド工具を使用する必要があります。また、熱応力と工具摩耗を低減するために、加工工程では低速切削と十分なクーラントが必要です。放電加工は複雑な形状（内部チャネルや薄肉構造など）に適しており、電気パルスによって材料を除去することで高精度を維持します。加工された部品は、残留応力や表面損傷がないことを確認するために、洗浄および検査を行う必要があります。品質管理では、寸法測定（CMM）、表面粗さ試験、SEM 観察を通じて、加工精度と表面品質を検証します。

実際の生産においては、後処理と加工により、タングステンニッケル銅合金の適用性が大幅に向上しています。例えば、フォトリソグラフィ機のバランスブロックでは、精密機械加工によってサブナノメートルの精度が確保され、表面研磨によって熱伝導率と耐腐食性が向上します。また、軍用徹甲弾の芯材では、熱処理によって靱性が向上し、機械加工によって複雑な形状が実現されています。プロセスの最適化では、工具の耐摩耗性と加工環境の清浄度に重点を置き、自動化された加工設備を使用して効率を向上させる必要があります。品質管理では、非破壊検査（超音波や X 線など）を通じて部品の完全性を検証します。

#### 5.4.1 精密加工

精密機械加工は、タングステンニッケル銅合金の後加工における重要なプロセスです。焼結または熱間静水圧プレスされたブランクを、航空宇宙、医療、電子産業の厳しい要件を満たす高精度寸法と複雑な形状を持つ最終部品に加工するために用いられます。タングステンニッケル銅合金は硬度と靱性が高いため、加工は困難ですが、工具とプロセスを最適化することで、サブミリメートル、さらにはサブミクロンの精度を実現できます。これは、リソグラフィ装置の振動低減部品、医療用コリメータ、軍用徹甲弾コアなどに適しています。精密機械加工は、部品の形状と寸法精度を保証するだけでなく、表面仕上げを向上させ、性能と信頼性を高めます。

精密機械加工には、旋削加工、フライス加工、研削加工、放電加工（EDM）などの技術が含ま

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

れます。旋削加工とフライス加工では、数値制御（CNC）工作機械を用いて合金を切削し、棒材や板材などの定形部品の製造に適しています。タングステンは硬度が高いため、超硬合金またはダイヤモンドコーティングされた工具を使用する必要があります。また、熱応力と工具摩耗を低減するために、加工工程では低切削速度と十分なクーラント（水性エマルジョンなど）が必要です。研削加工では、砥石車や研磨剤を用いて表面をさらに研磨し、高い仕上げ精度と寸法精度を実現します。これは、医療用シールド部品や電子機器用ヒートシンクの表面要件に特に適しています。放電加工（EDM）は、電気パルスを用いて導電性材料から微量の材料を除去する加工方法で、航空宇宙産業における小型カウンターウェイトの微細構造加工など、複雑な形状や内部チャネルの製造に適しています。放電加工は直接接触することなく高精度を実現できるため、工具摩耗と材料応力を低減できます。

タングステン - ニッケル - 銅合金の特性に合わせて加工プロセスを最適化する必要があります。ニッケル - 銅結合相の靱性により、加工中に合金が工具に付着する可能性があり、切削速度と送り速度を最適化することで表面バリを低減する必要があります。タングステン粒子の硬度が高いため、工具の摩耗が早くなる可能性があり、加工の一貫性を確保するために、工具を定期的に点検・交換する必要があります。部品の性能に影響を与えるほこりや不純物を避けるために、加工環境を清潔に保つ必要があります（クリーンルーム作業）。表面腐食や残留物を避けるために、クーラントの選択では環境保護と合金に対する非腐食性を考慮する必要があります。加工部品は、きれいな表面を確保するために、超音波洗浄して切りくずとクーラントを除去する必要があります。

実際の生産において、精密加工はタングステンニッケル銅合金部品の適用性能を大幅に向上させます。例えば、フォトリソグラフィ機のバランスブロックでは、CNC加工によってサブナノメートルの精度が達成され、プラットフォームの安定性が確保されています。また、軍用徹甲弾の芯材では、放電加工によって複雑な幾何学形状が形成され、貫通性能が向上しています。品質管理では、三座標測定機（CMM）、レーザー干渉計、表面粗さ試験などを通じて、寸法精度と仕上がりを検証しています。プロセスの最適化では、自動化加工設備の統合と工具材料の耐摩耗性に重点を置き、インテリジェント CNC システムを活用して効率を向上させる必要があります。

#### 5.4.2 表面処理プロセス

表面処理は、タングステン - ニッケル - 銅合金の後処理における重要なステップであり、医療、電子、航空宇宙産業の特定の要件を満たすために、部品の表面仕上げ、耐食性、耐摩耗性、および美観を向上させることを目的としています。タングステン - ニッケル - 銅合金の表面品質は、過酷な環境（滅菌、海洋、高温環境など）での性能に直接影響します。表面処理は、表面状態を最適化することで、合金の耐食性、耐酸化性、および機能性を向上させます。表面処理プロセスには、機械研磨、化学不動態化、電気化学研磨、コーティング技術などがあり、アプリケーションの要件に応じて適切な処理方法を選択する必要があります。

機械研磨は、一般的に用いられる表面処理方法です。部品の表面を砥石、研磨布、研磨剤など

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

で徐々に研磨し、加工痕、傷、軽微な欠陥を除去して鏡面仕上げを実現します。研磨後の表面平滑性が向上し（表面粗さが減少）、美観が向上するだけでなく、腐食性媒体の付着点も減少するため、医療用コリメータや電子ヒートシンクなどの用途に適しています。研磨には、徐々に精製された研磨剤を使用する必要があり、研磨圧力と速度を制御することで、過熱や表面応力の集中を回避します。電気化学研磨は、電解液に電流を流して合金表面をわずかに溶解し、表面を滑らかにして薄い不動態膜を形成し、耐食性をさらに向上させます。特に、海洋環境における船舶のカウンターウェイトに適しています。

化学的不動態化は、酸性または中性溶液（希硝酸またはクエン酸溶液など）に部品を浸漬することにより、表面に緻密な酸化物保護層（主に NiO）を形成し、耐食性と耐酸化性を向上させます。不動態化処理では、溶液の濃度と浸漬時間を制御して、過度の腐食や表面劣化を回避する必要があります。処理された部品は、滅菌環境または湿気の多い環境でより高い安定性を示し、医療機器の長期使用に適しています。コーティング技術（物理蒸着 PVD または化学蒸着 CVD など）は、表面に材料の薄い層（TiN、DLC、CrN など）を堆積することにより、表面硬度、耐摩耗性、耐腐食性を大幅に向上させます。PVD TiN コーティングは、部品に金色の外観と優れた耐摩耗性を提供し、航空宇宙のカウンターウェイトに適しています。DLC コーティングは摩擦係数が低く、電子産業の摺動部品に適しています。コーティングの厚さは、熱伝導性や非磁性に影響を与えないように正確に制御する必要があります。

表面処理は、粉塵や油による汚染を避けるため、クリーンな環境で行う必要があります。処理前には、部品を超音波洗浄して加工残留物を除去する必要があります。処理後は、脱イオン水ですすぎ、乾燥させて二次汚染を防ぐ必要があります。品質管理では、表面粗さ試験（プロファイロメーターなど）、表面形態の SEM 観察、塩水噴霧試験などを通じて耐食性を検証します。プロセス最適化では、処理液の環境親和性と設備の高精度に重点を置き、自動研磨装置やコーティング装置を使用して一貫性を向上させる必要があります。実際の生産では、表面処理によって合金の適用性能が大幅に向上します。たとえば、医療用 CT シールド部品では、電気化学研磨によって表面仕上げと消毒耐性が向上し、フォトリソグラフィ用ヒートシンクでは、PVD コーティングによって耐摩耗性と熱伝導性が向上します。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 第6章 電子情報分野におけるタングステン-ニッケル-銅合金の応用

タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、優れた熱伝導性、低熱膨張係数などの特性から、電子情報分野で広く利用されており、特にチップパッケージ、放熱管理、高精度カウンターウェイト部品に用いられています。この合金は粉末冶金プロセスで製造され、タングステンの高密度とニッケル - 銅結合相の靱性および熱伝導性を兼ね備えており、電子機器の熱管理、電磁両立性、寸法安定性などに対する高い要求を満たすことができます。5G技術、人工知能、モノのインターネットの急速な発展に伴い、電子情報分野における高性能材料の需要が高まっています。タングステン - ニッケル - 銅合金は、その独特の物理的・化学的特性から、チップパッケージ、RF モジュール、フォトリソグラフィ装置にとって理想的な選択肢となっています。

### 6.1 チップパッケージと放熱

チップのパッケージングと放熱は、電子情報分野の中核技術であり、チップを基板に固定し、動作中に発生する熱を効率的に管理することで、デバイスの高性能と長寿命を確保します。タングステン - ニッケル - 銅合金は、チップパッケージの放熱基板、ヒートシンク、カウンターウェイト部品として使用されます。高い熱伝導率、低い熱膨張係数、非磁性の特性により、熱を効果的に分散し、寸法安定性を維持し、電磁干渉を回避して、高出力および高周波電子機器のニーズを満たします。合金の微細構造は、液相焼結および熱間静水圧プレスプロセスを通じて最適化され、高密度のタングステン粒子とニッケル - 銅結合相ネットワークを形成し、優れた熱伝導性と機械的安定性を提供します。その用途は、高出力デバイス、5G RF モジュール、リソグラフィ装置などの高精度機器をカバーし、電子情報産業の性能向上と小型化の重要なサポートを提供します。

#### 6.1.1 高出力デバイス放熱基板

高出力デバイスの放熱基板は、チップパッケージの重要なコンポーネントです。動作中にチップから発生する高熱をすばやく放散し、過熱による性能低下やデバイスの故障を防ぐために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、優れた熱伝導性と低い熱膨張係数により、高出力デバイス（パワーアンプ、GPU、レーザーダイオードなど）の放熱基板に最適な材料です。合金の高い熱伝導率は銅の急速な熱伝導性によるもので、チップから発生した熱を放熱システムにすばやく伝達できます。低い熱膨張係数はチップ材料（シリコンや窒化ガリウムなど）の熱膨張特性と一致し、熱応力による変形やひび割れを軽減し、パッケージ構造の長期安定性を確保します。非磁性特性は電磁干渉を回避し、高周波電子機器に適しています。製造工程では、粉末冶金プロセスを経てタングステン - ニッケル - 銅合金を高密度基板に成形し、液相焼結によりニッケル - 銅結合相を均一に分散させ、熱伝導効率を高めます。さらに、熱間静水圧プレスにより微細孔が除去され、基板の密度と強度が向上します。精密機械加工と表面処理（電気化学研磨やPVDコーティングなど）により、基板の表面仕上げが最適化され、熱抵抗が低減し、チップとの接触効率が向上します。タングステン - ニッケル - 銅基板の表面は、通常、溶接または接合プロセスによってチップと結合されるため、熱サイクル中

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に脱落したり割れたりしないように、界面がしっかりと接合されていることを確認する必要があります。高出力デバイスでは、タングステン - ニッケル - 銅放熱基板を適用することで、デバイスのパフォーマンスが大幅に向上します。たとえば、高性能コンピューティング（HPC）チップでは、基板の急速な放熱により、高負荷時のチップの安定性が確保されます。レーザーダイオードでは、低い熱膨張係数が光学部品の位置精度を維持します。最適化の方向性としては、ニッケルと銅の比率を調整して熱伝導率を向上させること、ナノコーティング（DLC など）を使用して表面熱抵抗を低減すること、あるいは積層造形技術を組み合わせて複雑な放熱構造をカスタマイズすることなどが挙げられます。品質管理では、熱伝導率試験（レーザーフラッシュ法）と熱膨張係数測定によって基板特性を検証し、電子業界標準（JEDEC など）への準拠を確保しています。

### 6.1.2 5G RF モジュールカウンターウェイトヒートシンク

5G RF モジュール用カウンターウェイトヒートシンクは、5G 通信機器の主要部品です。放熱機能とカウンターウェイト機能の両方を備え、高周波動作時のモジュールの熱管理と重心安定性を確保します。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、高熱伝導性、低熱膨張係数などの特徴から、RF モジュール用カウンターウェイトヒートシンクに最適な材料です。5G RF モジュールは、高周波信号（ミリ波）で動作し、大量の熱を発生する必要があり、小型化と高精度が求められます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、熱を素早く分散させ、寸法安定性を維持し、電磁干渉を回避できるため、モジュールの高性能要件を満たします。高密度特性により、限られたスペースで十分なカウンターウェイトを提供し、モジュールの重心分布を最適化し、振動による信号伝送への影響を低減します。

製造工程では、タングステン・ニッケル・銅合金を用いて、金属射出成形（MIM）または粉末冶金法により、複雑な形状のカウンターウェイトヒートシンクを製造します。MIM 技術は、粉末をバインダーと混合し、射出成形、脱脂、焼結することで高精度部品を形成し、小型モジュールの複雑な形状要件に適合します。液相焼結により、ニッケル銅の液相がタングステン粒子を濡らして緻密な微細構造を形成し、熱伝導率と機械的特性を向上させます。表面処理（PVD TiN コーティングや電気化学研磨など）により、耐食性と表面仕上げが向上し、熱抵抗が低減し、耐酸化性が向上します。後工程の精密機械加工により、部品の寸法精度が確保され、5G モジュールの厳しい公差要件を満たします。

5G RF モジュールでは、タングステン - ニッケル - 銅カウンターウェイトヒートシンクにより、モジュールの性能が大幅に向上します。たとえば、基地局アンテナモジュールでは、合金の高密度によりアンテナの重心の安定性が確保され、熱伝導性により RF チップの熱を素早く分散させて信号伝送の安定性を維持します。モバイル端末（スマートフォンなど）では、小型カウンターウェイトヒートシンクがモジュールのコンパクト設計をサポートし、熱管理効率を確保します。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、微細構造設計（ハニカム放熱チャネルなど）による放熱機能の強化、熱間静水圧プレス技術の組み合わせによる密度のさらなる向上などが挙げられます。品質管理では、密度測定、熱伝導率試験、磁化強度試験を通じて部品の性能を検証し、5G 通信規格（3GPP など）への準拠を確保し

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ています。

## 6.2 マイクロ波およびレーダー機器

マイクロ波・レーダー機器は、電子情報分野の中核技術であり、通信、航法、リモートセンシング、国防などに広く応用されています。高周波、高電力、複雑な環境下での機器の性能を確保するためには、高密度、非磁性、高熱伝導性、寸法安定性を備えた材料が必要です。タングステンニッケル銅合金は、その独特な物理的・化学的性質により、マイクロ波・レーダー機器のアンテナウェイト部品やシールド部品の優先材料となっています。高密度による精密な重心制御、非磁性による電磁干渉の回避、高熱伝導性、低熱膨張係数による熱管理と寸法安定性の確保、そして高温、振動、電磁干渉などの過酷な環境下における機器の信頼性要件の充足を実現します。この合金は、液相焼結と熱間静水圧プレス工程を経て緻密な微細組織を形成し、精密機械加工と表面処理を組み合わせることで、マイクロ波・レーダー機器の高精度要件を満たしています。

### 6.2.1 アンテナウェイトアセンブリ

アンテナウェイト部品は、マイクロ波およびレーダー機器の重要な部品であり、アンテナの重心分布を調整して、動的環境（衛星の移動や船舶の振動など）でのアンテナの安定性と指向精度を確保するために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度と非磁性のため、アンテナウェイト部品に最適な材料です。高密度特性により、合金は限られた体積内で十分な質量を提供し、アンテナシステムの重心位置を最適化し、振動や風荷重による偏差を低減できます。非磁性特性により、磁場干渉を回避し、高周波マイクロ波信号（Ku バンドやミリ波など）の伝送におけるアンテナの精度と安定性を確保します。合金の熱膨張係数が低いいため、温度変化（昼夜の温度差や高地の低温など）下での寸法安定性が確保され、アンテナの形状精度が維持されます。

準備プロセスでは、粉末冶金プロセスによってタングステン - ニッケル - 銅合金がアンテナウェイト部品の製造に使用され、通常は金属射出成形（MIM）または冷間静水圧プレス技術を使用して複雑な形状のピレットを形成し、アンテナシステムのコンパクトな設計要件を満たします。液相焼結により、ニッケル - 銅の液相がタングステン粒子を濡らして高密度の微細構造を形成し、ウェイト部品の密度と機械的特性が向上します。熱間静水圧プレスにより、微細孔がさらに除去され、密度が向上するため、衛星通信アンテナなどの高信頼性アプリケーションに適しています。精密機械加工（CNC フライス加工、EDM など）によりウェイト部品の寸法精度が保証され、表面処理（電気化学研磨、PVD コーティングなど）により耐腐食性と表面仕上げが向上し、信号の散乱や環境による浸食が軽減されます。

