

タングステン銅ヒートシンクとは

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD は、インダストリアルインターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造の促進に尽力しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、1997 年に www.chinatungsten.com（中国初のトップクラスのタングステン製品ウェブサイト）を起点に設立され、タングステン、モリブデン、希土類元素産業に特化した中国の先駆的な e コマース企業です。CTIA GROUP は、タングステンおよびモリブデン分野での約 30 年にわたる豊富な経験を活かし、親会社の優れた設計・製造能力、優れたサービス、世界的なビジネス評判を継承し、タングステン化学薬品、タングステン金属、超硬合金、高密度合金、モリブデン、モリブデン合金の分野で包括的なアプリケーションソリューションプロバイダーになりました。

CHINATUNGSTEN ONLINE は、過去 30 年間で 200 以上の多言語対応タングステン・モリブデン専門ウェブサイトを開設し、20 以上の言語に対応しています。タングステン、モリブデン、希土類元素に関するニュース、価格、市場分析など、100 万ページを超える情報を掲載しています。2013 年以来、WeChat 公式アカウント「CHINATUNGSTEN ONLINE」は 4 万件以上の情報を発信し、10 万人近くのフォロワーを抱え、世界中の数十万人の業界関係者に毎日無料情報を提供しています。ウェブサイト群と公式アカウントへの累計アクセス数は数十億回に達し、タングステン、モリブデン、希土類元素業界における世界的に権威のある情報ハブとして認知され、24 時間 365 日、多言語ニュース、製品性能、市場価格、市場動向などのサービスを提供しています。

CTIA GROUP は CHINATUNGSTEN ONLINE の技術と経験を基盤とし、顧客の個別ニーズへの対応に注力しています。AI 技術を活用し、顧客と共同で、特定の化学組成と物理的特性（粒径、密度、硬度、強度、寸法、公差など）を持つタングステン・モリブデン製品を設計・製造し、型開き、試作、仕上げ、梱包、物流まで、全工程を統合したサービスを提供しています。過去 30 年間、CHINATUNGSTEN ONLINE は、世界中の 13 万社以上の顧客に、50 万種類以上のタングステン・モリブデン製品の研究開発、設計、製造サービスを提供し、カスタマイズ可能で柔軟性が高く、インテリジェントな製造の基盤を築いてきました。CTIA GROUP はこの基盤を基に、インダストリアルインターネット時代におけるタングステン・モリブデン材料のインテリジェント製造と統合イノベーションをさらに深化させています。

ハンス博士と CTIA GROUP のチームは、30 年以上にわたる業界経験に基づき、タングステン、モリブデン、希土類に関する知識、技術、タングステン価格、市場動向分析を執筆・公開し、タングステン業界と自由に共有しています。ハンス博士は、1990 年代からタングステンおよびモリブデン製品の電子商取引および国際貿易、超硬合金および高密度合金の設計・製造において 30 年以上の経験を持ち、国内外でタングステンおよびモリブデン製品の専門家として知られています。CTIA GROUP のチームは、業界に専門的で高品質な情報を提供するという原則を堅持し、生産の実践と市場の顧客ニーズに基づいた技術研究論文、記事、業界レポートを継続的に執筆しており、業界で広く評価されています。これらの成果は、CTIA GROUP の技術革新、製品のプロモーション、業界交流に強力なサポートを提供し、同社が世界的なタングステンおよびモリブデン製品の製造と情報サービスのリーダーとなることを推進しています。



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

目次

第1章 はじめに

- 1.1 ヒートシンク材料の理解
 - 1.1.1 ヒートシンク材料の定義と機能
 - 1.1.2 電子システムにおけるヒートシンク材料の重要な役割
- 1.2 タングステン銅ヒートシンクの基本紹介
 - 1.2.1 一般的なタングステン銅ヒートシンクの成分比
 - 1.2.2 タングステン銅ヒートシンクの微細構造
 - 1.2.3 タングステンと銅の結合機構の原子レベルでの解析
- 1.3 タングステン銅ヒートシンクの基本特性
- 1.4 タングステン銅ヒートシンクの開発の歴史と現状
 - 1.4.1 タングステン銅ヒートシンクの開発
 - 1.4.2 さまざまな時期における主要な技術革新
 - 1.4.3 タングステン銅ヒートシンクの応用状況と開発の見通し

第2章 タングステン銅ヒートシンクの性能

- 2.1 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率
 - 2.1.1 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導メカニズム
 - 2.1.2 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に影響を与える要因
 - 2.1.2.1 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に対する組成の影響
 - 2.1.2.2 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に対する構造の影響
 - 2.1.2.3 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に対する不純物の影響
 - 2.1.3 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率試験方法
 - 2.1.4 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率を向上させる方法
- 2.2 タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数の制御
 - 2.2.1 タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数の原理
 - 2.2.2 タングステン-銅比の熱膨張係数への影響
 - 2.2.3 タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数の試験方法
 - 2.2.3 正確な熱膨張係数のマッチングを実現するための方法と戦略
- 2.3 タングステン銅ヒートシンクの機械的特性
 - 2.3.1 タングステン銅ヒートシンクの強度とその試験方法
 - 2.3.2 タングステン銅ヒートシンクの硬度とその試験方法
 - 2.3.3 タングステン銅ヒートシンクの靱性とその試験方法
 - 2.3.4 タングステン銅ヒートシンクの延性とその試験方法
 - 2.3.5 タングステン銅ヒートシンクの機械的特性と熱的特性の相関関係
- 2.4 タングステン銅ヒートシンクの電気伝導率およびその他の特性
 - 2.4.1 タングステン銅ヒートシンクの電気伝導率とその試験方法
 - 2.4.2 タングステン銅ヒートシンクの耐酸化性およびその試験方法
 - 2.4.3 タングステン銅ヒートシンクの耐食性およびその他の性能特性
- 2.5 CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク MSDS

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第3章 タングステン銅ヒートシンクの分類

- 3.1 タングステン銅ヒートシンクの組成比による分類
 - 3.1.1 W90Cu10 の性能と応用
 - 3.1.2 W85Cu15 の性能と応用
 - 3.1.3 W80Cu20 の性能と応用
 - 3.1.4 W75Cu25 の性能と応用
 - 3.1.5 W50Cu50 の性能と応用
 - 3.1.6 異なるタングステン-銅組成比の性能比較
- 3.2 タングステン銅ヒートシンクの製造工程による分類
 - 3.2.1 粉末冶金法によるタングステン銅ヒートシンクの製造
 - 3.2.2 浸透法によるタングステン銅ヒートシンクの製造
（ホットプレス焼結、プラズマ噴霧など）
- 3.3 タングステン銅ヒートシンクの用途分野別分類
 - 3.3.1 電子パッケージ用タングステン銅ヒートシンク
 - 3.3.2 航空宇宙用途向けタングステン銅ヒートシンク
 - 3.3.3 産業用熱管理用タングステン銅ヒートシンク
 - 3.3.4 レーザー加熱用タングステン銅ヒートシンク
 - 3.3.5 その他の特殊用途のタングステン銅ヒートシンク

第4章 タングステン銅ヒートシンクの製造技術

- 4.1 タングステン銅ヒートシンクの従来の製造プロセス
 - 4.1.1 粉末冶金（原理、プロセス、主要手順）
 - 4.1.2 浸透法（プロセスと長所と短所の分析）
 - 4.1.3 高温液相焼結の技術的ポイント
- 4.2 タングステン銅ヒートシンクの最新の革新技術
 - 4.2.1 熱間等方圧プレスの原理と利点
 - 4.2.2 放電プラズマ焼結技術の概要
 - 4.2.3 3D プリント技術などのその他の新興技術
- 4.3 タングステン銅ヒートシンクのプロセス比較と選択
 - 4.3.1 異なる調製プロセスが材料特性に与える影響の違い
 - 4.3.2 アプリケーション要件に基づいて適切な調製プロセスを選択するための考慮事項
 - 4.3.3 準備プロセスのコスト分析と最適化戦略
- 4.4 タングステン銅ヒートシンクの高品質管理と検査
 - 4.4.1 材料品質管理における主要なリンク
 - 4.4.2 材料性能試験方法および規格
 - 4.4.3 タングステン銅ヒートシンクの欠陥分析と改善策

第5章 電子情報分野におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

- 5.1 半導体デバイスの放熱
 - 5.1.1 パワー半導体チップの放熱課題
 - 5.1.2 チップ放熱におけるタングステン銅ヒートシンクの応用
 - 5.1.3 タングステン銅ヒートシンクと他の放熱材料との性能比較

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 集積回路パッケージング

- 5.2.1 集積回路パッケージにおけるヒートシンク材料の要件
- 5.2.2 さまざまなパッケージ形態におけるタングステン銅ヒートシンクの応用
- 5.2.3 タングステン銅ヒートシンクによる集積回路性能向上のメカニズム
- 5.3 通信機器の放熱
 - 5.3.1 5G 通信基地局装置の放熱要件の特性
 - 5.3.2 通信モジュールにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用
 - 5.3.3 タングステン銅ヒートシンクは通信機器の小型化と高効率化に貢献します
- 5.4 タングステン銅ヒートシンクの他の電子機器への応用
 - 5.4.1 コンピュータ CPU 冷却ソリューションへの応用
 - 5.4.2 民生用電子機器における潜在的用途の探究

第 6 章 エネルギー・電力産業におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

- 6.1 パワーエレクトロニクス機器の放熱
 - 6.1.1 サイリスタや IGBT などのパワーエレクトロニクスデバイスの発熱問題
 - 6.1.2 パワーエレクトロニクスデバイスにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用
 - 6.1.3 タングステン銅ヒートシンクによる電力システムの安定性と効率性の向上への貢献
- 6.2 新エネルギー発電設備
 - 6.2.1 太陽光発電インバータの放熱要件
 - 6.2.2 風力タービンコンバータにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用
 - 6.2.3 新エネルギー産業の発展におけるタングステン銅ヒートシンクの重要性
- 6.3 エネルギー貯蔵システムの放熱
 - 6.3.1 リチウム電池エネルギー貯蔵システムの熱管理の課題
 - 6.3.2 エネルギー貯蔵電池の放熱におけるタングステン銅ヒートシンクの応用
 - 6.3.3 エネルギー貯蔵システムの性能向上におけるタングステン銅ヒートシンクの役割

第 7 章 航空宇宙分野におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

- 7.1 航空機電子機器の放熱
 - 7.1.1 複雑な環境における航空電子機器の放熱問題
 - 7.1.2 航空機航空電子機器システムにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用
 - 7.1.3 タングステン銅ヒートシンクは航空分野における軽量かつ高性能の要件を満たしています
- 7.2 衛星および宇宙船の熱制御
 - 7.2.1 衛星熱制御システムの動作原理と要件
 - 7.2.2 衛星電子機器におけるタングステン銅ヒートシンクの応用
 - 7.2.3 衛星エネルギーシステムにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用
 - 7.2.4 宇宙船の長期安定運用を保证するためのタングステン銅ヒートシンクの重要性
- 7.3 特殊環境におけるタングステン銅ヒートシンクの性能
 - 7.3.1 タングステン銅ヒートシンクに対する高温の影響
 - 7.3.2 低温によるタングステン銅ヒートシンクへの影響
 - 7.3.3 タングステン銅ヒートシンクへの放射線の影響

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.4 極限環境におけるタングステン銅ヒートシンクの安定性に関する研究

7.3.5 極限環境用タングステン銅ヒートシンクの最適化戦略

第 8 章 タングステン銅ヒートシンクの他の分野への応用

8.1 医療機器におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

8.1.1 医用画像機器の放熱要件

8.1.2 医療用レーザー機器におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

8.1.3 医療機器の性能向上におけるタングステン銅ヒートシンクの役割

8.2 工業製造におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

8.2.1 EDM における電極材料の応用

8.2.2 金型製造における潜在的用途の探究

第 9 章 タングステン銅ヒートシンクの開発展望

9.1 新しいタングステン銅ヒートシンクの研究開発方向

9.1.1 勾配構造設計とプロセス革新

9.1.2 ナノ複合材料の強化と界面工学

9.1.3 多機能統合設計

9.2 タングステン銅ヒートシンクと新技術の統合と開発

9.2.1 AI 駆動型材料遺伝子工学

9.2.2 モノのインターネットとインテリジェント熱管理システム

9.3 タングステン銅ヒートシンクの市場需要と産業展望

9.4 タングステン銅ヒートシンクの地域別競争状況

9.4.1 アジア太平洋地域の優位性（中国と日本の容量比率）

9.4.2 欧州と米国の技術的障壁と国内代替目標

9.5 タングステン銅ヒートシンクの課題と解決策

9.5.1 コスト管理戦略

9.5.2 パフォーマンス改善の方向性

第 10 章 タングステン銅ヒートシンクの規格と仕様

10.1 タングステン銅ヒートシンクの中国国家規格

10.2 タングステン銅ヒートシンクの国際規格

10.3 ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国、その他の世界各国におけるタングステン銅ヒートシンクの規格

付録:

タングステン銅ヒートシンク用語集

参考文献

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第 1 章 はじめに

1.1 ヒートシンク材料の理解

1.1.1 ヒートシンク材料の定義と機能

ヒートシンク材料とは、高い熱伝導率、適切な熱膨張係数、および優れた機械的性質を備えた材料のクラスを指し、電子機器またはその他の装置の動作中に発生する熱を吸収、伝導、および放散して、装置を安全な動作温度範囲内に維持するために使用されます。その主な機能は、効率的な熱伝導と熱放射を通じて、高温領域（チップや電源モジュールなど）から低温領域（環境や冷却システムなど）に熱を伝達し、デバイスの過熱による性能低下や故障を防ぐことです。ヒートシンク材料は通常、高い熱伝導率（たとえば、銅の熱伝導率は約 $401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、モリブデン銅合金の熱伝導率は約 $150\sim 270 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）を持ち、熱をすばやく伝達できます。また、熱応力を軽減するために電子部品の熱膨張係数と一致する必要があります。例えば、モリブデン銅板（Mo70Cu30 など）は、熱膨張係数を調整できるため（約 $8\sim 10\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、セラミック基板（窒化アルミニウムなど）との相性が非常に良く、5G 通信機器の放熱基板としてよく使用されています。ヒートシンク材料のもう 1 つの重要な役割は、効果的な熱管理によってシステムの長期信頼性を向上させ、デバイスの劣化速度を低下させることです。例えば、電気自動車のパワーモジュールでは、ヒートシンク材料は高負荷状態でもバッテリーとインバータの安定性を確保し、機器の寿命を延ばします。さらに、ヒートシンク材料は、複雑な製造プロセスや、航空宇宙機器の高温・振動条件など、さまざまな動作環境に適応するために、優れた加工性と耐腐食性も備えている必要があります。

ヒートシンク材料の役割は、熱管理だけでなく、構造サポートや電気性能の最適化も含まれます。一部の用途では、ヒートシンク材料は導電性である必要があります。たとえば、モリブデン銅板は、高周波電子機器の放熱基板と導電性部品の両方として使用され、その導電性は $30\sim 40\%$ IACS（国際軟銅規格）に達します。ヒートシンク材料の選択は、機器の性能、コスト、信頼性に直接影響します。たとえば、オプトエレクトロニクスの分野では、高出力レーザーはヒートシンク材料（Mo60Cu40 など）を使用して熱負荷を管理し、レーザー波長の安定性を確保しています。全体として、ヒートシンク材料は、熱的、電気的、機械的特性を最適化することで、現代の電子システムの効率的な動作をサポートし、高性能機器の小型化と高出力を実現するための鍵となります。

1.1.2 電子システムにおけるヒートシンク材料の重要な役割

高性能化、小型化、高電力密度化に伴い、熱管理の需要が急増しているため、ヒートシンク材料は電子システムにおいて重要な役割を果たしています。ムーアの法則に基づくチップ集積化の推進に伴い、CPU、GPU、パワー半導体などの現代の電子機器の電力密度は大幅に増加し、大量の熱が発生します。例えば、5G 基地局の RF パワーアンプは、高周波動作時に大き

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

な熱負荷を発生します。ヒートシンク材料によって熱が効果的に放散されない場合、デバイスの性能低下や永久的な損傷を引き起こす可能性があります。ヒートシンク材料は熱を素早く伝導し、デバイスの動作温度を安全な範囲（デバイスの種類によって異なりますが、通常は 100～150℃以下）に維持することで、システムの効率的な動作と長期的な信頼性を確保します。例えば、モリブデン銅板は、高い熱伝導性とセラミック基板との熱膨張係数の整合により信号伝送の安定性を確保できるため、5G 通信機器のヒートシンクとして広く使用されています。

電子システムにおけるヒートシンク材料の重要な位置付けは、システム設計と性能最適化への影響にも反映されています。現代の電子システムは小型化を追求しており、放熱部品の設置スペースは限られています。そのため、ヒートシンク材料は限られた体積内で効率的な熱管理を実現する必要があります。例えば、スマートフォンやノートパソコンでは、ヒートシンク材料（グラファイトシートや銅系複合材など）が薄層設計によって熱を素早く放散し、デバイスの薄型化に貢献しています。電気自動車の分野では、急速充電や高温環境下におけるバッテリーの安全性を確保するために、バッテリー管理システムやインバーターにヒートシンク材料が使用されています。2023 年の世界の電気自動車販売台数（米国では前年比 49%増）の増加は、ヒートシンク材料の重要性をさらに浮き彫りにしています。航空宇宙分野では、高温安定性と軽量特性を備え、過酷な環境下での性能要件を満たすヒートシンク材料（Mo85Cu15 など）が、衛星やジェットエンジンの熱管理部品に使用されています。

さらに、電子システムにおけるヒートシンク材料の状況は、システムコストと持続可能性への影響にも反映されています。高性能ヒートシンク材料（モリブデン銅合金など）は、放熱効率を向上させ、アクティブ冷却システム（ファンや液体冷却など）への依存を減らすことで、エネルギー消費量と製造コストを削減します。同時に、グリーン製造のトレンドは、世界的な ESG（環境、社会、ガバナンス）基準を満たすリサイクル可能なヒートシンク材料（リサイクルされたモリブデン銅廃棄物など）の適用を促進しました。たとえば、CTIA GROUP LTD は、モリブデン銅合金廃棄物をリサイクルして Mo70Cu30 ヒートシンクを製造し、環境への影響を減らし、市場競争力を向上させています。ヒートシンク材料はまた、熱膨張のマッチングを最適化することでシステム寿命を延ばし、熱応力によるデバイスの故障リスクを減らします。たとえば、オプトエレクトロニクスシステムでは、ヒートシンク材料はレーザーおよび LED チップの安定性を確保し、メンテナンスコストを削減します。要約すると、ヒートシンク材料は電子システムの熱管理の中核であるだけでなく、パフォーマンスの最適化、コスト管理、持続可能な開発においてもかけがえのない役割を果たします。

1.2 タングステン銅ヒートシンクの基本紹介

1.2.1 一般的なタングステン銅ヒートシンクの成分比

タングステン銅ヒートシンクは、タングステン（W）と銅（Cu）からなる複合材料です。タングステンと銅の含有率を調整することで、熱膨張係数（CTE）をセラミック（ Al_2O_3 など）などの材料に合わせて設計できます。タングステン銅ヒートシンクは、BeO、半導体（Si など）、または金属（コバルトなど）から構成されています。一般的なタングステン銅ヒートシンクの組成比は、W50Cu50、W60Cu40、W70Cu30、W75Cu25、W80Cu20、W90Cu10 など

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。ここで、組成比は重量パーセント（wt.%）を表します。例えば、W70Cu30 は、タングステン 70wt%、銅 30wt%を意味します。熱伝導率は約 256 W/m·K 、熱膨張係数は約 $9.2 \times 10^{-6}/K$ です。

W50Cu50 は銅含有量が高く、熱伝導率（約 280～300 W/m·K ）が高いため、高出力ダイオードパッケージングなど、高い熱伝導率を必要とする電子パッケージングアプリケーションに適しています。 W80Cu20 と W90Cu10 はタングステン含有量が高く、熱膨張係数が低い（それぞれ約 $7.0 \times 10^{-6}/K$ と $6.0 \times 10^{-6}/K$ ）ため、RF およびマイクロ波パッケージングなど、低膨張材料（ガリウムヒ素など）に適したシナリオに適しています。異なる比率のタングステン銅ヒートシンクは、粉末冶金または溶融浸透プロセスによって製造されます。成分比の選択は、アプリケーションの要件によって異なります。たとえば、航空宇宙分野では、高温安定性を確保するためにタングステン含有量の高い W85Cu15 が好まれますが、5G 通信機器では、熱伝導率と加工性のバランスをとるために W60Cu40 がよく使用されます。これらの比率の柔軟性により、タングステン銅ヒートシンクは熱管理アプリケーションに幅広く適応できます。

1.2.2 タングステン銅ヒートシンクの微細構造

タングステン銅ヒートシンクの微細構造は、タングステンと銅が液体および固体状態ではほぼ混ざらないため、真の合金ではなく金属マトリックス複合材（MMC）です。その微細構造の特徴は、タングステン粒子が銅マトリックス中に均一に分散し、擬似合金構造を形成することです。タングstenは、高融点（約 3,422℃）と高硬度を有する耐火金属として、複合材料の骨格を構成し、低熱膨張と高強度の特性を提供します。銅は、高熱伝導率（約 401 W/m·K ）と高電気伝導率（約 100%IACS）を有するマトリックスとして、タングステン骨格の細孔を埋め、材料の熱伝導性と電気伝導性を高めます。

微細構造は通常、粉末冶金プロセスによって形成されます。このプロセスでは、タングステン粉末を多孔質骨格に圧縮し、焼結後に真空浸透プロセスによって溶融銅をタングステン骨格の細孔に浸透させます。このプロセスにより、複合材料の高密度（理論密度の最大 99.8%）と均一な微細構造が保証されます。例えば、W70Cu30 の微細構造は、タングステン粒子（粒径は約 2～6μm）が球形または多角形で、銅マトリックス中に均一に分散しており、界面が緊密に結合し、明らかな細孔がないことを示しています。走査型電子顕微鏡による観察では、銅相がタングステン粒子間に連続的なネットワークを形成し、熱伝導効率が向上していることが示されています。微細構造の均一性と密度は、ヒートシンクの性能にとって非常に重要です。例えば、高出力電子機器では、W75Cu25 の緻密な構造が熱抵抗を効果的に低減し、放熱効率を確保します。微細構造の安定性により、高温やアーク浸食にも耐性があり、電気火花加工電極や抵抗溶接に適しています。

1.2.3 タングステンと銅の結合機構の原子レベルでの解析

タングステン銅ヒートシンクの原子レベルでの接合機構は、化学結合ではなく、主に物理的な接触と界面拡散に依存しています。これは、タングステンと銅の間には大きな相互溶解性がな

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

く、金属間化合物が形成されないためです。タングステンは体心立方（BCC）結晶構造を持ち、原子半径は約 0.139nm です。一方、銅は面心立方（FCC）結晶構造を持ち、原子半径は約 0.128nm です。両者の結晶構造と融点（タングステンは 3,422°C、銅は 1,083°C）の違いにより、界面接合は主に機械的なインターカレーションと限定的な原子拡散によって実現されます。

粉末冶金法または浸透法では、まずタングステン粉末を圧縮し、焼結して多孔質骨格を形成します。焼結温度はタングステンの融点よりも低いものの、銅の融点よりも高い温度です。熔融銅は真空または不活性雰囲気下でタングステン骨格の細孔に浸透し、毛細管現象によって細孔を満たし、密接な界面を形成します。原子レベルの分析により、タングステンと銅の界面に弱い拡散層が存在することが示されています。銅原子は高温下でタングステン粒子の表面または粒界に沿って拡散し、薄い遷移層を形成する可能性があります、顕著な化学反応生成物は生成されません。

X 線回折（XRD）および透過型電子顕微鏡（TEM）による研究では、タングステンと銅はそれぞれの結晶構造を維持しており、界面に明らかな金属間化合物や固溶体は形成されていないことが示されています。界面結合強度は、タングステン粒子の形態と焼結条件によって影響を受けます。たとえば、タングステン粒子が小さい（約 4 μm ）と、界面接触面積が増加し、機械的な連結効果が向上します。微量元素（Fe、Ni など）または第 2 相（SiC、グラフェンなど）を追加すると、たとえば Cu-OC 共有結合または遷移層（W₂C など）を形成して界面熱伝導率を高めることにより、界面結合を強化できます。この物理的な結合メカニズムにより、タングステン銅ヒートシンクは高温および熱サイクル条件下で構造安定性を維持し、電子パッケージングおよび航空宇宙用の熱管理材料として適しています。

1.3 タングステン銅ヒートシンクの基本特性

タングステン銅ヒートシンクは、タングステン（W）と銅（Cu）からなる複合材料です。優れた熱的、電気的、機械的特性を持つことから、電子工学、航空宇宙、光電子工学などの分野で熱管理に広く使用されています。タングステン銅ヒートシンクの主な特性は、高い熱伝導率、調整可能な熱膨張係数（CTE）、優れた機械的特性、高い耐熱性などです。銅の含有量が増えるほど、熱伝導率も高くなります。例えば、W50Cu50 の熱伝導率は約 280~300 W/m·K、W90Cu10 の熱伝導率は約 190~200 W/m·K で、純銅（401 W/m·K）と純タングステン（173 W/m·K）の中間です。5G 基地局 RF モジュールの放熱基板など、高効率の熱伝導が求められる用途に適しています。

熱膨張係数は、タングステン銅ヒートシンクのもう一つの重要な特性です。タングステンと銅の比率を調整することで、セラミック（窒化アルミニウムなど、CTE は約 4.5×10^{-6} /K）や半導体（シリコンなど、CTE は約 2.6×10^{-6} /K）材料と正確に一致させることができます。たとえば、W80Cu20 の CTE は約 7.0×10^{-6} /K で、ガリウムヒ素デバイスとのマッチングに適しており、電子パッケージの熱応力を低減します。導電率は銅含有量の増加に伴って増加します。W60Cu40 の導電率は約 40~50% IACS（国際軟銅規格）で、伝導性と放熱性を両立しており、高周波回路に適しています。機械特性の面では、タングステン銅ヒートシンクは、タングステンの高硬度（ピッカース硬度は約 300~400 HV）と銅の延性により、優れた引張強度と靱性を

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

示します。例えば、W70Cu30 の引張強度は 600～800 MPa に達し、航空宇宙用途における機械的ストレスに耐えることができます。さらに、タングステン銅ヒートシンクは優れた耐高温性と耐アーク侵食性を備えています。W85Cu15 は 800℃でも構造安定性を維持できるため、放電加工（EDM）電極や抵抗溶接に適しています。耐腐食性により、海洋環境におけるレーダーシステムヒートシンクなど、湿度の高い環境や化学環境でも優れた性能を発揮します。これらの特性の利点を組み合わせることで、タングステン銅ヒートシンクは高性能熱管理アプリケーションに最適な選択肢となります。

1.4 タングステン銅ヒートシンクの開発の歴史と現状

1.4.1 タングステン銅ヒートシンクの開発

タングステン銅ヒートシンクの開発は、20 世紀初頭の高性能熱管理材料の需要に端を発しています。エレクトロニクス産業の台頭に伴い、初期の電子機器（真空管など）には効率的な放熱材料が必要でした。純銅は熱伝導率が高いため広く使用されていましたが、熱膨張係数（約 $16.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）が高いため、セラミックや半導体材料には適合せず、熱応力による破損を引き起こしました。タングstenは熱膨張係数が低く（約 $4.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）、融点が高い（3,422℃）ため、潜在的な代替材料と考えられていますが、熱伝導率が低い（173 W/m·K）ため、その用途は限られています。20 世紀半ばには、複合材料の概念の台頭ににより、研究者はタングstenと銅の組み合わせを研究し、両方の利点を考慮に入れるようになりました。1940 年代には、粉末冶金技術の発達により、タングstenと銅の複合材料の製造の基礎が築かれました。

初期の実験では、タングsten粉末を圧縮し、溶融銅を浸透させることで、W70Cu30 などの初期のタングsten銅材料が作られました。これらの材料は、高温・高振動環境に耐えられるため、もともとミサイルの熱管理部品などの軍事レーダーや航空宇宙分野で使用されていました。1960 年代には、電子パッケージング技術の進歩によりタングsten銅ヒートシンクの商品化が促進され、W80Cu20 はトランジスタや集積回路の放熱基板に使用され始めました。1970 年代には、米国と日本の材料科学機関（ベル研究所など）がタングsten銅の比率と製造プロセスをさらに最適化し、タングsten銅ヒートシンクが電子産業における重要な地位を確立しました。1980 年代以降、中国は技術導入と自主研究開発を通じて、徐々にタングsten銅ヒートシンクの主要生産国となってきました。たとえば、CTIA GROUP LTD の前身である China Tungsten Online は、1997 年以来、タングsten銅材料の研究開発に注力してきました。

1.4.2 さまざまな時期における主要な技術革新

タングsten銅ヒートシンクの開発は、複数の時期における重要な技術革新の恩恵を受けてきました。1940 年代から 1950 年代にかけて、粉末冶金と真空浸透技術の確立が最初の大きな進歩でした。高温焼結（約 1,350～1,400℃）とタングsten骨格への銅液体浸透により、タングstenと銅が混ざらないという問題が解決され、高密度（理論密度の 99%以上）の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W75Cu25 などの材料が作られました。1960 年代から 1970 年代には、微細構造制御技術が進歩しました。研究者は、タングステン粉末の粒子サイズ（2~6 μm ）と焼結条件を最適化することで、界面の接合強度と熱伝導率を改善しました。たとえば、W60Cu40 の熱伝導率は約 270 W/m·K に向上しました。

1980 年代には、微量元素（Ni、Fe など）や第二相（SiC など）の添加により、例えば遷移層（W₂C など）を形成することで界面の結合が強化され、W70Cu30 の熱伝導率が向上しました。1990 年代には、高度な特性評価技術（走査型電子顕微鏡や X 線回折など）により、タングステンと銅の界面の原子レベルの結合メカニズムが明らかになり、プロセスの最適化が促進されました。21 世紀に入り、ナノテクノロジーと積層造形（3D プリンティング）が新たなブレークスルーとなり、グラフェンの添加により W80Cu20 の熱伝導率を約 300 W/m·K まで向上させたり、電子ビーム溶融（EBM）により複雑な形状のタングステン銅ヒートシンクを印刷して航空宇宙のニーズに対応したりしています。近年、タングステン銅廃棄物のリサイクルや低温焼結プロセスといったグリーン製造技術の進歩により、生産コストと環境への影響が低減しています。例えば、CTIA GROUP LTD は、プラズマ球状化モリブデン粉末技術によってタングステン銅の生産を最適化しました。これらの技術革新により、タングステン銅ヒートシンクの性能と適用範囲は継続的に向上しています。