アンテナ用途において、タングステンニッケル銅製のウェイト部品は機器の性能を大幅に向上させます。例えば、5G 基地局アンテナでは、高密度ウェイトが高周波振動下でもアンテナ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の安定性を確保し、非磁性特性が信号干渉を回避します。衛星通信アンテナでは、低熱膨張係数が高高度環境下でも指向精度を維持します。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、微細構造設計（内部補強リブなど）による機械的特性の向上、積層造形技術との組み合わせによる複雑な形状のカスタマイズなどが挙げられます。品質管理では、密度測定、磁化強度試験、振動試験などを通じて部品の性能を検証し、マイクロ波通信規格への適合性を確保しています。

### 6.2.2 レーダーシールド部品

レーダーシールド部品は、レーダー機器内の電磁干渉を遮断し、漂遊信号を吸収し、または敏感な電子部品を保護して、高周波および高電力環境でのシステムの安定した動作を確保するために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、非磁性、高密度、優れた熱伝導性のため、レーダーシールド部品に適した材料です。非磁性特性により、磁場がレーダー信号に干渉するのを防ぎ、特に高感度レーダーシステム（フェーズドアレイレーダーなど）に適しています。高密度特性により、合金は電磁波を効果的に吸収・遮蔽し、信号漏洩や外部干渉を低減します。熱伝導性により、レーダー送信機または受信機によって発生した熱をすばやく分散させ、過熱による機器の性能低下を防ぎます。熱膨張係数が低いいため、高温または熱サイクル環境でも部品の寸法安定性が確保され、シールド効果に影響を与える変形を回避できます。

製造工程では、タングステンニッケル銅合金を用いて粉末冶金法または MIM 技術によりシールド部品を製造し、複雑な形状やコンパクトな設計のニーズに対応します。液相焼結により、ニッケル銅結合相が均一に分布した緻密な微細構造が形成され、熱伝導率と機械的特性が向上します。熱間静水圧プレスにより残留気孔が除去され、シールド部品の密度と耐久性が向上し、軍用レーダーや航空レーダーの厳しい要件にも適合します。精密機械加工（研削加工や放電加工など）により高精度な形状を実現し、部品とレーダーシステムをシームレスに統合します。表面処理（PVD CrN コーティングや化学パッシベーションなど）により耐食性と耐酸化性が向上し、湿気や高温環境における部品の寿命が延びます。

レーダー用途において、タングステン・ニッケル・銅シールド部品はシステムの信頼性を大幅に向上させます。例えば、軍用フェーズドアレイレーダーでは、非磁性シールド部品が信号干渉を回避し、高密度化によって電磁シールド効率を向上させます。気象レーダーでは、熱伝導性によって高出力送信機の熱管理が確保されます。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の調整による導電性の向上、多層複合コーティングによるシールド効果の向上、あるいは 3D プリンティング技術を組み合わせた複雑なシールド構造の製造などが挙げられます。品質管理では、電磁シールド試験（MIL-STD-461 など）、熱伝導性試験、塩水噴霧試験を通じて部品の性能を検証し、レーダーシステム規格（IEC 61000 など）への準拠を確保しています。

### 6.3 微小電気機械システム

微小電気機械システム（MEMS）は、マイクロエレクトロニクスとマイクロメートルからミリメ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ートル規模の機械構造を統合する技術です。スマートフォン、自動車、医療機器、航空宇宙分野で、加速度計、ジャイロスコープ、マイクロアクチュエータなど、幅広く利用されています。MEMS デバイスには、カウンターウェイトの小型化を実現するための高密度材料、電磁干渉を回避するための非磁性材料、微小空間の熱管理のための優れた熱伝導性、寸法安定性を確保するための低熱膨張係数材料が必要です。高密度で非磁性の特性を持つタングステン - ニッケル - 銅合金は、微小な体積で十分な質量を提供し、MEMS デバイスの重心分布を最適化します。また、高い熱伝導性と低い熱膨張係数により、熱管理と長期安定性が確保されるため、高精度で動的な環境での用途に適しています。これらの合金は、金属射出成形（MIM）または精密粉末冶金法によって製造され、精密機械加工と表面処理を組み合わせることで、MEMS の小型化と高精度製造の要件を満たします。

### 6.3.1 慣性センサーカウンターウェイト

慣性センサーのカウンターウェイトは、MEMS 加速度センサーやジャイロスコープの中核部品です。センサーマスのブロックの慣性特性を調整し、加速度や角速度に対する高感度応答を確保するために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度で非磁性であるため、慣性センサーのカウンターウェイトに最適な材料です。高密度特性により、合金は小さな体積で十分な質量を提供し、センサーの感度と応答精度を向上させることができ、スマートフォンやウェアラブルデバイス用の MEMS センサーなどの小型設計に適しています。非磁性特性により、センサー信号への磁場の干渉を回避し、複雑な電磁環境（自動車用電子機器や航空ナビゲーションシステムなど）での高精度測定を保証します。合金の熱膨張係数が低いため、温度変化下でもカウンターウェイトの寸法安定性が確保され、センサーの長期信頼性が維持されます。

準備プロセスでは、タングステン - ニッケル - 銅合金を使用して、金属射出成形（MIM）技術によりマイクロウェイトを製造し、MEMS デバイスの複雑な形状と高精度の要件を満たします。MIM プロセスでは、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂と液相焼結により緻密な構造を形成します。ニッケル - 銅の液相はタングステン粒子を濡らし、多孔性を低減し、密度と機械的特性を向上させます。精密機械加工（マイクロミリングやレーザー加工など）により、カウンターウェイトの寸法精度がミクロンレベルの許容誤差にさらに最適化されます。表面処理（電気化学研磨や PVD コーティングなど）により、表面仕上げが改善され、摩擦と熱抵抗が低減し、MEMS 構造とのシームレスな統合が保証されます。マイクロコンポーネントの性能に影響を与える塵埃汚染を避けるため、処理と取り扱いにはクリーンルームで行う必要があります。

慣性センサー用途において、タングステンニッケル銅カウンターウェイトはデバイス性能を大幅に向上させます。例えば、スマートフォンの加速度センサーでは、高密度カウンターウェイトが動き検出の感度を向上させ、非磁性特性が電磁干渉環境における安定した動作を保証します。自動車のエアバッグシステムでは、カウンターウェイトの寸法安定性と熱伝導性が、極度の温度下でもセンサーの信頼性を保証します。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、慣性を維持しながら質量を削減するための微細構造設計（多孔質カウンターウェイトなど）の使用、または積層造形技術の組み合わせによる高精度小型化の

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実現などが挙げられます。品質管理では、密度測定、磁化強度試験、振動試験を通じてカウンターウェイトの性能を検証し、MEMS 規格（ISO 16063 など）への準拠を確保します。将来、MEMS センサーが高感度化と小型化に向けて進化するにつれて、タングステンニッケル銅カウンターウェイトはナノ材料を統合することで性能をさらに最適化できます。

### 6.3.2 マイクロバランスコンポーネント

マイクロバランス部品は、MEMS アクチュエータ、発振器、またはマイクロミラーの主要部品です。マイクロメカニカル構造の動的バランスと重心分布を調整し、高周波振動や急速な動きにおける安定性を確保するために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、低熱膨張係数のため、マイクロバランス部品に適した材料です。高密度特性により、合金は小さな体積で十分な質量を提供し、MEMS デバイス（光学マイクロミラーやマイクロジャイロスコープなど）の重心位置を最適化し、振動オフセットや機械的共振を低減します。非磁性特性は電磁干渉を回避し、高精度光学機器や通信機器に適しています。低熱膨張係数は、温度変化下における部品の幾何学的安定性を確保し、MEMS 構造の動作精度を維持します。

準備プロセスでは、タングステン - ニッケル - 銅合金を使用して、MIM またはマイクロ粉末冶金プロセスでマイクロバランス部品を製造し、複雑な形状とミクロンレベルの精度の要件を満たします。MIM プロセスでは、射出成形によって小さなピレットを形成し、液相焼結と熱間静水圧プレスにより密度がさらに向上し、微細孔が除去され、機械的特性と熱伝導性が向上します。精密機械加工（レーザーマイクロマシニングや電気放電加工など）は、ミクロンレベルで制御された公差で高精度の幾何学的形状を実現し、MEMS 発振器の小さな構造に適しています。表面処理（DLC コーティングや化学パッシベーションなど）は、耐摩耗性と耐腐食性を向上させ、動的環境での部品の寿命を延ばします。粉塵汚染がマイクロ部品の性能に影響を与えないように、処理プロセスは高潔度の環境で実行する必要があります。

MEMS アプリケーションにおいて、タングステンニッケル銅（TNC）マイクロバランス部品はデバイス性能を大幅に向上させます。例えば、レーザースキャン用マイクロミラーでは、高密度バランス部品が振動子の重心分布を最適化し、スキャン精度と速度を向上させます。マイクロジャイロスコープでは、非磁性と低熱膨張係数により、高い感度と環境適応性が確保されます。最適化の方向性としては、微細構造設計（中空構造など）による質量削減、ナノコーティングによる表面特性の向上、3D プリント技術の組み合わせによる複雑な形状の迅速なカスタマイズなどが挙げられます。品質管理では、CMM による寸法精度測定、熱伝導率試験、電磁シールド試験などを通じて部品性能を検証し、MEMS 規格への準拠を確保しています。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第7章 エネルギーと産業におけるタングステン・ニッケル・銅合金の応用

タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、優れた熱伝導性、低熱膨張係数などの特性により、エネルギーおよび産業分野で優れた応用可能性を示しており、特に新エネルギー車、航空宇宙、産業機器などの需要の高いシナリオで使用されています。この合金は粉末冶金プロセスで製造され、タングステンの高密度とニッケル - 銅結合相の靱性および熱伝導性を兼ね備えており、エネルギー機器の熱管理、重量バランス、電磁両立性に関する厳しい要件を満たすことができます。クリーンエネルギーと効率的な産業技術に対する世界的な需要の増加に伴い、新エネルギー車の分野でのタングステン - ニッケル - 銅合金の応用はますます重要になり、特にモーターローターカウンターウェイトやバッテリーパックの放熱基板で使用されています。

### 7.1 新エネルギー車分野

新エネルギー車（純電気自動車とハイブリッド車を含む）は、効率的なモーターシステムとバッテリー管理システムに依存しており、材料の密度、熱伝導性、非磁性、寸法安定性に高い要求があります。タングステン - ニッケル - 銅合金は、そのユニークな物理的および化学的特性により、モーターとバッテリーシステムの主要部品に最適な材料となっています。高密度特性により、正確な重量バランスを実現し、モーターローターの動的バランスを最適化します。高い熱伝導性と低い熱膨張係数は、バッテリーシステムの熱管理をサポートし、動作の安定性と安全性を維持します。非磁性特性は電磁干渉を回避し、モーターと電子システムの性能を確保します。この合金は、液相焼結、熱間静水圧プレス、精密機械加工プロセスによって製造され、新エネルギー車の高精度と耐久性のニーズを満たします。

#### 7.1.1 モーターローターの重量

モーターローターカウンターウェイトは、新エネルギー車の駆動システムの中核部品です。ローターの重心分布を調整し、高速回転時のモーターの動バランスを確保し、振動と騒音を低減し、効率と寿命を向上させるために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度と非磁性の特性から、モーターローターカウンターウェイトに適した材料です。高密度特性により、限られた体積内で十分な質量を提供し、ローターの重心位置を正確に制御し、高速回転時の偏心振動を低減し、モーターベアリングの寿命を延ばすことができます。非磁性特性は磁場干渉を回避し、高周波電磁環境におけるモーターの安定した動作を保証します。特に、永久磁石同期モーターや誘導モーターに適しています。合金の低熱膨張係数は、モーターの動作によって発生する温度上昇下でもカウンターウェイトの寸法安定性を維持し、ローターバランス精度を維持します。製造工程では、タングステンニッケル銅合金を用いて、金属射出成形（MIM）または粉末冶金プロセスによりカウンターウェイト部品を製造し、複雑な形状や小型化の設計要件を満たします。MIM技術は、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂および液相焼結することで高密度構造を形成します。ニッケル銅液相はタングステン粒子を濡らし、機械的特性と熱伝導性を高めます。さらに、熱間静水圧プレスにより微細孔が除去され、カウンターウェイトの密度と強度が向上し、高性能モーター用途

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に適しています。精密機械加工により、ミクロンレベルの公差を実現し、カウンターウェイトとローターの正確なマッチングを確保します。表面処理により、耐食性と表面仕上げが向上し、摩擦と摩耗が低減します。

新エネルギー車において、タングステンニッケル銅製のモーターローターウェイトは、駆動システムの性能を大幅に向上させます。例えば、電気自動車の主駆動モーターでは、高密度ウェイトが振動と騒音を低減し、出力効率を向上させます。ハイブリッド車のモーターシステムでは、非磁性ウェイトが電磁干渉を回避し、制御精度を高めます。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、軽量微細構造設計（中空ウェイトなど）による質量削減、あるいは積層造形技術の組み合わせによる複雑な形状カスタマイズなどが挙げられます。品質管理では、密度測定、振動試験、磁化強度試験を通じてウェイトの性能を検証し、自動車業界の基準への適合性を確保しています。

### 7.1.2 バッテリーパック放熱基板

バッテリーパックの放熱基板は、新エネルギー車のバッテリー管理システムの重要な部品です。動作中にバッテリーから発生する高熱を素早く放散し、過熱による性能低下や安全リスクを防ぐために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高い熱伝導率と低い熱膨張係数を備えているため、バッテリーパックの放熱基板に最適な材料です。高い熱伝導率は銅の急速な熱伝導率によるもので、バッテリー（リチウムイオンバッテリーなど）から発生する熱を放熱システムに素早く伝達し、バッテリーの理想的な動作温度を維持します。低い熱膨張係数は、バッテリー材料（グラファイトやセラミックダイヤフラムなど）の熱膨張特性と一致し、熱応力による変形や亀裂を軽減し、バッテリーパックの構造安定性を確保します。非磁性であるため、電磁干渉を回避し、バッテリー管理システムの電子制御ユニット（ECU）の近くでの使用に適しています。

製造工程では、タングステン - ニッケル - 銅合金を用いて粉末冶金またはMIM技術により放熱基板を製造し、バッテリーパックの薄肉高精度構造の要件を満たします。液相焼結により緻密な微細構造が形成され、ニッケル - 銅結合相が均一に分散されているため、熱伝導率と機械的特性が向上します。熱間静水圧プレスにより残留気孔が除去され、基板の密度と耐久性が向上し、高出力バッテリー用途に適しています。精密機械加工（マイクロミリングやレーザー加工など）により、複雑な放熱チャネルや薄板構造が実現され、バッテリーモジュールとの密着性が確保されます。表面処理（PVD TiN コーティングや化学パッシベーションなど）により耐食性と耐酸化性が向上し、湿気や高温環境での基板の寿命が延びます。粉塵汚染による熱伝導効率の低下を防ぐため、加工はクリーンルームで行う必要があります。

新エネルギー車では、タングステンニッケル銅放熱基板がバッテリーパックの性能を大幅に向上させます。例えば、高性能電気自動車では、基板の急速な放熱によりバッテリーの温度上昇が抑えられ、バッテリー寿命と充電効率が向上します。商用電気バスでは、低い熱膨張係数により、熱サイクル中のバッテリーパックの構造安定性が確保されます。最適化の方向性としては、マイクロチャネル設計による放熱効率の向上、複合コーティング（グラフェンなど）による熱抵抗の低減、3D プリント技術の組み合わせによる複雑な放熱構造のカスタマイズなど

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が挙げられます。品質管理では、熱伝導率試験、熱膨張係数測定、塩水噴霧試験などを通じて基板の性能を検証し、自動車業界の基準への準拠を確保しています。

## 7.2 産業用冷却ソリューション

産業用放熱ソリューションは、現代の産業機器の安定稼働を支える中核技術です。高出力電子部品やシステムの動作中に発生する熱を効率的に管理し、過熱による性能低下や機器故障を防ぎます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高い熱伝導率、低い熱膨張係数、非磁性といった特性から、産業用放熱部品に最適な材料です。熱を素早く分散させ、寸法安定性を維持し、電磁干渉を回避します。高密度で優れた機械的特性を持つこの合金は、データセンターのサーバー、産業オートメーション機器、パワー半導体モジュールなど、過酷な環境での長期使用にも適しています。タングステン-ニッケル-銅合金は、液相焼結、熱間静水圧プレス、精密機械加工などのプロセスを経て製造され、緻密な微細組織を形成します。この合金は、高精度で耐久性のある産業用放熱ニーズを満たし、高性能産業機器の安定稼働を支えます。

### 7.2.1 サーバー冷却ベース

サーバーヒートシンクは、データセンターサーバーの主要コンポーネントです。CPU、GPU、またはメモリモジュールの動作中に発生する高熱をすばやく放散し、高負荷状態でのサーバーの安定性と信頼性を確保するために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高い熱伝導率と低い熱膨張係数のため、サーバーヒートシンクに適した材料です。高い熱伝導率は銅の熱伝導率が速いため、プロセッサによって生成された熱をラジエーターまたは液体冷却システムにすばやく伝達し、チップの温度を下げ、機器の寿命を延ばすことができます。低い熱膨張係数は、シリコンベースのチップまたはセラミック基板の熱膨張特性と一致し、熱応力による変形や割れを軽減し、ベースとチップ間の長期的な接触安定性を確保します。非磁性特性は電磁干渉を回避し、データセンターの高密度電磁環境に適しています。

製造工程では、粉末冶金プロセスによってタングステン-ニッケル-銅合金をヒートシンクに製造します。通常、冷間静水圧プレスまたは金属射出成形（MIM）技術を使用して高精度のピレットを形成します。液相焼結により、ニッケル-銅の液相がタングステン粒子を濡らし、緻密な微細構造を形成し、熱伝導性と機械的特性を向上させます。熱間静水圧プレスは微細孔をさらに除去し、ベースの密度と耐久性を向上させ、高負荷サーバーアプリケーションに適しています。精密機械加工（CNCフライス加工やレーザー加工など）により、複雑な放熱チャネルや薄板構造が実現され、チップとの密着性が確保されます。表面処理（電気化学研磨やPVD TiNコーティングなど）により、表面仕上げと耐腐食性が向上し、熱抵抗が低減し、耐酸化性が向上します。熱伝導効率に影響を与える塵埃汚染を避けるため、加工はクリーンルームで行う必要があります。

サーバーアプリケーションでは、タングステンニッケル銅ヒートシンクがデータセンターのパフォーマンスを大幅に向上させます。たとえば、高性能コンピューティング（HPC）サーバーでは、ベースの急速な放熱によりチップの温度上昇が抑えられ、高負荷の連続動作をサポートします。クラウドコンピューティングサーバーでは、低い熱膨張係数により熱サイクル下で

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の構造安定性が確保され、メンテナンスコストが削減されます。最適化の方向性としては、マイクロチャネル設計による放熱効率の向上、ナノコーティング（グラフェンなど）による熱抵抗の低減、3D プリント技術の組み合わせによる複雑な放熱構造のカスタマイズなどが挙げられます。品質管理では、熱伝導率試験（レーザーフラッシュ法）、熱膨張係数測定、耐久性試験などを通じてベースの性能を検証し、データセンター標準（ASHRAE など）への準拠を確保しています。

## 7.2.2 パワー半導体パッケージ基板

パワー半導体パッケージ基板は、高出力電子機器の中核部品です。チップを支え、動作中に発生する高熱を速やかに放散することで、高電圧・高電流環境における機器の性能と信頼性を確保します。タングステン-ニッケル-銅合金は、高い熱伝導率、低い熱膨張係数、非磁性という特性から、パワー半導体パッケージ基板に最適な材料です。高い熱伝導率により、半導体チップから放熱システムへ熱を素早く伝達し、接合部温度を下げ、機器の効率と寿命を向上させます。低い熱膨張係数は、チップ材料（シリコンや炭化ケイ素など）の熱膨張特性と一致し、熱応力によるパッケージの故障を低減し、長期的な安定性を確保します。また、非磁性特性は電磁干渉を回避し、高周波パワーエレクトロニクス用途に適しています。

製造工程では、薄肉・高精度構造のニーズに応えるため、粉末冶金法または MIM 技術を用いて

タングステン・ニッケル・銅合金を用いたパッケージ基板を製造しています。液相焼結法により、ニッケル銅結合相が均一に分布した緻密な微細構造が形成され、熱伝導性と機械的特性が向上します。熱間静水圧プレスは残留気孔を排除し、基板の密度と耐久性を向上させ、高出力用途に適しています。精密加工（マイクロミリングや放電加工など）により、平坦な表面とミクロンレベルの公差で正確な寸法を実現し、チップとの密着性を確保します。表面処理（PVD CrN コーティングや化学パッシベーションなど）により、耐食性と耐酸化性が向上し、高温多湿環境における基板の寿命が延びます。基板表面は通常、溶接または熱伝導性接着剤によってチップに接合されるため、界面の熱抵抗を最小限に抑える必要があります。

パワー半導体用途において、タングステンニッケル銅パッケージ基板はデバイス性能を大幅に向上させます。例えば、産業用インバータでは、基板の急速な放熱により IGBT モジュールの電力密度と信頼性が向上します。また、風力発電インバータでは、低い熱膨張係数により、熱サイクル下におけるパッケージの安定性が確保されます。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、多層複合構造による熱拡散効率の向上、あるいは積層造形技術の組み合わせによる複雑な放熱経路のカスタマイズなどが挙げられます。品質管理では、熱伝導率試験、熱膨張係数測定、高温エージング試験を通じて基板の性能を検証し、産業規格（IEC 60747 など）への準拠を確保しています。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 第8章 タングステン・ニッケル・銅合金の国防産業への応用

タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、優れた熱伝導性、低熱膨張係数などの特性により、国防および軍事産業分野で優れた応用価値を示しており、特に電子対抗装置、兵器システム、防護装置に使用されています。この合金は粉末冶金プロセスで製造され、タングステンの高密度とニッケル - 銅結合相の靱性および熱伝導性を兼ね備えており、軍事装備の重量制御、電磁両立性、極限環境への耐性に関する厳しい要件を満たすことができます。現代戦における高精度、高信頼性、隠蔽性の需要が高まるにつれて、タングステン - ニッケル - 銅合金の電子対抗装置への応用は、特に妨害錘部品やレーダーデコイ部品においてますます重要になっています。

### 8.1 電子妨害装置

電子妨害装置は、現代の国防および軍事産業における中核技術です。敵のレーダー、通信システム、航法装置を妨害または欺瞞し、自軍や装備の安全を守るために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、高熱伝導性、低熱膨張係数といった特性から、電子妨害装置の主要部品に最適な材料です。高密度特性により、限られた体積内で十分な質量を確保し、装置の重量配分と動バランスを最適化します。非磁性特性は電磁干渉を回避し、高周波電磁環境における動作安定性を確保します。高熱伝導性と低熱膨張係数は、熱管理と寸法安定性をサポートし、高強度で迅速な展開が求められる軍事シナリオに適しています。この合金は、液相焼結、熱間静水圧プレス、精密機械加工プロセスによって製造され、電子妨害装置の高精度と耐久性の要件を満たす緻密な微細構造を形成します。

#### 8.1.1 対策と重量コンポーネント

ジャマーのカウンターウェイトアセンブリは、電子妨害装置の主要部品です。これは、ジャマー（同軸チャフや赤外線デコイなど）の重心を調整し、高速発射・飛行中の動的安定性と軌道精度を確保するために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度で非磁性であるため、ジャマーのカウンターウェイトアセンブリに適した材料です。高密度特性により、合金は小さな体積で十分な質量を提供し、ジャマーの重心を正確に制御し、空力性能を最適化し、飛行距離を延ばしたり、送達精度を向上させたりすることができます。非磁性特性は、ジャマー内部の電子部品（シーカーや制御回路など）への磁場の干渉を回避し、複雑な電磁環境下でも正常な動作を保証します。合金の低熱膨張係数は、高速飛行によって発生する空気摩擦熱や周囲温度差下でも、カウンターウェイトアセンブリの寸法安定性を保証します。

準備プロセスでは、タングステン - ニッケル - 銅合金を使用して、金属射出成形（MIM）または粉末冶金プロセスによりカウンターウェイト部品を製造し、ジャマーの小型化と複雑な形状の要件を満たします。MIM技術は、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂および液相焼結することにより、高密度構造を形成します。ニッケル - 銅の液相がタングステン粒子を濡らし、機械的特性と熱伝導性を高めます。熱間静水

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

圧プレスにより、微細孔がさらに除去され、カウンターウェイトの密度と強度が向上し、高動的負荷アプリケーションに適しています。精密機械加工は、ミクロンレベルの許容誤差を実現し、カウンターウェイトとジャマー構造の正確な一致を保証します。表面処理により耐食性と耐酸化性が向上し、湿気や高温環境での部品の寿命が延びます。

電子妨害装置用途において、タングステン・ニッケル・銅カウンターウェイトアセンブリは、妨害装置の性能を大幅に向上させます。例えば、艦載チャフ妨害装置では、高密度カウンターウェイトがミサイル本体の軌道を最適化し、敵のレーダー探知範囲を正確にカバーします。赤外線デコイ爆弾では、非磁性カウンターウェイトが電子誘導システムへの干渉を回避し、誘導効果を高めます。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、微細構造設計（中空カウンターウェイトなど）による質量の低減、積層造形技術との組み合わせによる複雑な形状のカスタマイズなどが挙げられます。品質管理では、密度測定、振動試験、磁化強度試験を通じてカウンターウェイトの性能を検証し、軍事規格への準拠を確保しています。

### 8.1.2 レーダーデコイコンポーネント

レーダーデコイ部品は、電子妨害装置の重要な構成部品であり、目標信号をシミュレートしたり、敵のレーダーを妨害したりすることで、自機、船舶、地上設備を検知や攻撃から守るために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、高熱伝導性を備え、レーダーデコイ部品に最適な材料です。高密度特性により、小さな体積で十分な質量を提供し、実際の目標のレーダー断面積（RCS）をシミュレートし、デコイの欺瞞効果を高めることができます。非磁性特性により、デコイ内部の電子部品（アンテナや信号発生器など）への磁場の干渉を回避し、高周波電磁環境における安定した動作を保証します。高い熱伝導性により、高速飛行時や高出力運転時にデコイから発生する熱を素早く分散させ、過熱や故障を防ぎます。また、低熱膨張係数により、極端な温度差下でも部品の寸法安定性を確保します。

準備プロセスでは、タングステン - ニッケル - 銅合金を使用して、MIMまたは粉末冶金プロセスでレーダーデコイコンポーネントを製造し、複雑な形状と高精度の要件を満たします。MIMテクノロジーは、射出成形によって小さなピレットを形成し、液相焼結と熱間静水圧プレスにより密度が向上し、微細孔がなくなり、熱伝導性と機械的特性が向上します。精密機械加工（レーザーマイクロマシニングや電気放電加工など）により、ミクロンレベルで公差が制御された複雑な幾何学的形状を実現し、レーダーデコイの小型設計に適しています。表面処理（PVD TiN コーティングや電気化学研磨など）は、耐食性と表面仕上げを改善し、信号の散乱を減らし、耐酸化性を高めます。粉塵汚染がコンポーネントの性能に影響を与えないように、処理はクリーンルームで行う必要があります。

レーダーデコイ用途において、タングステンニッケル銅部品は対抗手段の効果を大幅に向上させます。例えば、ドローンデコイでは、高密度部品が実機のRCSをシミュレートし、敵のレーダーを欺きます。また、艦載デコイシステムでは、非磁性と高い熱伝導性により、高出力動作下でもデコイの安定性と信頼性を確保します。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の調

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

整による導電性の向上、多層複合構造を用いた電磁シールド効果の強化、3D プリント技術を組み合わせた複雑なデコイ構造の製造などが挙げられます。品質管理では、電磁シールド試験（MIL-STD-461）、熱伝導率試験、高温老化試験などを通じて部品の性能を検証し、軍事規格への準拠を確保しています。

## 8.2 弾薬システム

防衛産業の中核部品であるタングステン - ニッケル - 銅合金は、重量配分を最適化するために高密度であること、高速衝撃に耐える優れた機械的特性、電磁干渉を避けるための非磁性特性が求められます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、高強度、低熱膨張係数といった特性から、弾薬システムのカウンターウェイトやバランス部品に最適な材料です。高密度であるため、限られた体積内で十分な質量を確保し、弾薬の飛行安定性と貫通力を最適化することができます。また、非磁性であるため、弾薬内の電子誘導システムに干渉しません。さらに、高強度と高靱性を備えているため、発射時や飛行時の極端な機械的負荷にも耐えることができます。さらに、低熱膨張係数であるため、高温または温度差のある環境でも寸法安定性が確保されます。この合金は、液相焼結、熱間静水圧プレス、精密機械加工プロセスによって製造され、弾薬システムの高精度と耐久性の要件を満たす高密度の微細構造を形成します。

### 8.2.1 弾頭カウンターウェイト

弾頭のカウンターウェイトは、弾頭設計における重要な部品です。弾頭の重心を調整し、高速発射および飛行中の動的安定性と貫通精度を確保するために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度と非磁性という特性から、弾頭のカウンターウェイトに適した材料です。高密度特性により、限られた体積内で十分な質量を確保し、弾頭の重心を正確に制御し、空力性能を最適化し、飛行中の偏向を低減し、命中精度を向上させることができます。非磁性特性は、弾頭内部の電子部品（誘導システムや信管など）への磁場の干渉を回避し、複雑な電磁環境下でも信頼性の高い動作を保証します。高強度と高靱性を有するこの合金は、弾頭発射時の大きな衝撃力や高速飛行中の振動に耐えることができます。また、熱膨張係数が低いため、高温発射時や周囲温度差下でも寸法安定性を確保できます。

準備工程では、タングステン - ニッケル - 銅合金を用いて粉末冶金または金属射出成形（MIM）技術によりカウンターウェイトを製造し、砲弾の複雑な形状と高精度の要件を満たします。MIM 技術は、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂および液相焼結することで高密度構造を形成します。ニッケル - 銅の液相はタングステン粒子を濡らし、機械的特性と熱伝導性を高めます。熱間静水圧プレスにより微細孔がさらに除去され、カウンターウェイトの密度と耐衝撃性が向上し、高性能砲弾に適しています。精密機械加工（CNC 旋削や EDM など）により、ミクロンレベルの公差が実現され、カウンターウェイトと弾頭構造の正確な一致が保証されます。表面処理により耐食性と耐酸化性が向上し、湿気や高温環境でのカウンターウェイトの寿命が延びます。砲弾用途において、タングステン・

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ニッケル・銅カウンターウェイトは弾薬の性能を大幅に向上させます。例えば、戦車砲弾では、高密度カウンターウェイトが弾頭の飛行安定性を最適化し、装甲貫通能力を高めます。また、艦砲弾では、非磁性カウンターウェイトが電子信管からの干渉を回避し、命中精度を向上させます。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による靱性向上、微細構造設計による重心分布の最適化、あるいは積層造形技術と組み合わせた複雑な形状のカスタマイズなどが挙げられます。品質管理では、密度測定、衝撃試験、磁化強度試験を通じてカウンターウェイトの性能を検証し、軍事規格への適合性を確保しています。

### 8.2.2 ミサイル弾頭バランス構成部品

ミサイル弾頭バランス部品は、ミサイルシステムの主要部品であり、弾頭の重心分布を調整することで、高速飛行および機動中のミサイルの安定性と精密誘導能力を確保します。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、高強度という特性から、ミサイル弾頭バランス部品に最適な材料です。高密度特性により、合金は小さな体積で十分な質量を提供し、弾頭の重心を正確に制御し、特に超音速飛行や高機動飛行において、ミサイルの飛行軌道と姿勢安定性を最適化します。非磁性特性は、弾頭の電子システム（レーダーシーカーや慣性航法システムなど）への磁場の干渉を回避し、高精度な誘導を保証します。合金の高い強度と靱性により、発射時の衝撃や飛行中の極端な機械的負荷に耐えることができ、低い熱膨張係数により、高温摩擦や周囲温度差下でも寸法安定性を確保します。

準備工程では、タングステン - ニッケル - 銅合金を MIM または粉末冶金プロセスでバランスの取れた部品に製造し、ミサイル弾頭の小型化と複雑な形状のニーズに対応します。MIM 技術は、射出成形で小さなピレットを形成し、液相焼結と熱間静水圧プレスにより密度を高め、微細孔を除去し、機械的特性と熱伝導性を高めます。精密機械加工（レーザー微細加工や放電加工など）は、ミクロンレベルで公差を制御した複雑な幾何学的形状を実現し、弾頭のコンパクト設計に適しています。表面処理（PVD CrN コーティングや電気化学研磨など）は、耐食性と表面仕上げを改善し、空気摩擦熱の影響を軽減し、耐酸化性を高めます。粉塵汚染による部品性能への影響を防ぐため、加工は高潔浄度環境で実施する必要があります。