1.4.3 タングステン銅ヒートシンクの応用状況と開発の見通し

エレクトロニクス分野では、5G 通信やパワー半導体の進化に伴い、タングステン銅ヒートシンクは超薄型化と高精度化へと進化しています。例えば、高周波ミリ波基地局では、ナノスケールの表面粗さにより、RF チップと放熱基板間の原子レベルの接合を確保し、熱抵抗の蓄積による信号歪みを回避できます。この特性は、衛星対地上通信端末などの極限環境機器において特に重要です。先進的なパッケージング技術では、タングステン銅ヒートシンクを 3 次元積層プロセスでチップインターコネクト層に埋め込み、「熱源-ヒートシンク-マイクロチャネル」の 3 次元放熱ネットワークを構築することで、データセンターサーバーの CPU 熱密度を 40%以上低減し、AI コンピューティングパワークラスターの放熱ボトルネックを効果的に解決します。航空宇宙分野における応用は、極限動作環境におけるブレークスルーへと進んでいます。新世代の再使用型ロケットでは、タングステン銅ヒートシンクを傾斜機能化技術で設計し、エンジン燃焼室壁に「タングステン骨格耐アブレーション-銅ネットワーク熱伝導」の複合構造を形成しています。この構造は、3000°Cを超えるガスの摩耗に耐えるだけでなく、冷却循環システムへ熱を迅速に放出します。

オプトエレクトロニクス分野における技術拡張は、軍民融合シナリオに重点を置いています。高出力ライダーシステムでは、タングステン銅ヒートシンクとダイヤモンド放熱層を液相遷移接合プロセスで複合基板に形成し、ナノ秒レーザーパルス照射下でも熱変形を 1 ミクロン未満に抑え、レーザー測距精度をセンチメートルレベルに引き上げています。医療用オプトエレクトロニクス機器では、タングステン銅ヒートシンクの生体適合性コーティング技術が画期的な進歩を遂げました。レーザーメスの熱伝導キャリアとして、手術中に発生する熱を素早く伝導するだけでなく、表面水酸化処理により細胞接着を防ぎ、低侵襲手術器具の小型化に材

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

料サポートを提供します。新エネルギー分野における応用イノベーションは、多次元的な拡大を見せています。水素燃料電池スタックでは、タングステン銅ヒートシンクがバイオニック多孔質構造を通じてハニカム六角形放熱チャネルをシミュレートするように設計されており、これによりバッテリーパックの温度均一性が 30% 向上し、水素利用率が 12% 向上します。

今後の技術革新は、デジタルツインとスマートマテリアルの概念を深く融合させるでしょう。機械学習アルゴリズムを基盤として、タングステン銅ヒートシンクのマイクロナノ構造を最適化することで、宇宙船姿勢制御エンジンのノズルにおいて「熱流束密度と材料の多孔度」の動的整合を実現し、高温域では自己組織化によってナノスケールのタングステン繊維ネットワークを、低温域では銅ベースのナノチャネルを形成します。この適応型設計は、4D プリンティング技術による産業化を加速させています。同時に、深海探査プロジェクトの進展に伴い、水深 1 万メートルの深海環境におけるタングステン銅ヒートシンクの高圧耐腐食技術も進歩しています。表面に原子層堆積法で堆積された二硫化タングステンコーティングは、1100 気圧においても安定した熱伝導効率を維持し、深海探査ロボットのセンサーアレイに重要な熱保護を提供します。カーボンニュートラルの目標達成に向け、タングステン銅ヒートシンクのグリーン製造システムは継続的に改善されています。高純度タングステン銅合金は、電子廃棄物から電解精錬技術を用いて抽出されます。リサイクル材料の熱伝導率は元の材料の 98% に達し、新エネルギー車の電動駆動システムのライフサイクル全体にわたる低炭素化を促進します。



CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Heat Sinks Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Heat Sinks

Tungsten copper heat sinks are composite materials composed of a tungsten matrix infiltrated with copper. They combine the high strength and high melting point of tungsten with the excellent thermal conductivity of copper. By adjusting the ratio of tungsten to copper, the coefficient of thermal expansion (CTE) can be tailored to match materials such as ceramics, semiconductors, or metals.

2. Features of Tungsten Copper Heat Sinks

High Thermal Conductivity: Efficient heat transfer ensures stable operation of electronic devices

Excellent CTE Matching: Customizable CTE to match a wide range of packaging materials

Customizable Design: Available in various thicknesses, dimensions, plating, and surface finishes

3. Typical Applications of Tungsten Copper Heat Sinks

Heat sink substrates for laser diodes and modules

Baseplates for IGBT and power modules

Thermal management components in microwave/RF packaging

Cooling solutions in aerospace electronic systems

4. Typical Properties of Tungsten Copper Heat Sinks

Grade	Tungsten Content (Wt%)	Copper Content (Wt%)	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/m • K at 25° C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
W90Cu10	90±1	Balance	17.0	180-190	6.5
W85Cu15	85±1	Balance	16.4	190-200	7.0
W80Cu20	80±1	Balance	15.6	200-210	8.3
W75Cu25	75±1	Balance	14.9	220-230	9.0
W50Cu50	50±1	Balance	12.2	310-340	12.5

4. Production Method of Tungsten Copper Heat Sinks

Tungsten copper heat sinks are primarily manufactured using the infiltration method, where a porous tungsten skeleton serves as the base structure and molten copper is infiltrated at high temperatures to form a dense composite. For high-precision applications, additional machining or surface treatment processes may be required to ensure dimensional accuracy and surface smoothness of the thermal interface, meeting the stringent requirements of electronic device assembly tolerances and thermal contact performance.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第2章 タングステン銅ヒートシンクの性能

2.1 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率

2.1.1 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導メカニズム

金属ベースの複合材料である タングステン銅ヒートシンクの熱伝導メカニズム は、主に銅相の高い熱伝導率とタングステン相の構造的支持に依存しています。銅は熱伝導率が非常に高く（約 $401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、自由電子の急速な移動によって効率的に熱を伝達します。一方、タングステンは熱伝導率が低い（約 $173 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）ものの、融点が高く（約 $3,422^\circ\text{C}$ ）、熱膨張係数が低い（約 $4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）ため、複合材料の構造的安定性が確保されています。タングステン銅ヒートシンクの微細構造は、連続した銅マトリックス中に均一に分散したタングステン粒子によって形成され、熱伝導は主に銅マトリックスの電子熱伝導メカニズムによって実現されます。銅相は連続した熱伝導ネットワークを形成し、熱は銅マトリックスに沿って素早く伝達されます。また、タングステン粒子は骨格として機能し、熱膨張を制限し、機械的強度を高めます。原子レベルでは、銅原子の格子振動（フォノン伝導）と自由電子の移動によって熱が伝達されます。タングステン粒子と銅マトリックスの界面に化学結合はありませんが、機械的なインターカレーションと限られた原子拡散によって密接な接触が形成され、効果的な熱伝達確保されます。たとえば、W70Cu30 ヒートシンクの熱伝導率は約 $256 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ で、その銅相ネットワークは、5G 基地局 RF モジュールのチップから外部の冷却システムに熱をすばやく伝達します。インターフェースの品質は熱伝導率に非常に重要であり、インターフェースの欠陥（気孔など）は熱抵抗を増加させ、熱効率を低下させます。タングステン銅ヒートシンクの熱伝導メカニズムも温度の影響を受けます。高温（ 600°C など）では銅相の熱伝導率はわずかに低下しますが、タングステンの安定性により全体的な性能の信頼性が保証され、航空宇宙の高温環境に適しています。

2.1.2 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に影響を与える要因

タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率は、組成比、微細構造、製造プロセス、界面品質、使用環境など、多くの要因の影響を受けます。熱伝導率を決定する主な要因は組成比です。銅含有量の増加は熱伝導率を直接向上させますが、熱膨張のマッチングを犠牲にする可能性があります。微細構造におけるタングステン粒子の分布の均一性と銅マトリックスの連続性は、熱伝導効率に不可欠です。たとえば、均一なタングステン粒子（粒子サイズ $2\sim 6\mu\text{m}$ ）は、銅相の熱伝導ネットワークを最適化できます。製造プロセス（粉末冶金や溶融浸透など）は、材料の密度と界面結合に影響を与えます。粉末冶金は、高温焼結（約 $1,350\sim 1,400^\circ\text{C}$ ）により 99.8% の理論密度を達成し、気孔による熱抵抗を低減できます。界面品質は熱伝導効率に直接影響します。微量元素（Ni、Fe など）または第2相（グラフェンなど）を追加すると、界面の結合が強化され、熱抵抗が低下します。たとえば、グラフェンを使用した W70Cu30 ヒートシンクは、熱伝導率を約 $300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ まで高めることができます。使用環境（温度や雰囲気など）も熱伝導率に影響します。高温または酸化環境では、銅相がわずかに酸化され、熱伝導

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

率が低下する可能性があります。そのため、不活性雰囲気（窒素など）でテストまたは適用されることがよくあります。さらに、熱サイクルと機械的ストレスによって微小亀裂が発生し、長期的な熱伝導率に影響を与える可能性があります。たとえば、航空宇宙用途では、W85Cu15 ヒートシンクは、安定した熱伝導率を確保するために、繰り返しの熱サイクルに耐える必要があります。これらの要因の複合的な影響によって、電子パッケージング、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野におけるタングステン銅ヒートシンクの適用性が決まります。

2.1.2.1 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に対する組成の影響

タングステン銅ヒートシンクの組成比（タングステンと銅の重量比）は、熱伝導率に影響を与える重要な要素です。銅は熱伝導率が高く（401 W/m·K）、熱伝導率の大きな要因となります。一方、タングステンは熱伝導率が低い（173 W/m·K）ため、全体の熱伝導率は制限されます。そのため、銅の含有量が多いほど、ヒートシンクの熱伝導率は高くなります。例えば、W50Cu50（タングステン 50 重量%、銅 50 重量%）の熱伝導率は約 280~300 W/m·K で、純銅に近いいため、パワーアンプなどの高出力電子機器の放熱基板に適しています。一方、W90Cu10（タングステン 90 重量%、銅 10 重量%）は熱伝導率が約 190~200 W/m·K と低く、ガリウムヒ素（CTE 約 $5.7 \times 10^{-6}/K$ ）と組み合わせた光電子パッケージングなど、低熱膨張が求められる用途に適しています。W70Cu30 と W80Cu20 は、熱伝導率がそれぞれ約 256 W/m·K と 220 W/m·K と、中間の組成比で一般的に使用されています。これらは熱伝導率と熱膨張率のバランスが取れており、5G 基地局や電気自動車インバータなどで広く使用されています。また、組成比は銅マトリックスの連続性にも影響を与えます。銅含有量の高い材料（W60Cu40 など）は、より連続的な熱伝導ネットワークを形成し、界面熱抵抗を低減します。一方、タングステン含有量の高い材料（W85Cu15 など）は、タングステン粒子が主成分となり、熱伝導経路を制限します。微量添加剤（Ni や Fe など）は、界面結合を最適化し、間接的に熱伝導率を向上させることができます。例えば、W75Cu25 に 1% の Ni を添加すると、熱伝導率を約 5~10% 向上させることができます。電子工学、航空宇宙、新エネルギー分野のニーズを満たすには、具体的な用途に応じて、熱伝導率とその他の特性（熱膨張係数や機械的強度など）のバランスをとる組成比を選択する必要があります。

2.1.2.2 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に対する構造の影響

タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率は、その微細構造とマクロ構造に大きく影響されます。金属系複合材料であるタングステン銅ヒートシンクの構造特性は、主にタングステン粒子と銅マトリックスの分布、形態、および界面特性によって決まります。微細構造の観点から見ると、タングステン銅ヒートシンクは粉末冶金法または溶融浸透法によって形成されます。タングステン粒子（通常 2~6 μm ）は、連続した銅マトリックス中に均一に分散しています。銅相は熱伝導ネットワークを形成し、主な熱伝導を担います。一方、タングステン相は構造的な支持と低熱膨張特性を提供します。

銅マトリックスの連続性が熱伝導率の鍵となります。連続した銅ネットワークは、熱抵抗を効果的に低減し、急速な熱伝達を促進します。例えば、W60Cu40 ヒートシンクの微細構造は、銅相がタングステン粒子間に連続した熱伝導経路を形成し、熱伝導率が約 270 W/m·K に達す

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ることを示しています。一方、W90Cu10 では、タングステン粒子の割合が高いため銅相の連続性が制限され、熱伝導率が約 190 W/m·K まで低下します。タングステン粒子の形態と分布の均一性も熱伝導率に影響を与えます。球形またはほぼ球形のタングステン粒子（プラズマ球状化技術で製造）は、銅マトリックスとの接触面積を増やして界面熱抵抗を低減できますが、不規則な粒子は局所的な熱抵抗の増加につながる可能性があります。マクロ構造の面では、ヒートシンクの密度と多孔度が熱伝導率に直接影響します。粉末冶金プロセスでは、高温焼結（約 1,350~1,400°C）と真空浸透により、理論密度 99.8%以上を達成し、気孔率を大幅に低減することができます。気孔は熱伝導の障害となり、電子とフォノンを散乱させ、熱伝導率を低下させます。例えば、W70Cu30 の気孔率が 1%の場合、熱伝導率は 5~10%低下する可能性があります。

さらに、ヒートシンクの形状と厚さも熱伝導率に影響を与えます。0.5~1mm などの薄いヒートシンクは熱伝導経路を短縮し、高出力電子機器の放熱効率を向上させることができます。一方、3~5mm などの厚いヒートシンクは、高い機械的強度が求められる航空宇宙用途に適しています。層状または複合構造設計（タングステン銅/銅多層構造など）は、熱伝導率をさらに最適化できます。例えば、W80Cu20 の表面に純銅層を堆積させることで表面熱伝導が向上し、5G 基地局の放熱基板に適しています。構造の最適化には、アプリケーションシナリオを総合的に考慮する必要があります。例えば、高周波回路では、均一な微細構造と高密度が熱安定性の確保の鍵となりますが、高温環境では、タングステン相の安定性が構造の完全性を維持するために重要です。

2.1.2.3 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に対する不純物の影響

不純物は、タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率に影響を与える重要な要因であり、主に原材料中の残留元素、製造プロセス中に導入された汚染物質、意図的に添加された微量元素が含まれます。主要成分であるタングステンと銅の純度は、熱伝導率に直接影響します。高純度タングステン（>99.95%）と銅（>99.99%）が理想的な選択肢です。酸素、窒素、炭素、鉄族元素（Fe、Ni、Co）などの不純物は、銅マトリックスの電子熱伝導機構を妨害します。たとえば、酸素不純物は銅マトリックス中に酸化物（Cu₂O など）を形成する可能性があります。これらの酸化物は熱伝導率が低く（約 20 W/m·K）、熱抵抗が大幅に増加し、W70Cu30 の熱伝導率が 256 W/m·K から約 240 W/m·K に低下します。窒素や炭素不純物は、タングステンと銅の界面に細孔や炭化物（WC など）を形成し、ホットキャリア（電子とフォノン）をさらに散乱させ、熱伝導効率を低下させる可能性があります。また、製造工程で混入した揮発性物質や焼結中に残留する潤滑剤などの不純物も、材料内部に微細な細孔を形成し、熱伝導経路を阻害する可能性があります。微量元素の添加も熱伝導率に影響を与える要因の一つです。ニッケル（Ni）や鉄（Fe）などの一般的な添加剤は、タングステンと銅の界面の接合強度を高めるために使用されますが、過剰添加（1 重量%超）は、これらの元素が銅マトリックスに固溶して自由電子の移動度を低下させるため、熱伝導率の低下につながります。例えば、W75Cu25 に 0.5 重量%の Ni を添加すると界面熱伝導率がわずかに向上しますが、2 重量%の Ni を添加すると熱伝導率が約 10%低下する可能性があります。環境不純物（水分や硫化物など）も、長期間使用中に熱伝導率に影響を与える可能性があります。たとえば、海洋環境では、硫化物が銅相を腐食し、表面の熱伝導率が低下する可能性があります。不純物の影響を減らすために、メー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

カーは高純度の原材料を使用し、真空または不活性雰囲気（アルゴンなど）での焼結プロセスを使用して材料の純度を確保しています。たとえば、CTIA GROUP LTD は、高純度タングステン粉末と電解銅から W60Cu40 ヒートシンクを製造し、不純物による熱伝導率への影響を最小限に抑えています。航空宇宙およびオプトエレクトロニクスの用途では、不純物含有量を制御することがヒートシンクの長期安定性を確保するための鍵となり、特に高出力レーザーでは、不純物による熱抵抗がデバイスの過熱や故障を引き起こす可能性があります。

2.1.3 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率試験方法

タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率試験は、その熱管理性能を評価する上で重要な部分です。一般的な試験方法には、レーザーフラッシュ法、熱流計法、定常熱伝導率法などがあります。これらの方法はそれぞれ異なる原理に基づいており、様々な応用シナリオに適用できます。レーザーフラッシュ分析（LFA）は最も一般的に使用される試験方法です。短パルスレーザーをヒートシンクの表面に照射し、サンプルを通過する熱の時間と温度勾配を測定することで、熱伝導率を計算します。この方法は、薄いサンプル（厚さ 0.5～2 mm の W70Cu30 ヒートシンクなど）に適しており、試験温度範囲が広く（室温～800℃）、精度も高いため、電子パッケージ材料の熱伝導率評価に広く使用されています。試験では、サンプルを標準サイズ（直径 10 mm、厚さ 1～2 mm など）に加工し、レーザー吸収を高めるために表面にグラファイトを塗布する必要があります。試験は、酸化を防ぐため、真空または不活性雰囲気中で実施されます。熱流計法は、サンプルの両面に一定の熱流を流し、温度差と熱流束密度を測定して熱伝導率を算出します。この方法は、厚いヒートシンク（例えば、3～5 mm の W85Cu15）に適しており、航空宇宙材料の熱伝導率の検証によく使用されます。

定常法は、サンプルの一端に熱源を当て、他端に冷却装置を接続することで、定常状態における温度勾配と熱流を測定します。実験室での研究や大型サンプルの試験に適しています。その他の補助的な方法としては、サンプル表面に熱プローブを当てることで熱伝導率を迅速に測定する過渡面熱源（TPS）法があります。これは、不均一構造または複合構造のタングステン銅ヒートシンクに適しています。試験中は、機器の校正と環境条件の管理が必要です。例えば、ASTM E1461 規格に規定されているレーザーフラッシュ法の試験プロセスを用いて、結果の一貫性を確保する必要があります。サンプルの準備では、表面が滑らかで欠陥がないことを確認する必要があります。試験環境は通常、銅相の酸化を防ぐために窒素またはアルゴン雰囲気です。例えば、W60Cu40 の熱伝導率を試験する場合、レーザーフラッシュ法は異なる温度における熱伝導率の変化を正確に測定し、5G 基地局への適用性を検証できます。熱伝導率の信頼性を確保するには、試験結果を微細構造分析（SEM など）と組み合わせて、気孔や不純物の影響を評価する必要があります。

2.1.4 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率を向上させる方法

タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率を向上させることは、エレクトロニクス、航空宇宙、新エネルギー分野での応用を最適化する鍵です。これは、組成の最適化、微細構造の改善、製造プロセスの改善、強化相の追加によって実現できます。まず、組成比を最適化することは、熱伝導率を向上させる直接的な方法です。銅含有量を増やすと、熱伝導率が大幅に向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

たとえば、W50Cu50（約 280～300 W/m·K）の熱伝導率は、W90Cu10（約 190 W/m·K）の熱伝導率よりもはるかに高くなります。高い銅比率（W60Cu40 など）を選択することで、高出力電子機器の放熱要件を満たすことができますが、熱膨張のマッチングニーズを考慮する必要があります。次に、微細構造を改善することで、熱伝導効率を高めることができます。タングステン粒子の粒径（2～4μm）と分布の均一性を制御することで、銅マトリックスの連続性を高めることができます。たとえば、タングステン粉末のプラズマ球状化により、球状の粒子が得られ、界面接触が強化され、熱抵抗が低減します。製造プロセスの最適化は、もう 1 つの重要な方向です。高温真空浸透プロセスは、材料密度（>99.8%）を向上させ、気孔による熱抵抗を低減できます。たとえば、1,400°C での焼結時間を延長することにより、W70Cu30 の気孔率を 0.5%未満に低減でき、熱伝導率を約 5%向上させることができます。微量の強化相（グラフェンやカーボンナノチューブなど）を添加することで、熱伝導率をさらに向上させることができます。グラフェンの高い熱伝導率は、タングステンと銅の界面の熱伝導効率を高めることができます。

2.1.4 タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率を向上させる方法

タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率を向上させることは、エレクトロニクス、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野におけるアプリケーションを最適化するための鍵であり、組成の最適化、微細構造の改良、製造プロセスの高度化、インターフェースの強化、環境適応性の制御などが含まれます。以下では、これらの観点からタングステン銅ヒートシンクの熱伝導率を効果的に向上させ、高電力密度機器（5G 基地局、電気自動車インバータ、高出力レーザーなど）の放熱要件を満たす方法について詳細に説明します。

まず、組成比を最適化することが、熱伝導率を向上させる直接的な方法です。タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率は、主に銅相の高い熱伝導率（約 401 W/m·K）に依存しており、タングステンの熱伝導率はそれよりも低い（約 173 W/m·K）。銅含有量を増やすことで、熱伝導率を大幅に向上させることができます。例えば、W50Cu50 の熱伝導率は 280～300 W/m·K に達し、W90Cu10 の 190～200 W/m·K を大幅に上回り、RF アンプなどの高出力電子デバイスの放熱基板に適しています。しかし、銅の含有量が多いと熱膨張係数（CTE）が増加する可能性があります（例えば、W50Cu50 の CTE は約 $12 \times 10^{-6}/K$ ）。これはセラミックや半導体材料（窒化アルミニウムなど、CTE は約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ ）と一致しないため、熱応力が増加します。したがって、アプリケーションシナリオに応じて適切な比率を選択する必要があります。たとえば、W60Cu40（熱伝導率約 270 W/m·K、CTE 約 $9.5 \times 10^{-6}/K$ ）は、5G 基地局における熱伝導率と熱膨張率のバランスが取れています。さらに、高純度の原材料（純度 99.99%超の銅、純度 99.95%超のタングステンなど）を使用することで、不純物（酸素や窒素など）による電子熱伝導率への干渉を低減し、銅相が効率的な熱伝導ネットワークを形成することを保証します。

第二に、微細構造の改善は、熱伝導率を向上させるための中核戦略です。タングステン銅ヒートシンクの微細構造は、連続した銅マトリックス中に均一に分散したタングステン粒子（粒子

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

サイズは通常 2~6 μm ）で構成されています。銅マトリックスの連続性とタングステン粒子の分布の均一性は、熱伝導効率に直接影響します。タングステン粒子の形態と粒子サイズを最適化することで、銅マトリックスとの接触面積を増やし、界面熱抵抗を低減できます。例えば、プラズマ球状化技術を使用して球状のタングステン粒子（粒子サイズ約 2~4 μm ）を調製すると、界面の接触点が増え、銅マトリックスがより連続した熱伝導ネットワークを形成し、熱伝導率が約 5~10%向上します。密度はもう 1 つの重要な要素です。多孔性はホットキャリア（電子とフォノン）を散乱させ、熱伝導率を低下させます。高温真空浸透プロセス（焼結温度約 1,350~1,400°C）により、W70Cu30 の密度は 99.8%以上に、気孔率は 0.5%未満にまで低減され、熱伝導率は約 260 W/m·K まで向上します。例えば、航空宇宙用途では、高密度 W80Cu20 ヒートシンクは熱抵抗を効果的に低減し、ジェットエンジンの熱管理部品の放熱効率を確保します。さらに、タングステン粒子の均一分布を制御することで、局所的な熱抵抗の過度な増加を回避できます。例えば、超音波分散技術を用いて銅マトリックス内のタングステン粉末の分布を最適化し、熱経路の安定性を高めます。

製造プロセスのアップグレードは、熱伝導率を向上させる重要な手段です。従来の粉末冶金および浸透プロセスでは、タングステン粉末を圧縮し、焼結して多孔質骨格を形成し、熔融銅を浸透させることで高性能のタングステン銅ヒートシンクを製造できますが、プロセスパラメータをさらに最適化することで熱伝導率を大幅に向上させることができます。たとえば、焼結時間を延長するか、焼結温度（タングステンが溶融しない範囲）を上げると、タングステンと銅の界面の結合強度が向上し、界面熱抵抗が低下します。真空または不活性雰囲気（アルゴンなど）での焼結は、銅相の酸化を防ぎ、熱伝導ネットワークの完全性を確保できます。近年、ホットプレス焼結技術の応用により、材料の密度がさらに向上しています。1,200~1,400°Cで高圧（約 50MPa）をかけることで、W75Cu25 の気孔率を 0.3%まで低減でき、熱伝導率を約 230W/m·K まで高めることができます。積層造形（3D プリント）技術は、複雑な形状のヒートシンクを作製するための新たな可能性を提供します。例えば、電子ビーム溶融（EBM）法で W70Cu30 の放熱構造を印刷することで、微細構造を精密に制御し、熱伝導経路を最適化するため、航空宇宙や医療分野のカスタマイズされたニーズに適しています。さらに、低温焼結技術（焼結助剤の添加など）の進歩により、高密度を維持しながらエネルギー消費を削減でき、グリーン製造のトレンドにも合致しています。

微量強化相やナノ材料の添加は、熱伝導率を向上させる革新的な方法です。タングステンと銅は相溶性がないため、界面の熱抵抗が高くなります。高熱伝導性ナノ相（グラフェンやカーボンナノチューブなど）を導入することで、界面熱伝導率を大幅に向上させることができます。グラフェンの熱伝導率は 5,000 W/m·K と高く、その添加量（約 0.5~1 重量%）は、タングステンと銅の界面の熱伝導率を向上させることができます。例えば、グラフェンを添加することで W70Cu30 の熱伝導率は約 300 W/m·K まで向上し、高出力レーザー放熱基板に適しています。微量金属元素（Ni や Fe など）も界面接合を改善します。Ni（約 0.5 重量%）を添加すると、Cu-Ni 遷移層が形成されて界面接触が強化されますが、固溶体が銅マトリックスの熱伝導率を低下させないように、添加量を制御する必要があります。さらに、セラミック強化相（SiC、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

熱伝導率約 120 W/m·K など）は、高い熱伝導率を維持しながら界面強度を向上させることができます。たとえば、W75Cu25 に 0.5 重量%の SiC を添加すると、熱伝導率は約 235 W/m·K にわずかに増加し、高温安定性が向上します。ナノ複合技術の応用には、精密な特性評価技術（TEM、XRD など）を組み合わせることで添加量と分布を最適化し、最大の熱伝導率を確保する必要があります。

環境適応性制御も熱伝導率向上の重要な要素です。高温または腐食環境では、銅相が酸化または腐食し、熱伝導率が低下する可能性があります。例えば、海洋環境では、硫化物が銅マトリックスを腐食させ、熱抵抗を増加させる可能性があります。そのため、表面コーティング技術（ニッケルメッキや窒化物コーティングなど）は、銅相を保護し、長期的な熱伝導率を維持します。試験および使用中に不活性雰囲気（窒素など）を使用することで、酸化を防ぎ、熱伝導効率を確保できます。例えば、W60Cu40 ヒートシンクの熱伝導率試験では、アルゴン雰囲気下でレーザーフラッシュ法を用いることで、より正確な熱伝導率を得ることができ、5G 基地局における実際の性能を反映できます。さらに、熱伝導率の長期維持には、熱サイクル安定性が不可欠です。微細構造と界面接合を最適化することで、熱サイクルによる微小亀裂を低減できます。たとえば、W80Cu20 は微量のグラフェンを添加することでインターフェースの靱性を高め、航空宇宙用途での繰り返しの熱サイクルに耐え、熱伝導性を維持します。

まとめると、タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率を向上させるには、組成、微細構造、製造プロセス、強化相、環境適応性の総合的な最適化が必要です。これらの方法の相乗効果により、熱伝導率が大幅に向上し、高性能熱管理のニーズを満たすことができます。例えば、CTIA GROUP LTD は、高純度原料、ホットプレス焼結、グラフェン強化技術を組み合わせることで、熱伝導率 300W/m·K の W60Cu40 ヒートシンクを製造しており、電気自動車やオプトエレクトロニクス分野で広く使用されています。今後、ナノテクノロジーとグリーン製造の進歩に伴い、タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率はさらに向上し、新興分野への応用が拡大していくでしょう。

2.2 タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数の制御

2.2.1 タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数の原理

タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数（CTE）は、温度が変化したときにサイズが膨張または収縮する特性です。単位は $10^{-6}/K$ です。電子パッケージ、オプトエレクトロニクスデバイス、航空宇宙部品において、他の材料（セラミックや半導体など）との熱整合を確保するには、熱膨張係数を制御することが重要です。タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数は、タングステンと銅の組成比と 2 つの相の微細構造によって決まります。耐火金属であるタングステンは、体心立方（BCC）結晶構造と高い結合エネルギーにより、熱膨張係数が非常に低く（25°C で約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ ）、原子間隔は温度によってほとんど変化しません。銅は面心立方（FCC）結晶構造を有し、原子間結合が弱く、熱振動の影響を受けやすいため、熱膨張係数が比較的高く（25°C で約 $16.5 \times 10^{-6}/K$ ）、タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数は両者の中間に位置し、タングステンと銅の重量比を調整することで精密に制御できます。例えば、W80Cu20 の熱膨張係数は約 $7.0 \times 10^{-6}/K$ ですが、W50Cu50 の熱膨張係数は約 $12 \times 10^{-6}/K$ であり、さまざまな用途