ミサイル用途において、タングステン・ニッケル・銅バランス部品は弾頭性能を大幅に向上させます。例えば、対艦ミサイルでは、高密度バランス部品が弾頭の重心分布を最適化し、高速飛行の安定性を向上させます。精密誘導ミサイルでは、非磁性と高強度により、誘導システムの信頼性と耐衝撃性を確保します。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の調整による熱伝導率の向上、多層複合構造の採用による機械的特性の向上、あるいは 3D プリント技術を組み合わせた複雑なバランス構造の製造などが挙げられます。品質管理では、密度測定、振動試験、電磁シールド試験を通じて部品の性能を検証し、軍事規格への準拠を確保しています。

### 8.3 装甲防護装備

装甲防護装備は、国防軍事産業の中核部品です。人員、車両、施設を飛来物、爆発破片、その

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

他の脅威から保護するために使用されます。軽量化と高い防護性能を両立させるには、高密度、高強度、靱性、非磁性を備えた材料が求められます。タングステンニッケル銅合金は、高密度と優れた機械的特性により、高い耐衝撃性を発揮します。また、非磁性特性により電磁干渉を回避し、電子機器を統合した現代の装甲システムに適しています。さらに、低い熱膨張係数により、極度の温度下でも寸法安定性を確保します。

### 8.3.1 軽量装甲板補強

軽量装甲板補強材は、装甲防護装置の主要部品です。軽量化を図りながら、装甲板の防弾性能を高めるために用いられます。携帯型防護装置（防弾チョッキなど）や軽装甲車両に適しています。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、高強度、高靱性を有するため、軽量装甲板補強材として好まれています。高密度特性により、限られた体積内で十分な質量を確保し、装甲板の耐衝撃性を高め、発射体や爆発破片の運動エネルギーを効果的に吸収・分散させることができます。ニッケル-銅結合相の靱性により、高速衝撃下でも脆性破壊を起こしにくく、塑性変形によってエネルギーを吸収することで防護性能を向上させます。非磁性特性により、装甲板に埋め込まれた電子機器（通信機器やセンサーなど）への磁場干渉を回避し、現代の戦場の複雑な電磁環境に適しています。熱膨張係数が低いため、高温爆発や周囲温度差下でも補強材の寸法安定性が確保されます。

製造工程では、粉末冶金または金属射出成形（MIM）技術を用いてタングステン - ニッケル - 銅合金から強化材を製造し、複雑な形状と軽量化を求める軽量装甲板の要件を満たしています。MIM 技術は、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂および液相焼結することで高密度構造を形成し、ニッケル - 銅の液相がタングステン粒子を濡らして靱性と機械的特性を高めます。熱間静水圧プレスにより微細孔がさらに除去され、強化材の密度と耐衝撃性が向上し、高動的荷重用途に適しています。精密機械加工（CNC フライス加工や EDM など）により、正確な幾何学的形状と寸法公差が実現し、強化材と装甲板のシームレスな統合が保証されます。表面処理（PVD TiN コーティングや化学不動態化など）により耐食性と耐摩耗性が向上し、過酷な環境下でも強化材の寿命が延びます。

装甲用途では、タングステンニッケル銅補強材により軽装甲板の防護性能が大幅に向上します。例えば防弾チョッキでは、補強材により軽量性を維持しながら徹甲弾への抵抗力が向上し、兵士の機動性も向上します。また、軽装甲車両では、高密度補強材により装甲板の耐衝撃性が最適化されます。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による靱性向上、複合構造（セラミックとの組み合わせなど）の使用による保護効率の向上、積層造形技術の組み合わせによる複雑な補強材のカスタマイズなどが挙げられます。品質管理では、密度測定、衝撃試験、電磁シールド試験を通じて補強材の性能を検証し、軍事規格への準拠を確保しています。

### 8.3.2 装甲車両の防護ライニング

装甲車両の防護ライニングは、装甲車両内部の重要な防護部品であり、爆発の衝撃波、飛来物、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

または破片のエネルギーを吸収・分散させ、乗員と主要装備を危害から保護するために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、高強度、非磁性という特性から、装甲車両の防護ライニングの優れた材料となっています。高密度特性により、合金は衝撃エネルギーを効果的に吸収し、爆発や飛来物の貫通力を低減し、車両の防護能力を向上させます。ニッケル-銅結合相の強靱性により、ライニングは高速衝撃下でも塑性変形によってエネルギーを吸収し、脆性破壊を回避し、多重衝撃に対する耐性を向上させます。非磁性特性により、ライニングは車両内の電子システム（ナビゲーション機器や通信機器など）に干渉せず、現代のインテリジェント装甲車両に適しています。低熱膨張係数は、高温爆発や周囲温度差下でもライニングの寸法安定性を確保し、防護構造の完全性を維持します。

準備工程では、粉末冶金または MIM 技術を用いてタングステン - ニッケル - 銅合金を用いて保護ライニングを製造し、装甲車両の複雑な形状と軽量化のニーズを満たします。液相焼結は緻密な微細構造を形成し、ニッケル - 銅液相がタングステン粒子を濡らすことで、機械的特性と熱伝導性が向上します。熱間静水圧プレスは微細孔を除去し、ライニングの密度と耐衝撃性を向上させ、高強度保護用途に適しています。精密機械加工（CNC 研削やレーザー加工など）により複雑な幾何学的形状を実現し、許容差はミクロンレベルで管理されているため、ライニングと車両構造の正確なフィットが保証されます。表面処理（PVD CrN コーティングや化学不動態化など）は耐食性と耐酸化性を向上させ、湿気や高温環境でのライニングの寿命を延ばします。粉塵汚染による性能への影響を防ぐため、高純度環境で加工を行う必要があります。装甲車両用途において、タングステンニッケル銅（TNC）保護ライニングは保護性能を大幅に向上させます。例えば、主力戦車においては、高密度ライニングが爆発衝撃エネルギーを効果的に吸収し、乗員の安全を確保します。装甲兵員輸送車においては、非磁性ライニングが電子機器の安定した動作を確保します。最適化の方向性としては、微細構造設計（勾配密度ライニングなど）によるエネルギー吸収効率の向上、複合コーティングによる耐摩耗性の向上、あるいは 3D プリント技術を組み合わせたカスタマイズされたライニング構造の製造などが挙げられます。品質管理においては、密度測定、衝撃試験、高温老化試験などを通じてライニングの性能を検証し、軍事規格への適合性を確保しています。

#### 8.4 宇宙兵器

宇宙兵器には、ロケット、ミサイル、宇宙船などのシステムが含まれており、重量配分を最適化するための高密度、極度の熱環境に耐えるための優れた熱伝導性と耐高温性、電磁干渉を避けるための非磁性、寸法安定性を確保するための低熱膨張係数を備えた材料が必要です。タングステン - ニッケル - 銅合金は、そのユニークな物理的および化学的特性により、航空宇宙兵器の主要部品に最適な材料となっています。高密度特性により、限られた体積内で十分な質量を提供でき、システムの重心分布と動的バランスを最適化します。高い熱伝導性と耐高温性により、高熱流環境での部品の性能をサポートします。

非磁性により、精密電子システムとの干渉を回避します。低熱膨張係数により、極度の温度でも形状の安定性が確保されます。この合金は、液相焼結、熱間静水圧プレス、精密機械加工プロセスによって製造され、航空宇宙兵器の高精度と耐久性のニーズを満たす高密度の微細

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

構造を形成します。

#### 8.4.1 ロケットエンジンノズル部品

ロケットエンジンノズル部品は、航空宇宙兵器の中核部品です。高温高圧のガスを誘導・加速し、ロケットの推力を効率的に出力するために使用され、極度の高温、熱衝撃、機械的応力に耐える必要があります。タングステン-ニッケル-銅合金は、高い熱伝導率、耐熱性、低い熱膨張係数を有するため、ノズル部品（スロートライナーやノズルエクステンションなど）に最適な材料です。高い熱伝導率は銅の急速な熱伝導率によるもので、高温のノズルの熱を燃焼室内に素早く分散させ、局所的な過熱や材料破損を防止します。低い熱膨張係数は、急激な温度差下でもノズルの形状安定性を確保し、ガス流の正確な誘導を維持し、推力効率を向上させます。合金の高密度と靱性により、高速ガス流の摩耗や振動に耐えることができ、ニッケル-銅結合相の可塑性により熱衝撃エネルギーを吸収し、脆性破壊を回避します。非磁性特性により、ロケットのナビゲーションや制御システムの電子部品に干渉が発生しません。

製造工程では、タングステン - ニッケル - 銅合金を用いて粉末冶金または金属射出成形（MIM）技術によりノズル部品を製造し、複雑な形状と高精度の要件を満たします。液相焼結により緻密な微細構造が形成され、ニッケル - 銅液相がタングステン粒子を濡らすことで、熱伝導率と機械的特性が向上します。熱間静水圧プレスにより微細孔が除去され、部品の密度と耐高温性が向上し、高熱流環境にも適しています。精密機械加工（CNC 研削や放電加工など）により、ミクロンレベルで公差を制御した複雑な形状を実現し、ノズルの空力性能を確保します。表面処理（PVD CrN コーティングや化学不動態化など）により、高温酸化耐性と耐侵食性が向上し、過酷な環境下での部品寿命が延びます。粉塵汚染による性能低下を防ぐため、高清浄度環境で加工を行う必要があります。航空宇宙兵器用途において、タングステン・ニッケル・銅ノズル部品はロケットエンジンの性能を大幅に向上させます。例えば、固体ロケットエンジンでは、高熱伝導率のノズル部品が高温ガスの流れを効果的に管理し、耐用年数を延ばします。液体ロケットエンジンでは、低熱膨張係数が熱サイクル中のノズルの形状安定性を確保します。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、複合コーティングによる耐熱性の向上、あるいは 3D プリント技術を組み合わせた複雑なノズル構造の製造などが挙げられます。品質管理では、熱伝導率試験、熱衝撃試験、高温老化試験を通じて部品の性能を検証し、航空宇宙規格への適合性を確保しています。

#### 8.4.2 宇宙船姿勢制御カウンターウェイト

宇宙船姿勢制御カウンターウェイトは、宇宙兵器や衛星システムの重要なコンポーネントです。軌道上での運用や操縦中に宇宙船の重心分布を調整し、姿勢の安定性と精密な制御を確保するために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、低熱膨張係数のため、姿勢制御カウンターウェイトに最適な材料です。高密度特性により、合金は小さな体積で十分な質量を提供し、宇宙船の重心を正確に制御し、姿勢調整の効率を最適化し、推進剤の消費量を削減できます。非磁性特性は、宇宙船ナビゲーションシステム（スターセンサ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

一やジャイロスコープなど）への磁場の干渉を回避し、高精度の姿勢制御を保証します。低熱膨張係数は、宇宙環境の極端な温度差下でのカウンターウェイトの寸法安定性を確保し、宇宙船の動的バランスを維持します。

準備工程では、タングステンニッケル銅合金を用いてMIM（粉末冶金）プロセスでカウンターウェイトを製造し、宇宙船の小型化と複雑な形状のニーズに対応します。MIM技術は、射出成形によって小さなピレットを形成し、液相焼結と熱間静水圧プレスにより密度を向上させ、微細孔を除去し、機械的特性と熱伝導性を高めます。精密機械加工（レーザー微細加工や放電加工など）は、ミクロンレベルで公差を制御した複雑な幾何学的形状を実現し、宇宙船のコンパクトな設計に適しています。表面処理により、耐食性と表面仕上げが向上し、宇宙環境での粒子汚染や放射線の影響が軽減されます。粉塵汚染が部品の性能に影響を与えないように、高 cleanliness 環境で加工を行う必要があります。

宇宙船用途において、タングステンニッケル銅カウンターウェイトは姿勢制御性能を大幅に向上させます。例えば、軍事偵察衛星では、高密度カウンターウェイトが重心分布を最適化し、姿勢調整の応答速度を向上させます。また、ミサイル防衛システムでは、非磁性カウンターウェイトが航法システムの安定した動作を確保します。最適化の方向性としては、微細構造設計による質量低減、耐放射線コーティングによる宇宙環境への適応性向上、あるいは積層造形技術を組み合わせたカスタマイズされたカウンターウェイト構造の実現などが挙げられます。品質管理では、密度測定、振動試験、磁化強度試験などを通じてカウンターウェイトの性能を検証し、航空宇宙規格への適合性を確保しています。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 第9章 医療分野におけるタングステンニッケル銅合金の応用

タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、優れた熱伝導性、良好な生体適合性を有し、特に放射線治療機器、画像機器、手術器具において医療分野において優れた応用価値を示しています。この合金は粉末冶金プロセスによって製造され、タングステンの高密度とニッケル-銅結合相の靱性および熱伝導性を兼ね備えており、放射線遮蔽、熱管理、電磁両立性など、医療機器の厳しい要件を満たすことができます。精密医療と非侵襲治療技術の発展に伴い、タングステン-ニッケル-銅合金の放射線治療機器への応用はますます重要になっています。

### 9.1 放射線治療装置

放射線治療装置（直線加速器やガンマナイフなど）は、現代医学におけるがん治療の中核技術です。高エネルギー放射線（X線やガンマ線など）を精密に制御し、周囲の健康組織を保護しながら腫瘍組織を標的とします。この種の装置には、放射線を効果的に遮蔽するための高密度、精密電子システムへの干渉を回避するための非磁性、動作中に発生する熱を管理するための優れた熱伝導性、安全性を確保するための優れた生体適合性など、極めて高い材料要件が求められます。タングステンニッケル銅合金は、高密度と非磁性により、放射線を効果的に吸収・遮蔽し、患者と医療従事者を保護します。高い熱伝導性と低い熱膨張係数は、高出力動作時の装置の熱管理と寸法安定性をサポートします。ニッケル銅バインダー相の強靱性は、部品の耐久性を高めます。この合金は、液相焼結、熱間静水圧プレス、精密機械加工プロセスによって製造され、医療機器の高精度と信頼性のニーズを満たす緻密な微細構造を形成します。

#### 9.1.1 放射線治療シールドアセンブリ

放射線治療遮蔽部品は、放射線治療装置の主要部品であり、高エネルギー放射線を遮蔽・制限し、放射線が標的治療部位にのみ作用するようにし、患者の健康な組織と医療従事者を不必要な放射線被曝から保護するために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度で非磁性であるため、放射線治療遮蔽部品に最適な材料です。高密度特性により、X線やガンマ線を効果的に吸収し、放射線漏洩を大幅に低減し、優れた遮蔽効果を発揮します。従来の鉛材料よりも軽量で環境に優しい材料です。非磁性特性により、放射線治療装置（磁気共鳴誘導システムなど）の精密電子システムへの磁場の干渉を回避し、治療精度を確保します。高い熱伝導率により、動作中に発生する熱を素早く分散させ、遮蔽カバーが過熱して装置の性能に影響を与えるのを防ぎます。また、熱膨張係数が低いいため、熱サイクル中の部品の寸法安定性を確保し、遮蔽構造の精度を維持します。

製造工程では、タングステン・ニッケル・銅合金を用いて粉末冶金法または金属射出成形(MIM)技術によりシールド部品を製造し、複雑な形状と高精度の要件を満たします。MIM技術は、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂および液相焼結することで高密度構造を形成します。ニッケル銅液相はタングステン粒子を湿潤させ、機械的

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性と熱伝導性を向上させます。さらに、熱間静水圧プレスにより微細孔が除去され、シールドの密度と放射線吸収能力が向上し、高エネルギー放射線治療用途に適しています。精密加工（CNCフライス加工や放電加工など）により、ミクロンレベルで公差を制御した複雑な形状を実現し、放射線治療装置とのシームレスな統合を保証します。表面処理（電気化学研磨や化学不動態化など）により、耐食性と生体適合性が向上し、長期使用における酸化や滅菌環境における侵食を防ぎます。

放射線治療用途において、タングステンニッケル銅遮蔽部品は治療の安全性と精度を大幅に向上させます。例えば、直線加速器では高密度遮蔽により放射線の散乱を効果的に抑制し、患者の健康な組織を保護します。ガンマナイフ装置では、非磁性遮蔽により治療システムの電磁両立性を確保します。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、DLCなどの複合コーティングによる耐腐食性の向上、3Dプリント技術を組み合わせたカスタマイズされた遮蔽構造の製造などが挙げられます。品質管理では、放射線遮蔽試験、熱伝導率試験、生体適合性試験（ISO 10993）を通じて部品の性能を検証します。

### 9.1.2 放射線コリメータ部品

放射線コリメータ部品は、放射線治療装置の中核部品であり、放射線の方向と範囲を正確に制御し、高エネルギー放射線を腫瘍組織に集中させ、周囲の健常組織への損傷を最小限に抑えるために使用されます。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、高熱伝導性を備えているため、放射線コリメータ部品の材料として最適です。高密度特性により、散乱放射線を効果的に吸収・遮蔽し、放射線ビームの形状を精密に整え、治療の標的精度を向上させます。

非磁性特性は、コリメータ近傍の電子制御システム（サーボモーターやセンサーなど）への磁場の干渉を回避し、放射線ビームの動的調整精度を確保します。高い熱伝導性は、高エネルギー放射線の作用下でコリメータから発生する熱を素早く分散させ、過熱による変形を防ぎます。また、低い熱膨張係数は、熱サイクル中の部品の寸法安定性を確保し、コリメーション精度を維持します。

準備プロセスでは、タングステン-ニッケル-銅合金を使用し、MIMまたは粉末冶金プロセスでコリメータ部品を製造し、複雑な形状とミクロンレベルの精度の要件を満たします。MIM技術は、射出成形で小さなピレットを形成し、液相焼結と熱間静水圧プレスにより密度が向上し、微細孔がなくなり、放射線遮蔽機能と機械的特性が向上します。精密機械加工（レーザー微細加工や放電加工など）は、ビームの正確な制御を確保するためにミクロンレベルで制御された許容差で、マルチリーフコリメータ（MLC）の薄板構造などの複雑な形状を実現します。表面処理（PVD TiNコーティングや電気化学研磨など）は、耐腐食性と表面仕上げを改善し、放射線の散乱を減らし、耐酸化性を高めます。ほこりによる汚染が部品の性能に影響を与えないように、処理は高潔浄度の環境で実行する必要があります。

放射線治療用途において、タングステンニッケル銅コリメータ部品は治療精度と安全性を大幅に向上させます。例えば、強度変調放射線治療（IMRT）では、高密度コリメータがビームを正確に成形し、複雑な形状の腫瘍を標的とします。陽子線治療装置では、非磁性コリメータが

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高精度電磁制御システムの安定した動作を保証します。最適化の方向性としては、微細構造設計（多孔質コーティングブレードなど）による質量削減、耐摩耗性と生体適合性を高めるナノコーティングの使用、あるいは積層造形技術の組み合わせによる複雑なコーティング構造の実現などが挙げられます。品質管理では、放射線遮蔽試験、熱伝導率試験、形状精度測定を通じて部品の性能を検証し、医療基準への適合性を確保しています。

## 9.2 診断画像機器

画像診断装置は、現代医学における疾病診断や治療計画の中核技術です。高精度の放射線や磁場を用いて人体内部の画像を生成するため、材料には放射線を遮蔽する高密度、電磁干渉を避ける非磁性、装置の動作熱を管理する優れた熱伝導性、安全性を確保するための優れた生体適合性などが求められます。タングステンニッケル銅合金は、高密度で非磁性であるため、X線を効果的に遮蔽したり、重量バランスを保ったりすることができます。また、高い熱伝導性と低い熱膨張係数により、熱管理と寸法安定性が向上します。さらに、ニッケル銅バインダー一相の靱性により、部品の耐久性が向上します。この合金は、液相焼結、熱間静水圧プレス、精密機械加工プロセスによって製造され、高精度と信頼性を求める画像診断装置の要件を満たす緻密な微細構造を形成します。

### 9.2.1 CT 検出器保護部品

CT 検出器シールドは、コンピュータ断層撮影（CT）装置の重要なコンポーネントであり、散乱 X 線を遮蔽し、検出器モジュールと患者を不必要な放射線被曝から保護し、画像信号の鮮明さと正確性を確保するために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度と非磁性の特性により、CT 検出器シールドの好ましい材料となっています。高密度により、X 線を効果的に吸収し、散乱放射線を大幅に削減できます。従来の鉛材料よりも薄く、環境に優しく、優れた遮蔽効果を提供します。非磁性特性により、磁場が CT 装置内の精密電子部品（検出器アレイや信号処理回路など）に干渉するのを防ぎ、画像取得の安定性を確保します。高い熱伝導性により、動作中に検出器から発生する熱がすばやく分散され、過熱が検出器の感度に影響するのを防ぎます。熱膨張係数が低いため、熱サイクル中のシールドの寸法安定性が確保され、検出器モジュールとの正確なフィットが維持されます。

製造工程では、タングステン・ニッケル・銅合金を用いて金属射出成形（MIM）または粉末冶金プロセスにより保護部品を製造し、CT 装置の複雑な形状と高精度の要件を満たします。MIM 技術は、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂および液相焼結することで高密度構造を形成し、ニッケル銅液相がタングステン粒子を濡らすことで機械的特性と熱伝導性を高めます。さらに、熱間静水圧プレスにより微細孔が除去され、保護部品の密度と放射線吸収能力が向上し、高エネルギー X 線環境に適しています。精密機械加工により、ミクロンレベルで公差を管理しながら複雑な幾何学的形状を実現し、保護部品と検出器モジュールをシームレスに統合します。表面処理（電気化学研磨や化学パッシベーションなど）により、耐腐食性と生体適合性が向上し、長期使用時の酸化や消毒環境による侵食を防ぎます。CT 装置用途において、タングステンニッケル銅保護部品は画質と装置の安全性を大

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

幅に向上させます。例えば、高解像度 CT スキャナでは、高密度保護部品が散乱線を効果的に低減し、画像コントラストを向上させます。モバイル CT 装置では、非磁性で軽量の設計により、装置の携帯性と電磁両立性をサポートします。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による熱伝導率の向上、ナノコーティング（DLC など）による耐腐食性の向上、3D プリント技術を組み合わせたカスタマイズされた保護構造の製造などが挙げられます。品質管理では、放射線遮蔽試験（IEC 60601 規格準拠）、熱伝導率試験、生体適合性試験（ISO 10993）を通じて保護部品の性能を検証します。

## 9.2.2 MRI 装置用カウンターウェイト

磁気共鳴画像（MRI）装置のカウンターウェイトは、MRI システムにおいて装置の重心や機械構造のバランスを調整するための重要な部品であり、動作中のスキャンプラットフォームや磁石アセンブリの安定性と精度を確保します。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、低熱膨張係数という特性から、MRI 装置のカウンターウェイトに最適な材料です。高密度特性により、合金は小さな体積で十分な質量を提供し、MRI 装置（スキャンベッドや傾斜磁場コイルなど）の重心分布を正確に制御し、振動や機械的オフセットを低減し、画像の鮮明度を向上させます。非磁性特性は、MRI の高強度磁場との磁場干渉を回避するために重要であり、磁場の均一性と信号取得精度を確保します。低熱膨張係数は、装置動作時の温度上昇や環境温度差によるカウンターウェイトの寸法安定性を確保し、機械構造の長期信頼性を維持します。

準備プロセスでは、タングステン - ニッケル - 銅合金を使用して、MIM または粉末冶金プロセスでカウンターウェイトを製造し、MRI 装置の複雑な形状と小型化のニーズを満たします。MIM 技術は、射出成形によって小さなピレットを形成し、液相焼結と熱間静水圧プレスにより密度が向上し、微細孔がなくなり、機械的特性と熱伝導性が向上します。精密機械加工（CNC フライス加工や EDM など）により、ミクロンレベルで公差が制御された複雑な幾何学的形状が実現され、MRI 装置のコンパクト設計に適しています。表面処理（PVD TiN コーティングや電気化学研磨など）により、耐食性と表面仕上げが向上し、滅菌環境での酸化や汚染のリスクが軽減されます。ほこりによる汚染がコンポーネントの性能や MRI 磁場に影響を与えないように、処理は高潔浄度の環境で実行する必要があります。MRI アプリケーションでは、タングステン - ニッケル - 銅カウンターウェイトによって装置のパフォーマンスが大幅に向上します。例えば、高磁場 MRI 装置では、高密度カウンターウェイトがスキャンプラットフォームの動的バランスを最適化し、振動が画質に与える影響を低減します。一方、ポータブル MRI システムでは、非磁性カウンターウェイトが磁場安定性と電磁両立性を確保します。最適化の方向性としては、微細構造設計（中空カウンターウェイトなど）による質量削減、耐腐食コーティングによる生体適合性の向上、あるいは積層造形技術の組み合わせによるカスタマイズされたカウンターウェイト構造の実現などが挙げられます。品質管理では、密度測定、磁化強度試験、振動試験を通じてカウンターウェイトの性能を検証し、医療基準への適合性を確保しています。

## 9.3 手術器具

手術器具は、現代医学における精密な診断と治療の中核ツールであり、手術ナビゲーションシ

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ステム、低侵襲介入器具、インプラント医療機器などが含まれます。これらの器具には、重量バランスを最適化するための高密度、電磁干渉を回避するための非磁性、耐久性を確保するための優れた機械的特性、そして体内または体表面での使用における安全基準を満たすための優れた生体適合性を備えた材料が求められます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度と非磁性により、精密な重量制御と電磁適合性を提供します。ニッケル - 銅結合相の靱性と高い熱伝導性は、器具の耐久性と熱管理能力を向上させます。また、低い熱膨張係数は、体温または滅菌環境における寸法安定性を保証します。この合金は、液相焼結、熱間静水圧プレス、精密機械加工によって製造され、手術器具の高精度と信頼性のニーズを満たす高密度の微細構造を形成します。

### 9.3.1 高精度外科ナビゲーション位置決めコンポーネント

高精度手術ナビゲーション位置決め部品は、手術ナビゲーションシステムにおいて手術器具の位置特定と誘導に使用される重要な部品です。脳神経外科、整形外科、心臓血管外科において、手術経路の精度と安全性を確保するために広く使用されています。タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、低熱膨張係数という特性から、手術ナビゲーション位置決め部品に最適な材料です。高密度特性により、この合金は小さな体積で十分な質量を提供し、位置決め部品の重心分布を最適化し、手術ナビゲーションシステムの安定性を高め、特にロボット支援手術などの動的調整における位置決め精度を向上させます。非磁性特性は、ナビゲーションシステム内の電子部品への磁場の干渉を回避し、磁気共鳴誘導や電磁ナビゲーション環境における信頼性を確保します。低熱膨張係数は、体温または滅菌環境下における位置決め部品の寸法安定性を確保し、ナビゲーション精度を維持します。

準備工程では、タングステンニッケル銅合金を用いて金属射出成形（MIM）または粉末冶金プロセスにより位置決め部品を製造し、手術ナビゲーションシステムの複雑な形状とミクロンレベルの精度の要件を満たします。MIM技術は、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂および液相焼結することで高密度構造を形成します。ニッケル銅の液相がタングステン粒子を濡らし、機械的特性と熱伝導性を高めます。熱間静水圧プレスにより微細孔がさらに除去され、位置決め部品の密度と耐久性が向上し、高精度用途に適しています。精密機械加工（レーザー微細加工や放電加工など）により、ミクロンレベルで許容誤差が制御された複雑な形状を実現し、ナビゲーションシステムとのシームレスな統合を保証します。表面処理（電気化学研磨や PVD TiN コーティングなど）により、耐腐食性と生体適合性が向上し、滅菌中や生体内環境での酸化が防止され、ISO 10993 生体適合性規格に準拠します。

外科手術ナビゲーション用途において、タングステンニッケル銅製の位置決め部品は、手術の精度と安全性を大幅に向上させます。例えば、脳神経外科ナビゲーションでは、高密度の位置決め部品が誘導システムの安定性を最適化し、ミクロンレベルの精度で脳外科手術を実現します。整形外科手術では、非磁性の位置決め部品が電磁干渉を回避し、ナビゲーションシステムの信頼性を向上させます。最適化の方向性としては、ニッケル銅比の最適化による靱性の向上、耐摩耗性と生体適合性を高めるナノコーティングの使用、3D プリント技術を組み合わせたカスタマイズされた位置決め構造の製造などが挙げられます。品質管理では、密度測定、磁

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

化強度試験、表面粗さ試験などを通じて位置決め部品の性能を検証し、医療基準を満たしています。

### 9.3.2 低侵襲介入デバイスガイドコンポーネント

低侵襲手術（心臓血管介入や内視鏡手術など）においてガイドワイヤ、カテーテル、またはステントを誘導するために使用される主要部品。手術の成功と患者の安全を確保するために、高精度、生体適合性、および耐久性が求められます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、および優れた機械的特性を備えているため、ガイド部品に最適な材料です。高密度特性により、合金は小さな体積で十分な質量を提供し、ガイド部品の重心分布を最適化し、ガイドワイヤまたはカテーテルの操作性と安定性を高め、特に複雑な血管経路での正確な誘導を可能にします。非磁性特性により、介入デバイス内の電子部品（センサーやイメージングモジュールなど）への磁場の干渉が回避され、磁気共鳴誘導による低侵襲手術に適しています。ニッケル銅バインダー相の強靱性により、部品は繰り返しの曲げやねじりに耐えることができ、低い熱膨張係数により体温や滅菌環境でも寸法安定性が確保されます。

準備工程では、タングステン - ニッケル - 銅合金を用いて MIM（マイクロ粉末冶金）プロセスでガイド部品を製造し、低侵襲デバイスの小型化と複雑な形状のニーズに対応します。MIM 技術は、射出成形で微細なピレットを形成し、液相焼結と熱間静水圧プレスにより密度を高め、微細孔を除去し、機械的特性と熱伝導性を向上させます。精密機械加工（レーザー微細加工や放電加工など）は、ガイドワイヤガイドリングやカテーテルチップなどの複雑な形状を実現し、許容誤差をミクロンレベルで制御することで、手術中の正確な操作を保証します。表面処理（DLC コーティングや化学不動態化など）は、耐摩耗性、耐腐食性、生体適合性を向上させ、血管組織との摩擦を減らし、長期使用時の酸化や消毒による侵食を防ぎます。粉塵汚染が部品の性能に影響を与えないように、高潔浄度環境で加工を行う必要があります。

低侵襲手術において、タングステンニッケル銅（TNC）製ガイドコンポーネントは、手術の効率と安全性を大幅に向上させます。例えば、心血管ステント留置術では、高密度ガイドコンポーネントがガイドワイヤの操作性を最適化し、正確な位置決めを実現します。また、神経介入手術では、非磁性ガイドコンポーネントが MRI 環境からの干渉を回避し、画像誘導の信頼性を向上させます。

最適化の方向性としては、微細構造設計（中空ガイドなど）による質量削減、生体適合性コーティングによる組織親和性の向上、あるいは積層造形技術の組み合わせによるパーソナライズされたガイド構造の実現などが挙げられます。品質管理では、機械特性試験、生体適合性試験（ISO 10993）、表面粗さ測定を通じて部品の性能を検証します。

## 9.4 リハビリテーション補助機器

リハビリテーション補助器具（義肢、装具、リハビリテーション訓練機器など）は、現代医学において、患者の運動機能の回復や生活の質の向上を支援する重要なツールです。これらの機器には、重量配分を最適化するための高密度、耐久性を確保するための優れた機械的特性、電

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

磁干渉を回避するための非磁性、そして長期使用の安全基準を満たすための優れた生体適合性を備えた材料が求められます。タングステンニッケル銅合金は、高密度と非磁性により、精密な重量制御と電磁適合性を提供します。ニッケル銅結合相の靱性と高い熱伝導性は、部品の耐久性と熱管理能力を向上させます。また、低い熱膨張係数は、体温または周囲温度差における寸法安定性を保証します。この合金は、液相焼結、熱間静水圧加圧、精密機械加工によって製造され、リハビリテーション補助器具に求められる高精度と信頼性の要件を満たす緻密な微細構造を形成します。

#### 9.4.1 人工関節の重量部品

義肢関節ウェイト部品は義肢設計の重要な部品であり、義肢の重心分布を調整し、動作バランスと自然な歩行を最適化し、患者の快適性と機能性を向上させるために使用されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、優れた機械的特性により、義肢関節ウェイト部品の好ましい材料となっています。高密度特性により、合金は小さな体積で十分な質量を提供し、義肢関節の重心を正確に制御し、自然な手足の重量配分をシミュレートし、義肢を使用する際の患者の疲労を軽減します。非磁性特性により、義肢に埋め込まれた電子部品への磁場の干渉を回避でき、インテリジェントな義肢システムに適しています。ニッケル - 銅バインダー相の靱性により、ウェイト部品は歩行中や走行中のストレスなど、繰り返しの機械的負荷や衝撃に耐えることができます。熱膨張係数が低いため、体温や周囲温度差での部品の寸法安定性が確保され、ジョイントの動作精度が維持されます。

準備プロセスでは、タングステン - ニッケル - 銅合金を使用して、金属射出成形（MIM）または粉末冶金プロセスでウェイト部品を製造し、小型化、複雑な形状、高精度などの人工関節の要件を満たします。MIM 技術は、タングステン、ニッケル、銅の粉末をバインダーと混合し、射出成形後に脱脂および液相焼結することで高密度構造を形成し、ニッケル - 銅の液相がタングステン粒子を濡らして機械的特性と熱伝導性を高めます。熱間静水圧プレスにより微細孔がさらに除去され、ウェイト部品の密度と耐久性が向上し、長期的な人工関節への適用に適しています。精密機械加工（レーザー微細加工や CNC フライス加工など）により、ミクロンレベルで公差が制御された複雑な形状を実現し、人工関節との正確なフィットを保証します。表面処理により、耐腐食性と生体適合性が向上し、長期使用時の酸化や皮膚との接触による刺激を防ぎ、ISO 10993 生体適合性規格を満たしています。