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に適しています。

熱膨張係数の調整原理は、複合材料の混合則と微細構造の相乗効果に基づいています。タングステン銅ヒートシンクでは、タングステン粒子が剛性骨格を形成して銅マトリックスの膨張挙動を制限し、銅マトリックスがタングステン粒子間の空隙を埋めて熱伝導性と延性を提供します。熱膨張係数は主にタングステン相の低膨張特性によって支配され、銅相の寄与はその割合とともに大きくなります。理論的には、複合材料の熱膨張係数は線形混合則で近似できますが、実際の値は界面の結合、微細構造の均一性、および製造プロセスの影響を受けます。例えば、W70Cu30 ヒートシンクの熱膨張係数は約 $9.2 \times 10^{-6}/K$ で、セラミック基板（窒化アルミニウムなど、CTE は約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ ）と銅の中間値に近く、熱応力を低減する 5G 基地局放熱基板に適しています。界面の接合は熱膨張の調整において非常に重要です。タングステンと銅は混和しませんが、機械的な連動と原子拡散の制限により界面が密着し、熱膨張の不均一によるマイクロクラックを防止します。微細構造の均一性も熱膨張挙動に影響します。均一に分布したタングステン粒子（粒子サイズ $2 \sim 6 \mu m$ ）は、銅マトリックスの膨張を効果的に抑制し、熱膨張係数の安定性を確保します。例えば、W85Cu15 は粉末冶金プロセスで製造され、タングステン粒子が均一に分散されているため、熱膨張係数は $6.5 \sim 7.5 \times 10^{-6}/K$ で安定しており、ガリウムヒ素（CTE は約 $5.7 \times 10^{-6}/K$ ）に一致する光電子パッケージングに適しています。

熱膨張係数の調整には、温度範囲と動作環境も考慮する必要があります。室温から $800^{\circ}C$ の範囲では、タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数は温度とともにわずかに増加しますが、タングステン相の高い安定性により、その変化は小さくなります。たとえば、W90Cu10 は $600^{\circ}C$ でも低い熱膨張係数（約 $6.2 \times 10^{-6}/K$ ）を維持しており、航空宇宙の高温部品に適しています。製造プロセスは熱膨張係数に大きな影響を与えます。粉末冶金または浸透プロセスは、タングステン粒子の形態と密度を制御することで、熱膨張性能を最適化します。たとえば、真空浸透プロセスは W75Cu25 の気孔率を 0.5% 未満に低減し、気孔による局所的な膨張の不均一性を低減します。さらに、微量元素（Ni、Fe など）または強化相（SiC など）を添加することで、熱膨張係数を微調整できます。Ni の添加（約 0.5 重量%）は、遷移層を形成することで界面の拘束を強化し、全体的な膨張率を低下させます。環境要因（酸化や熱サイクルなど）は、長期的な熱膨張性能に影響を与える可能性があります。たとえば、湿度の高い環境では、銅相がわずかに酸化され、界面応力が変化する可能性があります。そのため、安定性を維持するために、不活性雰囲気（アルゴンなど）保護や表面コーティング（ニッケルメッキなど）がよく使用されます。つまり、タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数の調整は、タングステンと銅の固有の特性、微細構造の最適化、プロセス制御に基づいており、対象材料との熱的整合を実現し、電子システムと航空宇宙システムの信頼性を向上させることを目的としています。

2.2.2 タングステン-銅比の熱膨張係数への影響

タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数（CTE）は、温度変化による寸法の膨張または収縮の重要な特性であり、セラミック、半導体、その他の材料との熱適合性に直接影響します。タ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ングステン銅比（タングステンと銅の重量比）は、熱膨張係数を調節する主要因です。タングステンの低い熱膨張係数（25℃で約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ ）と銅の高い熱膨張係数（25℃で約 $16.5 \times 10^{-6}/K$ ）が、複合材料の CTE がタングステン銅比に応じて変化する法則を決定づけます。

一般的に、タングステン含有量が多いほど熱膨張係数は低くなり、銅含有量が多いほど熱膨張係数は高くなり、ほぼ直線的な変化傾向を示します。たとえば、W90Cu10（タングステン 90 重量%、銅 10 重量%）の CTE は約 $6.0 \times 10^{-6}/K$ で、純タングステンに近く、ガリウムヒ素（CTE 約 $5.7 \times 10^{-6}/K$ ）などの低膨張材料とのマッチングに適しています。一方、W50Cu50（タングステン 50 重量%、銅 50 重量%）の CTE は約 $12 \times 10^{-6}/K$ で、純銅に近く、高出力ダイオードパッケージングなど、高い熱伝導性が求められるシナリオに適しています。W70Cu30 と W80Cu20 は、熱膨張係数がそれぞれ $9.2 \times 10^{-6}/K$ と $7.0 \times 10^{-6}/K$ であり、一般的に使用されている中間比の材料です。これらは、窒化アルミニウム（CTE 約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ ）やシリコン（CTE 約 $2.6 \times 10^{-6}/K$ ）との熱的整合性に優れているため、5G 基地局の放熱基板や光電子パッケージングに広く使用されています。

この法則は、微細構造におけるタングステンと銅の相乗効果に由来する。タングステン粒子は剛性骨格を形成して銅マトリックスの熱膨張を制限し、銅マトリックスはタングステン粒子間の空隙を埋めて高い膨張率に貢献する。しかし、界面結合、粒子形態、調製プロセスが膨張挙動に影響を与えるため、実際の値は理論予測からわずかにずれる。例えば、W75Cu25 の理論上の CTE は約 $8.3 \times 10^{-6}/K$ であるが、測定値はタングステンと銅の界面の機械的な連結によってタングステン相の拘束が強化されるため、 $8.0 \sim 8.5 \times 10^{-6}/K$ となる場合がある。タングステン含有量の増加により、タングステン粒子間の接触がより密接になり、より強固な剛性ネットワークが形成され、膨張がさらに抑制される。例えば、W85Cu15 のタングステン粒子（粒径 $2 \sim 6 \mu m$ ）は粉末冶金プロセスを通じて均一に分散されており、熱膨張係数は $6.5 \sim 7.5 \times 10^{-6}/K$ で安定しており、高温航空宇宙部品に適しています。対照的に、銅の含有量が多い場合（W60Cu40 など）、銅マトリックスはより連続的になり、膨張挙動は純銅に近くなり、CTE は約 $10 \times 10^{-6}/K$ に増加します。温度は熱膨張係数にあまり影響しません。室温から 800℃ の範囲では、タングステン銅ヒートシンクの CTE はわずかに（約 5～10%）増加しますが、タングステン相の安定性により、ジェットエンジンの熱管理などの高温用途に適しています。

2.2.3 タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数の試験方法

タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数試験は、その熱整合性能を評価する上で重要なステップです。一般的な方法には、熱機械分析（TMA）、膨張測定法、光干渉法などがあります。これらの方法は、制御された温度変化下でのサンプルの寸法変化を測定することで熱膨張係数を正確に測定するため、電子機器、航空宇宙、光エレクトロニクス分野の品質管理に適しています。

熱機械分析（TMA）は最も一般的に使用される方法です。サンプルに小さな機械的負荷をかけることで、プローブ（圧縮プローブなど）を使用して、加熱または冷却中のサンプルの線膨張

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を記録します。テスト装置（NETZSCH TMA402 など）には、 $0.1\mu\text{m}$ の変位変化を測定できる高精度変位センサー（LVDT など）が装備されています。テスト温度範囲は通常 -50°C ～ 1000°C で、W70Cu30 などのヒートシンクの CTE テストに適しています。サンプルは、均一なプローブ接触を確保するために滑らかな表面を持つ規則的な形状（直径 10 mm、高さ 5 mm など）に加工する必要があり、銅相の酸化を防ぐために不活性雰囲気（窒素など）下でテストを実行します。TMA テストは ASTM E831 規格に準拠しており、 $25 \sim 800^{\circ}\text{C}$ の範囲で W80Cu20 の CTE を正確に測定し、セラミック基板との適合性を検証できます。

膨張計法は、加熱中のサンプルの長さの変化を直接測定することで熱膨張係数を算出するため、厚いヒートシンク（W85Cu15 など、厚さ 3～5mm）に適しています。水平プッシュロッド膨張計などの装置は、石英またはアルミナプッシュロッドを介してサンプルの膨張を記録します。試験温度範囲が広く、TMA よりも精度がわずかに劣りますが、大型サンプルや高温試験に適しています。

光干渉法（レーザー干渉計など）は、熱膨張時のサンプル表面の変位変化を測定することで、非接触で高精度な試験を実現します。薄いヒートシンク（W60Cu40 など、厚さ 0.5～1mm）や複雑な形状のサンプルに適しています。試験は真空または不活性雰囲気下で実施する必要があります。サンプル表面は光の反射を確保するために研磨する必要があります。その他の補助的な方法としては、X 線回折（XRD）高温試験があります。これは、温度による格子定数の変化を測定することで間接的に CTE を推定するため、タングステンと銅の界面の膨張挙動の研究に適しています。試験中は、機器を校正する必要があります（アルミナなどの標準サンプルを使用するなど）、熱応力を回避するために加熱速度を制御する必要があります（通常 $2 \sim 5^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ）。環境制御は非常に重要です。例えば、W50Cu50 を試験する場合、アルゴン雰囲気は高温酸化を防ぎ、CTE データの信頼性を確保します。試験結果は、SEM などの微細構造解析と組み合わせることで、気孔や界面欠陥の影響を検証する必要があります。例えば、W75Cu25 の気孔率が 1% の場合、CTE の測定値は約 3～5% 高くなる可能性があります。

2.2.3 正確な熱膨張係数のマッチングを実現するための方法と戦略

タングステン銅ヒートシンクとターゲット材料（セラミック、半導体など）の CTE（熱膨張係数）の正確なマッチングは、電子パッケージングおよび熱管理部品の長期信頼性を確保するための鍵であり、組成の最適化、微細構造制御、製造プロセスの改善、インターフェースの強化などの戦略が必要です。まず、タングステンと銅の比率を最適化することが、CTE のマッチングを実現するための中核的な方法です。タングステンと銅の重量比を調整することで、特定の材料に合わせて CTE を正確に制御できます。たとえば、5G 基地局の放熱基板では、窒化アルミニウムに合わせるために W85Cu15 または W90Cu10 を選択できます。ガリウムヒ素に合わせるには、オプトエレクトロニクスパッケージで広く使用されている W80Cu20 が理想的な選択肢です。組成設計は、アプリケーションの温度範囲と組み合わせる必要があります。たとえば、W70Cu30 の CTE は $25 \sim 600^{\circ}\text{C}$ で、電気自動車のインバーターに適しており、シリコンとの許容可能な熱応力差を形成します。微細構造の制御は、精密なマッチングを実現するためのもう 1 つの重要な戦略です。均一なタングステン粒子分布と高密度により、熱膨張挙動が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

安定し、局所的な膨張の不均一性を低減できます。タングステン粉末をプラズマ球状化することで球状粒子を作製し、銅マトリックスとの界面接触を強化し、膨張制約を最適化します。たとえば、W75Cu25 は、球状タングステン粒子と真空浸透プロセスにより、CTE が $8.0 \sim 8.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ で安定しており、高温の航空宇宙部品に適しています。製造プロセスの改善は、CTE マッチングに不可欠です。ホットプレス焼結は、密度を 99.8% 以上に高め、気孔による膨張偏差を低減できます。真空または不活性雰囲気（アルゴンなど）での焼結は、銅相の酸化を防ぎ、タイトな界面を確保します。微量元素（Ni、Fe など、約 0.5 重量%）や強化相（SiC など）を添加することで、CTE を微調整できます。Ni は Cu-Ni 遷移層を形成することで界面拘束を強化し、W80Cu20 の CTE を約 $0.2 \sim 0.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ 低減し、セラミックスとのマッチングを最適化します。

インターフェース強化戦略により、マッチング精度をさらに向上させることができます。タングステンと銅のインターフェースにおける機械的な連動と原子拡散の制限により、熱膨張の調整が保証され、グラフェン（約 0.5 重量%）を添加することでインターフェースの靱性が向上し、熱サイクルによる膨張の不均一性が低減されます。たとえば、W70Cu30 にグラフェンを添加すると、高温での CTE がより安定し、オプトエレクトロニクスパッケージングに適しています。複合構造設計は、W85Cu15 の表面に純銅またはセラミックコーティング（AlN など）の薄層を堆積して勾配 CTE 構造を形成し、ターゲット材料との膨張遷移をスムーズにし、熱応力を低減する高度な戦略です。熱サイクル安定性テストにより、マッチング効果を検証し、長期的な信頼性を確保できます。環境適応性の制御も重要です。たとえば、海洋環境では、ニッケルメッキにより、W60Cu40 ヒートシンクを湿気による浸食による膨張変化から保護できます。要約すると、組成の最適化、微細構造の調整、プロセスの改善、インターフェースの強化を通じて、タングステン銅ヒートシンクはターゲット材料との正確な CTE マッチングを実現し、電子システムと航空宇宙システムの性能を向上させることができます。

2.3 タングステン銅ヒートシンクの機械的特性

2.3.1 タングステン銅ヒートシンクの強度とその試験方法

タングステン銅ヒートシンクの強度は、電子工学、航空宇宙、光電子工学分野における応用において重要な機械的特性であり、主に引張強度、降伏強度、圧縮強度を含みます。これは、タングステンの高硬度と銅の延性の相乗効果によるものです。タングステン（W）は高融点金属として高い引張強度と高い硬度を有し、構造的な剛性をもたらします。一方、銅（Cu）は優れた延性と低い強度（引張強度約 $200 \sim 250 \text{MPa}$ ）を有し、材料に靱性を与えます。タングステン銅ヒートシンクの強度は、タングステン含有量の増加に伴って増加します。例えば、W90Cu10 の引張強度は $800 \sim 1000 \text{MPa}$ に達し、航空宇宙分野の高温部品に適しています。一方、W50Cu50 の引張強度は約 $400 \sim 600 \text{MPa}$ で、5G 基地局の放熱基板など、高熱伝導率の電子パッケージング用途に適しています。強度は微細構造の影響も受けます。均一に分布したタングステン粒子（粒径 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ ）と高密度（理論密度の 99.8% 超）により、界面欠陥を低減し、機械的特性を向上させることができます。例えば、W70Cu30 は粉末冶金プロセスで製造され、引張強度は約 $600 \sim 800 \text{MPa}$ で、高い機械的応力とアーク浸食に耐えることができるため、EDM 電極に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

適しています。温度は強度に一定の影響を与えます。600 ～ 800℃ の高温では、銅相の軟化により強度がわずかに低下する可能性があります (約 10 ～ 15%)。ただし、タングステン相の安定性により、全体的なパフォーマンスは信頼できます。

試験方法: タングステン銅ヒートシンクの強度試験は、主に引張試験、圧縮試験、曲げ試験を採用しています。引張試験は ASTM E8 規格に準拠しています。万能試験機（インストロンなど）を使用して標準サンプル（棒状またはドッグボーン形状、サイズ 5mm×10mm×50mm など）に張力を加え、応力-ひずみ曲線を記録し、引張強度と降伏強度を計算します。試験は室温または高温（600℃など）で実施する必要があるため、銅相の酸化を防ぐために不活性雰囲気（アルゴンなど）を使用します。圧縮試験は圧縮強度の評価に適しています。ASTM E9 規格に準拠しています。サンプルは通常円筒形（直径 10mm、高さ 10～15mm）です。材料の圧縮容量は、圧縮荷重を加えて測定します。たとえば、W85Cu15 の圧縮強度は 1200MPa に達することがあります。曲げ強度の評価には、3 点曲げ試験（ASTM E290）が用いられます。薄板サンプルに適しています。曲げ強度は、サンプルの中心に荷重を加えることで測定されます。航空宇宙部品の検証によく用いられます。試験前に、サンプル表面が滑らかでひび割れがないことを確認し、機器の校正を行って精度を確保する必要があります。強度試験結果の検証や、破断面の気孔や界面剥離の有無の確認には、微細構造分析（SEM 等）がよく用いられます。例えば、W75Cu25 の引張試験では、均一なタングステン粒子分布が破壊起点を減らし、強度を向上させることが示されました。

2.3.2 タングステン銅ヒートシンクの硬度とその試験方法

タングステン銅ヒートシンクの硬度は、局所的な塑性変形に対する抵抗力を反映しており、タングステンの高い硬度と銅の延性によって決まり、タングステン含有量の増加に伴って増加します。タングステンのピッカース硬度（HV）は約 300～400、銅は約 50～100 HV です。タングステン銅ヒートシンクの硬度は、この 2 つの中間です。例えば、W90Cu10 のピッカース硬度は 250～300 HV に達し、抵抗溶接電極などの耐摩耗性が求められる用途に適しています。W50Cu50 の硬度は約 100～150 HV で、加工性が求められる電子パッケージ用ヒートシンクに適しています。硬度は、微細構造や製造プロセスによっても影響を受けます。粉末冶金または浸透プロセスでは、タングステン粒子の粒径（2～6μm）と密度（>99.8%）を制御することで硬度を最適化できます。たとえば、W70Cu30 の硬度は約 180～220 HV で、均一なタングステン粒子分布と緊密な界面結合により、変形に対する耐性が向上します。硬度は高温でわずかに低下します。たとえば、600℃ では、W80Cu20 の硬度は銅相の軟化により約 10% 低下する可能性があります。微量元素（Ni など、約 0.5 重量%）を添加すると、固溶強化によって硬度がわずかに増加しますが、過剰量（>1 重量%）では脆い相が導入され、性能が低下する可能性があります。

試験方法: 硬度試験は主にピッカース硬度試験とブリネル硬度試験を採用しています。ピッカース硬度試験（ASTM E92）では、ダイヤモンド四角錐圧子（荷重は通常 0.5～5kg）を用いて、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

試料表面に正方形のくぼみ（例えば W75Cu25、サイズ 10mm×10mm×2mm）を押し込み、対角線の長さを測定して硬度値を算出します。試験は、表面に傷や酸化層がないことを確認するために、研磨された試料を用いて実施する必要があります。通常、精度を向上させるために、5～10 点の平均値を取得します。

ブリネル硬度試験（ASTME10）では、硬い鋼球圧子（直径 10mm、荷重 3000kg）を使用します。これは、より厚いヒートシンク（W85Cu15、厚さ 3～5mm など）に適しており、円形の圧痕の直径を測定することで硬度を計算します。試験環境は室温で制御する必要があり、必要に応じて不活性雰囲気（窒素など）下で実施して銅相の酸化を防ぐ必要があります。ナノインデントーション試験は、特に界面領域の局所硬度を評価するために使用でき、グラフェンを添加した W70Cu30 の硬度変化の研究に適しています。試験結果は SEM および XRD 分析と組み合わせて、硬度に影響を与える気孔や不純物があるかどうかを確認する必要があります。たとえば、W60Cu40 のピッカース硬度試験では、高密度のサンプルの硬度がより均一であることが示されており、高周波回路のヒートシンクに適しています。

2.3.3 タングステン銅ヒートシンクの靱性とその試験方法

タングステン銅ヒートシンクの靱性は、エネルギー吸収能力と破壊抵抗能力を反映しており、銅の延性とタングステンの剛性によって決まり、銅含有量の増加に伴って増加します。銅相の延性により、材料は力を受けると塑性変形を起こしてエネルギーを吸収します。一方、タングステン相は高い強度を提供し、脆性破壊を防止します。

例えば、W50Cu50 は銅含有量が多い（50 重量%）ため靱性が高く、破壊靱性（ K_{IC} ）は約 15～20 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ であり、パワーモジュールの放熱基板など、耐衝撃性が求められる電子パッケージング用途に適しています。W90Cu10 はタングステン粒子が優勢であるため靱性は低くなります（ K_{IC} は約 8～12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）が、それでも高温航空宇宙部品のニーズを満たすことができます。微細構造は靱性に大きな影響を与えます。タングステン粒子の均一な分布（粒子サイズ 2～6 μm ）と高密度（>99.8%）により、亀裂伝播経路が短縮され、靱性が向上します。たとえば、W70Cu30 は真空浸透プロセスで製造され、優れた靱性を備えています。繰り返しの機械的および熱的応力に耐えることができるため、EDM 電極に適しています。微量強化相（グラフェンなど、約 0.5 重量%）を添加すると、架橋機構を通じて界面の靱性を高めることができます。例えば、W75Cu25 にグラフェンを添加すると、破壊靱性が約 10%向上します。高温では銅相の軟化により靱性がわずかに低下しますが（600℃で約 5～10%）、タングステン相の安定性により、材料の破壊靱性は維持されます。

試験方法: 靱性試験では、主に破壊靱性試験、衝撃試験、疲労試験が採用されます。破壊靱性試験（ASTME399）では、片側ノッチ付き梁（SENB）またはコンパクト引張（CT）試験片を通して亀裂伝播に必要な臨界応力拡大係数（ K_{IC} ）を測定します。試験片（W70Cu30、サイズ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20 mm×10 mm×5 mm など）には、標準ノッチ（深さ約 2 mm）を事前に作製し、万能試験機を使用して引張または曲げ荷重を適用して、亀裂伝播挙動を記録します。衝撃試験（ASTM E23）では、シャルピー法またはアイゾット法を使用して、衝撃振り子を通して試験片（W60Cu40、サイズ 10 mm×10 mm×55 mm など）に吸収されるエネルギーを測定し、その衝撃抵抗を評価します。これは、電子パッケージングヒートシンクの耐振動性を検証するのに適しています。疲労試験（ASTM E466）は、繰り返し荷重による繰り返し応力下での材料の寿命を測定する試験であり、航空宇宙用ヒートシンク（W85Cu15 など）の長期信頼性評価に適しています。試験は、酸化を防ぐため、不活性雰囲気（アルゴンなど）を用いて、室温または高温（600℃など）で実施する必要があります。サンプル表面は研磨し、微細構造分析（SEM など）を用いて亀裂伝播経路を調査する必要があります。例えば、W50Cu50 の衝撃試験では、銅マトリックスの延性が亀裂伝播を効果的に防止し、靱性を向上させることが示されており、高周波回路用ヒートシンクに適しています。

2.3.4 タングステン銅ヒートシンクの延性とその試験方法

延性はタングステン銅ヒートシンクの重要な機械的特性であり、応力を受けても破損することなく塑性変形する能力を反映しており、耐衝撃性や加工・成形が求められる用途に特に適しています。タングステン銅ヒートシンクの延性は、主に銅相の優れた延性（伸び率約 40～50%）によってもたらされますが、タングステンの高硬度と低延性（伸び率<1%）が全体的な延性を制限します。延性は銅含有量の増加に伴って大幅に増加します。たとえば、W50Cu50（銅 50 重量%）は延性が高く、伸び率が約 15～20%であるため、高出力ダイオード基板など、複雑な成形が必要な電子パッケージングヒートシンクに適しています。W90Cu10（銅 10 重量%）は延性が低く、伸びが約 2～5%であるため、ジェットエンジンの熱管理部品などの高強度航空宇宙用途に適しています。微細構造は延性に重要な影響を与えます。均一に分散したタングステン粒子（粒子サイズ 2～6μm）と高密度（理論密度>99.8%）により、亀裂の開始点が減少し、延性が向上します。たとえば、W70Cu30 は真空浸透プロセスで製造され、伸びが約 8～12%で、電気放電加工（EDM）電極の機械的衝撃と熱サイクルに耐えることができます。微量元素（Ni など、約 0.5 重量%）を添加すると、固溶強化によって銅相の延性が向上しますが、過剰量（>1 重量%）は脆い相を形成し、延性が低下する可能性があります。銅相の軟化により、高温での延性がわずかに向上します。例えば、W60Cu40 は 600℃で約 10%の伸び率を達成できますが、過熱による強度低下を防ぐ必要があります。環境要因（湿気や腐食など）によって界面応力集中が誘発され、延性が低下する可能性があるため、保護のために表面コーティング（ニッケルメッキなど）が用いられることがよくあります。

試験方法: 延性試験は、主に引張試験、曲げ試験、カップリング試験によって評価されます。引張試験（ASTM E8）は最も一般的に使用される方法です。万能試験機（インストロンなど）を使用して、標準サンプル（ドッグボーン形状、サイズ 5mm×10mm×50mm など）に張力を加え、応力-ひずみ曲線を記録し、伸び（破断前の長さの変化率）を測定します。試験は、銅相の酸

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

化を防ぐために、不活性雰囲気（アルゴンなど）を使用して、室温または高温（600℃など）で実施する必要があります。たとえば、W60Cu40 の引張試験では、伸びが 10～15% であることが示されており、高周波回路のヒートシンクに適しています。曲げ試験（ASTM E290）は、3 点または 4 点曲げ荷重により薄板サンプル（W75Cu25、厚さ 1～2mm など）の塑性変形能力を評価し、曲げ角度と亀裂発生点を記録し、電子パッケージングヒートシンクの曲げ耐性の検証に適しています。カップリング試験（ASTM E643）は、ヒートシンクのスタンピング性能を評価するために使用されます。球状のパンチをサンプル（直径約 20mm、厚さ 0.5～2mm）に押し込むことにより、カップリングの深さを測定します。W50Cu50 などの高銅含有量ヒートシンクの延性評価に適しています。試験を行う前に、サンプル表面が滑らかで欠陥がないことを確認し、機器を校正して精度を確保する必要があります。微細構造分析を使用して破面を検査し、延性に影響を与える気孔や界面の剥離があるかどうかを確認します。例えば、W70Cu30 の引張試験では、均一なタングステン粒子の分布により伸びが効果的に向上することが示されています。

2.3.5 タングステン銅ヒートシンクの機械的特性と熱的特性の相関関係

タングステン銅ヒートシンクの機械的特性（強度、硬度、靱性、延性）と熱的特性（熱伝導率、熱膨張係数）の間には密接な相関関係があり、これらが相まって、エレクトロニクス、航空宇宙、オプトエレクトロニクス分野における適用性を決定づけています。この相関関係は、タングステンと銅の物理的特性、微細構造、および製造プロセスの相乗効果に起因しています。以下では、組成、微細構造、および用途要件という 3 つの側面からこの相関関係を分析します。

組成の影響: タングステンと銅の比率は、機械的特性と熱的特性の両方に影響を与えます。銅含有量が多い材料（W50Cu50 など）は、熱伝導率（約 280～300 W/m·K）と延性（伸び率 15～20%）を向上させますが、熱膨張係数（約 $12 \times 10^{-6}/K$ ）が高くなります。そのため、セラミック（窒化アルミニウムなど、熱膨張係数約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ ）とのマッチングが悪くなり、熱応力が増加し、界面強度が低下する可能性があります。一方、タングステン含有量が多い材料（W90Cu10 など）は、熱膨張係数（約 $6.0 \times 10^{-6}/K$ ）が低下し、強度（引張強度 800～1000MPa）と硬度（250～300HV）が向上しますが、熱伝導率（約 190W/m·K）が低く、延性と靱性（伸び 2～5%、 K_{IC} 約 8～12MPa·m^{1/2}）が劣ります。例えば、W70Cu30 は、熱伝導率（約 256W/m·K）、熱膨張係数（約 $9.2 \times 10^{-6}/K$ ）、機械的特性（引張強度 600～800MPa、伸び 8～12%）のバランスが取れており、5G 基地局の放熱基板に広く使用されています。

微細構造の相関: 微細構造は、機械的特性と熱的特性の調和的な最適化に不可欠です。均一なタングステン粒子分布（粒子サイズ 2～6μm）と高密度（>99.8%）は、気孔率と界面欠陥を低減し、熱伝導率、強度、延性を向上させます。例えば、W75Cu25 は真空浸透プロセスで製造され、高密度、熱伝導率約 230W/m·K、引張強度約 650MPa、伸び率 10%を実現し、光電子パッケージングに適しています。重要なのは界面接合の品質です。タングステンと銅の密接な界面は、機械的な連結を通じて熱抵抗と亀裂伝播を低減し、熱伝導率と靱性を向上させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微量強化相（例えばグラフェン、約 0.5 重量%）を添加すると、界面強度が向上し、熱伝導率（例えば W70Cu30 は 300 W/ m·K に達する）と破壊靱性（約 10%向上）が向上しますが、過剰な添加は脆化を引き起こすため避けるべきです。気孔率は一般的な制限因子であり、1%の気孔率は熱伝導率を 5~10%低下させ、引張強度と延性も約 10%低下させる可能性があります。したがって、高密度は機械的特性と熱的特性を最適化するための基盤となります。

アプリケーション要求のトレードオフ: アプリケーションシナリオに応じて、機械的特性と熱的特性の相関関係を比較検討する必要があります。高周波電子デバイス（RF アンプなど）では、放熱性と耐振動性を確保するために、高い熱伝導率と適度な延性（W60Cu40 など）が好まれ、熱応力を低減するために熱膨張係数はシリコンまたはセラミックスの熱膨張係数と一致する必要があります。航空宇宙の高温部品（ジェットエンジンヒートシンクなど）では、高強度と低熱膨張係数（W85Cu15 など）がより重要であり、熱伝導率を適切に下げることによって高温安定性の要件を満たすことができます。たとえば、W80Cu20（熱伝導率約 220 W/ m·K、CTE 約 7.0×10^{-6} /K、引張強度 700 MPa）は、オプトエレクトロニクスパッケージングにおける熱マッチングと機械的信頼性のバランスを取り、高出力レーザーに適しています。熱サイクル環境では、靱性と熱膨張マッチングが特に重要です。W70Cu30 は SiC を添加することで界面靱性を高め、熱膨張安定性を維持し、デバイス寿命を延ばします。ホットプレスや焼結などの製造プロセスは、微細構造を最適化することで、機械的特性と熱的特性を相乗的に向上させます。例えば、W75Cu25 の熱伝導率と引張強度は、1,400°C でホットプレスおよび焼結することで、ともに約 5%向上します。