#### 9.4.2 リハビリテーション機器のバランス調整部品

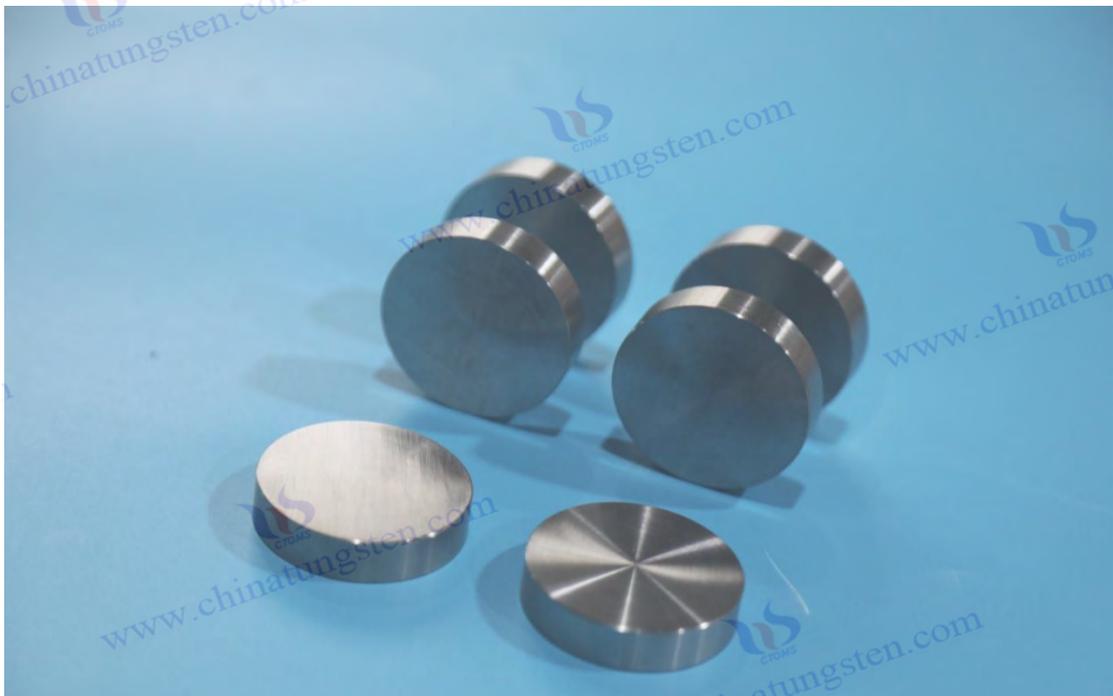
リハビリテーション機器用バランス調整部品は、リハビリテーション訓練機器（歩行訓練器や筋力訓練器など）の主要部品です。機器の重心や運動抵抗を調整することで、訓練中の安定性と安全性を確保し、患者のリハビリテーション効果を最適化します。タングステン - ニッケル - 銅合金は、高密度、非磁性、優れた機械的特性を備えているため、リハビリテーション機器用バランス調整部品に最適な材料です。高密度特性により、限られた体積内で十分な質量を確保し、機器の重心分布を正確に制御し、動的運動における機器の安定性を高め、患者への振動やオフセットの干渉を低減します。非磁性特性により、リハビリテーション機器内の電子部品（モーションセンサーや制御システムなど）への磁場の干渉を回避でき、インテリジェン

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

トナリハビリテーション機器に適しています。ニッケル銅結合相の強靱性により、調整部品は繰り返しの機械的負荷に耐えることができ、低い熱膨張係数により体温または周囲温度差での寸法安定性が確保され、調整精度が維持されます。

準備工程では、タングステン - ニッケル - 銅合金を用いて MIM または粉末冶金プロセスでバランス調整部品を製造し、リハビリテーション機器の複雑な形状と高精度の要件を満たします。MIM 技術は、射出成形で微細なピレットを形成し、液相焼結と熱間静水圧プレスにより密度を高め、微細孔を除去し、機械的特性と熱伝導性を向上させます。精密機械加工（EDM や CNC 研削など）により複雑な幾何学的形状を実現し、許容差はミクロンレベルで制御され、調整部品が機器構造に正確にフィットすることを保証します。表面処理（DLC コーティングや化学的不動態化など）は、耐摩耗性、耐腐食性、生体適合性を向上させ、患者の皮膚との摩擦を減らし、滅菌環境での酸化を防ぎます。粉塵汚染が部品の性能に影響を与えないように、処理は高洗浄度環境で実行する必要があります。

リハビリテーション機器の用途において、タングステンニッケル銅製バランスアジャスターは、トレーニング結果と機器の信頼性を大幅に向上させます。例えば、歩行訓練器では、高密度アジャスターが機器の重心を最適化し、トレーニング中の安定性を高めます。筋力リハビリテーション機器では、非磁性アジャスターが電子制御システムからの干渉を回避し、動作軌道の精度を向上させます。最適化の方向性としては、微細構造設計（勾配密度アジャスターなど）による重量配分の最適化、ナノコーティングによる耐久性と生体適合性の向上、積層造形技術の組み合わせによる個別調整構造の実現などが挙げられます。品質管理では、密度測定、振動試験、生体適合性試験を通じてアジャスターの性能を検証し、医療基準（ISO 13485 など）への準拠を確保しています。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 第 10 章 タングステンニッケル銅合金と他の材料との比較

タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、優れた熱伝導性、低熱膨張係数などの特性により、航空宇宙、医療、電子情報、国防、エネルギー分野で幅広い応用価値を示しています。粉末冶金法で製造されたタングステン-ニッケル-銅合金は、タングステンの高密度とニッケル-銅結合相の靱性および熱伝導性を兼ね備えており、さまざまな高需要シナリオのニーズを満たしています。ただし、実際のアプリケーションでは、タングステン-ニッケル-銅合金は、その性能上の利点と適用性を評価するために、タングステン-ニッケル-鉄合金や銅-タングステン合金などの他の高性能材料と比較されることがよくあります。さまざまな材料の物理的および化学的特性、製造プロセス、およびコストの違いが、特定のアプリケーションにおける競争力を決定します。

### 10.1 タングステンニッケル銅合金の競合材料の分析

タングステン-ニッケル-銅 (W-Ni-Cu) 合金は、高密度 (15-18 g/cm<sup>3</sup>)、非磁性、優れた熱伝導性、生体適合性のため、重量、放熱、シールド、保護部品に広く使用されています。ただし、タングステン-ニッケル-鉄 (W-Ni-Fe) や銅-タングステン (W-Cu) とは性能とコストに大きな違いがあります。タングステン-ニッケル-鉄合金は、高強度と低コストのため、軍事および産業分野で有利ですが、磁性があるため、高い電磁適合性要件のある用途は制限されます。銅-タングステン合金は、優れた熱伝導性と電気伝導性のため、電子機器や熱管理の分野で優れていますが、密度が低く、靱性が低いです。競合材料の選択は、アプリケーションの要件（非磁性、熱伝導性、コストなど）と比較して検討する必要があります。

#### 10.1.1 タングステン-ニッケル-鉄合金との比較

タングステン-ニッケル-鉄 (W-Ni-Fe) は、軍事産業（徹甲弾の装甲コアなど）、航空宇宙用カウンターウェイト、産業機器などで広く使用されている一般的な高密度合金です。主な成分はタングステン (85%~98%)、ニッケル、鉄で、密度範囲はタングステン-ニッケル-銅合金とほぼ同じです。タングステン-ニッケル-銅合金と比較すると、タングステン-ニッケル-鉄合金は機械的特性、コスト、用途において大きな違いがあります。

**性能比較:** タングステン-ニッケル-鉄合金の強度と硬度は、一般にタングステン-ニッケル-銅合金よりも高くなっています。鉄を添加すると、ニッケル-鉄結合相の機械的特性が向上し、耐衝撃性と耐摩耗性が求められる用途（徹甲弾の芯や機械式カウンターウェイトなど）で有利になります。ただし、鉄を添加すると磁性が弱くなるため、電磁両立性要件の高い用途（MRI 機器や電子対抗装置など）での使用が制限されます。

タングステン-ニッケル-銅合金の非磁性はその核となる利点であり、医療機器やレーダーシステムなど、電磁干渉を回避する必要がある用途に適しています。タングステン-ニッケル-銅合金の熱伝導率は、タングステン-ニッケル-鉄合金の熱伝導率よりもわずかに高くなっています。銅は鉄よりも熱伝導性に優れているため、放熱用途に適しています。両者の熱膨張係数は似ており、どちらも優れた寸法安定性を提供できます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**プロセスの比較:** 両合金とも粉末冶金法（粉末の混合、加圧、液相焼結など）で製造されますが、タングステン - ニッケル - 鉄合金の焼結温度はわずかに低く、鉄の価格は銅よりもはるかに低いため、プロセスコストも低くなります。タングステン - ニッケル - 銅合金の製造には、銅の酸化を防ぐために、より厳格な環境制御（高純度アルゴンや真空など）が必要であり、生産コストが増加します。タングステン - ニッケル - 鉄合金の加工性能は、硬度が高いため工具の摩耗を引き起こす可能性があるため、わずかに劣りますが、タングステン - ニッケル - 銅合金の靱性により、精密機械加工（MIM や CNC 機械加工など）で複雑な形状を実現しやすくなります。

**適用シナリオと長所と短所:** タングステン - ニッケル - 鉄合金は、高強度で低コストであるため、軍事分野（徹甲弾コア、ミサイルカウンターウェイトなど）や工業用カウンターウェイト（振動抑制装置など）で広く使用されていますが、磁性が弱いため、電磁気に敏感な環境には適していません。タングステン - ニッケル - 銅合金は、医療（MRI カウンターウェイト、放射線治療シールド）、電子情報（5G 無線周波数モジュール）、航空宇宙兵器（姿勢制御カウンターウェイト）でより多くの利点があります。その非磁性特性と生体適合性は、高精度と安全要件を満たしています。タングステン - ニッケル - 銅合金の欠点はコストが高いことで、特に銅価格が変動する場合、経済効率に影響を与えます。最適化の方向性としては、ニッケル銅比を調整して性能を向上させるか、積層造形を使用して処理コストを削減することが含まれます。

### 10.1.2 銅タングステン合金との比較

銅タングステン合金（W-Cu）は、タングステンをマトリックスとし、銅をバインダー相とする複合材料です。電子機器の放熱、電気接点、高温部品などに広く使用されています。典型的な組成はタングステン（70%~90%）と銅で、密度は 12~17g/cm<sup>3</sup> です。タングステン-ニッケル-銅合金と比較すると、銅タングステン合金は熱伝導率、電気伝導率、用途において大きな違いがあります。

**性能比較:** 銅タングステン合金の熱伝導率と電気伝導率は、タングステン-ニッケル-銅合金よりも優れています。銅含有量が多い（10%~30%）ため、熱と電気の伝導効率が向上し、高出力電子機器の放熱（パワー半導体基板、サーバーヒートシンクなど）や電極材料に優れています。ただし、銅タングステン合金の密度はタングステン-ニッケル-銅合金よりも低いため、高い重量バランスが求められる用途（航空宇宙用カウンターウェイトやミサイルバランス部品など）への適用が制限されます。銅タングステン合金の機械的性質は弱く、靱性と耐衝撃性はタングステン-ニッケル-銅合金ほど優れていません。ニッケルの強化効果がないため、高応力下では破損しやすいです。タングステン-ニッケル-銅合金の非磁性は利点であり、電磁気に敏感な環境に適しています。銅タングステン合金も非磁性ですが、密度が低いためシールド能力は若干劣ります。両者の熱膨張係数はほぼ同等であり、寸法安定性が求められる用途に適しています。

**プロセスの比較:** 銅タングステン合金とタングステンニッケル銅合金はどちらも粉末冶金法で製造されますが、銅タングステン合金は通常、複雑でエネルギー集約的な浸透法（最初にタ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ングステン骨格を焼結し、次に液体銅を浸透させる）で製造されます。タングステンニッケル銅合金は、より柔軟性が高く、MIM で複雑な形状を実現できる液相焼結法を使用するため、小型部品（医療用コリメータや MEMS カウンターウェイトなど）に適しています。銅タングステン合金は、硬度が高く銅相が柔らかいため加工が難しく、表面に凹凸がしやすいですが、タングステンニッケル銅合金の靱性により、精密機械加工に有利です。銅タングステン合金は銅の含有量が多く、焼結雰囲気厳密に制御して酸化を防ぐ必要があり、プロセスコストが増加します。

**適用シナリオと長所と短所:** 銅タングステン合金は、優れた熱伝導性と導電性により、電子産業（パワー半導体パッケージ、電気接点など）や高温部品（ロケットノズルライニングなど）で広く使用されていますが、密度が低く靱性が低いため、高密度カウンターウェイトや高衝撃シナリオでの適用が制限されます。タングステン - ニッケル - 銅合金は、医療（放射線治療シールド、MRI カウンターウェイト）、国防（レーダーデコイ、ミサイルカウンターウェイト）、新エネルギー車（モーターカウンターウェイト）でより多くの利点があります。その高密度と靱性は、複雑な機械的および電磁氣的要件を満たしています。銅タングステン合金のコストは銅含有量が多いため大きく変動しますが、タングステン - ニッケル - 銅合金のコストはニッケルと銅の価格の影響を受け、経済的圧力を軽減するために比率を最適化する必要があります。最適化の方向性としては、複合コーティングによる銅タングステン合金の靱性の向上や、ナノスケールのタングステン粉末を使用したタングステン-ニッケル-銅合金の性能向上などが挙げられます。

## 10.2 タングステン・ニッケル・銅合金の最先端技術の研究開発

高性能材料の需要が高まるにつれ、タングステンニッケル銅合金の研究開発は、従来の性能最適化から微細構造設計と機能革新へと移行しつつあります。ナノ構造合金は、粉末粒子のサイズをナノスケールまで微細化することで、材料の強度、靱性、熱伝導率を大幅に向上させ、高精度および過酷な環境下での用途に適しています。傾斜機能材料は、合金内の組成または構造を段階的に分布させることで、複雑かつ多機能なニーズを満たすカスタマイズされた性能を実現します。これらの技術は、高度な製造プロセスを通じて、医療、電子、防衛、エネルギー分野におけるタングステンニッケル銅合金の新たな用途を促進し、次世代の高性能部品の開発を支えています。

### 10.2.1 ナノ構造合金

ナノ構造タングステン - ニッケル - 銅合金は、ナノスケールのタングステン、ニッケル、銅粉末を用いて製造され、合金の微細構造と特性が大幅に改善されます。ナノスケール粒子は比表面積と表面活性が高く、焼結中により均一な微細構造を形成し、気孔率を低減し、密度、強度、靱性を向上させます。従来のミクロンスケールのタングステン - ニッケル - 銅合金と比較して、ナノ構造合金の機械的特性は大幅に向上します。これは、ナノ粒子の粒界強化効果により、耐衝撃性と耐疲労性が向上するためです。非磁性特性は保持されるため、高い電磁両立性要件が求められる用途（MRI 装置、レーダーシステムなど）に適しています。さらに、ナ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ノスケール粒子の均一な分布により熱伝導性が向上し、合金は放熱用途（パワー半導体基板、5G RF モジュールなど）でより優れた性能を発揮します。ナノ構造の微細粒子は熱膨張係数も低減し、寸法安定性をさらに向上させます。

**製造方法:** ナノ構造合金は通常、高エネルギーボールミル、化学蒸着（CVD）、またはプラズマ支援法でナノスケールの粉末を製造し、その後、粉末冶金プロセス（液相焼結や放電プラズマ焼結（SPS）など）で高密度合金を形成します。高エネルギーボールミルは、機械的粉碎によって粉末粒子をナノスケールに精製しますが、不純物の混入を避けるために粉碎時間と環境（高純度アルゴンまたは真空）を制御する必要があります。SPS 技術は、高電圧とパルス電流を使用してナノ粉末を迅速に焼結し、焼結時間を短縮し、粒成長を抑制し、ナノ構造特性を維持します。熱間静水圧プレス（HIP）は密度をさらに向上させ、微細孔を除去します。精密機械加工（レーザー微細加工など）は複雑な形状を実現し、表面処理は耐食性と生体適合性を高めます。製造プロセスでは、ナノ構造の安定性と性能の一貫性を確保するために、粉末の純度と焼結条件を厳密に制御する必要があります。

**用途と利点:** ナノ構造タングステン - ニッケル - 銅合金は、高精度アプリケーションにおいて大きな利点があります。たとえば、医療分野では、ナノ構造合金は放射線治療コリメータ部品に使用され、放射線遮蔽効率と寸法精度を向上させます。電子情報分野では、ナノ合金の優れた熱伝導性により、高出力サーバーの放熱ベースに適しています。防衛分野では、高強度ナノ合金をミサイルバランス部品に使用して耐衝撃性を高めることができます。最適化の方向性としては、より効率的なナノ粉末調製技術の開発、複合ナノコーティングの使用による性能のさらなる向上、または積層造形の組み合わせによる複雑なナノ構造の実現などが挙げられます。課題は、ナノ粉末の高コストと調製プロセス中の酸化制御にあり、生産効率を向上させるために自動化装置とオンライン監視技術の使用が必要です。

### 10.2.2 傾斜機能材料

傾斜機能材料（FGM）は、タングステン - ニッケル - 銅合金内部の組成または構造を段階的に分布させることで、高密度から高熱伝導率または高靱性へのスムーズな移行を実現し、多機能部品のニーズに対応します。従来のタングステン - ニッケル - 銅合金は組成が均一であるため、複雑な動作条件下での適応性が制限されますが、FGM は傾斜設計（タングステン含有量を高から低に段階的に変化させる、またはニッケル - 銅比を地域的に変化させるなど）によって性能を最適化します。たとえば、表面近くの銅含有量が多い領域は熱伝導性を向上させ、放熱のニーズに適しています。内部のタングステン含有量が多い領域は高密度を実現し、重量要件を満たします。FGM の非磁性特性は保持されるため、電磁気に敏感な環境に適しています。また、傾斜構造により耐熱衝撃性と界面結合も強化されるため、高温または高応力のシナリオに適しています。

**製造方法:** FGM タングステン - ニッケル - 銅合金は、通常、液相焼結または積層造形技術と組み合わせた層状粉末積層によって製造されます。層状粉末積層は、異なる組成比のタングステン、ニッケル、銅の粉末を層ごとに金型に配置して傾斜構造を形成し（高タングステン層から高銅層への傾斜など）、次に液相焼結によって傾斜構造を形成します。界面の結合を確実に

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

にするために、焼結プロセス中の温度と雰囲気とを正確に制御する必要があります。積層造形（選択的レーザー溶融、SLM など）は、異なる組成の粉末を層ごとに堆積させることによって傾斜構造を直接構築するため、複雑な形状の部品に適しています。熱間静水圧プレスは密度をさらに向上させ、傾斜界面の微細孔を排除します。精密機械加工（CNC フライス加工や放電加工など）により正確な形状が実現され、表面処理（化学不動態化や PVD コーティングなど）により耐食性と生体適合性が向上します。準備プロセスでは、勾配界面での応力集中を避けるために、粉末分布と焼結パラメータを最適化する必要があります。

**用途と利点:** 傾斜機能タングステン-ニッケル-銅合金は、多機能部品において大きな利点を持っています。例えば、新エネルギー自動車バッテリーパックの放熱基板では、表面の銅含有量が高いため熱伝導率が向上し、内部のタングステン含有量が高いため構造的なサポートが得られます。医療用放射線治療遮蔽カバーでは、傾斜構造により放射線遮蔽と軽量化が最適化されます。航空宇宙兵器ノズル部品では、傾斜設計により耐熱衝撃性が向上します。最適化の方向性としては、より高精度な傾斜制御技術（マルチマテリアル 3D プリントなど）の開発、複合コーティングによる表面特性の向上、シミュレーションによる傾斜分布の最適化などが挙げられます。課題は、製造コストの高さと傾斜インターフェースの安定性にあり、自動化とオンライン監視を通じてこれを低減する必要があります。

### 10.3 タングステン-ニッケル-銅合金のグリーン製造技術

タングステン - ニッケル - 銅合金の製造には、高エネルギーの粉末冶金プロセスと化学処理が必要であり、廃ガス、廃液、固形廃棄物が発生する可能性があります。環境に一定の負担をかけています。グリーン製造技術は、準備プロセスの改善と効率的な廃棄物リサイクル方法の開発により、資源の利用と生産効率を向上させながら、環境への影響を大幅に削減します。環境に優しい準備プロセスは、生産プロセスを最適化し、有害な化学物質の使用を減らし、エネルギー消費を減らすことでクリーンな生産を実現します。廃棄物リサイクル技術は、生産時に廃棄物やスクラップ部品をリサイクルすることで、資源の無駄と環境汚染を削減します。これらの技術は、環境規制の要件を満たすだけでなく、医療、エレクトロニクス、防衛などの分野におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の市場競争力を高め、持続可能な製造への新しい道を提供します。

#### 10.3.1 環境に優しい調製プロセス

環境に優しい製造プロセスは、タングステン - ニッケル - 銅合金の製造プロセスを最適化し、エネルギー消費、排気ガス、有害化学物質の使用を削減することにより、クリーンで効率的な製造プロセスを作り出すことを目的としています。従来の粉末冶金プロセスには、高エネルギー焼結と化学洗浄のステップが含まれており、酸化物排ガスや酸性廃液が発生する可能性があります。環境に優しい製造プロセスでは、低エネルギー焼結技術、グリーンバインダー、クリーンな処理方法を採用することで、環境への影響を大幅に低減します。低エネルギー焼結技術は、放電プラズマ焼結（SPS）などの高速焼結方法を使用します。これは、パルス電流と高圧により急速に加熱することで、焼結時間を短縮し、エネルギー消費を削減しながら、合金の密度と性能を維持します。グリーンバインダーは、従来のパラフィンまたはポリマーバイン

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ダーの代わりに、分解性または無毒の材料を使用し、金属射出成形（MIM）における揮発性有機化合物の排出を削減し、脱脂中の排気ガス汚染を削減します。クリーンな加工方法では、油性クーラントの代わりに水性クーラントを使用することで加工中の有害な廃液を削減し、同時に精密加工プロセスを最適化して粉塵や廃棄物の発生を削減します。

環境に優しい製造プロセスは、生産環境の管理にも重点を置いています。高純度不活性ガスまたは真空環境で焼結・加工することで、タングステン、ニッケル、銅粉末の酸化を防ぎ、酸化物廃ガスの発生を抑えます。廃水リサイクル処理システムは、生産時に洗浄液を回収・精製することで、水の浪費と環境汚染を削減します。プロセス最適化には、自動制御システムの使用も含まれ、焼結温度と雰囲気を正確に制御し、生産の安定性を向上させ、プロセスエラーによる廃棄物を削減します。環境に優しい製造プロセスの利点は、エネルギー消費と排出量を削減しながら、合金の高密度、非磁性、熱伝導性を維持し、医療用放射線治療遮蔽材、電子機器放熱基板、国防用カウンターウェイト部品などのニーズを満たすことです。最適化の方向性としては、より効率的な急速焼結技術の開発、バイオベースバインダーの応用検討、生産効率のさらなる向上のためのインテリジェント製造システムの統合などが挙げられます。

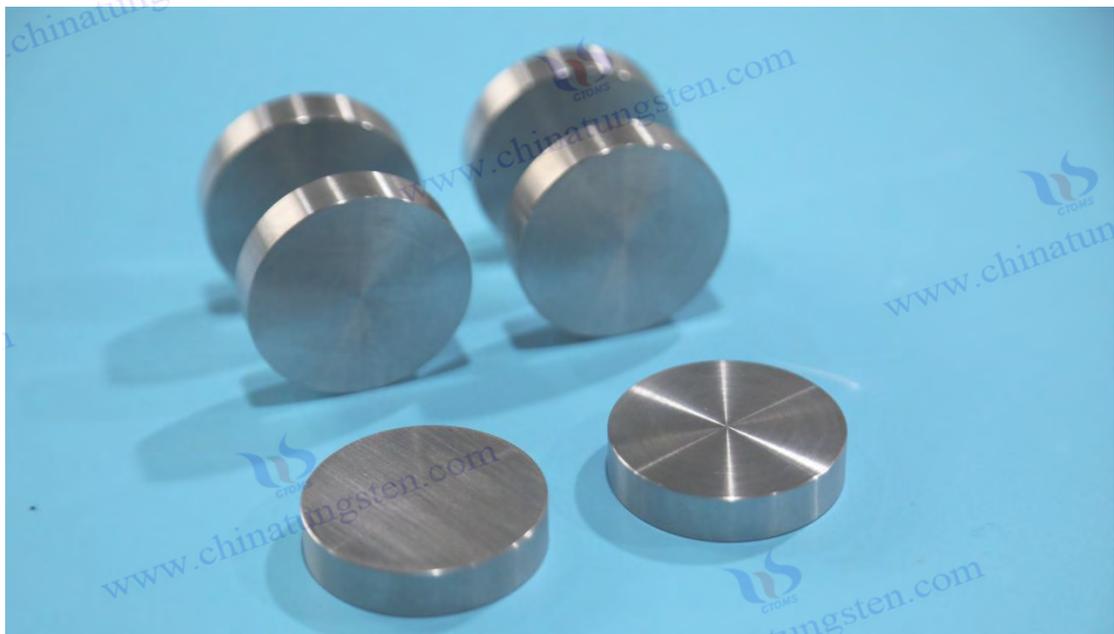
### 10.3.2 廃棄物リサイクル技術

合金の製造において、廃棄物（粉末、チップなど）やスクラップ部品（医療用シールド部品やカウンターウェイトなど）をリサイクルすることで、資源の無駄や環境汚染を削減し、材料の経済性と持続可能性を向上させます。従来のリサイクル方法には、二次汚染を引き起こす高エネルギー精錬や化学処理が含まれる場合があります。グリーン廃棄物リサイクル技術は、物理的分離、化学的精製、効率的な再利用プロセスを通じて、高い回収率と低い環境影響を実現します。物理的分離では、機械的な粉砕とふるい分けを用いて、廃棄物中のタングステン、ニッケル、銅の成分を最初に分離し、化学処理の必要性を減らします。化学的精製では、環境に優しい溶媒（水性溶液や低毒性の酸性液体など）を使用して金属成分を分離・精製し、従来の強酸や高温精錬で発生する廃ガスや廃液を回避します。効率的な再利用プロセスでは、回収された金属粉末を粉末冶金または MIM プロセス用に再配合し、新しい合金部品を製造して性能の一貫性を維持します。

廃棄物リサイクル技術には、廃部品のリサイクルも含まれます。廃棄された医療用コリメータ、電子ヒートシンク、防衛用カウンターウェイトなどを分解・選別することで、使用可能なタングステン・ニッケル・銅材料を抽出し、洗浄、粉砕、再焼結することで高品質の粉末原料に変換します。リサイクルプロセスは、合金の非磁性および生体適合性に影響を与える不純物の混入を避けるため、クリーンな環境で実施する必要があります。リサイクル粉末の組成と純度を高度なオンライン監視技術を用いて検出し、生産基準を満たしていることを確認します。廃棄物リサイクル技術の利点は、一次タングステン、ニッケル、銅鉱物への依存を大幅に低減し、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

採掘・精錬による環境への影響を軽減し、固形廃棄物の蓄積を削減できることです。最適化の方向性としては、より効率的な分離技術（電磁選別やレーザー選別など）の開発、閉ループリサイクルシステムの検討、そしてリサイクル粉末を複雑な部品製造に直接使用するための積層造形技術の統合などが挙げられます。



CTIA GROUP LTD タングステンニッケル銅合金

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 第 11 章 タングステンニッケル銅合金の一般的な問題と解決策

タングステン-ニッケル-銅合金は、高密度、非磁性、優れた熱伝導性、低熱膨張係数といった特性から、航空宇宙、医療、電子情報、防衛、エネルギー分野で広く使用されています。粉末冶金法で製造されるこの合金は、タングステンの高密度とニッケル-銅結合相の靱性および熱伝導性を兼ね備えており、高精度かつ過酷な環境下での使用に適しています。しかしながら、製造工程においては、焼結欠陥、組成の不均一性、加工の難しさなど、様々な問題が発生する可能性があり、合金の性能と信頼性に影響を与えます。これらの問題を解決するには、プロセスフローの最適化、設備制御の改善、そして高度な技術の導入によって、合金の高品質と均一性を確保する必要があります。

### 11.1 タングステン-ニッケル-銅合金の製造プロセス

タングステン-ニッケル-銅合金は、主に粉末冶金プロセスに依存しており、粉末の混合、プレス、焼結、後処理が含まれます。不適切な原材料、設備、またはプロセスパラメータにより、各工程で問題が発生する可能性があります。焼結は重要なステップとして、合金の密度、微細構造、性能に直接影響しますが、多孔性、亀裂、成分の偏析などの欠陥が発生しやすくなります。これらの問題は、合金の機械的特性の低下、不十分な熱伝導性、または非磁性特性の損傷につながり、医療用シールド部品、電子機器の放熱基板、または国防用カウンターウェイト部品への応用に影響を与える可能性があります。製造プロセスの問題を解決するには、原材料の選択、プロセスの最適化、品質管理から始めて、合金の性能が需要の高い用途のニーズを満たすことを保証する必要があります。

#### 11.1.1 焼結欠陥の解決策

焼結欠陥は、タングステン-ニッケル-銅合金の製造工程でよく見られる問題で、主に気孔、亀裂、組成偏析、焼結ムラとして現れます。これらの欠陥は、合金の密度、機械的特性、熱伝導率を低下させ、高精度用途における信頼性に影響を与えます。気孔は通常、粉末粒子間の隙間の不完全な充填や残留ガスによって発生し、密度不足につながり、放射線遮蔽効果やカウンターウェイト効果が弱まる可能性があります。亀裂は、焼結中の熱応力や冷却速度の不均一性によって発生することが多く、合金の靱性と耐久性に影響を与えます。組成偏析は、タングステン、ニッケル、銅粉末の不均一な分布、または液相焼結中の流動性の不足によって引き起こされ、熱伝導率の低下や非磁性特性の劣化など、局所的な特性の不一致につながります。不均一な焼結は、炉内の不適切な温度勾配または雰囲気制御に関連しており、合金の微細構造の均一性に影響を与えます。

**解決策:** 焼結欠陥については、原料選択の最適化、焼結プロセスの改善、プロセス制御の強化によって解決できます。高純度で均一な粒子サイズのタングステン、ニッケル、銅粉末を使用することで、粉末の化学組成と物理的性質の一貫性を確保し、気孔と偏析の発生を低減します。高エネルギーボールミルまたはメカニカルアロイング技術を使用して粉末を混合し、粒子の均一性と接触面積を向上させ、液相焼結中のニッケル相と銅相の濡れと充填効果を促進します。焼結プロセスパラメータを最適化し、段階的な温度上昇焼結戦略を採用し、液相焼結温度

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

までゆっくりと加熱することで、ニッケルと銅の液相が完全に流動し、タングステン粒子間の隙間を埋め、気孔の形成を低減します。同時に、冷却速度を制御して熱応力による亀裂を回避します。酸化物の形成を防ぎ、合金の非磁性と熱伝導性を維持するため、焼結には高純度不活性ガス（アルゴンなど）または真空環境を使用します。また、パルス電流と高圧を用いて急速加熱し、焼結時間を短縮し、粒成長を抑制し、気孔率と偏析を低減する放電プラズマ焼結（SPS）などの急速焼結技術を導入します。

焼結工程における品質管理を強化し、オンライン監視システムを用いて炉内の温度、雰囲気、圧力をリアルタイムで検出し、焼結条件の安定性を確保します。後処理工程として熱間静水圧加圧（HIP）を行うことで、高温高圧下で残留気孔や微小亀裂をさらに除去し、合金の密度と均一性を向上させます。特に、医療用コリメータや航空宇宙用カウンターウェイト部品などの需要の高い用途に適しています。焼結装置を定期的に校正することで、炉内の温度場を均一に保ち、局所的な過熱や低温による焼結ムラを回避します。さらに、シミュレーション技術を組み合わせて焼結パラメータを最適化し、液相の流れや応力分布を予測し、試行錯誤コストを削減します。このソリューションの利点は、合金の密度、機械的特性、性能の一貫性を大幅に向上させ、医療、電子、防衛分野の厳しい要件を満たすことです。最適化の方向性としては、より効率的な急速焼結装置の開発、プロセス安定性を向上させるための自動制御システムの検討、そして複雑な形状を直接作製し、後続の加工欠陥を低減するための積層造形技術の統合などが挙げられます。将来的には、グリーン製造技術と組み合わせることで、焼結プロセスのエネルギー消費と排出量をさらに削減し、タングステン-ニッケル-銅合金の持続可能な発展を促進することができます。