2.4 タングステン銅ヒートシンクの電気伝導率およびその他の特性

2.4.1 タングステン銅ヒートシンクの電気伝導率とその試験方法

タングステン銅ヒートシンクの導電率は、電子、通信、新エネルギー分野での応用において重要な性能です。これは電流を伝送する能力を反映し、通常は国際軟銅規格（IACS）のパーセンテージで表されます。銅の導電率は非常に高く（約 100% IACS、抵抗率は約 $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ）、タングステンは導電率が低く（約 31% IACS、抵抗率は約 $5.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ）、そのため、タングステン銅ヒートシンクの導電率は主に銅相の連続導電ネットワークによって決まり、銅含有量の増加に伴って増加します。たとえば、W50Cu50（銅 50 重量%）の導電率は約 40~50% IACS で、5G 基地局 RF アンプなどの高周波回路やパワー半導体放熱基板に適しています。W90Cu10（銅 10 重量%）の導電率は約 20~25% IACS で、衛星の熱管理部品など、低熱膨張が求められる航空宇宙用途に適しています。導電率は微細構造と密接に関連しています。の均一な分布と高密度（理論密度の 99.8%超）により、界面散乱を低減し、銅マトリックスの導電経路を強化できます。たとえば、W70Cu30 は真空浸透プロセスで製造され、導電率は約 30~35% IACS です。これは、電気伝導性と耐アーク浸食性の両方を備えているため、電気火花加工（EDM）電極に適しています。微量元素（Ni など、約 0.5 重量%）を添加すると、固溶体強化によって界面結合を改善できますが、過剰量（1 重量%超）は高抵抗相（Ni-Cu 固溶体など）を形成し、電気伝導性が低下する可能性があります。電気伝導性は高温でわずかに低下します。たとえば、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W60Cu40 の電気伝導性は 600°C で約 5~10%低下します。これは、銅相の抵抗率が温度上昇とともに増加するためですが、タングステン相の安定性により信頼性の高いパフォーマンスが保証されます。環境要因（酸化や湿気など）により銅相の表面抵抗が増加する可能性があるため、導電性を維持するために不活性雰囲気保護またはめっき（ニッケルめっきなど）がよく使用されます。

試験方法: タングステン銅ヒートシンクの導電率試験は、主に四端子法、渦電流法、抵抗率測定法を採用しています。四端子法（ASTM B193）は標準的な方法です。サンプル（W70Cu30、サイズ 10mm×10mm×2mm など）の表面に定電流を流し、2つの端子間の電圧差を測定して抵抗率を計算し、導電率に変換します。試験は室温または高温（600°Cなど）で実施する必要があります。接触抵抗を減らすために研磨されたサンプルを使用し、銅相の酸化を防ぐために不活性雰囲気（窒素など）で実施する必要があります。渦電流法（ASTM E1004）は、高周波電磁場を通してサンプル（W60Cu40、厚さ 1~2mm など）に渦電流を誘導し、導電率を測定します。迅速な非破壊検査に適しており、電子パッケージングヒートシンクの品質管理によく使用されます。抵抗率測定法は、マルチメーターまたは専用の抵抗計を用いてサンプル（W80Cu20、棒状、サイズ 5mm×5mm×50mm など）の抵抗を測定し、幾何学的寸法と組み合わせて抵抗率を計算するもので、実験室での研究に適しています。試験では、機器の校正と標準銅サンプルの使用によって精度を確保する必要があります。微細構造分析（SEM など）は、界面欠陥や不純物が導電性に与える影響を検証できます。例えば、W50Cu50 の 4 プローブ試験では、均一な銅ネットワークが導電性を大幅に向上させることを示しています。試験結果は、適用環境と組み合わせて分析する必要があります。例えば、高周波回路では、W60Cu40 の導電性試験において、周波数が渦電流効果に与える影響を考慮する必要があります。

2.4.2 タングステン銅ヒートシンクの耐酸化性およびその試験方法

タングステン銅ヒートシンクの耐酸化性は、高温または腐食性環境での酸化反応に耐える能力を反映しており、エレクトロニクス、航空宇宙、オプトエレクトロニクスの分野での長期信頼性に不可欠です。タングstenは優れた耐酸化性を備えています。融点が高く化学的に安定しているため、高温で酸化物を形成しにくいですが、銅は耐酸化性が悪く、空気中で約 200°C で酸化銅（Cu₂O）を形成し始め、約 400°C で酸化第一銅（CuO）を形成し始めます。これらの酸化物は熱伝導率と電気伝導性が低いため、熱抵抗と電気抵抗が増加する可能性があります。タングステン銅ヒートシンクの耐酸化性は、主にタングステン相の保護効果と微細構造の密度に依存します。

タングステン含有量が多い（W90Cu10 など）は、銅相の露出が少ないため耐酸化性が強く、ジェットエンジンの熱管理部品などの高温航空宇宙用途に適しています。W50Cu50 は銅含有量が多い（50 重量%）ため耐酸化性が弱いですが、不活性雰囲気下または表面保護下で、5G 基地局の放熱基板などの電子パッケージングヒートシンクに使用できます。微細構造は耐酸化性に大きな影響を与えます。高密度（>99.8%）および均一なタングステン粒子分布（粒子サイズ 2~6μm）は、銅相の露出を減らし、酸化リスクを軽減できます。たとえば、W70Cu30

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は真空浸透プロセスで製造され、気孔率<0.5%で、低密度サンプルよりも耐酸化性が優れています。表面コーティング（ニッケルメッキや窒化物コーティングなど）は、耐酸化性を大幅に向上させることができます。例えば、ニッケルメッキを施した W60Cu40 は、湿気の多い環境下でも長期安定性を維持できます。微量元素（例えば Cr、約 0.5 重量%）を添加すると、保護酸化物層（例えば Cr_2O_3 ）を形成して耐酸化性を向上させることができますが、熱伝導性への影響を避けるため、過剰な添加は避けるべきです。

試験方法：耐酸化性は、主に熱重量分析（TGA）、高温酸化試験、環境暴露試験によって評価されます。熱重量分析（TGA、ASTM E1131）は、サンプル（W75Cu25、サイズ 10 mm × 10 mm × 2 mm など）を制御された雰囲気（空気や酸素など）で加熱し、温度または時間による質量の変化を記録することで、酸化重量増加を評価します。このテストでは高精度の天秤（分解能 0.1μg）を使用し、加熱速度は通常 5~10°C/分です。また、酸化効果を区別するために、窒素またはアルゴンを参照雰囲気として使用します。たとえば、W80Cu20 の TGA テストでは、600°C の空気中での酸化重量増加が 0.5%未満であることが示されており、その耐酸化性が高温用途に適していることを示しています。高温酸化試験では、サンプル（W60Cu40 など、厚さ 1~2 mm）を高温炉に一定時間さらすことで、表面酸化物の厚さ（SEM または XRD で分析）や特性の変化（熱伝導率の低下など）を測定します。環境暴露試験は、実際の使用条件をシミュレートし、ASTM B117 規格に従って、サンプル（W70Cu30 など）を湿気や塩水噴霧環境に置き、表面腐食または酸化の程度を評価します。この試験では、サンプルを研磨して表面の一貫性を確保し、XPS または EDS と組み合わせて酸化物成分（ Cu_2O 、 CuO など）を分析します。たとえば、W85Cu15 の高温酸化試験では、タングステン相が銅マトリックスを効果的に保護し、酸化物層の厚さが 1μm 未満であり、高温の航空宇宙環境に適していることが示されています。

2.4.3 タングステン銅ヒートシンクの耐食性およびその他の性能特性

タングステン銅ヒートシンクの耐食性は、電子工学、航空宇宙工学、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野での応用において重要な特性であり、過酷な環境（湿気、塩水噴霧、化学雰囲気など）での化学的侵食に耐える能力を反映しています。タングstenは優れた耐食性を持っています。高い融点（3,422°C）と化学的安定性により、室温から高温（<800°C）までの酸、アルカリ、酸化雰囲気に対して、特に王水を除く一般的な酸（硫酸、塩酸など）に対して強い耐性を示します。銅は耐食性が弱く、湿気や酸素を含む環境では酸化第二銅または酸化第一銅を形成しやすいです。これらの酸化物は熱伝導率と電気伝導率を低下させる可能性があります。タングステン銅ヒートシンクの耐食性は、主にタングステン相の保護効果と高密度微細構造によって決まります。タングステン含有量が多い（W90Cu10 など）は銅相の露出が少ないため耐食性が強く、海洋環境のレーダーシステムのヒートシンクに適しています。W50Cu50 は銅含有量が多い（50 重量%）ため耐食性が弱いですが、不活性雰囲気下や表面保護下での 5G 基地局放熱基板に使用できます。微細構造は耐食性に大きな影響を与えます。高密度（>99.8%）で均一なタングステン粒子分布（粒子サイズ 2~6μm）により、多孔性と銅相の露出

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が低減し、腐食のリスクを軽減できます。たとえば、W70Cu30 は真空浸透プロセスで製造され、多孔性は<0.5%で、85°C、相対湿度 85%の環境で優れた耐食性を示します。表面コーティング（ニッケルメッキや窒化物コーティングなど）により、耐食性を大幅に向上させることができます。例えば、ニッケルメッキを施した W60Cu40 は、塩水噴霧試験で 500 時間以上、明らかな腐食を示さずに耐えることができます。微量元素（例えば Cr、約 0.5 重量%）を添加すると、保護酸化層が形成され、耐食性はさらに向上しますが、熱伝導性や電気伝導性に影響を与えないように添加量を制御する必要があります。

その他のパフォーマンス機能:

1. **耐高温性:** タングステン銅ヒートシンクは、タングステンの高い融点と銅の熱伝導性を組み合わせることで、高温（600~800°C）でも構造安定性を維持します。例えば、W85Cu15 は航空宇宙分野の高温部品において軟化することなく 800°Cに耐え、ジェットエンジンの熱管理に適しています。
2. **アーク侵食性:** タングステンは高い融点を持ち、銅は優れた導電性を持つため、放電加工（EDM）電極や抵抗溶接に最適です。例えば、W70Cu30 は高強度アークにも耐え、電極寿命を延ばします。
3. **加工性:** 銅相の延性により、タングステン銅ヒートシンクは旋削、フライス加工、穴あけ加工が容易で、複雑な形状の加工に適しています。例えば、W60Cu40 は高周波回路用ヒートシンクとして 0.5~2mm の薄板に加工できます。
4. **耐摩耗性:** タングステンは硬度が高い（300~400 HV）ため、優れた耐摩耗性を備えています。W80Cu20 は、抵抗溶接電極における繰り返しの機械的摩耗にも耐えることができます。
5. **熱サイクル安定性:** タングステン銅ヒートシンクは、熱サイクル環境（-50°C~800°C など）においても安定した性能を維持します。W75Cu25 は、最適化されたインターフェース接合により、1000 回の熱サイクルにおいても明らかな亀裂を生じずに耐えることができ、オプトエレクトロニクスパッケージングに適しています。

試験方法: 耐食性試験には、主に塩水噴霧試験、湿熱試験、化学浸漬試験があります。塩水噴霧試験（ASTM B117）では、サンプル（W70Cu30 など、サイズ 10mm×10mm×2mm）を 5%NaCl 溶液噴霧環境（35°C、48~500 時間）に置き、表面腐食の程度を観察し、質量減少または性能変化（熱伝導率の低下など）を測定します。湿熱試験（IEC 60068-2-30）では、サンプル（W60Cu40 など、100~1000 時間）を 85°C、相対湿度 85%にさらして酸化または腐食の兆候を評価し、SEM と EDS を組み合わせて表面酸化物（Cu₂O など）を分析します。化学浸漬試験では、サンプルを酸性またはアルカリ性溶液（例：10% H₂SO₄、25°C、24 時間）に浸漬し、腐食速度を測定します。これは、化学環境における W85Cu15 の安定性を検証するのに適しています。サンプルは表面の均一性を確保するために研磨する必要があります。高温試験では、酸化の影響を分離するために不活性雰囲気（窒素など）を使用できます。XRD などの微細構造分析により、腐食生成物を特定し、タングステン相の保護効果を検証します。

2.5 CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク MSDS

CTIA GROUP LTD は、中国を代表するタングステン銅ヒートシンクメーカーであり、高性能

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

タングステン銅複合材料の研究開発と製造に注力しています。同社の製品は、エレクトロニクス、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野で幅広く使用されています。

CTIA GROUP LTD は、W50Cu50、W60Cu40、W70Cu30、W75Cu25、W80Cu20、W85Cu15 など、様々なブランドのタングステン銅ヒートシンクを製造しています。粉末冶金や真空浸透といった高度な製造プロセスにより、様々な熱管理および機械性能要件に対応しています。同社の製品は、高密度、優れた熱伝導性、調整可能な熱膨張係数、優れた機械特性で知られています。例えば、W60Cu40 ヒートシンクは 5G 基地局の RF モジュールに広く使用されており、W80Cu20 は光電子パッケージングに使用され、ガリウムヒ素に匹敵します。

CTIA GROUP LTD は、高純度タングステン粉末 (> 99.95%) と電解銅 (> 99.99%) を使用し、プラズマ球状化技術とホットプレス焼結プロセスを組み合わせることで、均一な微細構造、気孔率<0.5%を確保し、熱伝導性と耐腐食性を向上させています。CTIA GROUP LTD のタングステン銅ヒートシンクシートは耐腐食性に優れています。真空浸透プロセスは銅相の露出を減らし、表面ニッケルメッキまたは Cr コーティングと組み合わせることで、酸化と湿気腐食に対する耐性が大幅に向上します。たとえば、W70Cu30 ヒートシンクシートは、85°C、85%相対湿度のテストで明らかな腐食なしに数千時間に耐えることができ、海洋環境レーダーシステムに適しています。機械特性の面では、タングステン粒子の分布を最適化することで、製品は高い強度と靱性を実現しています。CTIA GROUP LTD は、構成比を調整し、強化相（グラフェンなど、約 0.5 wt.%）を追加することでパフォーマンスを最適化するカスタマイズサービスも提供しています。

危険の概要: 物理的危険性: 通常状況下では、タングステン銅ヒートシンク自体は可燃性または爆発性ではありません。健康への危険性: 通常の使用および接触では、タングステン銅ヒートシンクは人体に無害です。環境への危険性: タングステン銅ヒートシンクの化学的性質は、自然環境中で比較的安定しており、一般に環境に急性の害を及ぼすことはありません。ただし、廃棄された大量のタングステン銅ヒートシンクが適切に処理されない場合、タングステンと銅が徐々に土壌や水に放出され、汚染を引き起こす可能性があります。危険な特性: タングステン銅ヒートシンク自体は可燃性ではありませんが、高温環境、特に強力な酸化剤と接触すると、化学反応が起こり、可燃性ガスが発生したり、その他の危険を引き起こしたりする可能性があります。

操作と保管: 操作上の注意: タングステン銅ヒートシンクを取り扱う前に、作業者は特別な訓練を受け、製品の特性と動作仕様を熟知する必要があります。保管上の注意: タングステン銅ヒートシンクは、涼しく乾燥した、換気の良い倉庫に保管してください。

廃棄物処理: 廃棄物処理方法: 廃棄タングステン銅ヒートシンクは、関連する国および地方自治体の法律および規制に従って処分する必要があります。一般的には、資格のある金属リサイクル会社に引き渡してリサイクルし、専門的なプロセスでタングステンと銅を分離して生産に再利用することができます。リサイクルできない部品については、重金属などの有害物質による環境汚染を防止するため、有害廃棄物処理要件に従って専門の有害廃棄物処理機関に引き渡して処理する必要があります。廃棄物に関する注意事項: 廃棄物処理プロセスでは、作

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

業者や環境への危害を防ぐため、タングステン銅ヒートシンクの破損に注意する必要があります。廃棄タングステン銅ヒートシンクは適切に梱包し、輸送および処分のために、その構成と危険性を示すラベルを貼付する必要があります。同時に、廃棄タングステン銅ヒートシンクの処分記録を作成し、処分時間、方法、受入部署などの情報を記録して、規制当局による検査に備えなければなりません。

交通情報： 梱包区分：輸送の危険区分に応じて適切な梱包区分を選択してください。非危険タングステン銅ヒートシンクの場合、輸送中に製品が損傷しないように、木箱や段ボールなどの一般的な梱包材が一般的に使用されます。輸送上の注意事項：輸送中は、輸送中の衝突や押し出しを防ぐため、梱包が損傷していないことを確認する必要があります。輸送車両には、事故防止のため、適切な消防設備と緊急時対応設備を備える必要があります。輸送担当者は、製品の特性と輸送上の注意事項を理解するための特別な訓練を受ける必要があります。CTIA GROUPLTD のタングステン銅ヒートシンクの製造、販売、使用、廃棄は、一連の国家および地方の法律および規制に準拠する必要があります。中国では、「中華人民共和国安全生産法」、「危険化学品安全管理条例」、「中華人民共和国固形廃棄物環境汚染防止法」などの法律および規制が遵守すべき主要な法律および規制です。これらの法律および規制は、化学物質の安全な製造、保管、輸送、使用、廃棄物処理について明確な規定を設けており、製品のライフサイクル全体にわたる安全性と環境への配慮を確保しています。



CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第3章 タングステン銅ヒートシンクの分類

3.1 タングステン銅ヒートシンクの成分比による分類

タングステン銅ヒートシンクは、タングステン（W）と銅（Cu）の重量パーセント（wt.%）比によって分類されます。異なる比率により、材料に独自の熱伝導率、熱膨張係数（CTE）、電気伝導性、および機械的特性が与えられ、エレクトロニクス、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野の多様なニーズを満たします。一般的なグレードには、W50Cu50、W60Cu40、W70Cu30、W75Cu25、W80Cu20、W85Cu15、W90Cu10 などがあります。その中でも、W90Cu10 と W85Cu15 は、熱膨張係数が低く強度が高いため、高信頼性および高温用途に特に適しています。構成比は、微細構造と性能に直接影響します。銅含有量が多い（W50Cu50 など）と、熱伝導率と電気伝導性が向上し、高出力電子機器に適しています。タングステン含有量の高い銅（W90Cu10 など）は熱膨張係数を低減し、セラミックや半導体材料とのマッチングに適しています。タングステン銅ヒートシンクは、粉末冶金法または真空含浸法によって製造されます。タングステン粒子（粒径 2～6 μm ）が銅マトリックス中に均一に分散されているため、高密度（>99.8%）と性能安定性が確保されています。以下は、W90Cu10 と W85Cu15 の性能と用途に関する詳細な分析です。

3.1.1 W90Cu10 の性能と応用

性能: W90Cu10（タングステン 90 重量%、銅 10 重量%）は、タングステン含有量が多いため、熱膨張係数が極めて低く（25°Cで約 $6.0 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）、セラミック（窒化アルミニウムなど、CTE 約 $4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）や半導体（ガリウムヒ素など、CTE 約 $5.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）に近い、高精度の熱マッチングアプリケーションに適しています。熱伝導率は約 $190 \sim 200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ と低く、銅相の割合が少ないため熱伝導ネットワークは限られていますが、中低電力の放熱ニーズを満たすのに十分です。導電率は約 20～25% IACS（国際軟銅規格）で、低電流または高導電率ではない用途に適しています。優れた機械的性質、引張強度 800～1000MPa、ビッカース硬度約 250～300HV、耐摩耗性と耐圧縮性が強く、圧縮強度は 1200MPa に達します。延性と靱性は低く、伸びは約 2～5%、破壊靱性（ K_{IC} ）は約 $8 \sim 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。銅相の量が少いため、塑性変形能力は限られています。W90Cu10 は耐高温性に優れ、800°Cでも構造安定性を維持でき、アークアブレーションに耐性があり、放電加工（EDM）電極に適しています。タングステン相が優勢で銅相の露出が少ないため、耐食性に優れており、高温多湿（85°C、湿度 85%）環境や塩水噴霧環境でも優れた性能を発揮します。酸化重量増加率は 0.5%未満（600°C、空気、100 時間）です。微細構造は緻密で、気孔率は 0.5%未満です。真空浸透プロセスによって最適化されているため、均一な性能が確保されています。

用途: W90Cu10 は、熱膨張係数が低く強度が高いことから、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、エレクトロニクス分野で広く使用されています。航空宇宙分野では、低熱膨張率と耐高温性により、ジェットエンジンの熱管理部品や衛星のヒートシンクに最適です。セラミック基板と組み合わせることで熱応力を軽減します。例えば、W90Cu10 は衛星電源モジュールの放

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱に使用され、600～800℃の高温・振動環境下でも安定した動作を確保しています。オプトエレクトロニクス分野では、高出力レーザーや赤外線検出器のヒートシンクとして使用され、ガリウムヒ素やシリコンベースのデバイスと組み合わせることで光学性能の安定性を維持しています。エレクトロニクス分野では、W90Cu10 は耐腐食性と熱サイクル安定性（-50℃から800℃まで 1000 サイクルに耐える）に優れており、特にレーダーシステムなどの高信頼性機器において、マイクロ波集積回路や RF パッケージの放熱基板として使用されています。さらに、W90Cu10 は放電加工電極や抵抗溶接にも優れた性能を発揮し、高い硬度と耐アークアブレーション性により長寿命化を実現しています。表面にニッケルメッキを施すことで、海洋環境における耐腐食性をさらに高めることができ、船舶搭載レーダーヒートシンクにも最適です。

3.1.2 W85Cu15 の性能と応用

性能: W85Cu15（タングステン 85 重量%、銅 15 重量%）は、熱膨張係数と熱伝導率の良好なバランスを実現しています。熱膨張係数は約 $6.5 \sim 7.5 \times 10^{-6}/K$ で、ガリウムヒ素や窒化アルミニウムに近く、中・高電力の熱管理用途に適しています。熱伝導率は約 $200 \sim 220 W/m \cdot K$ で、W90Cu10 よりわずかに高くなっています。銅相の割合が増加したため、熱伝導ネットワークの連続性が向上し、より高い放熱要件を満たしています。電気伝導率は約 25～30% IACS で、中程度の導電性が求められる電子用途に適しています。機械的性質は強く、引張強度は約 700～900MPa、ビッカース硬度は約 220～270HV、圧縮強度は約 1100MPa で、耐摩耗性も良好です。延性と靱性は W90Cu10 よりわずかに優れ、伸びは約 4～7%、破壊靱性は約 $10 \sim 14 MPa \cdot m^{1/2}$ です。銅相の割合の増加により、塑性変形能力が向上しています。優れた耐高温性、700～800℃での安定した動作、耐アーク浸食性、抵抗溶接電極に適しています。耐食性が強く、タングステン相が銅マトリックスを保護し、湿熱または塩水噴霧試験に良好に反応し、酸化重量増加率は 0.7%未満（600℃、空気、100 時間）です。粉末冶金法または浸透法によって微細構造が最適化され、タングステン粒子は均一に分散（粒子径 $2 \sim 6 \mu m$ ）し、気孔率は 0.5%未満であるため、安定した性能が確保されています。微量元素（Ni など、0.5 重量%）を添加することで、界面結合が強化され、靱性と耐食性が向上します。

用途: W85Cu15 は、そのバランスの取れた熱特性と機械特性により、エレクトロニクス、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野で広く使用されています。エレクトロニクス分野では、W85Cu15 は 5G 基地局 RF モジュールやパワー半導体の放熱基板に使用され、セラミック基板と組み合わせて信号伝送の安定性と放熱効率を確保しています。たとえば、高周波増幅器のヒートシンクとして使用すると、熱負荷を効果的に管理し、デバイス寿命を延ばすことができます。航空宇宙分野では、W85Cu15 はミサイルや衛星の熱管理部品に使用され、その低い CTE と高い強度により、600℃でのレーダーシステムの放熱をサポートするなど、高温および振動環境に耐えます。オプトエレクトロニクス分野では、W85Cu15 は高出力 LED やレーザーダイオードのヒートシンクとして使用され、ガリウムヒ素またはシリコンベースのデバイスと組み合わせてオプトエレクトロニクスの性能を最適化します。新エネルギー分野では、W85Cu15 は電気自動車のインバータや太陽電池の熱管理に使用され、耐腐食性と熱サイクル安定性により、急速充電や高温環境に適しています。さらに、W85Cu15 は放

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

電加工や抵抗溶接の電極としても優れた性能を発揮し、高い硬度と耐アークアブレーション性により長寿命化を実現します。表面コーティング（Cr めっきなど）により、湿気や化学環境における耐腐食性を高めることができ、海洋用途や産業用途にも適しています。

3.1.3 W80Cu20 の性能と応用

性能: W80Cu20（タングステン 80 重量%、銅 20 重量%）は、適度な熱膨張係数、熱伝導率、および機械特性を備えたバランスの取れたタングステン銅ヒートシンクです。熱マッチングと高信頼性が求められるシナリオで広く使用されています。熱膨張係数（CTE）は約 $7.0 \times 10^{-6} / \text{K}$ （25°C）で、ガリウムヒ素（CTE 約 $5.7 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）や窒化アルミニウム（CTE 約 $4.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）に近い値のため、半導体またはセラミック基板とのマッチングに適しており、熱応力を軽減します。

熱伝導率は約 220～240 W / m·K で、銅含有量が高く、銅マトリックスの連続熱伝導ネットワ

ークのおかげで、W90Cu10（約 190～200 W / m·K ）よりも優れています。電気伝導率は約 25～35% IACS（国際軟銅規格）で、中程度の電流伝送をサポートし、高周波回路のニーズを満たしています。機械的性質に関しては、引張強度は約 700～850 MPa、ビッカース硬度は約 200～250 HV、圧縮強度は約 1000～1100 MPa であり、良好な強度と耐摩耗性を示しています。W90Cu10 と比較して延性と靱性が向上し、伸びは約 5～8%、破壊靱性（ K_{IC} ）は約 10～15 MPa·m^{1/2} です。銅相の割合の増加により、塑性変形能力が向上しています。耐高温性が良好で、700°C で安定して動作し、アークアブレーションに耐性があり、放電加工（EDM）電極や抵抗溶接に適しています。耐食性と耐酸化性に優れ、タングステン相が銅マトリックスを保護します。高温多湿環境（85°C、湿度 85%）または塩水噴霧試験における酸化重量増加率は 0.8% 未満（600°C、空気中、100 時間）です。粉末冶金法または真空浸透法で製造されたタングステン粒子（粒径 2～6 μm）は均一に分散しており、気孔率は 0.5% 未満であるため、安定した性能が得られます。微量元素（Ni など、約 0.5 重量%）を添加することで、界面結合が強化され、靱性と耐食性が向上します。

用途: W80Cu20 は、優れた熱整合と総合的な性能により、オプトエレクトロニクス、エレクトロニクス、航空宇宙分野で広く使用されています。オプトエレクトロニクス分野では、W80Cu20 は高出力レーザーや LED チップのヒートシンクとして使用され、ガリウムヒ素またはシリコンベースのデバイスと組み合わせて、安定した光学性能と効率的な放熱を確保します。たとえば、レーザーダイオードパッケージの熱負荷を効果的に管理し、デバイス寿命を延ばすことができます。エレクトロニクス分野では、W80Cu20 は 5G 基地局 RF モジュールやマイクロ波集積回路の放熱基板に使用されています。適度な熱伝導性と電気伝導性により高周波信号伝送をサポートし、セラミック基板と整合して熱応力を低減します。航空宇宙分野では、W80Cu20 は衛星の熱管理部品やミサイルシーカーの放熱に使用されています。CTE が低く強度が高いため、600～700°C の高温・振動環境に耐えます。さらに、W80Cu20 は放電加工用電極や抵抗溶接用電極としても優れた性能を発揮し、高い硬度と耐アークアブレーション性により長寿命を実現します。表面にニッケルまたはクロムコーティングを施すことで、海洋環境（船舶搭載レーダーなど）における耐食性をさらに高めることができ、長期間の湿気や塩水噴

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

霧への曝露にも適しています。W80Cu20 は優れた加工性を有し、旋削加工やフライス加工により複雑な形状に加工できるため、お客様のニーズに合わせてカスタマイズ可能です。

3.1.4 W75Cu25 の性能と応用

性能: W75Cu25（タングステン 75 重量%、銅 25 重量%）は、熱伝導率、熱膨張係数、機械的特性のバランスが優れており、高い放熱効率と適度な熱マッチングが求められる用途に適しています。熱膨張係数は約 $8.0 \sim 8.5 \times 10^{-6}/K$ （25°C）で、アルミナ（CTE 約 $7.0 \times 10^{-6}/K$ ）や一部の半導体材料に近く、中・高出力電子デバイスに適しています。熱伝導率は約 230～250W/m·K で、W80Cu20 よりも優れています。

銅相の割合が増えるため、熱伝導ネットワークがより連続的になります。電気伝導率は約 30～40%IACS で、高周波回路やパワーモジュールに適しています。機械的性質は、引張強度が約 650～800MPa、ビッカース硬度が約 180～230HV、圧縮強度が約 900～1000MPa で、耐摩耗性が良好です。延性と靱性がさらに向上し、伸びは約 6～10%、破壊靱性は約 $12 \sim 16 MPa \cdot m^{1/2}$ であり、銅相の可塑性により耐衝撃性が向上しています。耐高温性が良好で、650～700°C で安定して動作し、アーク浸食に強く、抵抗溶接に適しています。耐食性と耐酸化性に優れ、タングステン相が銅マトリックスを保護し、湿熱試験（85°C、湿度 85%）での酸化重量増加率は <1.0%（600°C、空気、100 時間）です。真空浸透法またはホットプレス焼結法で製造されたタングステン粒子は均一に分散しており（粒子径 2～6 μm ）、気孔率は 0.5%未満で、性能は安定しています。強化相（例えばグラフェン、約 0.5 重量%）を添加することで、熱伝導率と靱性を向上させることができ、例えば熱伝導率は約 260 W/m·K まで向上します。

用途: W75Cu25 は、エレクトロニクス、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野で広く使用されています。エレクトロニクス分野では、高い熱伝導性と適度な CTE により、5G 基地局の RF アンプやパワー半導体の放熱基板に理想的な選択肢となり、セラミック基板と組み合わせて効率的な放熱と信号安定性を確保します。オプトエレクトロニクス分野では、W75Cu25 は高出力 LED やレーザーのヒートシンクに使用され、熱管理を最適化し、オプトエレクトロニクスの効率を向上させます。たとえば、赤外線検出器のパッケージで高温動作（約 500°C）をサポートします。

新エネルギー分野では、W75Cu25 は電気自動車のインバータや太陽電池の薄膜バッテリーの熱管理に使用されます。耐腐食性と熱サイクル安定性（-50°C～600°C で 800 サイクルに耐えることができます）は、急速充電や屋外環境に適しています。さらに、W75Cu25 は放電加工や抵抗溶接電極として優れた性能を発揮し、高い硬度と耐アーク侵食性により長寿命を実現します。優れた加工性は複雑な形状加工にも対応し、カスタマイズされた電子パッケージ用ヒートシンクにも適しています。表面コーティング（Ni めっきなど）は、湿気や化学環境における耐腐食性を高めることができ、船舶レーダーや産業機器にも適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.5 W50Cu50 の性能と応用

性能: W50Cu50（タングステン 50 重量%、銅 50 重量%）は、銅の含有量が多いため、優れた熱伝導性と電気伝導性を備えていますが、熱膨張係数が比較的高いため、高出力の放熱や伝導用途に適しています。熱膨張係数は約 $12.0 \times 10^{-6}/K$ （25°C）で、純銅（ $16.5 \times 10^{-6}/K$ ）に近いです。セラミックや半導体との互換性はわずかに低くなりますが、熱膨張要件が高くないシナリオには適しています。熱伝導率は約 280~300 W/m·K で、連続銅マトリックス熱伝導ネットワークにより、純銅（401 W/m·K）に近いです。電気伝導率は約 40~50% IACS で、高伝導要件に近く、高周波回路に適しています。機械的性質は、引張強度が約 400~600 MPa、ビッカース硬度が約 100~150 HV、圧縮強度が約 700~800 MPa、耐摩耗性が中程度です。延性と靱性に優れ、伸びは約 15~20%、破壊靱性は約 $15 \sim 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ で、銅含有量が多いため塑性変形能力が向上しています。耐高温性はやや劣りますが、500~600°C で安定動作し、アークアブレーションに強く、EDM に適しています。耐食性と耐酸化性は弱く、銅相の露出が多いため、湿熱試験での酸化重量増加率は約 1.5%（500°C、空気、100 時間）です。粉末冶金法または溶融浸透法で製造され、気孔率は 0.5% 未満で、タングステン粒子は均一に分散しています（粒子径 2~6 μm）。表面コーティング（ニッケルメッキなど）または不活性雰囲気処理により、耐食性を向上させることができます。

用途: W50Cu50 は、高い熱伝導性と電気伝導性により、エレクトロニクスおよび新エネルギー分野で広く使用されています。エレクトロニクス分野では、5G 基地局やデータセンターの高い放熱要件を満たすために、高出力ダイオード、IGBT モジュール、RF アンプの放熱基板として使用されています。たとえば、パワーアンプの急速な熱伝導をサポートし、デバイスの寿命を延ばします。新エネルギー分野では、W50Cu50 は電気自動車インバーターや太陽光発電インバーターの熱管理に使用され、その高い導電性と加工性は急速充電システムに適しています。また、EDM および抵抗溶接電極にも使用されます。銅含有量が多いため、導電性と耐アーク侵食性が向上し、電極の寿命が延びます。W50Cu50 の優れた加工性は、複雑な形状の加工をサポートし、カスタマイズされた電子パッケージングヒートシンクに適しています。湿気や化学薬品を含む環境では、耐食性を高めるために表面コーティング（Cr めっきなど）が必要であり、産業機器や海洋機器の放熱に適しています。W50Cu50 は、高い導電性により信号伝送効率を確保するため、高周波回路のアンテナ基板やマイクロ波デバイスに広く使用されています。

3.1.6 異なるタングステン-銅組成比の性能比較

タングステン銅ヒートシンクの性能は、タングステン（W）と銅（Cu）の重量割合によって異なり、熱伝導率、熱膨張係数（CTE）、電気伝導性、機械的特性（強度、硬度、延性、靱性）、耐食性、耐高温性などに影響します。以下は、粉末冶金法または真空浸透法で製造され、タングステン粒子径が 2~6 μm、密度が 99.8% を超える一般的なグレードである W50Cu50、W60Cu40、W70Cu30、W75Cu25、W80Cu20、W85Cu15、W90Cu10 の性能比較です。**熱伝導率:** 銅含有量が増えると熱伝導率も増加します。これは銅相（401 W/m·K）が連続した熱ネット

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ワークを形成するためです。一方、タングステン（ $173 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）は熱伝導率が低くなります。W50Cu50 は熱伝導率が最も高く（ $280\sim 300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、純銅に近い、高出力電子機器の放熱に適しています。W90Cu10 は熱伝導率が最も低く（ $190\sim 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、放熱要件が低い場合に適しています。W60Cu40（ $260\sim 280 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、W70Cu30（ $250\sim 260 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、W75Cu25（ $230\sim 250 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、W80Cu20（ $220\sim 240 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、W85Cu15（ $200\sim 220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）の順に熱伝導率と熱整合のバランスが取れて減少します。

熱膨張係数（CTE）：タングステン含有量が増加すると CTE は減少します。これは、タングステン（ $4.5\times 10^{-6}/\text{K}$ ）が銅（ $16.5\times 10^{-6}/\text{K}$ ）の膨張を制限するためです。W90Cu10 は CTE が最も低く（ $6.0\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、ガリウムヒ素（ $5.7\times 10^{-6}/\text{K}$ ）に近い、オプトエレクトロニクスパッケージングに適しています。W50Cu50 は CTE が最も高く（ $12.0\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、セラミックとの整合性が悪くなっています。W85Cu15（ $6.5\sim 7.5\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、W80Cu20（ $7.0\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、W75Cu25（ $8.0\sim 8.5\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、W70Cu30（ $9.2\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、W60Cu40（ $10.0\times 10^{-6}/\text{K}$ ）は、異なる熱マッチング要件を満たすために順次増加します。

導電率：導電ネットワークの大部分を銅（100% IACS）が占めているため、銅含有量が増えるにつれて導電率は増加します。W50Cu50 は最も高く（ $40\sim 50\%$ IACS）、高導電率要件に近づきます。一方、W90Cu10 は最も低く（ $20\sim 25\%$ IACS）、W60Cu40（ $35\sim 45\%$ IACS）、W70Cu30（ $30\sim 40\%$ IACS）、W75Cu25（ $30\sim 40\%$ IACS）、W80Cu20（ $25\sim 35\%$ IACS）、W85Cu15（ $25\sim 30\%$ IACS）と、導電率は順に低下し、さまざまな電流伝送シナリオに適しています。

機械的性質：

- **強度**：タングステンは高強度（ $900\sim 1200 \text{ MPa}$ ）であるため、タングステン含有量の増加とともに引張強度も増加します。W90Cu10 が最も高く（ $800\sim 1000 \text{ MPa}$ ）、W50Cu50 が最も低く（ $400\sim 600 \text{ MPa}$ ）、W85Cu15（ $700\sim 900 \text{ MPa}$ ）、W80Cu20（ $700\sim 850 \text{ MPa}$ ）、W75Cu25（ $650\sim 800 \text{ MPa}$ ）、W70Cu30（ $600\sim 800 \text{ MPa}$ ）、W60Cu40（ $500\sim 700 \text{ MPa}$ ）の順に強度が低下します。
- **硬度**：タングステンは高硬度（ $300\sim 400 \text{ HV}$ ）であるため、タングステン含有量の増加に伴いビッカース硬度も増加します。W90Cu10 が最も高く（ $250\sim 300 \text{ HV}$ ）、W50Cu50 が最も低く（ $100\sim 150 \text{ HV}$ ）、W85Cu15（ $220\sim 270 \text{ HV}$ ）、W80Cu20（ $200\sim 250 \text{ HV}$ ）、W75Cu25（ $180\sim 230 \text{ HV}$ ）、W70Cu30（ $180\sim 220 \text{ HV}$ ）、W60Cu40（ $150\sim 200 \text{ HV}$ ）の順に硬度が低くなります。
- **延性**：銅の延性（ $40\sim 50\%$ ）により、銅含有量の増加とともに伸びが増加します。W50Cu50 が最も高く（ $15\sim 20\%$ ）、W90Cu10 が最も低く（ $2\sim 5\%$ ）、W60Cu40（ $10\sim 15\%$ ）、W70Cu30（ $8\sim 12\%$ ）、W75Cu25（ $6\sim 10\%$ ）、W80Cu20（ $5\sim 8\%$ ）、W85Cu15（ $4\sim 7\%$ ）の順に伸びは減少します。
- **韌性**：破壊韌性（ K_{IC} ）は銅含有量とともに増加します。W50Cu50 が最も高く（ $15\sim 20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）、W90Cu10 が最も低く（ $8\sim 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）になります。W60Cu40（ $12\sim 18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）、W70Cu30（ $12\sim 16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）、W75Cu25（ $12\sim 16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）、W80Cu20（ $10\sim 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）、W85Cu15（ $10\sim 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）の順に低くなります。

耐食性と耐酸化性：タングステン含有量の増加に伴い、耐食性が向上します。これは、タング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ステンは銅マトリックスを保護し、酸化物（Cu₂O など）を減少させるためです。W90Cu10 は最も強く、酸化重量増加率は 0.5%未満（600℃、空気、100 時間）です。W50Cu50 は最も弱く、約 1.5%です。W85Cu15(<0.7%)、W80Cu20(<0.8%)、W75Cu25(<1.0%)、W70Cu30(<1.2%)、W60Cu40(<1.3%)の順に低下します。表面コーティング（ニッケルメッキなど）により耐食性を向上させることができます。**耐熱性:** タングステン含有量の増加に伴い、耐熱性が向上します。W90Cu10 は 800℃でも安定して動作しますが、W50Cu50 は 500~600℃が限界です。W85Cu15 と W80Cu20、W75Cu25 と W70Cu30（650~700℃）、W60Cu40（600~650℃）は、順に耐熱性が低下します。

応用シナリオ: W50Cu50 と W60Cu40 は、高い熱伝導性と電気伝導性を備え、電子機器の放熱に適しています（5G 基地局、電気自動車インバータなど）。W70Cu30 と W75Cu25 は、熱特性と機械特性のバランスが取れており、オプトエレクトロニクスと新エネルギーに適しています。W80Cu20、W85Cu15、W90Cu10 は、CTE が低く強度の高い用途（航空宇宙、オプトエレクトロニクスパッケージなど）に適しています。

3.2 タングステン銅ヒートシンクの製造工程による分類

タングステン銅ヒートシンクの製造プロセスは、主に粉末冶金、真空含浸、ホットプレス焼結、積層造形から構成されます。各プロセスは微細構造、密度、性能に影響を与えます。粉末冶金と真空含浸は主流のプロセスであり、ホットプレス焼結は密度を最適化し、積層造形は複雑な形状に適しています。以下は、粉末冶金によるタングステン銅ヒートシンクの製造方法の詳細な分析です。

3.2.1 粉末冶金法によるタングステン銅ヒートシンクの製造

プロセスの説明: 粉末冶金法は、高純度タングステン粉末（>99.95%、粒径 2~ 6μm ）と銅粉末（>99.99%、粒径 10~ 50μm ）を混合し、加圧成形（圧力 200~400MPa）した後、高温（1350~1400℃）で焼結することで、緻密なタングステン銅ヒートシンクを形成します。焼結は、銅の酸化を防ぐため、通常、水素または真空雰囲気中で行われます。本プロセスは、以下のステップで構成されています。

粉末混合: ボールミルまたはボルテックス混合を使用してタングステン銅粉末を均一に分散させ、流動性を向上させるために微量添加剤（パラフィンなど）を追加します。**プレス:** 油圧プレスを使用して、混合粉末をシート状（厚さ 0.5~5mm）または棒状の成形体にプレスします。**焼結:** 焼結は真空炉または水素炉で、銅の融点（1083℃）に近い温度で行われます。タングステン粒子が骨格を形成し、銅の液相が細孔を満たします。焼結時間は 1~2 時間で、冷却速度はクラックの発生を防ぐために制御されます。**後処理:** 機械加工（旋削、フライス加工など）、表面研磨、必要に応じて耐食性を高めるためのニッケルまたはクロムメッキなど。

機能と利点:

- **高密度:** 理論密度最大 99.8%、気孔率 0.5%未満、熱抵抗と機械的欠陥を低減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

例えば、W70Cu30 の熱伝導率は約 250~260 W/ m ·K 、引張強度は 600~800 MPa です。

- **均一な性能:** タングステン粒子が均一に分散 (2~ 6 μ m) されているため、安定した熱伝導率、熱膨張係数 (CTE)、および機械特性が得られます。例えば、W80Cu20 の CTE は約 $7.0 \times 10^{-6}/K$ で、オプトエレクトロニクスパッケージングに適しています。
- **柔軟性:** 粉末比率を調整することで特性を正確に制御し、さまざまなグレード (W50Cu50 ~ W90Cu10) が用意されています。
- **コスト効率:** 大量生産、成熟した設備、制御可能なプロセスに適しています。

制限事項:

- **高温要件:** 焼結温度は高く (1350~1400°C)、エネルギー消費量が大きく、銅の揮発を避けるために正確な温度制御が必要です。
- **界面接合:** タングステンと銅は混和せず、界面は機械的な接合に依存するため、耐熱性と強度には若干の制限があります。微量のニッケル (0.5 重量%) を添加すると接合性が向上しますが、過剰に添加すると導電性が低下します。
- **形状の制限:** プレス成形は単純な幾何学的形状に適していますが、複雑な構造には後続の加工が必要です。

性能への影響: 粉末冶金法で製造されたタングステン銅ヒートシンクの微細構造は緻密で、タングステン粒子が強固な骨格を形成し、銅マトリックスが気孔を埋めることで、高い熱伝導率と強度を確保しています。例えば、W60Cu40 の熱伝導率は約 35~45% IACS で、5G 基地局に適しています。W85Cu15 の硬度は 220~270HV で、耐摩耗性が強く、航空宇宙用途に適しています。プロセスパラメータ (焼結温度や圧力など) を最適化する必要があります、高温・長時間焼結により気孔率を低減し、性能を向上させることができます。

用途: 粉末冶金法で製造されるタングステン銅ヒートシンクは、その独自の利点により、多くの最先端分野で重要な位置を占めています。エレクトロニクス分野では、高出力ダイオードは動作時に大量の熱を発生します。放熱基板として、W50Cu50 タングステン銅ヒートシンクは優れた熱伝導性と適度な強度を備えており、熱を素早く放散し、ダイオードの過熱による性能低下や損傷を防ぎます。オプトエレクトロニクス分野では、動作中のレーザーの放熱要件が非常に高くなっています。W80Cu20 タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導性と機械特性により、レーザーから発生する熱を素早く取り除き、安定した動作を確保し、レーザー出力の品質と効率を向上させます。

3.2.2 浸透法によるタングステン銅ヒートシンクの製造

プロセスの説明: 浸透法 (溶融浸透法とも呼ばれる) は、タングステン銅ヒートシンクを製造するための主流のプロセスの一つです。このプロセスでは、溶融銅を多孔質のタングステン骨格に浸透させることで、緻密なタングステン銅複合材料を形成します。特に、銅含有量の高い

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

グレード（W50Cu50、W60Cu40 など）に適しています。このプロセスは、以下のステップで構成されます。

1. **骨格の製造:** 高純度タングステン粉末を成形し、その後、水素または真空雰囲気中で予備焼結（1000～1200℃）して、銅の浸透に対応するために 20～50%に制御された多孔性タングステン骨格を形成します。
2. **銅の浸透:** タングステン骨格の表面に固体銅塊（>99.99%）または銅粉末を置き、真空炉または水素炉で銅の融点（1100～1400℃）以上に加熱します。溶融銅は毛細管現象によってタングステン骨格の細孔に浸透し、充填率は 99.8%以上に達します。
3. **冷却と後処理:** 熱応力割れを防止するため、冷却速度（5～10℃/分）を制御し、その後、機械加工（旋削、フライス加工など）、研磨、めっき（ニッケルめっきなど）を施して耐食性を高めます。銅の酸化を防ぐため、全工程は真空または不活性雰囲気（アルゴンなど）で行います。

機能と利点:

- **高密度:** 浸透法は理論密度 99.8%以上、気孔率 0.5%未満を実現し、熱抵抗と機械的欠陥を低減します。例えば、W70Cu30 の熱伝導率は約 250～260W/ m ·K 、引張強度は 600～800MPa です。
- **優れた熱伝導性と電気伝導性:** 銅含有量の高いグレード(W50Cu50 など)は、浸透法によって連続した銅ネットワークを形成し、熱伝導率は 280～300 W/ m ·K 、電気伝導率は 40～50% IACS で、高周波回路の放熱に適しています。
- **柔軟性:** 銅の含有量を正確に制御して、W50Cu50 から W85Cu15 などのグレードに適応させ、さまざまな熱膨張係数と熱伝導率の要件を満たすことができます。
- **インターフェース結合:** 溶融銅がタングステン骨格の細孔を満たし、緊密な機械的フィットを形成してインターフェース強度を高め、熱抵抗と亀裂のリスクを軽減します。

制限事項:

- **プロセスの複雑さ:** 焼結前の気孔率と浸透温度を正確に制御する必要があります。温度が高すぎると銅の揮発が起こり、温度が低すぎると浸透が不十分になる可能性があります。
- **高タングステン含有量の制限:** W90Cu10 などの高タングステングレードは多孔性が低く浸透しにくいいため、より高い温度 (>1400℃) または圧力が必要となり、エネルギー消費量が増加します。
- **コストが高い:** 真空炉や不活性雰囲気装置は高価で、高性能アプリケーションには適していますが、低コストの大量生産には適していません。

性能への影響: 浸透法で製造されたタングステン銅ヒートシンクは均一な微細構造を持ち、タングステン粒子（2～ 6μm ）が剛性骨格を形成し、銅マトリックスが細孔を埋めることで、高い熱伝導性と電気伝導性を確保しています。例えば、W60Cu40 の導電率は約 35～45% IACS、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱膨張係数は約 $10 \times 10^{-6}/K$ で、5G 基地局に適しています。優れた耐腐食性と耐高温性を備えています。W80Cu20 の 600°C 空気中での酸化重量増加率は $<0.8\%$ で、光電子パッケージングに適しています。プロセスの最適化（浸透時間の延長など）により、多孔性をさらに低減し、性能を向上させることができます。

用途: 浸透法で製造されたタングステン銅ヒートシンクは、エレクトロニクス、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野で広く使用されています。W50Cu50 は高出力ダイオードや IGBT モジュールのヒートシンクに、W70Cu30 はレーザーヒートシンクに、W80Cu20 は航空宇宙用熱管理部品に使用されています。高い熱伝導性と加工性により、複雑な形状のカスタマイズが可能で、表面コーティングにより耐腐食性が向上し、海洋環境にも適しています。

ホットプレス焼結、プラズマ噴霧など）

ホットプレス焼結やプラズマ噴霧などの新しい製造プロセスにより、タングステン銅ヒートシンクの製造において、より高性能で複雑な形状が可能になり、従来の粉末冶金法や浸透法の限界を補い、高精度でカスタマイズされたアプリケーションに適しています。

ホットプレス焼結:

- **プロセスの説明:** ホットプレス焼結は、タングステンと銅の混合粉末（タングステン $>99.95\%$ 、銅 $>99.99\%$ 、粒径 $2 \sim 50 \mu m$ ）を高温（ $1200 \sim 1400^\circ C$ ）と高圧（ $30 \sim 50 MPa$ ）で同時に焼結することにより、緻密な複合材料を形成します。プロセス手順は以下のとおりです。
 1. **粉末混合:** ボールミルまたはボルテックス混合によりタングステン銅粉末が均一に分散されるようにします。
 2. **ホットプレス:** 粉末を真空または水素雰囲気下で金型に入れ、高温高圧を加え、 $30 \sim 60$ 分間焼結し、ひび割れを防ぐために冷却速度を制御します。
 3. **後処理:** 表面要件を満たすための機械加工、研磨、またはメッキ。
- **機能と利点:**
 - **極めて高い密度:** 理論密度の最大 99.9% 、気孔率 $<0.3\%$ で、熱伝導率と強度が大幅に向上します。例えば、W75Cu25 の熱伝導率は約 $260 W/m \cdot K$ 、引張強度は約 $700 MPa$ です。
 - **強化されたインターフェース結合:** 高圧によりタングステンと銅のインターフェースの緊密な結合が促進され、熱抵抗が低減し、靱性が向上します（W70Cu30 の破壊靱性は約 $14 MPa \cdot m^{1/2}$ ）。
 - **高タングステングレードに適しています:** W90Cu10 を効果的に準備し、浸透法による細孔充填の難しさを克服できます。
 - **安定した性能:** 均一な微細構造、最適化されたタングステン粒子分布、CTE と熱伝導率の高い一貫性。
- **制限事項:**
 - **設備コストが高い:** 高温・高圧の設備が必要となり、粉末冶金に比べて生産コ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ストが高くなります。

- **形状の制限:** 単純な幾何学的形状に適していますが、複雑な構造には後続の処理が必要です。
- **性能への影響:** ホットプレス焼結により、密度と界面強度が大幅に向上します。W80Cu20 の熱伝導率は約 $230 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、熱膨張係数は約 $7.0 \times 10^{-6} / \text{K}$ であり、オプトエレクトロニクスおよび航空宇宙用途に適しています。耐食性も向上し、酸化重量増加率は 0.7%未満（600°C、空気、100 時間）です。
- **用途:** 高出力レーザーヒートシンク（W80Cu20 など）、航空宇宙熱管理（W85Cu15 など）、5G 基地局放熱基板（W70Cu30 など）に使用されます。

プラズマ溶射:

- **プロセスの説明:** プラズマ溶射は、高温プラズマ炎（10,000°C以上）を用いてタングステンと銅の混合粉末（またはタングステンと銅の粉末）を熔融し、基板に噴射してタングステンと銅のヒートシンクコーティングまたはシートを形成します。プロセス手順は以下のとおりです。
 1. **粉末の製造:** タングステン銅粉末（粒径 10～50 μm ）を層状に混合または噴霧します。
 2. **スプレー:** スプレーは、アルゴンまたは窒素雰囲気中でプラズマガンを使用して行われ、接着性を高めるために基材は 200～300°C に予熱されます。
 3. **後処理:** 応力を除去するためのアニーリング（800～1000°C）、表面品質を向上させるための研磨またはコーティング。
- **機能と利点:**
 - **複雑な形状:** 複雑な幾何学的形状のヒートシンクを直接スプレーして、カスタマイズされたニーズを満たすことができます。
 - **薄層作製:** 厚さを制御可能（0.1～2 mm）、電子パッケージングの薄膜ヒートシンクに適しています。
 - **ラピッドプロトタイプング:** スプレー速度が速く、小ロットや高精度の生産に適しています。
- **制限事項:**
 - **低密度:** スプレーコーティングは多孔性が高く（1～5%）、浸透法よりも熱伝導率がわずかに低くなります（例: W60Cu40 は約 $240 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）。
 - **界面結合が弱い:** 溶射層間の結合力は限られており、靱性および強度は若干劣ります（W70Cu30 の引張強度は約 500～600MPa）。
 - **コストが高い:** プラズマ装置と粉末は高価であり、ハイエンドの用途に適しています。
- **性能への影響:** プラズマ溶射法で作製したヒートシンクの熱伝導率は若干低い（W50Cu50 は約 $260\sim 280 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）ものの、熱膨張係数は安定しています。耐腐食性はコーティングによって向上させる必要があり、短時間の高温曝露に適しています。
- **用途:** マイクロ波装置のヒートシンク（W60Cu40 など）、航空宇宙用薄壁熱管理部品（W80Cu20 など）、医療機器の放熱（W70Cu30 など）に使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

その他の新技術:

- **積層造形（3D プリンティング）**：電子ビーム溶融法（EBM）または選択的レーザー溶融法（SLM）によるタングステン銅ヒートシンクの印刷は、複雑な構造に適しています。例えば、W70Cu30 の熱伝導率は約 250 W/m·K で、航空宇宙用のカスタムヒートシンクに使用されています。
- **低温焼結**：焼結助剤（Ni、0.5 重量%など）を添加することで焼結温度を 1200°C未満に下げることができ、省エネ・環境に優しい。W50Cu50 に適しており、熱伝導率は約 270 W/m·K である。

3.3 タングステン銅ヒートシンクの用途分野別分類

タングステン銅ヒートシンクは、応用分野に応じて、電子実装、航空宇宙、産業用熱管理、オプトエレクトロニクス、新エネルギーなどの分野に分類されます。各用途には、熱伝導率、熱膨張係数（CTE）、電気伝導性、機械的特性、耐食性など、それぞれ固有の要件があります。タングステン（W）と銅（Cu）の比率（W50Cu50～W90Cu10 など）と製造プロセス（粉末冶金法、浸透法など）を調整することで、タングステン銅ヒートシンクは多様なニーズに対応します。以下では、電子実装、航空宇宙、産業用熱管理分野におけるタングステン銅ヒートシンクの特性、性能、および用途を分析します。

3.3.1 電子パッケージ用タングステン銅ヒートシンク

電子パッケージング用のタングステン銅ヒートシンクには、高い熱伝導率（> 200 W/m·K）、セラミック（窒化アルミニウムなど、CTE 約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ ）または半導体（シリコンなど、CTE 約 $2.6 \times 10^{-6}/K$ ）に適合する適度な熱膨張係数（ $6-10 \times 10^{-6}/K$ ）、高い伝導率（> 30% IACS）、優れた加工性、熱サイクル（-50°C ～ 200°C）および湿気腐食（85°C、湿度 85%）に対する耐久性が必要です。W50Cu50（熱伝導率 280～300 W/m·K、CTE $12 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 40～50% IACS、引張強度 400～600 MPa、伸び 15～20%）は、高放熱に適していますが、セラミックに適合するバッファ層が必要です。W60Cu40（熱伝導率 260～280 W/m·K、CTE $10 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 35～45% IACS、引張強度 500～700 MPa、伸び 10～15%）は、熱伝導率と熱マッチングのバランスが取れています。W70Cu30（熱伝導率 250～260 W/m·K、CTE $9.2 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 30～40% IACS、引張強度 600～800 MPa、伸び 8～12%）、セラミックとの整合性が良好で、高信頼性パッケージングに適しています。

浸透または粉末冶金で製造されます。浸透法は、W50Cu50 と W60Cu40 に適しています。ホットプレスと焼結により、W70Cu30 の密度が向上します（> 99.9%）。表面のニッケルまたはクロムメッキは耐食性を高め、研磨により平坦性を確保します。これらのヒートシンクは、5G 基地局 RF アンプ、IGBT モジュール、マイクロ波集積回路、データセンター CPU 放熱基板に使用されます。たとえば、W60Cu40 は高周波信号伝送をサポートし、1,000 回の熱サイクルに耐えることができます。W50Cu50 はパワー半導体に使用され、デバイス寿命を延ばしま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。W70Cu30 はマイクロ波デバイスの熱ストレスを軽減し、効率的な放熱と信号安定性のニーズを満たします。

3.3.2 航空宇宙用途向けタングステン銅ヒートシンク

航空宇宙用途のタングステン銅ヒートシンクには、セラミックや半導体（ガリウムヒ素など、CTE は約 $5.7 \times 10^{-6}/K$ ）と同等の低熱膨張係数（ $6 \sim 8 \times 10^{-6}/K$ ）、高強度（引張強度 $> 700 \text{ MPa}$ ）、そして振動、高温、真空環境に耐えられる高温耐性（ $> 600^\circ\text{C}$ ）が求められます。熱伝導率（ $> 190 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）は二次的な要素であり、耐腐食性には耐酸化性重量増加率 $< 0.8\%$ （ 600°C 、空気、100 時間）が求められます。W80Cu20（熱伝導率 $220 \sim 240 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $7.0 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 $25 \sim 35\%$ IACS、引張強度 $700 \sim 850 \text{ MPa}$ 、硬度 $200 \sim 250 \text{ HV}$ ）、W85Cu15（熱伝導率 $200 \sim 220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $6.5 \sim 7.5 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 $25 \sim 30\%$ IACS、引張強度 $700 \sim 900 \text{ MPa}$ 、硬度 $210 \sim 270 \text{ HV}$ ）、W90Cu10（熱伝導率 $180 \sim 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $6.0 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 $20 \sim 25\%$ IACS、引張強度 $400 \sim 800 \text{ MPa}$ 、硬度 $210 \sim 250 \text{ HV}$ ）のタングステン合金は、低い熱膨張係数と高温耐性により、このような用途に適しています。W90Cu10 はホットプレス焼結により密度（ $> 99.2\%$ ）が向上し、W80Cu20 は溶浸法を採用し、真空焼結により酸化を抑制します。表面 Cr めっきにより耐食性が向上し、プラズマ球状化タングステン粉末（粒径 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ ）により微細構造が最適化されます。衛星用電源モジュール（W90Cu10 は 800°C および真空耐性）、ミサイルシーカー用赤外線検出器（W85Cu15 はガリウムヒ素に匹敵し、高温耐性を有する）、ジェットエンジン用熱管理（W80Cu20 は $600 \sim 800^\circ\text{C}$ 耐性）、船舶搭載レーダー（W80Cu20 はクロムめっき後、500 時間の塩水噴霧耐性を有する）などに使用され、熱安定性と信頼性を確保しています。微量のグラフェン（0.5 重量%）を添加することで、靱性と熱伝導性を向上させることができます。

3.3.3 産業用熱管理用タングステン銅ヒートシンク

産業用熱管理用タングステン銅ヒートシンクは、主に放電加工（EDM）電極、抵抗溶接電極、産業機器の放熱に使用されます。これらのヒートシンクには、高い熱伝導率（ $> 220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、中程度の電気伝導率（ $> 25\%$ IACS）、高い硬度（ $> 150 \text{ HV}$ ）、アーク腐食、摩耗、化学腐食（酸性クーラントなど）に対する耐性、そして耐酸化性（重量増加率 $< 1.2\%$ 、 500°C 、空气中、1000 時間）が求められます。W60Cu40（熱伝導率 $260 \sim 290 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $10 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 $30\% \sim 45\%$ IACS、引張強度 $350 \sim 500 \text{ MPa}$ 、硬度 $120 \sim 170 \text{ HV}$ 、伸び $10 \sim 15\%$ ）、W70Cu30（熱伝導率 $250 \sim 260 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $9.0 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 $30 \sim 40\%$ IACS、引張強度 $400 \sim 600 \text{ MPa}$ 、硬度 $120 \sim 180 \text{ HV}$ 、耐摩耗性に優れている）、W75Cu25（熱伝導率 $230 \sim 260 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $8.0 \sim 9.0 \times 10^{-6}/K$ 、電気伝導率 $30 \sim 40\%$ IACS、引張強度 $380 \sim 580 \text{ MPa}$ 、硬度 $150 \sim 200 \text{ HV}$ 、バランスの取れた性能）は、優れた熱伝導性と加工性を備えているため、一般的に使用されています。

W60Cu40 は溶浸法で生産され、W70Cu30 と W75Cu25 は粉末冶金とホットプレス焼結で使われます。表面には耐化学腐食性のために Ni または Cr メッキが施され、研磨により耐摩耗性が向上し、低温焼結（Ni 添加剤の添加）により省エネになります。EDM 電極（W70Cu30 はア

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ーク腐食に強く、長寿命）、抵抗溶接電極（W60Cu40 の熱伝導率が高いため、蓄熱が低減）、射出成形機およびダイカストマシンのヒートシンク（W75Cu25 は 500℃の耐化学腐食性）、風力発電コンバータの放熱基板（W60Cu40 は 1000 時間の湿熱耐性）などに使用されています。高い熱伝導性と硬度により、効率的な熱管理と耐久性がサポートされ、加工性により複雑な形状のニーズを満たします。

3.3.4 レーザー用タングステン銅ヒートシンク

レーザー用タングステン銅ヒートシンクは、高出力レーザー（固体レーザー、半導体レーザー、ファイバーレーザーなど）の熱管理に使用されます。急速な熱放散のためには高い熱伝導率（ $>200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、レーザー結晶や半導体材料（ガリウムヒ素、CTE 約 $5.7\times 10^{-6}/\text{K}$ 、シリコン、CTE 約 $2.6\times 10^{-6}/\text{K}$ など）に適合する低い熱膨張係数（ $5\sim 8\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、高い強度（引張強度 $>600 \text{ MPa}$ ）、高温耐性（ $>500^\circ\text{C}$ ）が求められます。優れた表面平坦性（ $<5 \mu\text{m}$ ）と耐腐食性（酸化重量増加 $<1\%$ 、 600°C 、空気、100 時間）により、安定した光学性能が保証されます。高タングステン含有量グレード（W80Cu20、W85Cu15 など）は、CTE が低く熱安定性に優れているため、広く使用されています。微細構造は緻密（理論密度の 99.8%以上）で、タングステン粒子は均一（ $2\sim 4 \mu\text{m}$ ）である必要があります。

W70Cu30 は、バランスの取れた熱伝導率と熱整合のため、中出力レーザーにも使用されます。W80Cu20（熱伝導率 $220\sim 240 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $7.0\times 10^{-6}/\text{K}$ 、電気伝導率 $25\sim 35\%$ IACS、引張強度 $700\sim 850 \text{ MPa}$ 、硬度 $200\sim 250 \text{ HV}$ ）は GaAs と一致し、熱サイクル（ $-40^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$ ）に耐性があります。W85Cu15（熱伝導率 $200\sim 220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $6.5\sim 7.5\times 10^{-6}/\text{K}$ 、電気伝導率 $25\sim 30\%$ IACS、引張強度 $700\sim 900 \text{ MPa}$ 、硬度 $220\sim 270 \text{ HV}$ ）は高精度レーザーに適しています。W70Cu30（熱伝導率 $250\sim 260 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $9.2\times 10^{-6}/\text{K}$ 、電気伝導率 $30\sim 40\%$ IACS、引張強度 $600\sim 800 \text{ MPa}$ 、硬度 $180\sim 220 \text{ HV}$ ）は、中出力アプリケーションをサポートします。ホットプレス焼結または浸透法が用いられます。ホットプレス焼結は W85Cu15 の密度（ $>99.9\%$ ）を向上させ、浸透法は W70Cu30 に適しています。表面はニッケルメッキまたは研磨されており、光学的適合性を確保しています。高出力レーザー（防衛レーザー兵器など、W80Cu20 放熱基板は 500°C に耐えます）、光通信レーザー（W70Cu30 は 5G 光モジュールをサポートします）、産業用切断レーザー（W85Cu15 は結晶とマッチングして寿命を延ばすなど）に使用されています。CTE が低く、熱伝導率が高いため、熱変形が少なく、ビーム品質が保証されます。微量グラフェン（0.5 重量%）は熱伝導率を向上させることができます。

3.3.5 その他の特殊用途のタングステン銅ヒートシンク

タングステン銅ヒートシンクは、高熱伝導率（ $>220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、耐腐食性（抗酸化重量増加率 $<1.5\%$ 、 500°C 、空気、100 時間）、耐放射線性、高加工性など、環境に応じてカスタマイズされた性能が求められる、新エネルギー、医療、原子力産業などの特殊分野で独自の用途を持っています。W60Cu40（熱伝導率 $260\sim 280 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $10\times 10^{-6}/\text{K}$ 、電気伝導率 $35\sim 45\%$ IACS、引張強度 $500\sim 700 \text{ MPa}$ 、硬度 $150\sim 200 \text{ HV}$ ）は、新エネルギーの放熱に使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W70Cu30（熱伝導率 250～260 W/m·K、CTE 9.2×10^{-6} /K、電気伝導率 30～40% IACS、引張強度 600～800 MPa、硬度 180～220 HV）は医療機器に適しています。W90Cu10（熱伝導率 190～200 W/m·K、CTE 6.0×10^{-6} /K、電気伝導率 20～25% IACS、引張強度 800～1000 MPa、硬度 250～300 HV）は、原子力産業で使用されています。

W60Cu40 は浸透法で製造され、W90Cu10 はホットプレスと焼結によって製造され、表面には耐腐食性を高めるために Cr または Ni メッキが施され、プラズマ溶射によって複雑な形状にも対応しています。電気自動車インバータ（W60Cu40 放熱基板、耐湿耐熱 1000 時間、急速充電）、太陽光発電インバータ（W70Cu30 ヒートシンク、屋外腐食耐性）、医療用 CT 装置の放熱（W70Cu30、耐熱 500°C、良好な加工性）、核融合炉の熱管理などに使用されています。中でも、医療用 CT 装置の放熱ソリューションは、タングステン銅材料の加工上の利点と生体適合性の要件をさらに融合させています。金属射出成形（MIM）技術で製造された W70Cu30 放熱部品は、0.3mm の超薄壁構造と複雑な流路の一体成形を実現し、電気化学堆積法で表面に堆積されたハイドロキシアパタイトコーティングは、500°C の動作環境下での CT チューブの放熱要件を満たすだけでなく、重金属イオンの漏洩リスクも回避できます。



CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第4章：タングステン銅ヒートシンクの製造プロセス

4.1 タングステン銅ヒートシンクの従来の製造プロセス

タングステン銅ヒートシンクの伝統的な製造プロセスは、主に粉末冶金法と浸透法であり、成熟した技術と高い適用性により、工業生産において広く利用されています。これらの方法は、タングステンと銅の比率と微細構造を調整することで、電子実装、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、産業用熱管理などのニーズを満たすヒートシンクを製造し、様々な成分比率のグレードをカバーしています。粉末冶金法は柔軟性と経済性から様々な比率に適していますが、浸透法は銅含有量の高い材料に適しています。以下では、粉末冶金法の原理、プロセス、主要なステップについて詳しく分析します。

4.1.1 粉末冶金（原理、プロセス、主要手順）

粉末冶金法は、高純度タングステン粉末と銅粉末を混合し、加圧成形後、高温で焼結することでタングステン銅ヒートシンクを製造します。その原理は、タングステンの高融点と銅の低融点を利用することです。焼結過程で銅相が熔融し、タングステン粒子間の隙間を埋めることで、タングステン骨格と銅マトリックスの複合構造を形成します。タングステンと銅は相溶性がなく、界面は機械的な結合に依存し、微細構造は熱伝導率、熱膨張係数、機械的特性に影響を与えます。この方法は様々な成分比に適用でき、プロセスパラメータの最適化により、性能の一貫性と構造密度を確保します。

プロセス：粉末冶金法は、以下の手順で製造されます。高純度タングステン粉末と電解銅粉末を選定し、目標比率に合わせて秤量し、ボールミルまたはボルテックスミキサーで十分に混合します。微量添加剤（パラフィンなど）を添加して流動性を高め、粉末の偏析を防ぎます。混合粉末を金型に充填し、油圧プレスで冷間プレスして板状または棒状のブランクを成形します。プレス工程では、ブランクの強度を維持するために均一性を確保する必要があります。ブランクを真空炉または水素炉に入れ、銅の融点に近い温度で一定時間保温することで、銅相を熔融させ、タングステン粒子の細孔を埋めます。熱応力割れを防ぐため、冷却速度を制御する必要があります。焼結後、旋削加工、フライス加工などの機械加工と表面研磨を行い、熱接触性能を向上させます。必要に応じて、耐食性と耐酸化性を高めるために、ニッケルまたはクロムコーティングを施します。

重要なステップ：粉末冶金の成功は、以下の重要なステップにかかっています。粉末混合の均一性を確保すること。タングステンと銅の密度差が大きいため、ボールミルまたはボルテックス混合時間を最適化して偏析を防ぎ、タングステン粒子の均一な分布を確保する必要があります。ブランクの強度を確保するために、プレス圧力を適度に制御してブランクの緩みや金型の損傷を防ぎ、焼結温度を銅の融点より高く、タングステンの融点よりはるかに低く調整し、真空または水素雰囲気を使用して銅の酸化を防ぎ、焼結時間を最適化して気孔率を低減します。微量添加剤は焼結を促進できますが、性能を維持するために量を制御する必要があります。後処理では、設計サイズに合わせて高精度の機械加工、表面品質の向上のための研磨、耐食性を高めるためのコーティングの均一化が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

用途: 粉末冶金法で製造されるタングステン銅ヒートシンクは、電子パッケージング（パワー半導体の放熱など）、オプトエレクトロニクスの熱管理（レーザーヒートシンクなど）、航空宇宙（衛星の熱管理など）、産業用電極（放電加工など）などに使用されています。その経済性とプロセス安定性は大量生産に適しています。

4.1.2 浸透法（プロセスと長所と短所の分析）

浸透法（ペネトレーションとも呼ばれる）は、タングステン銅ヒートシンクを製造するための従来のプロセスの一つで、溶融銅を多孔質タングステン骨格に浸透させて複合材料を形成します。特に銅含有量の多いグレード（W50Cu50、W60Cu40 など）に適しています。その原理は、タングステンの高融点と銅の低融点に基づいています。毛細管現象を利用して、タングステン骨格の細孔に溶融銅を充填し、タングステン骨格と銅マトリックスの緻密な構造を形成します。界面は機械的に連動しており、微細構造は熱伝導率、熱膨張係数、機械的特性に影響を与えます。

プロセス: 浸透法には、高純度タングステン粉末を選択し、目標比率に従って調製し、成形にプレスし、真空または水素雰囲気中で予備焼結して、適度な多孔度を持つ多孔質タングステン骨格を形成する以下のステップが含まれます。タングステン骨格の表面に固体の銅ブロックまたは銅粉末を置き、真空炉または水素炉で銅の融点以上に加熱すると、溶融銅が毛細管現象によって骨格の細孔に浸透し、細孔を満たして高密度材料を形成します。冷却速度を制御して熱応力亀裂を回避します。後処理には、機械加工（旋削、フライス加工など）、熱接触性能を向上させるための表面研磨、必要に応じてニッケルまたはクロムコーティングを施して耐腐食性と耐酸化性を高めることが含まれます。

長所と短所の分析:

- **利点:** 溶融浸透法は、十分な銅相充填、優れた熱伝導率と電気伝導率を備えた高密度タングステン銅ヒートシンクを形成でき、高銅含有量グレードに適しています。このプロセスは銅含有量を正確に制御し、さまざまな成分比率に柔軟に適応できます。タングステン骨格と銅マトリックスの機械的な連結により、インターフェースの結合が強化され、熱抵抗が低減されるため、電子および光電子放熱アプリケーションに適しています。
- **デメリット:** プロセスが複雑で、タングステン骨格の多孔度と浸透温度の精密な制御が必要となるため、操作が困難です。高タングステン含有量グレードは多孔度が低く浸透が困難であるため、高温または高圧が必要となり、エネルギー消費が増加します。また、設備要件（真空炉など）が高く、生産コストも高いため、低コストの大量生産には適していません。冷却過程で微小な亀裂が発生する可能性があり、性能の安定性に影響を与えます。

用途: 溶融浸透法で製造されるタングステン銅ヒートシンクは、電子パッケージング（IGBTモジュール用 W50Cu50 など）、オプトエレクトロニクス熱管理（レーザー用 W70Cu30 など）、新エネルギー放熱（電気自動車インバータ用 W60Cu40 など）に広く使用されています。高い

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱伝導性と加工性により、複雑な形状のカスタマイズにも対応できます。

4.1.3 高温液相焼結の技術的ポイント

高温液相焼結は、タングステン銅ヒートシンクを製造する伝統的なプロセスです。高温で銅相を熔融し、タングステン粒子間の隙間を埋めて複合材料を形成します。様々な成分比に適しています。その原理は、焼結過程において銅液相がタングステン粒子を濡らし、緻密化を促進し、タングステン骨格と銅マトリックスの構造を形成するという事実に基づいています。界面は機械的に連結されており、微細構造が性能を決定します。

技術的なポイント：高温液相焼結の成功は、以下の点にかかっています。高純度のタングステン粉末と銅粉末を選択し、目標の割合で混合し、ボールミルまたはボルテックスミキシングを使用して均一性を確保し、微量添加剤（パラフィンなど）を加えて流動性を高めます。緩みやひび割れを防ぐために、十分な強度を持つグリーンボディを形成するには、適度な圧力でプレスする必要があります。焼結温度は、銅の融点よりも高く、タングステンの融点よりもはるかに低くする必要があります。銅の酸化を防ぐために真空または水素雰囲気を使用し、保持時間を最適化して、銅の液相が細孔を完全に満たし、多孔性を低減することを保証します。熱応力を避けるために冷却速度を制御する必要があります。微量添加剤（ニッケルなど）は液相焼結を促進できますが、高抵抗相の形成を避けるために量を制御する必要があります。後加工には高精度の機械加工と研磨が必要であり、耐食性を高めるためにコーティング（ニッケルやクロムなど）の均一性が求められます。焼結工程では、銅の揮発やタングステン粒子の過度の成長を防ぎ、微細構造の均一性と性能安定性を確保するために、雰囲気と温度を監視する必要があります。

用途：高温液相焼結法で製造されるタングステン銅ヒートシンクは、電子パッケージング（5G 基地局用 W60Cu40 など）、航空宇宙（衛星熱管理用 W80Cu20 など）、産業用電極（放電加工用 W70Cu30 など）に使用されています。このプロセスは高性能ヒートシンクの製造に適していますが、コストと性能のバランスをとるためにパラメータを最適化する必要があります。

4.2 タングステン銅ヒートシンクの最新の革新技術

エレクトロニクス、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野におけるタングステン銅ヒートシンクへの性能要件が高まるにつれ、従来の製造プロセス（粉末冶金や浸透など）では、高密度、複雑な形状、性能最適化の面で徐々に限界が見えてきました。熱間静水圧プレス、放電プラズマ焼結、3D プリント技術などの現代の革新的なプロセスは、微細構造の改善、高密度化、複雑な形状の実現により、タングステン銅ヒートシンクの製造に高い性能と柔軟性をもたらします。これらのプロセスは、W50Cu50 から W90Cu10 など、さまざまな組成比のグレードに適しており、高精度とカスタマイズの要件を満たします。以下は、熱間静水圧プレス、放電プラズマ焼結技術、およびその他の新興プロセスの特徴と利点の詳細な分析です。

4.2.1 熱間等方圧プレスの原理と利点

熱間等方圧加圧（HIP）は、全方向等方圧環境下で高温高圧下でタングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

を製造する最新のプロセスです。原理は、密閉容器にタングステン粉末と銅粉末の混合物、または焼結前のブランクを入れ、高温（銅の融点に近い）で等方性高压ガス（通常はアルゴン）を吹き付けることで材料の密度を高めます。銅相が溶融し、タングステン粒子間の隙間を埋めることで、タングステン骨格と銅マトリックスの均一な複合構造を形成します。界面は機械的に連結されており、微細構造は緻密です。

プロセス: 熱間静水圧プレスプロセスには、以下の手順が含まれます。高純度のタングステン粉末と銅粉末を選択し、目標の比率で混合してプレスして形状にするか、焼結前の多孔質グリーン体を直接使用します。グリーン体を金属またはセラミック容器に入れ、密封して熱間静水圧プレス炉に配置し、高温高压のガス環境で処理し、一定時間保温して銅の液相充填と緻密化を促進します。冷却速度を制御して熱応力を回避します。後処理には、機械加工、表面研磨、必要に応じて耐食性を高めるためのニッケルまたはクロムコーティングの適用が含まれます。

利点: 熱間静水圧プレス工程により、タングステン銅ヒートシンクの密度が大幅に向上し、理論密度に近くなり、多孔性が極めて低く、熱伝導性と機械特性に優れています。等方性圧力により内部応力が除去され、微細構造が均一になり、高タングステン含有量グレード（W90Cu10 など）に適しています。複雑な形状や大型部品を製造できるため、航空宇宙および光電子パッケージングのニーズを満たすことができます。この工程により、インターフェース結合が最適化され、熱抵抗が低減し、熱膨張係数の一貫性が向上します。

用途: 熱間静水圧プレス法で製造されたタングステン銅ヒートシンクは、高出力レーザーヒートシンク（W80Cu20 など）、航空宇宙用熱管理（衛星部品用 W85Cu15 など）、5G 基地局放熱基板（W70Cu30 など）などに使用されています。高密度と性能安定性により、高信頼性アプリケーションに適しています。

4.2.2 放電プラズマ焼結技術の概要

放電プラズマ焼結（SPS）技術は、タングステン銅粉末をパルス直流電流と圧力で直接加熱し、急速な緻密化を実現する、高速かつ効率的な最新の製造プロセスです。原理は、タングステン粉末と銅粉末の混合物を導電性金型に入れ、パルス電流を印加して局所的な高温（火花放電）とプラズマを発生させ、外部圧力を組み合わせることで粒子の結合と銅の液相充填を促進し、緻密なタングステン銅複合構造を形成することです。SPS の急速加熱（高い加熱速度）と短時間焼結（数分）は、タングステン粒子の成長を効果的に抑制し、微細な微細構造を維持します。

プロセス: 放電プラズマ焼結は、以下の手順で構成されます。高純度のタングステン粉末と銅粉末を選択し、目標比率で混合してグラファイト型に充填します。型を SPS 装置に配置し、真空または不活性雰囲気（アルゴンなど）下でパルス DC と軸圧力を適用し、銅の融点を超えるまで急速に加熱し、短時間保温して焼結を完了します。冷却速度を制御して熱応力を軽減します。後処理には、必要に応じて機械加工、研磨、コーティングを行い、耐食性を向上させます。

利点: SPS 技術は焼結時間が短く、消費エネルギーが低いため、小ロットの高精度生産に適

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

しています。急速加熱によりタングステン粒子が微細（2～4 μm ）に保たれ、強度と靱性が向上します。高密度で均一な微細構造により、熱伝導性と電気伝導性が向上します。柔軟なプロセスで様々なグレードに対応し、特に高性能電子・光電子工学用途に適しています。用途：

SPS 製タングステン銅ヒートシンクは、マイクロ波デバイスヒートシンク（W60Cu40 など）、高出力 LED 放熱部品（W70Cu30 など）、航空宇宙薄壁熱管理部品（W80Cu20 など）に使用されています。迅速な試作と高い性能により、お客様のニーズに応えます。

4.2.3 3D プリント技術などのその他の新興技術

3D プリンティング技術（積層造形）は、タングステン銅ヒートシンクの製造に革新的な手法を提供し、材料を層状に積み重ねることで複雑な形状やカスタマイズされたデザインを実現します。一般的な手法としては、選択的レーザー溶融法（SLM）と電子ビーム溶融法（EBM）があります。原理は、タングステン銅混合粉末、またはタングステンと銅の粉末を高エネルギーレーザーまたは電子ビームで層状に溶融・堆積させ、高密度のタングステン銅複合構造を形成することです。微細構造はプロセスパラメータによって最適化できます。

プロセス：3D 印刷プロセスには、以下の手順が含まれます。高純度のタングステン粉末と銅粉末を準備し、それらを混合または層状にして 3D 印刷装置に装填します。レーザーまたは電子ビームを使用して、不活性雰囲気（アルゴンなど）で粉末を層ごとに溶かし、設計した形状に堆積します。後処理には、残留応力を除去するための熱処理、機械加工と表面研磨、必要に応じて性能を向上させるためのコーティングの適用が含まれます。

利点：3D 印刷技術は、従来のプロセスでは実現が難しい、埋め込まれた冷却チャネルを備えたヒートシンクなどの複雑な幾何学的形状を生成できます。小バッチのカスタマイズ生産をサポートし、開発サイクルを短縮します。成分の分布を正確に制御し、局所的なパフォーマンスを最適化できます。航空宇宙および医療分野の複雑な熱管理ニーズに適しています。

その他の新興技術：

- **低温焼結：**焼結助剤（ニッケルやコバルトなど）を添加することで焼結温度が低下し、省エネ・環境に優しい焼結方法です。銅含有量の高いグレード（W50Cu50 など）に適しており、優れた熱伝導性を維持します。
- **プラズマ噴霧：**高温プラズマを通してタングステン銅粉末を基板に噴霧し、ヒートシンクの薄層を形成します。マイクロ波装置や医療機器に適しており、ラピッドプロトタイピングが可能です。多孔隙度が若干高くなります。

用途：3D プリントされたタングステン銅ヒートシンクは、航空宇宙産業（W70Cu30 など）、医療用 CT 装置の放熱（W60Cu40 など）、高周波アンテナ基板（W50Cu50 など）などのカスタムヒートシンクに使用されています。プラズマ溶射法と低温焼結法は、それぞれ薄層ヒートシンクと省エネ生産に使用され、多様なニーズに対応しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3 タングステン銅ヒートシンクのプロセス比較と選択

タングステン銅ヒートシンクの製造プロセスには、伝統的なプロセス（粉末冶金、溶融浸透、高温液相焼結など）と現代的な革新的プロセス（熱間静水圧プレス、放電プラズマ焼結、3D プリント技術など）が含まれます。各プロセスは、材料特性、用途適応性、製造コストにそれぞれ異なる影響を及ぼします。適切な製造プロセスを選択するには、熱伝導率、熱膨張係数、機械的特性、微細構造、複雑な形状への対応力、そしてコスト効率を総合的に考慮し、電子実装、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、新エネルギーなどの分野の特定のニーズを満たす必要があります。以下では、さまざまな製造プロセスが材料特性に与える影響、プロセス選択の考慮事項、そしてコスト分析と最適化戦略を分析します。

4.3.1 異なる調製プロセスが材料特性に与える影響の違い

異なる製造プロセスは、微細構造、密度、界面の結合モードを調整することにより、熱伝導率、熱膨張係数、電気伝導率、機械的強度、靱性、耐食性、耐高温性など、タングステン銅ヒートシンクの性能に重大な影響を及ぼします。粉末冶金法は、タングステン銅粉末を混合し、加圧して焼結することにより複合構造を形成します。さまざまなグレードに適しており、微細構造が均一で、熱伝導性と電気伝導性が良好ですが、タングステン含有量の高いグレードの密度はわずかに低く、多孔度が強度に影響を与える可能性があります。浸透法は、多孔質のタングステン骨格に溶融銅を充填します。これは、銅含有量の高いグレードに特に適しており、熱伝導性と電気伝導性に優れ、界面の結合が緊密ですが、タングステン含有量の高いグレードは浸透が難しく、不完全な細孔充填により性能が低下する可能性があります。高温液相焼結法は、銅液相を使用してタングステン粒子を湿潤させる方法で、密度が高く、熱伝導率と機械的性質のバランスが取れており、中程度および高い銅含有量に適していますが、焼結温度が高いため銅が揮発し、性能の一貫性に影響を与える可能性があります。

熱間静水圧プレス法は、高温高压で全方向からプレスするため、密度が理論値に近くなります。微細組織が細かく、熱伝導率、強度、靱性に優れています。高性能用途に適していますが、複雑な形状の製造には限界があります。放電プラズマ焼結技術は、加熱が速く、微細なタングステン粒子を維持し、強度と靱性が高く、熱伝導率も優れているため、高精度の小型部品に適していますが、設備コストが高くなります。3D プリント技術は、層ごとに溶融することで複雑な幾何学的形状を形成します。多孔性が高いため、熱伝導率と強度は従来のプロセスよりわずかに劣りますが、カスタマイズ能力が高く、航空宇宙および医療分野に適しています。一般的に、従来のプロセス（粉末冶金や浸透など）は熱伝導率と費用対効果に優れ、大量生産に適しています。現代のプロセス（熱間静水圧プレスや SPS など）は密度と性能の最適化に優れており、高信頼性のアプリケーションに適しています。3D プリントは、複雑な形状やカスタマイズにおいて独自の利点があります。

4.3.2 アプリケーション要件に基づいて適切な調製プロセスを選択するための考慮事項

タングステン銅ヒートシンク製造プロセスの選択は、アプリケーション要件に応じて、以下の要素を総合的に考慮する必要があります。まず、熱管理性能要件、たとえば電子パッケージン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

グ（5G 基地局など）では、高い熱伝導率と中程度の熱膨張係数が求められ、溶融浸透または放電プラズマ焼結法を使用して銅含有量の高いグレード（W50Cu50、W60Cu40 など）を製造することが好ましいです。航空宇宙（衛星ヒートシンクなど）では、熱膨張係数が低く強度が高いことが求められ、高タングステングレード（W80Cu20、W90Cu10 など）には熱間静水圧プレス法または粉末冶金法が適しています。

第二に、機械的特性の要件としては、工業用電極（放電加工など）では高硬度と耐摩耗性が求められるため、W70Cu30 を製造するには溶融浸透法または高温液相焼結法がより適しています。一方、オプトエレクトロニクス用途（レーザーヒートシンクなど）では高靱性と表面平坦性が求められるため、放電プラズマ焼結法または熱間静水圧プレス法がより適しています。

第三に、複雑な冷却チャネルや薄壁構造などの複雑な幾何学的形状の場合、3D 印刷技術は独自の利点があり、カスタマイズされた航空宇宙および医療部品に適しています。単純なプレートやバーは、粉末冶金または溶融浸透を使用して作成できます。

第四に、環境適応性です。例えば、海洋環境で高い耐食性が求められる場合は、ニッケルメッキやクロムコーティングに対応したプロセス（粉末冶金、溶融浸透など）を選択する必要があります。一方、高温環境（航空宇宙など）では耐熱性が求められるため、熱間静水圧プレスや高温液相焼結がより適しています。最後に、生産規模とコストの制約から、大量生産には設備が成熟しておりコストが低い粉末冶金や溶融浸透が好まれます。小ロットの高精度用途には、コストは高くなりますが性能に優れている放電プラズマ焼結や 3D プリンティングを選択できます。用途要件、性能の優先順位、生産条件に基づいて、最も適合性の高いプロセスを総合的に選択します。

4.3.3 準備プロセスのコスト分析と最適化戦略

製造プロセスのコストは、原材料、設備、エネルギー消費、人件費、後処理などの要素によって決まります。粉末冶金法は、設備（油圧プレスや焼結炉など）が成熟しており、プロセスが簡単のためコストが低く、大量生産に適していますが、高タングステングレードの焼結エネルギー消費は比較的高くなります。溶融浸透法はコストが中程度で、真空炉と気孔率の精密制御が必要であり、設備とプロセスの複雑さによってコストが上昇しますが、中程度および高い銅含有量のグレードに適しています。高温液相焼結のコストは粉末冶金法とほぼ同じですが、高温焼結エネルギー消費と銅の揮発制御によってコストが増加します。

熱間静水圧プレス法は高圧ガス設備と密閉容器が必要なためコストが高くなりますが、高性能の小ロット生産に適しています。放電プラズマ焼結法はコストが高く、設備も高価で金型もカスタマイズが必要ですが、急速焼結によりエネルギー消費が抑えられ、高精度部品に適しています。3D プリント技術は粉末の準備、レーザーまたは電子ビーム設備、後処理が複雑なためコストが最も高くなりますが、複雑な形状や小ロットのカスタマイズに適しています。

最適化戦略には、コスト削減のためのタングステン銅廃棄物のリサイクルなど、費用対効果の高い原材料の選択、焼結時間の短縮、温度低下によるエネルギー消費量の削減など、プロセス

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パラメータの最適化、自動化設備の活用による生産効率の向上と人件費の削減、大量生産においては粉末冶金法または溶融浸透法を優先し、金型設計の改善による生産性向上、高付加価値用途においては熱間静水圧プレス法または 3D プリンティングへの投資による性能向上によるコスト削減、粉末冶金法と 3D プリンティングを組み合わせたハイブリッドプロセスの開発などが含まれます。コスト最適化には、生産規模と用途シナリオに基づき、性能を確保しながら最も経済的なソリューションを選択する必要があります。

4.4 タングステン銅ヒートシンクの品質管理と検査

タングステン銅ヒートシンクの品質管理と試験は、電子パッケージング、航空宇宙、オプトエレクトロニクス、新エネルギー分野における高性能要件を満たすための鍵となります。品質管理は、原材料の選定、製造工程、そして完成品の試験を通して行われ、微細構造、密度、成分比、性能安定性などが含まれます。試験方法では、熱伝導率、熱膨張係数、電気伝導率、機械的特性、耐食性を正確に評価するとともに、気孔、亀裂、接合不良などの潜在的な欠陥を特定する必要があります。以下では、材料品質管理、性能試験方法と基準、そして欠陥分析と改善策の主要な要素を分析します。

4.4.1 材料品質管理における主要なリンク

タングステン銅ヒートシンクの品質管理は、原材料から完成品までの全工程を通じて厳密に管理され、性能の一貫性と信頼性を確保する必要があります。まず、原材料の選択が基本です。高純度のタングステン粉末と銅粉末を選択し、不純物含有量（酸素や鉄など）を制御して熱伝導率と電気伝導率に影響を与えないようにする必要があります。混合効果を確保するために、粉末の粒子サイズと形態は均一でなければなりません。第二に、製造プロセスパラメータの正確な制御が重要です。たとえば、粉末冶金法では、混合の均一性、プレス圧力、焼結温度を最適化する必要があります。浸透法では、タングステン骨格の多孔性と銅の浸透条件を制御する必要があります。熱間静水圧プレスまたは放電プラズマ焼結では、銅の揮発や気孔残留を防ぐために圧力と加熱速度を調整する必要があります。第三に、微細構造の制御が鍵となります。タングステン粒子が均一に分散し、銅マトリックスが完全に充填され、界面がしっかりと結合していることを確認する必要があります。密度は、プロセスの最適化（焼結時間の延長や微量添加剤の添加など）によって向上します。第4に、後処理工程では、加工精度と表面品質を制御し、研磨は高い平坦性を実現する必要があります。耐食性を高めるためにメッキ（ニッケルやクロムなど）を均一にする必要があります。最後に、生産環境管理も無視できません。酸化を防ぐために真空または不活性雰囲気を使用し、汚染を避けるためにはほこりや湿度を管理する必要があります。これらのリンクを厳密に監視することで、タングステン銅ヒートシンクの性能が設計要件を満たすことを保証できます。

4.4.2 材料特性の試験方法と規格

タングステン銅ヒートシンクの性能試験は、密度、組成、主要な特性（熱伝導率、熱膨張係数、電気伝導率、機械的特性など）を網羅しており、正確な結果を得るには標準化された方法が必要です。密度検出では通常、アルキメデスの排水法を用いて材料の実際の密度と理論密度の比

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を測定し、緻密化の程度を評価します。高密度は、優れた熱伝導率と強度の前提条件です。組成分析では、化学滴定または分光分析（ICP-AES など）によってタングステン銅比を決定し、目標グレード（W70Cu30 など）を満たしているかどうかを確認します。不純物含有量は、業界標準（YS / T 1562.1-2022 など）に準拠する必要があります。熱伝導率試験では、レーザーフラッシュ法を用いて異なる温度における材料の熱拡散率を評価し、密度と比熱を組み合わせ、熱伝導率を計算します。これは、電子および光電子工学の用途に適しています。

熱膨張係数は、熱機械分析装置（TMA）によって測定され、動作温度範囲内の材料の膨張挙動を検出して、セラミックまたは半導体との整合性を確保します。導電率テストでは、4 プローブ法を使用して導電率（%IACS など）を測定し、高周波回路の要件を満たしているかどうかを確認します。機械的特性テストには、引張テスト（引張強度と伸びの測定）、硬度テスト（ビッカース硬度またはブリネル硬度）、および破壊靱性テストが含まれ、強度、靱性、耐磨耗性を評価します。耐食性は、酸化重量増加または表面腐食を検出するために湿熱テストまたは塩水噴霧テストによって評価され、コーティングの品質は金属組織顕微鏡によってチェックされます。微細構造分析では、走査型電子顕微鏡（SEM）と X 線回折（XRD）を使用して、タングステンの粒子分布、多孔度、界面結合を観察します。これらのテスト方法は、結果の比較可能性と信頼性を確保するために、関連規格（YS/T 1546-2022 など）に準拠する必要があります。

4.4.3 タングステン銅ヒートシンクの欠陥分析と改善策

タングステン銅ヒートシンクによく見られる欠陥には、気孔、亀裂、部品の偏析、界面接合不良、表面欠陥などがあり、これらは熱伝導率、強度、耐食性の低下を招き、アプリケーション性能に影響を及ぼす可能性があります。気孔欠陥は、粉末冶金における焼結温度不足や、溶浸におけるタングステン骨格の気孔率が低すぎるなど、焼結または溶浸不足によって引き起こされることが多いです。密度は、焼結時間を延長したり、温度を最適化したり、熱間静水圧プレス法を用いたりすることで改善できます。クラック欠陥は、主に熱応力、例えば冷却速度が速すぎる、成形体のプレスが不均一であるなどの原因で発生します。残留応力は、冷却速度の制御、プレス圧力の最適化、あるいは後処理の熱処理によって除去できます。組成偏析は、粉末の混合不均一や銅の揮発によって引き起こされます。均一性を向上させるために、ボールミルの代わりに渦電流混合法を用いたり、焼結雰囲気気を最適化（真空など）、微量添加剤（ニッケルなど）を添加したりできます。

界面接合不良は、タングステンと銅の非混和性、および機械的な接合強度の限界によって引き起こされます。界面接合は、放電プラズマ焼結による急速加熱、または界面活性剤の添加による濡れ性の向上によって強化できます。表面粗度の高さやコーティングの不均一性などの表面欠陥は、熱接触および耐腐食性に影響を与えますが、精密研磨やコーティングプロセスの改善（電気めっきパラメータの最適化など）によって解決できます。改善策としては、オンライン X 線による気孔率の検出や赤外線温度測定による焼結温度制御といったプロセス監視の強化、3D プリント技術によるレーザー出力調整による気孔率低減といったプロセスパラメータの最適化、高精度 CNC 加工による寸法公差確保といった設備精度の向上などが挙げられる。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Heat Sinks Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Heat Sinks

Tungsten copper heat sinks are composite materials composed of a tungsten matrix infiltrated with copper. They combine the high strength and high melting point of tungsten with the excellent thermal conductivity of copper. By adjusting the ratio of tungsten to copper, the coefficient of thermal expansion (CTE) can be tailored to match materials such as ceramics, semiconductors, or metals.

2. Features of Tungsten Copper Heat Sinks

- High Thermal Conductivity:** Efficient heat transfer ensures stable operation of electronic devices
- Excellent CTE Matching:** Customizable CTE to match a wide range of packaging materials
- Customizable Design:** Available in various thicknesses, dimensions, plating, and surface finishes

3. Typical Applications of Tungsten Copper Heat Sinks

- Heat sink substrates for laser diodes and modules
- Baseplates for IGBT and power modules
- Thermal management components in microwave/RF packaging
- Cooling solutions in aerospace electronic systems

4. Typical Properties of Tungsten Copper Heat Sinks

Grade	Tungsten Content (Wt%)	Copper Content (Wt%)	Density (g/cm³)	Thermal Conductivity (W/m • K at 25° C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
W90Cu10	90±1	Balance	17.0	180-190	6.5
W85Cu15	85±1	Balance	16.4	190-200	7.0
W80Cu20	80±1	Balance	15.6	200-210	8.3
W75Cu25	75±1	Balance	14.9	220-230	9.0
W50Cu50	50±1	Balance	12.2	310-340	12.5

4. Production Method of Tungsten Copper Heat Sinks

Tungsten copper heat sinks are primarily manufactured using the infiltration method, where a porous tungsten skeleton serves as the base structure and molten copper is infiltrated at high temperatures to form a dense composite. For high-precision applications, additional machining or surface treatment processes may be required to ensure dimensional accuracy and surface smoothness of the thermal interface, meeting the stringent requirements of electronic device assembly tolerances and thermal contact performance.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第5章：電子情報分野におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

5.1 半導体デバイスの放熱

電子情報産業の急速な発展に伴い、半導体デバイス（パワー半導体チップ、マイクロプロセッサ、RFデバイスなど）は、5G通信、電気自動車、データセンター、産業オートメーションなどの分野でますます多く使用されています。これらの高電力密度は、放熱の需要の急増につながっています。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、優れた機械的特性により、特に高信頼性が求められる用途において、半導体デバイスの放熱に重要な材料となっています。以下では、パワー半導体チップの放熱課題、チップ放熱におけるタングステン銅ヒートシンクの応用、および他の放熱材料との性能比較を分析します。

5.1.1 パワー半導体チップの放熱課題

SiC、GaNデバイスなどは、高電圧・高電流の動作環境で大量の熱を発生し、熱電力密度は1平方センチメートルあたり数百ワットに達することがあります。放熱が不十分な場合、チップ温度が上昇し、性能低下、寿命短縮、さらにはデバイス故障につながります。放熱の課題は主に次のとおりです。第1に、熱流束密度が高いため、放熱材料には高い熱伝導率を持たせ、チップから外部ヒートシンクに熱を素早く伝達する必要があります。第2に、チップと放熱材料の熱膨張係数を一致させて、熱サイクル（-40℃～200℃）による熱応力を回避し、インターフェースの亀裂やチップの損傷を防ぐ必要があります。シリコン（CTEは約 $2.6 \times 10^{-6}/K$ ）とセラミック基板（CTEは約 $4 \sim 7 \times 10^{-6}/K$ ）の場合、この一致が特に重要です。第三に、放熱材料は、複雑な動作環境（高温多湿、塩水噴霧など）に適応するために十分な機械的強度と耐腐食性を備えていなければなりません。第四に、小型化と高集積化に伴い、放熱材料は精密加工と薄型設計に対応しつつ、高い導電性を維持して高周波信号伝送をサポートする必要があります。従来の放熱ソリューション（アルミニウムや銅系材料など）は、熱膨張係数が高い、あるいは熱伝導率が不十分なため、新世代のパワー半導体チップのニーズを満たすことができません。

5.1.2 チップ放熱におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

タングステン銅ヒートシンクは、タングステンと銅の比率を調整することにより（W50Cu50～W90Cu10など）、優れた熱伝導性、適度な熱膨張係数、良好な機械的性質を提供し、パワー半導体チップの放熱に広く使用されています。W50Cu60（高熱伝導率、高熱流束密度に適しています）とW60Cu40（バランスの取れた熱伝導率と熱マッチング）は、高出力IGBTおよびMOSFETモジュールに使用され、熱をすばやく放散してデバイス寿命を延ばします。W70Cu30とW80Cu20（セラミックと半導体に近い熱膨張係数）は、SiCおよびGaNデバイスに使用され、窒化アルミニウムまたはガリウムヒ素基板とマッチングし、熱応力を軽減し、5G RFアンプとデータセンターに適しています。タングステン銅ヒートシンクは、粉末冶金、熔融浸透、または熱間静水圧プレスによって製造されます。微細構造が緻密で、研磨後の表面

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

平坦度が高く、ニッケルまたはクロムコーティングにより耐食性が向上し、湿気や高温環境にも適応します。応用例としては、電気自動車の電力フローデバイスにおいて、W60Cu40 は IGBT モジュールの放熱基板として急速充電をサポートします。W80Cu20 は 5G 基地局の RF モジュールに使用され、セラミック基板と組み合わせて信号安定性を確保します。W70Cu30 はレーダーシステムにおいて高出力チップの放熱に使用され、高温や振動にも耐性があります。タングステン銅ヒートシンクは、精密加工により複雑な形状（マイクロチャネル構造など）に対応し、微量元素（グラフェンなど）を添加することで熱伝導率を最適化し、高度な集積化要件を満たすことができます。

5.1.3 タングステン銅ヒートシンクと他の放熱材料との性能比較

他の放熱材料（銅、アルミニウム、アルミニウム系複合材料、炭素系材料、セラミックなど）と比較して、タングステン銅ヒートシンクは性能面で独自の利点があります。純銅（熱伝導率約 $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $16.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）は熱伝導性に優れていますが、熱膨張係数が高すぎるため、半導体に適合せず、熱応力割れが発生しやすいです。アルミニウム（熱伝導率約 $230 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE $23 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）は低コストで軽量ですが、熱膨張係数が高く、強度と耐腐食性が低く、低電力のシナリオに適しています。アルミニウム系複合材料（AlSiC など）の熱伝導率（約 $180 \sim 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）と熱膨張係数（ $7 \sim 10 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）はタングステン銅に近く、コストは低いですが、導電性が悪く、加工の難しさも高く、高周波用途には制限があります。炭素系材料（グラフェンや炭素繊維複合材など）は熱伝導率が $1000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 以上ですが、異方性があり、機械的強度が低く、高価であるため、大規模に適用するのは困難です。セラミック（窒化アルミニウムなど、熱伝導率が約 $170 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、CTE が $4.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）の熱膨張係数はチップと一致しますが、熱伝導率と電気伝導性が不十分で、加工が複雑です。タングステン銅ヒートシンク（W60Cu40 や W80Cu20 など）は、熱伝導率（ $220 \sim 280 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、熱膨張係数（ $7 \sim 10 \times 10^{-6} / \text{K}$ ）、電気伝導率（ $30 \sim 45\% \text{ IACS}$ ）のバランスが取れており、高い機械的強度、良好な加工性、そして強力な耐腐食性を備えているため、高出力・高信頼性の用途に適しています。一方、タングステン銅は、特に熱整合と高伝導性が求められる用途において、総合的な性能においてほとんどの材料よりも優れていますが、コストはアルミニウムや純銅よりも高く、用途に応じて検討する必要があります。

5.2 集積回路パッケージング

集積回路（IC）パッケージングは、電子情報産業の中核を成す要素であり、チップの保護、電気接続、放熱を担っています。集積回路が高性能、高集積、小型化（5G チップ、AI プロセッサ、車載エレクトロニクスなど）に向けて進化するにつれ、熱管理は重要な課題となっています。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導性、適度な熱膨張係数、優れた機械的特性により、特に高出力・高信頼性の用途において、集積回路パッケージングに広く使用されています。以下では、集積回路パッケージングにおけるヒートシンク材料の要件、様々なパッケージ形態におけるタングステン銅ヒートシンクの適用、そして集積回路の性能向上メカニズム

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

について分析します。

5.2.1 集積回路パッケージにおけるヒートシンク材料の要件

集積回路パッケージのヒートシンク材料に対する要件は、主に以下のとおりです。第 1 に、チップで発生した熱を外部ヒートシンクにすばやく伝達して、高電力密度チップ（GPU、CPU など）の放熱要件を満たし、熱流束密度は 1 平方センチメートルあたり数十から数百ワットに達することがあります。第 2 に、熱膨張係数はチップ（シリコンなど、CTE は約 2.6×10^{-6} /K）またはパッケージ基板（窒化アルミニウムなど、CTE は約 4.5×10^{-6} /K、酸化アルミニウム、CTE は約 7×10^{-6} /K）と一致している必要があり、熱サイクル（ $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ ）による熱応力を軽減し、インターフェースの亀裂やチップの反りを回避します。第 3 に、高い伝導性は高周波信号伝送をサポートし、特に RF および 5G アプリケーションでは信号損失を減らす必要があります。第 4 に、強度、硬度、靱性などの機械的特性は、パッケージングプロセス中の加工および長期使用の信頼性要件を満たす必要があります。第 5 に、耐腐食性と耐湿熱性は、複雑な環境（塩水噴霧や車載電子機器の湿気や熱条件など）に適応するために強力である必要があります。最後に、材料は、小型化と高集積パッケージングのニーズを満たすために、精密加工（薄型化、マイクロチャネル設計など）と表面処理（ニッケルメッキなど）をサポートする必要があります。純銅やアルミニウムなどの従来の材料は熱膨張係数が高いため、これらの要件を満たすのが困難ですが、タングステン銅は組成比を調整することで性能を最適化できるため、理想的な選択肢となります。

5.2.2 さまざまなパッケージ形態におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

タングステン銅ヒートシンクは、異なるパッケージ形態（BGA、QFN、SiP、3D パッケージなど）の熱管理要件に応じて、異なる組成比（W50Cu50 から W90Cu10 など）と製造プロセス（粉末冶金、溶融浸透、熱間静水圧プレスなど）で、集積回路パッケージに広く使用されています。ボールグリッドアレイ（BGA）パッケージでは、W60Cu40 と W70Cu30 がヒートシンク基板として使用され、セラミック基板（窒化アルミニウムまたは酸化アルミニウム）と組み合わせて、高い熱伝導率と適度な熱膨張係数を備え、高性能プロセッサと 5G RF チップに適しています。W50Cu50 は、熱流束密度が高く、放熱が速く、表面のニッケルメッキにより耐湿性と耐熱性が向上するため、GPU に使用されます。QFN パッケージでは、W80Cu20 はヒートシンクパッドとして使用され、シリコンチップまたはガリウムヒ素基板と一致し、熱膨張係数が近いいため熱応力が軽減され、自動車用電子機器やレーダーモジュールに使用されます。精密加工により薄型設計がサポートされ、小型化の要件を満たしています。システムレベルパッケージ（SiP）では、W70Cu30 はマルチチップモジュール（MCM）の放熱に使用され、熱伝導性と電気伝導性のバランスを取り、高周波信号伝送をサポートします。放電プラズマ焼結によって製造されます。微細構造は均一で、5G および AI チップに適しています。3D パッケージでは、W90Cu10 が積層チップの熱管理に使用されます。熱膨張係数が低く、シリコン貫通ビア（TSV）構造と互換性があります。熱間静水圧プレスプロセスにより高密度が保証され、データセンターの高性能コンピューティングチップに使用されます。タングステン銅ヒートシンクは、3D プリントにより複雑なマイクロチャネル構造を作製することで、放熱効率を高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

め、高度なパッケージング要件を満たすことができます。応用例としては、W60Cu40 は 5G 基地局 SiP モジュールに使用され、耐熱性は 1,000 倍です。W80Cu20 は車載 ADAS チップ QFN パッケージに使用され、塩水噴霧耐性は 500 時間です。W70Cu30 はサーバーCPU BGA パッケージに使用され、放熱性能を向上させ、寿命を延ばします。

5.2.3 タングステン銅ヒートシンクによる集積回路性能向上のメカニズム

タングステン銅ヒートシンクは、熱管理を最適化し、熱応力を軽減し、信頼性を向上させることで、集積回路の性能を向上させます。そのメカニズムには次の側面が含まれます。第 1 に、高い熱伝導率（W50Cu50～W80Cu20）により、連続した銅熱伝導ネットワークが形成され、チップの熱がヒートシンクにすばやく伝導され、チップの接合部温度が下がり（IGBT 接合部温度が 150℃未満に低下するなど）、作業効率と寿命が向上します。第 2 に、適度な熱膨張係数（ $6\sim12\times10^{-6}/K$ ）がチップと基板に適合し、熱サイクルによる熱応力が軽減され、インターフェースの亀裂や反りを防ぎ、長期的な信頼性を確保します。第 3 に、高い伝導率（30～45% IACS）により、高周波信号の損失が軽減され、5G および RF アプリケーションの信号整合性がサポートされます。第 4 に、優れた機械的特性（高強度、靱性など）により、パッケージ構造の安定性が向上し、振動や衝撃に耐え、自動車や航空宇宙アプリケーションに適しています。第五に、緻密な微細構造（気孔率<0.5%）と表面処理（ニッケルメッキなど）により、耐腐食性、耐湿性、耐熱性が向上し、過酷な環境にも適応します。最後に、精密加工とカスタム設計により、熱流路が最適化され、放熱効率が向上し、高集積化の要件を満たします。微量添加剤（グラフェンなど）は熱伝導性をさらに向上させ、放電プラズマ焼結などのプロセスは微細構造を微細化し、性能を向上させることができます。これらのメカニズムにより、タングステン銅ヒートシンクは集積回路の放熱効率、信号安定性、信頼性を大幅に向上させ、高性能電子デバイスの開発を促進します。

5.3 通信機器の放熱

5G 通信技術の普及と 6G 技術の発展に伴い、通信機器（基地局、RF モジュール、光モジュールなど）は、高電力密度と複雑な動作環境による放熱課題に直面しています。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、良好な機械的特性により、特に高性能、小型化、高信頼性が求められる用途において、通信機器の放熱における重要な材料となっています。以下では、5G 通信基地局機器の放熱要件、通信モジュールにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用、そして通信機器の小型化と高効率化への貢献について詳細に分析します。

5.3.1 5G 通信基地局装置の放熱要件の特性

5G 通信基地局設備は、従来の通信システムと比較して、データ伝送速度が高く、帯域幅が広く、遅延が低いいため、設備内部の RF 電力増幅器（PA）、アンテナアレイ、デジタル信号プロセッサ（DSP）などの部品から大量の熱が発生し、放熱需要が大幅に増加しています。その放

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱要件の特徴は次のとおりです。第 1 に、熱流束密度が高いため、放熱材料は優れた熱伝導性を備え、高出力チップまたはモジュールから外部のヒートシンクに熱をすばやく伝導して、設備の安定した動作を維持する必要があります。第 2 に、熱膨張係数は、チップ（シリコン、ガリウムヒ素など）またはセラミック基板（窒化アルミニウム、酸化アルミニウムなど）と一致し、頻繁な熱サイクルによる熱応力を軽減し、インターフェースの亀裂や機器の性能低下を回避する必要があります。第 3 に、高い伝導性が鍵となり、特に RF モジュールでは、放熱材料は高周波信号伝送をサポートし、信号損失と電磁干渉を低減する必要があります。第 4 に、機器はさまざまな環境（高温、高湿度、塩水噴霧、振動など）で長時間稼働する必要があり、放熱材料には優れた耐腐食性、耐高温性、機械的強度が求められます。第 5 に、5G 基地局の小型化と集積化のトレンドにより、放熱材料はコンパクトなスペースに適応するために薄型設計、精密加工、複雑な形状（マイクロチャネル構造など）をサポートする必要があります。最後に、放熱ソリューションは、コスト効率を考慮し、大規模展開に適する必要があります。同時に、性能低下のない長期稼働など、基地局機器の高い信頼性要件を満たす必要があります。これらの特性により、従来の放熱材料（純銅やアルミニウムなど）ではニーズを完全に満たすことが難しく、組成とプロセスの最適化により、タングステン銅ヒートシンクが理想的な選択肢となっています。

5.3.2 通信モジュールにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用

タングステン銅ヒートシンクは、タングステンと銅の比率を調整し、粉末冶金、溶融浸透、熱間静水圧プレス、放電プラズマ焼結などのプロセスと組み合わせることで、5G 通信基地局の RF モジュール、光モジュール、パワーアンプ、アンテナアレイなどの通信モジュールの放熱に広く使用されています。RF モジュールでは、高銅含有量グレード（W50Cu50、W60Cu40 など）が放熱基板として使用され、パワーアンプから発生した熱を素早く伝導し、セラミック基板（窒化アルミニウムなど）との整合性を高め、熱応力を軽減し、高周波信号伝送の安定性を確保します。表面にニッケルまたはクロムコーティングを施すことで、耐湿性、耐熱性、塩水噴霧腐食性を高め、屋外基地局の環境に適応します。

光モジュールでは、W70Cu30 と W80Cu20 がレーザーや光検出器の熱管理に使用されています。これらの材料の熱膨張係数は、ガリウムヒ素やシリコンベースのチップの熱膨張係数に近いので、高い熱伝導率と相まって、光モジュールの温度安定性を維持し、信号品質を向上させます。精密加工により薄型設計が可能になり、高速光通信のニーズに対応しています。パワーアンプでは、W60Cu40 がヒートシンクとして使用され、効率的に熱を放散させてデバイス寿命を延ばします。放電プラズマ焼結プロセスを使用して製造され、均一な微細構造と高い信頼性を備えています。大規模アンテナアレイ（Massive MIMO）では、W70Cu30 がマルチチャネル RF ユニットの熱管理に使用されています。高い伝導率を持ち、電磁干渉を低減します。熱間静水圧プレスプロセスにより高密度実装が可能で、高集積設計に適しています。タングステン銅ヒートシンクは、3D 印刷技術を使用して複雑なマイクロチャネル構造を作成し、熱流路を最適化して放熱効率を向上させるためにも使用できます。

応用事例としては、W60Cu40 は 5G 基地局 RF モジュールにおいて高温環境下における信号安定性の維持に、W80Cu20 は沿岸基地局光モジュールにおいて塩水噴霧腐食への耐性と耐用年

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

数の延長に、W70Cu30 は小型基地局においてコンパクトなレイアウトにおける熱管理要件を満たすために使用されています。これらの用途は、通信モジュールにおけるタングステン銅ヒートシンクの重要な役割を実証しています。

5.3.3 タングステン銅ヒートシンクは通信機器の小型化と高効率化に貢献します

タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱管理性能、材料特性、プロセスの利点により、通信機器の小型化と効率化の重要なサポートを提供します。

そのサポートメカニズムには、次の側面が含まれます。第1に、タングステン銅ヒートシンクの高い熱伝導率により、効率的な熱伝導ネットワークが形成され、通信モジュール内の熱がチップまたはモジュールからラジエーターにすばやく伝導され、動作温度が大幅に低下し、RF アンプと光モジュールの効率的な動作が維持され、消費電力が削減されます。2 番目に、適度な熱膨張係数がチップと基板に適合し、熱サイクルによるストレスが軽減され、デバイスの長期安定性が向上し、高密度統合と 3D パッケージの小型化要件がサポートされます。3 番目に、高い伝導率により、高周波信号の損失と電磁干渉が軽減され、RF モジュールとアンテナアレイの信号伝送効率が向上し、効率的な通信が促進されます。4 番目に、優れた機械的強度と靱性により、ヒートシンクは振動や衝撃に強いことが保証されます。

第五に、ニッケルまたはクロムコーティングにより耐腐食性と耐高温性がさらに強化され、屋外基地局の過酷な環境（湿度、熱、塩水噴霧など）に適応し、機器の寿命を延ばし、メンテナンスコストを削減します。第六に、タングステン銅ヒートシンクは、3D プリントなどのさまざまな準備プロセスをサポートし、埋め込み型冷却チャネルを実現し、熱流路を最適化し、放熱効率をさらに向上させ、高度に統合されたモジュールに適しています。微量添加剤（グラフェンなど）やスパークプラズマ焼結などのプロセスにより、微細構造を改良し、熱伝導率と靱性を高め、5G などの次世代通信技術のニーズを満たすことができます。

さらに、タングステン銅ヒートシンクのカスタマイズ機能により、RF、オプトエレクトロニクス、アンテナなど、様々な通信モジュールの具体的なニーズに合わせて構成比や構造設計を調整することが可能となり、粉末冶金や溶融浸透といったコスト最適化された製造プロセスと組み合わせることで、5G 基地局の大規模展開をサポートします。これらのメカニズムを通じて、タングステン銅ヒートシンクは通信機器の小型化、効率化、高信頼性を促進し、5G ネットワークのグローバルカバレッジと将来の通信技術の発展のための強固な基盤を提供します。

5.4 タングステン銅ヒートシンクの他の電子機器への応用

タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、良好な機械的特性により、半導体デバイス、集積回路、通信機器だけでなく、コンピュータ CPU や民生用電子機器などの他の電子機器にも広く使用されています。これらの応用シナリオでは、放熱材料に高い熱伝導率、熱整合、耐久性、加工柔軟性が求められます。タングステン銅ヒートシンクは、W50Cu50 から W90Cu10 などの組成比を調整し、粉末冶金、溶融浸透、3D プリントなどの高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

度なプロセスを採用することで、多様なニーズに対応しています。以下は、タングステン銅ヒートシンクのコンピュータ CPU 冷却ソリューションへの応用と、民生用電子機器における潜在的な応用探索の詳細な分析です。

5.4.1 コンピュータ CPU 冷却ソリューションへの応用

コンピュータ CPU（中央処理装置）は、高性能コンピューティングデバイス（サーバー、ワークステーション、ゲーミング PC など）の中核部品です。プロセス技術の進歩（5nm、3nm など）とマルチコアアーキテクチャの普及に伴い、CPU の電力密度は継続的に増加し、大量の熱が発生します。放熱は、性能と寿命を維持するための鍵となっています。タングステン銅ヒートシンクは、CPU 冷却ソリューションにおいて放熱基板またはヒートシンクパッドとして重要な役割を果たします。高い熱伝導率により、CPU から発生した熱をラジエーター（空冷または液冷システムなど）に素早く伝達し、チップの動作温度を安全な範囲に保ちます。適度な熱膨張係数はシリコンチップまたはセラミック基板に適合し、熱サイクルによる熱応力を軽減し、チップの反りやパッケージの破損を回避します。高い熱伝導率は信号伝送をサポートし、電磁干渉を低減し、CPU の高周波動作に適しています。優れた機械的強度と耐腐食性により、長期的な信頼性を確保し、データセンターやゲーミング PC の過酷な環境にも適応します。

W50Cu50 と W60Cu40 は、その高い熱伝導率から、高性能サーバーの CPU 放熱によく使われています。これらは、溶融浸透法や放電プラズマ焼結法で製造され、緻密な微細構造を持ち、表面研磨後の高い平坦性があり、ニッケルメッキコーティングが施されているため、耐湿性と耐熱性が向上しています。W70Cu30 と W80Cu20 は、ワークステーションやゲーミング PC に使用され、熱膨張係数が基板と一致し、熱間静水圧プレスプロセスで密度が向上しているため、高信頼性のシナリオに適しています。タングステン銅ヒートシンクは、3D プリントのマイクロチャネル構造で製造することもでき、液体冷却システムと組み合わせて、放熱効率をさらに最適化します。応用例としては、データセンターサーバーでは、W60Cu40 を CPU 放熱基板として使用し、液体冷却システムで高負荷時の温度安定性を維持しています。ハイエンドゲーミング PC では、CPU ヒートシンクパッドに W70Cu30 が採用されており、頻繁な熱サイクルへの耐性とオーバークロック性能の向上を実現しています。タングステン銅ヒートシンクの精密加工技術は薄型設計をサポートし、コンパクトな CPU パッケージスペースに適応するだけでなく、微量のグラフェンを添加することで熱伝導性を高め、次世代の高性能コンピューティングのニーズに応えます。

5.4.2 民生用電子機器における潜在的用途の探究

家電市場における競争が激化するにつれ、製品のイテレーションサイクルは短縮され、冷却ソリューションのタイムリーさと革新性に対する要求はますます高まっています。タングステン銅ヒートシンクは、その独自の物理的・化学的特性により、研究室から産業応用の主要ノードへと移行し、より多様な技術革新と用途拡大をもたらしています。スマートフォン分野では、5G 通信と AI コンピューティングの融合により、SoC チップの消費電力密度が 150W/cm² を超

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

え、従来のグラファイト放熱フィルムではもはやこの需要に対応できなくなりました。タングステン銅ヒートシンクは、「サンドイッチ」複合構造設計を採用し、W50Cu50 基板にナノ銀はんだペーストと超薄型 VC ヒートスプレッダーを組み合わせることで、3 次元放熱ネットワークを構築しています。この構造により、チップのジャンクション温度を 12~15°C 低減できます。大規模なモバイルゲームシナリオでは、フレームレートの変動を 3% 以内に抑えることができ、発熱と周波数低下の問題を大幅に改善します。同時に、マグネトロンスパッタリング技術を用いてヒートシンク表面に窒化チタンコーティングを施すことで、耐塩水噴霧腐食性が 1,000 時間以上に向上し、海辺や高湿度環境での使用シナリオにも効果的に対応します。タブレットのマルチタスク要件は、GPU 性能の継続的な向上を牽引し、タングステン銅ヒートシンクのカスタマイズ設計が鍵となっています。高解像度ディスプレイ画面とゲームアプリケーションの二重の放熱圧力に対応するため、W70Cu30 ヒートシンクは放電プラズマ焼結 (SPS) プロセスで製造されています。微細構造制御により、銅相がハニカム状に均一に分散され、熱伝導率が 18% 向上するとともに軽量化も実現しました。液体金属熱伝導材料と組み合わせることで、GPU ジャンクション温度を 85°C 以内に制御でき、4K ビデオ編集や 3D モデリングなどの高性能アプリケーションのスムーズな動作を確保します。さらに、ヒートシンクのフレキシブル設計技術も飛躍的な進歩を遂げています。レーザーエッチングで形成されたマイクロスプリング構造により、タブレットの曲げヒンジ部分でも効率的な放熱を維持できます。

ウェアラブルデバイスの分野では、タングステン銅ヒートシンクの小型化と統合の革新が深海域に入りました。スマートウォッチでは、マイクロステレオリソグラフィ（ μSL ）技術で製造された W80Cu20 ヒートシンクは、厚さが 0.1mm を超え、フレキシブル回路基板とのシームレスな統合を実現できます。表面に化学ニッケル金メッキを施した後、優れた耐汗腐食性を持つだけでなく、アンテナキャリアとして使用して放熱と無線周波数機能の統合を実現できます。TWS ヘッドフォンでは、ナノタングステン銅粉末射出成形（ナノ MIM）技術で製造されたヒートシンクブラケットが、0.5cm³ の小さなスペースにバイオニック血管放熱チャネルを構築し、充電ボックスの内部温度を 8°C 下げ、リチウム電池のサイクル寿命を効果的に延ばします。AR/VR デバイスの没入型体験は、放熱ソリューションに厳しい要件を提示しています。タングステン銅ヒートシンクと相変化材料 (PCM) の複合応用は新たな方向性を示しています。ヘッドマウントデバイスでは、W60Cu40 基板の表面にマイクロ射出成形プロセスによりパラフィン系 PCM が埋め込まれています。プロセッサが加熱されると、PCM は固体から液体へと溶融して熱を吸収し、動的な温度制御を実現します。この複合ソリューションは、デバイスの表面温度を人体にとって快適な範囲に保ち、長時間装着による灼熱感を回避します。同時に、勾配ドーピングによりヒートシンクの電磁シールド機能を最適化し、高周波帯域でのシールド効率は 50dB 以上に達し、AR/VR デバイスにおける信号干渉による画像遅延の問題を効果的に解決します。

新たな応用シーンにおいて、ワイヤレス充電装置の放熱最適化は、タングステン銅ヒートシンクにとって重要なブレークスルーとなっている。150W 以上の高出力ワイヤレス充電ベースでは、ホットプレス拡散溶接プロセスで製造された W70Cu30 ヒートシンクが、内部マイクロチャネルと外部放熱フィンの一体設計により、充電コイルの温度を 65°C 以下に制御し、充電効率を 92% まで向上させている。ゲームコントローラーの分野では、タングステン銅ヒートシンクと形状記憶合金のインテリジェント温度制御システムを開発している。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第 6 章：エネルギーおよび電力産業におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

6.1 パワーエレクトロニクス機器の放熱

SiC デバイスなどは、エネルギーおよび電力業界（スマートグリッド、再生可能エネルギーシステム、電気自動車、高電圧直流送電など）で重要な役割を果たしていますが、高出力動作により多くの熱が発生し、放熱管理がシステム効率、信頼性、および寿命に直接影響します。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、および優れた機械的特性により、特に高出力および高信頼性のシナリオにおいて、パワーエレクトロニクスデバイスの放熱に重要な材料となっています。以下では、サイリスタや IGBT などのパワーエレクトロニクスデバイスの加熱問題、パワーエレクトロニクスデバイスへのタングステン銅ヒートシンクの適用、およびそれらが電力システムの安定性と効率の向上に貢献することについて詳しく分析します。

6.1.1 サイリスタや IGBT などのパワーエレクトロニクスデバイスの発熱問題

サイリスタや IGBT などのパワーエレクトロニクスデバイスは、高電圧および大電流の動作条件下で電力変換および制御機能を実行します（スマートグリッド、風力発電インバータ、電気自動車の電源モジュールのコンバータなど）。動作中にかなりの熱が発生し、熱出力密度は 1 平方センチメートルあたり最大数百ワットに達します。発熱の問題は主に次の側面から発生します。第 1 に、デバイス内部の伝導損失とスイッチング損失によって電気エネルギーが熱エネルギーに変換されます。特に高周波スイッチングや大電流のシナリオでは、熱が急速に蓄積されます。熱が時間内に放散されない場合、チップの接合部温度が高くなりすぎて、パフォーマンスが低下し、効率が低下し、デバイスが故障する可能性があります。第 2 に、デバイスとパッケージ材料の熱膨張係数が一致せず、頻繁な熱サイクル（-40°C ~ 150°C など）で熱応力が発生し、インターフェースの亀裂、はんだ層の剥離、チップの反りが発生する可能性があります。第三に、パワーエレクトロニクスデバイスは複雑な環境（高温、高湿度、ほこり、振動など）で動作することが多く、放熱材料は長期信頼性を確保するために耐腐食性と機械的強度を備えている必要があります。第 4 に、高集積化と小型化の傾向により、放熱材料は薄型設計と複雑な構造をサポートしながら、高い伝導性を維持して電磁干渉を低減する必要があります。最後に、風力発電や太陽光発電インバータなど、システムレベルの放熱需要が増加しており、全体的なエネルギー変換効率を向上させるには、熱を効率的に放散する必要があります。従来の放熱材料（純銅やアルミニウムなど）は、熱膨張係数が高く、耐腐食性が不十分であるため、高出力パワーエレクトロニクスデバイスのニーズを満たすのが難しく、高性能の放熱ソリューションが緊急に必要とされています。

6.1.2 パワーエレクトロニクスデバイスにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用

タングステン銅ヒートシンクは、タングステンと銅の比率（W50Cu50 から W90Cu10 など）を調整し、粉末冶金、溶融浸透、熱間静水圧プレス、3D プリントなどのプロセスを組み合わせることで、サイリスタ、IGBT、MOSFET、SiC デバイスの放熱管理に広く使用されています。IGBT モジュールでは、W60Cu40 と W70Cu30 が放熱基板として使用され、熱を効率的に伝導

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、セラミック基板（窒化アルミニウムや酸化アルミニウムなど）やシリコンチップと整合させることで熱応力を低減し、デバイス寿命を延ばします。溶融浸透または放電プラズマ焼結によって製造され、緻密な微細構造と表面にニッケルまたはクロムコーティングが施されているため、湿気、熱、腐食に対する耐性が向上し、風力発電インバータや電気自動車のパワーモジュールに適しています。サイリスタデバイスでは、W80Cu20 は高電圧シナリオで使用され、セラミックに近い熱膨張係数と、高密度、高温および振動耐性を確保するための熱間静水圧プレスプロセスを備えており、高電圧直流 (HVDC) システムに使用されます。

SiC デバイスにおいて、W70Cu30 と W90Cu10 は高温動作（200℃以上）に対応し、優れた熱伝導性を有し、シリコン窒化物基板との適合性も備えています。3D プリンティング技術を用いてマイクロチャネル構造を作製し、熱流路を最適化することで、鉄道輸送や航空輸送用パワーモジュールに適しています。MOSFET モジュールにおいて、W50Cu50 は高い熱伝導性と導電性、信号損失の低減、粉末冶金法による製造コストの低さから、高周波スイッチング電源に用いられており、大規模アプリケーションに適しています。

タングステン銅ヒートシンクは、微量のグラフェンを添加することで熱伝導性を向上させたり、精密加工により薄型設計を実現してコンパクトなパッケージ要件を満たしたりすることができます。例えば、電気自動車のインバーターIGBT モジュールにおける W60Cu40 は高温環境下でも安定した動作を維持します。風力発電コンバーターのサイリスタ放熱における W80Cu20 は腐食耐性を高め、メンテナンスサイクルを延長します。太陽光発電インバーター SiC モジュールにおける W70Cu30 はエネルギー変換効率を向上させます。これらの用途は、パワーエレクトロニクスの放熱におけるタングステン銅ヒートシンクの重要な役割を実証しています。

6.1.3 タングステン銅ヒートシンクによる電力システムの安定性と効率性の向上への貢献

タングステン銅ヒートシンクは、熱管理を最適化し、信頼性を高め、効率的な動作をサポートすることで、電力システムの安定性と効率の向上に重要な貢献をします。その貢献メカニズムには次の側面が含まれます。第1に、高い熱伝導率により効率的な熱伝導ネットワークが形成され、デバイスの熱がヒートシンクにすばやく伝導され、チップの接合部温度が下がり、熱による性能低下が抑えられ、IGBT やサイリスタなどのデバイスの電力変換効率が向上し、風力発電インバータの効率が向上し、エネルギー損失が低減します。第2に、適度な熱膨張係数がチップと基板に適合し、熱サイクルによる熱応力が軽減され、インターフェースの亀裂や溶接不良が防止され、デバイスの長期安定性が向上し、電力システム（HVDC やスマートグリッドなど）の動作寿命が延びます。第3に、高い伝導率により電磁干渉と信号損失が低減し、高周波スイッチングと高速応答がサポートされ、MOSFET および SiC デバイスの性能が最適化され、システムの動的調整能力が向上します。第4に、優れた機械的強度と耐腐食性により、電気自動車や洋上風力発電などの過酷な条件など、高温、高湿度、振動環境でヒートシンクの構造的完全性が保証され、メンテナンス要件が軽減され、システムの信頼性が向上します。第5に、精密機械加工と3D プリント技術は、マイクロチャネルまたは薄型設計をサポートし、熱流路を最適化して放熱効率を高め、小型化されたパワーエレクトロニクスデバイスに適応し、スマートグリッドと再生可能エネルギーシステムの統合を促進します。第6に、タング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ステン銅ヒートシンクのカスタマイズ機能により、さまざまなデバイス（サイリスタ高電圧、IGBT 高電流など）に応じてコンポーネント比率を調整でき、コスト最適化プロセス（粉末冶金や溶融浸透など）と組み合わせ、大規模アプリケーションをサポートし、システムコストを削減します。

さらに、微量添加剤（グラフェンなど）や放電プラズマ焼結などのプロセスにより、微細構造が改良され、熱伝導率と靱性がさらに向上し、次世代パワーエレクトロニクスのニーズを満たします。これらのメカニズムを通じて、タングステン銅ヒートシンクは電力システムの安定性、効率性、経済性を大幅に向上させ、再生可能エネルギーの効率的な利用とスマートグリッドの開発を強力にサポートします。

6.2 新エネルギー発電設備

新エネルギー発電設備（太陽光発電システムや風力発電システムなど）は、カーボンニュートラルの目標を達成するための重要な技術です。インバータやコンバータなどのコアコンポーネントは、高出力運転時に大量の熱を発生し、放熱管理は設備の効率、信頼性、寿命に直接影響します。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、優れた機械的性質により、特に高出力、複雑な環境、高信頼性のシナリオにおいて、新エネルギー発電設備の放熱に重要な材料となっています。以下では、太陽光発電インバータの放熱要件、風力タービンコンバータにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用、および新エネルギー産業の発展におけるタングステン銅ヒートシンクの意義を詳細に分析します。

6.2.1 太陽光発電インバータの放熱要件

太陽光発電インバータは、太陽光発電モジュールで発電された直流を交流に変換する役割を担っています。分散型屋上太陽光発電システム、大規模太陽光発電所、エネルギー貯蔵システムに広く使用されています。高出力動作により多くの熱が発生するため、放熱要件には次の特性があります。第1に、熱流束密度が高いため、放熱材には優れた熱伝導性が求められます。これにより、インバータ内のパワーデバイス（IGBT、MOSFET、SiC モジュールなど）で発生した熱をヒートシンクに素早く伝達し、デバイスの動作温度を安全な範囲内に維持し、効率の低下や過熱による故障を回避できます。第2に、熱膨張係数は、半導体チップ（シリコンなど）またはセラミック基板（窒化アルミニウム、酸化アルミニウムなど）と一致している必要があります。これにより、熱サイクルによる熱応力が低減し、シールが破損するのを防ぎます。

放熱材は、長期信頼性を確保するために、耐腐食性、耐高温性、機械的強度を備えている必要があります。高効率化と小型化のトレンドにより、放熱材料は薄型設計と複雑な構造（マイクロチャネルなど）に対応し、コンパクトな空間に適応し、放熱効率を向上させる必要があります。高い導電性は、電磁干渉を低減し、インバータの高周波スイッチングと信号伝送をサポートし、電力変換効率を最適化するのに役立ちます。最後に、放熱ソリューションは費用対効果を考慮し、大規模な太陽光発電プロジェクトの展開に適しており、性能低下のない長期運用など、高い信頼性要件を満たす必要があります。従来の放熱材料（純銅やアルミニウムなど）は、熱膨張係数が高く、耐腐食性が不十分であるため、太陽光発電インバータのニーズを完全に満

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

たすことが難しく、高性能な放熱ソリューションが緊急に必要とされています。

6.2.2 風力タービンコンバータにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用

風力発電コンバータは、風力タービンで発電した交流電力を直流に整流し、さらに電力網に適合する交流電力に変換する役割を担っています。高出力動作と高周波スイッチングにより、IGBT、SiC モジュールなどのデバイスは大量の熱を発生するため、タングステン銅ヒートシンクが放熱において重要な役割を果たしています。W60Cu40 と W70Cu30 は、コンバータ内の IGBT モジュールの放熱基板としてよく使用されます。これらは熱伝導率が高く、セラミック基板（窒化アルミニウムなど）やシリコンチップと組み合わせることで熱応力を低減します。これらは溶融浸透法または放電プラズマ焼結法で製造されます。微細構造は緻密で、表面にニッケルまたはクロムメッキを施すことで、耐湿性、耐熱性、塩水噴霧腐食性を高めています。特に、洋上風力発電の過酷な環境に適しています。W80Cu20 は、高出力 SiC モジュールの放熱に使用されます。熱膨張係数はセラミックに近いです。熱間静水圧プレス法は高密度、高温耐性、耐振動性を備え、大型風力タービンに使用されています。W50Cu50 は、高い熱伝導性と導電性を有するため、高周波スイッチモジュールに使用されています。粉末冶金法は製造コストが中程度であるため、大規模な用途に適しています。

タングステン銅ヒートシンクは、3D プリント技術と液体冷却システムを組み合わせることでマイクロチャネル構造にすることができ、熱流路を最適化し、放熱効率を向上させ、コンパクトなコンバータ設計に適応させることができます。応用例としては、洋上風力発電コンバータにおける W60Cu40 は、高温多湿環境でも安定した動作を維持し、メンテナンスサイクルを延長します。陸上風力発電 IGBT モジュールにおける W70Cu30 は、電力変換効率を向上させます。メガワット級風力タービン SiC コンバータにおける W80Cu20 は、振動や腐食に強く、高出力をサポートします。タングステン銅ヒートシンクは、精密加工により薄型化や複雑な形状にも対応し、微量のグラフェンを添加することで熱伝導性をさらに向上させ、風力発電コンバータの高い信頼性要件を満たすことができます。

6.2.3 新エネルギー産業の発展におけるタングステン銅ヒートシンクの重要性

タングステン銅ヒートシンクは、熱管理を最適化し、信頼性を高め、効率的な運用をサポートすることで、新エネルギー産業の急速な発展に重要なサポートを提供します。その重要性は次の側面に反映されています。第 1 に、高い熱伝導率により、インバーターとコンバーター内の熱が素早く伝導され、パワーデバイスのジャンクション温度が下がり、熱による性能低下が抑えられ、太陽光発電システムと風力発電システムの電力変換効率が向上し、新エネルギーの発電量が増加し、キロワット時あたりのコストが削減されます。第 2 に、適度な熱膨張係数がチップと基板に適合し、熱サイクルによる熱応力が軽減され、パッケージの故障を防ぎ、特に過酷な屋外環境（砂漠の太陽光発電や洋上風力発電など）での機器の寿命が延び、メンテナンスコストが削減されます。第 3 に、高い伝導率により、電磁干渉と信号損失が減少し、高周波スイッチングと高速応答がサポートされ、SiC および IGBT モジュールの性能が最適化され、システムの動的調整機能が向上し、スマートグリッド統合が促進されます。第 4 に、優れた機械的強度と耐腐食性により、高温、高湿度、塩水噴霧、振動環境におけるヒートシンクの構

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

造的完全性が保証され、新エネルギー機器の長期動作要件を満たし、システムの信頼性が向上します。第5に、精密機械加工と3Dプリント技術は、マイクロチャネル、薄型またはカスタマイズされた設計をサポートし、放熱効率を高め、小型化されたインバータとコンバータに適応し、新エネルギー機器の統合と軽量化を促進します。第6に、タングステン銅ヒートシンクのカスタマイズ機能により、さまざまなアプリケーション（太陽光発電の高効率と風力発電の高出力など）に応じてコンポーネント比率を調整でき、コストを最適化したプロセス（粉末冶金や溶融浸透など）と組み合わせることで、新エネルギープロジェクトの大規模展開をサポートし、システムコストを削減します。さらに、微量添加剤（グラフェンなど）や放電プラズマ焼結などのプロセスにより微細構造が微細化され、熱伝導性と靱性がさらに向上し、次世代の新エネルギー技術のニーズに対応します。これらの貢献を通じて、タングステン銅ヒートシンクは、太陽光や風力エネルギーなどの新エネルギー産業の効率的、信頼性、持続可能な発展を促進し、世界的なエネルギー転換とカーボンニュートラル目標の実現に確固たる技術的支援を提供します。

6.3 エネルギー貯蔵システムの放熱

エネルギー貯蔵システム（リチウム電池エネルギー貯蔵システムなど）は、再生可能エネルギー系統連系、電気自動車、マイクログリッド、データセンターなどで重要な役割を果たしています。これらの効率的な運用は、効果的な熱管理にかかっています。リチウム電池は、充放電プロセス中に大量の熱を発生します。熱が適切に放散されないと、性能低下、安全上の問題、さらには熱暴走につながる可能性があります。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導性、適度な熱膨張係数、優れた機械的特性により、特に高電力密度と高信頼性のシナリオにおいて、エネルギー貯蔵システムの放熱に重要な材料となっています。以下は、リチウム電池エネルギー貯蔵システムの熱管理の課題、エネルギー貯蔵バッテリーの放熱におけるタングステン銅ヒートシンクの応用、およびエネルギー貯蔵システムの性能向上におけるその役割の詳細な分析です。

6.3.1 リチウム電池エネルギー貯蔵システムの熱管理の課題

リチウム電池エネルギー貯蔵システムは、高充放電率、急速充電、または極端な環境（高温または低温など）で動作している場合、電池内部の化学反応と抵抗熱によって著しい熱蓄積が発生し、熱管理が多くの課題に直面します。まず、熱流束密度が高いため、放熱材料は優れた熱伝導性を持ち、電池またはモジュールで発生した熱をヒートシンクにすばやく伝達し、高温による電極材料の劣化や電解質の分解を防ぐために電池の動作温度を最適な範囲に維持する必要があります。次に、熱膨張係数は電池コンポーネント（電極材料やパッケージ基板など）と一致している必要があります。これにより、特に頻繁な充放電シナリオで熱サイクルによって引き起こされる機械的ストレスが軽減され、電池の変形やパッケージの破損を防ぐことができます。

3 番目に、エネルギー貯蔵システムは複雑な環境（高温多湿、塩水噴霧、振動など）で稼働することが多く、長期信頼性を確保するために放熱材料には耐腐食性、耐高温性、機械的強度が求められます。4 番目に、小型化と高エネルギー密度のトレンドにより、コンパクトなバッテ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

リー モジュール レイアウトに適応するために、放熱材料は薄型設計と複雑な構造（マイクロチャンネルやヒートシンクなど）をサポートする必要があります。5 番目に、放熱ソリューションは軽量と費用対効果の両方を考慮し、大規模エネルギー貯蔵プロジェクト（グリッドレベルのエネルギー貯蔵や電気自動車など）の展開に適したものでなければなりません。最後に、熱管理によって温度均一性を確保し、バッテリー モジュール内の局所的な過熱による熱暴走を回避してシステムの安全性を確保する必要があります。従来の放熱材料（アルミニウムや銅など）は、熱膨張係数の不一致や重量の重さにより、リチウム電池エネルギー貯蔵システムのニーズを完全に満たすことが難しく、高性能の放熱ソリューションが緊急に必要とされています。

6.3.2 エネルギー貯蔵電池の放熱におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

タングステン銅ヒートシンクは、タングステンと銅の比率（W50Cu50 と W90Cu10 など）を調整し、粉末冶金、溶融浸透、熱間静水圧プレス、3D プリントなどのプロセスを組み合わせることで、リチウム電池エネルギー貯蔵システムの放熱管理に広く使用されています。バッテリーモジュールでは、W60Cu40 と W70Cu30 が放熱基板またはヒートシンクパッドとして使用され、バッテリーセルまたはモジュールから発生する熱を効率的に伝導し、バッテリーパッケージング材料（アルミニウムプラスチックフィルムやセラミック基板など）との整合性を保ち、熱応力を低減します。これらは溶融浸透法または放電プラズマ焼結法で製造されます。

微細構造が緻密で、表面にはニッケルメッキまたはクロムメッキが施されており、耐湿性、耐熱性、耐腐食性を高めているため、屋外のエネルギー貯蔵発電所や電気自動車用途に適しています。高出力密度モジュールでは、W50Cu50 は高い熱伝導率と導電性、放熱性、過熱防止のため、急速充電用途に使用されています。粉末冶金の生産コストは中程度で、大規模量産に適しています。高信頼性用途（グリッドレベルのエネルギー貯蔵など）では、W80Cu20 と W90Cu10 が主要モジュールの放熱に使用されています。

熱膨張係数はセラミックや電極材料に近い。熱間静水圧プレス加工により、高密度、耐高温・耐振動性、電池寿命の延長を実現。タングステン銅ヒートシンクは、3D プリント技術を用いてマイクロチャンネルやヒートシンク構造を作製し、液体冷却や空冷システムと組み合わせることで、熱流路を最適化し、放熱効率を向上させ、コンパクトなモジュール設計にも適応できる。応用事例としては、電気自動車用バッテリーモジュールにおける W60Cu40 は急速充電時の温度安定性を維持し、サイクル寿命を延ばす。分散型エネルギー貯蔵発電所における W70Cu30 は、湿熱腐食に強く、長期運用をサポートする。データセンターのバックアップ電源バッテリーにおける W80Cu20 は、振動や高負荷に強く、信頼性が高い。タングステン銅ヒートシンクは、精密加工により薄型化や複雑な形状にも対応し、微量のグラフェンを添加することで熱伝導性をさらに向上させ、エネルギー貯蔵システムの多様なニーズを満たす。

6.3.3 エネルギー貯蔵システムの性能向上におけるタングステン銅ヒートシンクの役割

タングステン銅ヒートシンクは、熱管理の最適化、信頼性の向上、効率的な運用のサポートに

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

より、エネルギー貯蔵システムの性能を大幅に向上させます。その役割は、以下の側面に反映されています。

まず、高い熱伝導率により効率的な熱伝導ネットワークが形成され、バッテリーセルまたはモジュールの熱がラジエーターに素早く伝導され、バッテリーの動作温度が下がり、高温による容量減衰と内部抵抗の増加が抑えられ、充放電効率とサイクル寿命が向上し、電気自動車用バッテリーのサイクル数が延長され、交換コストが削減されます。次に、適度な熱膨張係数がバッテリー構成部品にマッチし、熱サイクルによる機械的ストレスが軽減され、パッケージの割れや電極の損傷を防ぎ、特に充放電が頻繁なグリッドエネルギー貯蔵用途において、モジュールの長期安定性が向上します。

第三に、高い導電性により電磁干渉が低減し、バッテリー管理システム（BMS）の信号伝送がサポートされ、充放電制御精度が最適化され、システム全体の効率が向上します。第四に、タングステン銅ヒートシンクの優れた機械的強度と耐腐食性により、屋外のエネルギー貯蔵発電所や電気自動車の過酷な条件など、高温、高湿度、塩水噴霧、振動環境でヒートシンクの構造的完全性が確保され、メンテナンス要件が軽減され、システムの信頼性が向上します。第五に、精密加工と 3D 印刷技術により、マイクロチャネル、薄型、またはカスタマイズされた設計がサポートされ、放熱効率と温度均一性が向上し、熱暴走のリスクが軽減され、システムの安全性が確保され、高エネルギー密度モジュールの小型化要件に適応できます。

第六に、タングステン銅ヒートシンクのカスタマイズ機能により、さまざまな用途（急速充電、長寿命エネルギー貯蔵など）に応じて構成比率を調整し、コスト最適化プロセス（粉末冶金、溶融浸透など）を組み合わせることで、エネルギー貯蔵システムの大規模展開をサポートし、システムコストを削減できます。さらに、微量添加剤（グラフェンなど）や放電プラズマ焼結などのプロセスにより、微細構造が改良され、熱伝導率と靱性がさらに向上し、固体電池や高レート電池などの次世代エネルギー貯蔵技術のニーズを満たします。これらの機能により、タングステン銅ヒートシンクはエネルギー貯蔵システムの効率、安全性、経済性の向上を促進し、再生可能エネルギーの系統連系、電気自動車の普及、スマートグリッドの発展に重要な技術サポートを提供し、世界のエネルギー転換とカーボンニュートラルの目標達成に貢献しました。



CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Heat Sinks Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Heat Sinks

Tungsten copper heat sinks are composite materials composed of a tungsten matrix infiltrated with copper. They combine the high strength and high melting point of tungsten with the excellent thermal conductivity of copper. By adjusting the ratio of tungsten to copper, the coefficient of thermal expansion (CTE) can be tailored to match materials such as ceramics, semiconductors, or metals.

2. Features of Tungsten Copper Heat Sinks

High Thermal Conductivity: Efficient heat transfer ensures stable operation of electronic devices

Excellent CTE Matching: Customizable CTE to match a wide range of packaging materials

Customizable Design: Available in various thicknesses, dimensions, plating, and surface finishes

3. Typical Applications of Tungsten Copper Heat Sinks

Heat sink substrates for laser diodes and modules

Baseplates for IGBT and power modules

Thermal management components in microwave/RF packaging

Cooling solutions in aerospace electronic systems

4. Typical Properties of Tungsten Copper Heat Sinks

Grade	Tungsten Content (Wt%)	Copper Content (Wt%)	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/m • K at 25° C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
W90Cu10	90±1	Balance	17.0	180-190	6.5
W85Cu15	85±1	Balance	16.4	190-200	7.0
W80Cu20	80±1	Balance	15.6	200-210	8.3
W75Cu25	75±1	Balance	14.9	220-230	9.0
W50Cu50	50±1	Balance	12.2	310-340	12.5

4. Production Method of Tungsten Copper Heat Sinks

Tungsten copper heat sinks are primarily manufactured using the infiltration method, where a porous tungsten skeleton serves as the base structure and molten copper is infiltrated at high temperatures to form a dense composite. For high-precision applications, additional machining or surface treatment processes may be required to ensure dimensional accuracy and surface smoothness of the thermal interface, meeting the stringent requirements of electronic device assembly tolerances and thermal contact performance.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第7章：航空宇宙分野におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

7.1 航空機電子機器の放熱

航空宇宙分野の航空機電子機器（アビオニクスシステム、レーダー、ナビゲーションシステム、制御モジュールなど）は、高性能コンピューティング、高電力動作、および過酷な環境（高高度、急激な温度差、振動、放射線など）下で動作します。放熱管理は、機器の性能、信頼性、および寿命を確保するための鍵となります。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、優れた機械的特性、および耐環境性により、特に高信頼性、軽量、高性能のシナリオにおいて、航空機電子機器の放熱の中核材料となっています。以下は、複雑な環境におけるアビオニクス機器の放熱問題、航空機アビオニクスシステムにおけるタングステン銅ヒートシンクの適用、およびそれらが航空分野の軽量および高性能材料の要件をどのように満たしているかについての詳細な分析です。

7.1.1 複雑な環境における航空電子機器の放熱問題

アビオニクス機器（略してアビオニクス）は、航空機、ドローン、宇宙船における航法、通信、レーダー探知、飛行制御、データ処理といった重要な機能を担っています。高度な集積度と高い電力密度により、放熱要件が大幅に増加し、複雑な動作環境によって熱管理の問題はさらに深刻化しています。

まず、高い熱流束密度が主な課題です。航空電子機器に搭載されている高性能プロセッサ、RFモジュール、パワーアンプは、動作中に大量の熱を発生します。放熱が不十分だと、チップやモジュールの温度が上昇しすぎて、性能低下、信号歪み、さらにはシステム障害につながる可能性があります。次に、熱膨張係数の整合が非常に重要です。航空電子機器では、シリコンチップ、ガリウムヒ素デバイス、またはセラミック基板（窒化アルミニウム、酸化アルミニウムなど）が使用されることが多く、放熱材料はこれらに適合している必要があります。これにより、熱サイクル（-55°C～125°C以上）による熱応力を低減し、接合部の亀裂、溶接部の剥離、チップの反りを防ぐことができます。第三に、航空環境は高度が高く気圧が低い（酸素が薄く、酸化しやすい）、温度差が激しい（昼夜や離着陸の温度差が大きい）、湿度が高い（雲や海洋環境）、振動が激しい（離陸、乱気流、超音速飛行）、放射線（高高度宇宙線）など、極めて複雑です。放熱材料は、耐腐食性、耐高温性、機械的強度、耐放射線性を備え、長期信頼性を確保する必要があります。第四に、高い導電性は航空電子機器の重要な要件です。放熱材料は、高周波信号伝送をサポートし、電磁干渉を低減し、レーダーや通信システムの信号整合性を確保する必要があります。第五に、軽量化は航空分野における中核的な要件です。

航空機の燃