### 11.1.2 組成均一性制御

組成均一性の問題は、タングステン - ニッケル - 銅合金の製造において共通の課題です。これは、合金中のタングステン、ニッケル、銅の成分が不均一に分布していることを指し、局所的な密度差、熱伝導率の低下、または非磁性特性の劣化につながる可能性があります。組成の不均一性は通常、粉末の混合不足、粒子サイズの差、または液相焼結中の流動性の悪さによって引き起こされます。タングステンは高密度であるため、粉末混合プロセス中に沈降しやすく、ニッケル - 銅結合相の不均一な分布は焼結後に局所的な偏析を引き起こし、合金の性能の一貫性に影響を与えます。たとえば、医療用放射線治療遮蔽部品では、組成の不均一性が放射線遮蔽効果を低下させる可能性があり、電子機器のヒートシンクでは、不安定な熱伝導率を引き起こし、放熱効率に影響を与える可能性があります。

**解決策:** 組成の均一性を確保するには、粉末選択の最適化、粉末混合プロセスの改善、焼結制御の強化によって解決できます。粒子の沈降と成層化傾向を低減し、混合初期段階での均一性を確保するために、粒径が均一な高純度のタングステン、ニッケル、銅粉末を選択します。粉末混合には、高エネルギーボールミルまたはメカニカルアロイング技術を使用します。長時間の高強度粉砕により、タングステン、ニッケル、銅粒子は十分に分散し、粒子間の接触均一性が向上し、不純物の混入を回避します。三次元粉末混合装置または超音波支援粉末混合を使用することで、粉末の分散性と流動性をさらに向上させ、沈降を低減します。液相焼結プロセスを最適化し、段階的な加熱戦略を通じてニッケル-銅液相の溶融と流動を制御し、タングステ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ン粒子を完全に濡らし、粒子間の隙間を埋め、偏析を低減します。銅の酸化による組成の不均衡を防ぐため、焼結プロセス中は高純度不活性ガスまたは真空環境を使用します。

プロセス制御の強化は、組成均一性を確保する鍵です。オンライン監視システムを用いて、焼結中の粉末混合度と組成分布をリアルタイムで検出し、蛍光 X 線分析または電子顕微鏡で均一性を検証します。熱間等方圧加圧 (HIP) は、高温高压下で局所的な偏析や微細孔を除去し、合金の密度と組成の一貫性を向上させる後処理プロセスであり、航空宇宙用カウンターウェイトや医療用コリメータなどの高精度用途に特に適しています。粉末混合・焼結装置を定期的に校正することで、安定したプロセスパラメータを確保し、装置の偏差による組成の不均一性を回避します。さらに、シミュレーション技術を組み合わせることで、粉末混合・焼結パラメータを最適化し、液体の流れと組成分布を予測し、試験コストを削減します。このソリューションの利点は、合金の性能の一貫性を大幅に向上させ、医療、電子、防衛分野の厳しい要件を満たすことです。最適化の方向性としては、自動粉末混合システムの開発、均一性をさらに向上させるためのナノスケール粉末の探索、組成分布を直接制御するための添加剤製造技術の統合などが挙げられます。

## 11.2 タングステン-ニッケル-銅合金の応用故障解析

タングステン - ニッケル - 銅合金は、材料の欠陥、環境要因、不適切な使用により、要求の厳しい用途（医療用放射線治療遮蔽、電子機器の放熱基板、防衛用カウンターウェイト部品など）で故障し、性能低下や部品損傷につながる可能性があります。用途における故障は、機械的特性の不足、熱伝導率の低下、表面腐食、寸法不安定性などの形で現れ、機器の安全性と信頼性に影響を及ぼします。例えば、医療機器では故障により放射線遮蔽効果が低下する可能性があり、電子機器では過熱故障が発生する可能性があり、防衛機器ではカウンターウェイトの精度や耐衝撃性に影響が出る可能性があります。故障の原因を分析し、解決策を提案することが、材料の準備、環境適応性、使用条件などから始めて、合金用途の信頼性を向上させる鍵となります。

**不具合の原因と解決策:** アプリケーション不具合の一般的な原因には、準備不良、環境侵食、機械的過負荷などがあります。気孔、亀裂、組成の不均一性などの準備不良は、合金の機械的特性と熱伝導性を直接的に低下させます。これらの欠陥は、焼結プロセス（放電プラズマ焼結など）を最適化するか、熱間静水圧プレスを使用して緻密で均一な微細構造を確保することで排除できます。環境侵食は主に湿気、化学消毒、高温酸化によって引き起こされ、特に医療機器や海洋環境において表面腐食や性能低下を引き起こします。解決策としては、PVD TiN コーティングや化学不動態化などの耐腐食性表面処理を施し、緻密な保護層を形成して耐酸化性と耐腐食性を向上させること、合金組成を最適化しニッケル銅比を高めることで耐腐食性を向上させることなどが挙げられます。機械的過負荷は、ミサイルのカウンターウェイトや装甲保護など、衝撃や振動の大きい用途でよく発生し、亀裂や変形を引き起こす可能性があります。耐衝撃性は、合金の靱性を向上させる（ナノ構造設計の使用など）か、コンポーネントの形状を最適化する（フィレットまたは勾配構造の追加など）ことによって強化できます。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

環境適応性は故障解析の焦点です。高温または熱サイクル環境では、熱応力によって寸法不安定性や界面剥離が発生し、放熱基板やシールド部品の性能に影響を与える可能性があります。解決策としては、低熱膨張係数の配合設計と傾斜機能材料（FGM）の組み合わせによる熱応力分布の最適化などが挙げられます。電磁干渉は、特に MRI 装置やレーダーシステムにおいて非磁性故障を引き起こす可能性があります。鉄不純物含有量の厳格な管理とオンライン磁化試験によってこれを確実に防ぐことができます。過負荷運転や設計要件に従わない設置などの不適切な使用は、部品の故障につながる可能性があります。ユーザートレーニングや標準化された設置プロセスを通じて人為的なミス削減する必要があります。品質管理では、走査型電子顕微鏡による微細構造の分析、塩水噴霧試験による耐食性の検証、振動試験による機械的特性の評価を行い、部品がアプリケーション基準を満たしていることを確認します。このソリューションの利点は、合金の信頼性と寿命を総合的に向上させ、医療、電子、防衛分野の厳しい要件を満たすことです。最適化の方向性としては、環境侵食に対処するための自己修復コーティングの開発、故障リスクをリアルタイムで検出するためのインテリジェント監視技術の探究、耐故障構造をカスタマイズするための付加製造技術の統合などが挙げられます。

### 11.2.1 熱サイクル故障の解決策

熱サイクル破損は、高温または温度差環境におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の一般的な破損モードであり、熱膨張と収縮の繰り返しによってマイクロクラック、界面剥離、または寸法変形として現れ、合金の構造健全性と性能安定性に影響を与えます。熱サイクル破損は主に熱応力によって引き起こされます。合金が高温動作または極端な温度差環境で急激な温度変化を受けると、熱膨張係数の差により材料内部またはマトリックスとの界面に応力集中が発生し、亀裂の伝播や部品の破損につながる可能性があります。たとえば、医療用 CT 装置の検出器シールドでは、熱サイクルによってシールド部品が変形し、放射線遮蔽効果が低下する可能性があります。

**解決策:** 熱サイクル破壊は、合金組成の最適化、微細構造の改善、高度なプロセス採用によって解決できます。ニッケル銅比を調整し、銅含有量を増やすことで熱伝導率を向上させ、熱分散を促進し、局所的な温度差を減らし、熱応力の蓄積を軽減します。傾斜機能材料（FGM）設計を用いて、合金内部にタングステン、ニッケル、銅の含有量を段階的に分布させることで、熱膨張係数のマッチングを最適化し、界面応力を軽減します。これは、シリコン、セラミックスなどの基板と組み合わせた放熱基板やシールド部品に特に適しています。ナノ構造合金を導入し、ナノスケール粒子の粒界強化効果を利用して耐熱疲労性を高め、微小亀裂の形成を低減します。焼結プロセスを最適化し、放電プラズマ焼結（SPS）を用いて緻密な構造を迅速に形成し、気孔と応力集中点を低減します。さらに、熱間静水圧加圧（HIP）により微細気孔が除去され、合金の耐熱衝撃性が向上します。

表面処理は、熱サイクルによる破損に対処するための重要な対策です。高性能コーティングを施して遮熱層を形成することで、合金表面への熱衝撃の影響を軽減し、界面の結合力を高めて剥離を防止できます。フィレットの増加や厚さの勾配の増加など、部品の形状設計を最適化して熱応力を分散させ、亀裂のリスクを低減します。品質管理では、熱サイクル試験を通じて実際の使用状況をシミュレートし、走査型電子顕微鏡と組み合わせて微小亀裂を分析し、合金の

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱安定性を検証します。このソリューションの利点は、高温および温度差環境における合金の信頼性を大幅に向上させ、医療、電子、航空宇宙分野の厳しい要件を満たすことです。最適化の方向性には、熱応力を動的に緩和するアダプティブコーティングの開発や、複雑な勾配構造を製造するための3Dプリント技術の探求が含まれます。

### 11.2.2 環境腐食保護

環境腐食は、湿気、化学殺菌、または高温酸化環境におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の一般的な故障モードであり、表面酸化、腐食ピット、または材料劣化として現れ、合金の性能と寿命に影響を与えます。腐食は主に湿度、塩水噴霧、化学洗浄剤などの環境要因によって引き起こされ、特に医療機器（頻繁な消毒が必要）、海洋環境（船舶搭載レーダーカウンターウェイトなど）、または高温用途（ロケットノズル部品など）で発生します。結合相としての銅は酸化または化学攻撃の影響を受けやすく、表面粗さ、熱伝導率の低下、または非磁性の劣化をもたらします。たとえば、医療用放射線治療シールドカバーでは、腐食によって放射線シールド効果が低下する可能性があります。新エネルギー自動車モーターカウンターウェイトでは、腐食が表面摩耗を引き起こし、動的バランスに影響を与える可能性があります。

**解決策:** 環境腐食は、合金組成の最適化、保護コーティングの適用、環境管理の改善によって解決できます。ニッケル含有量の増加、またはニッケル銅比の最適化により、結合相の耐食性が向上し、湿気や化学環境における銅の酸化傾向を低減できます。PVD TiN や CrN コーティングなどの表面処理技術は、緻密な保護層を形成して酸素、水分、化学物質を遮断し、耐食性を大幅に向上させます。化学不動態化処理は、表面に酸化物保護膜を形成することで耐酸化性と生体適合性をさらに向上させ、医療用補綴物や外科用ナビゲーション部品に適しています。電気化学研磨は表面仕上げを最適化し、腐食の開始点を減らし、耐食性を向上させます。

準備プロセスを改善し、腐食感受性を低減します。高純度の原材料を使用し、クリーンな焼結環境（真空または高純度アルゴンなど）で焼結することで、鉄や酸素などの不純物の混入を防ぎ、合金の非磁性および耐腐食性を維持します。熱間静水圧プレス（HIP）は合金の密度を高め、腐食の起点となる気孔の発生を抑えます。医療機器では強酸・強アルカリ洗浄剤の代わりに中性消毒剤を使用するなど、使用環境管理を最適化し、化学腐食を低減します。

また、海洋環境ではシーリング設計を組み合わせ、塩水噴霧と湿気を遮断します。品質管理では、塩水噴霧試験、湿熱サイクル試験、表面分析（SEM または XPS）を通じて耐食性を検証し、医療および軍事基準への準拠を確保します。このソリューションの利点は、過酷な環境下での合金寿命を大幅に延ばし、医療、電子、防衛分野の信頼性要件を満たすことです。最適化の方向性としては、腐食による損傷を動的に修復する自己修復コーティングの開発、保護効率を向上させるナノ複合コーティングの検討、腐食状態をリアルタイムで評価するオンライン監視技術の統合などが挙げられます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録

タングステンニッケル銅合金用語

用語	定義と説明
粉末冶金	金属粉末を混合し、プレスし、焼結してタングステン - ニッケル - 銅合金を製造することにより、高密度かつ均質な微細構造を保證する金属材料を製造するプロセス。
液相焼結	焼結プロセス中に、ニッケル銅相が高温で溶けて液体となり、タングステン粒子を濡らして隙間を埋めるため、合金の密度と性能が向上します。
熱間等方圧加圧 (HIP)	合金を高温高压下で全方向圧力下で処理し、微細孔や欠陥を除去し、密度と機械的特性を向上させるプロセス。
金属射出成形 (MIM)	脱脂・焼結することで、複雑な形状の高精度部品を製造するプロセスで、小型化用途に適しています。
高密度	タングステン - ニッケル - 銅合金は、単位体積あたりの質量が大きいため、医療用放射線治療遮蔽部品や航空宇宙用カウンターウェイトなどのカウンターウェイトおよびシールド用途に適しています。
非磁性	この合金は磁場を生成せず、また磁場によって妨害されることもないため、MRI 装置やレーダー システムなどの電磁気に敏感な環境に適しています。
熱伝導率	合金の熱伝導能力と銅相の追加により、熱放散用途（電子ヒートシンク、バッテリー基板など）に優れています。
低い熱膨張係数	この合金は温度変化による寸法変化が小さいため、熱サイクル中の形状安定性が確保され、高精度部品に適しています。
傾斜機能材料 (FGM)	高密度コアと高熱伝導性表面層の組み合わせなど、組成または構造の勾配設計により性能が最適化された材料。
ナノ構造合金	この合金はナノスケールの粉末から作られ、微細な粒子構造を持っているため、強度、靱性、熱伝導性が向上します。
焼結欠陥	焼結プロセス中に生成される気孔、亀裂、または成分の分離は性能に影響を及ぼしますが、プロセスと後処理を最適化することで解決できます。
組成の均一性	合金中のタングステン、ニッケル、銅の均一な分布により、高エネルギーボールミリングとオンライン監視によって制御される一貫したパフォーマンスが保證されます。
熱サイクル障害	温度変化の繰り返しによって生じる亀裂や界面剥離は、勾配設計とコーティングによって軽減できます。
環境腐食	湿気や化学環境によって引き起こされる表面の酸化や劣化は、耐腐食コーティングやコンポーネントによって最適に保護できます。
生体適合性	人体組織に接触しても有害な反応を引き起こさないため、義肢や手術ナビゲーション部品などの医療用途に適しています。

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 中国語参考文献

- [1] 張立、王勇。タングステン基高密度合金の製造と性能研究。材料科学工学ジャーナル、2019年。
- [2] 李暁、劉志。電子機器の放熱におけるタングステン-ニッケル-銅合金の応用の進歩。電子材料技術、2020年。
- [3] 陳輝、趙明。タングステン合金製造におけるグリーン製造技術の応用。中国材料進歩、2021年。
- [4] 王強、張華。ナノ構造タングステン合金の製造と性能最適化。ナノテクノロジーと精密工学、2022年。
- [5] 孫偉、李強。高精度タングステン合金部品における機能傾斜材料の応用。複合材料ジャーナル、2023年。
- [6] 劉楊、張偉。医療機器におけるタングステン - ニッケル - 銅合金の放射線遮蔽に関する研究。医療機器研究、2021年。
- [7] 周平、徐鋒。航空宇宙カウンターウェイトにおけるタングステン - ニッケル - 銅合金の応用。航空材料ジャーナル、2020年。
- [8] 楊凡、王雷。タングステン - ニッケル - 銅合金の製造における焼結欠陥制御戦略。粉末冶金技術、2022年。
- [9] 張濤、李娜。タングステン-ニッケル-銅合金の廃棄物回収およびリサイクル技術。循環経済と材料、2023年。
- [10] 何明、孫麗。国防および軍事産業分野におけるタングステン-ニッケル-銅合金の応用と課題。国防技術、2021年。

## 英語の参考文献

- [1] Smith, J., Brown, T. 「航空宇宙および医療用途向け高密度合金」 Journal of Materials Science、Springer、2020年。
- [2] Zhang, L., Wang, Y. 「タングステンベース合金の粉末冶金の進歩」 Materials Today、Elsevier、2019年。
- [3] Kumar, R., & Singh, A. 電磁環境における非磁性タングステン合金。応用物理学ジャーナル、AIP出版、2021年。
- [4] Li, X. 他「エレクトロニクスおよびエネルギー用途向け熱管理材料」 Advanced Materials Research、Wiley、2022年。
- [5] Chen, H., Liu, Z. 高性能合金のためのグリーン製造技術。持続可能な材料と技術、エルゼビア、2023年。
- [6] 王Q、趙M. 「高精度用途における機能性傾斜材料」 複合材料科学技術、エルゼビア、2021年。
- [7] Lee, S., et al. 「極限環境用ナノ構造タングステン合金」 ナノテクノロジーレビュー、De Gruyter、2023年。
- [8] ジョンソン、P.、テイラー、R. 「医療機器の放射線遮蔽におけるタングステン合金」 医学物理学、AAPM、2020年。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT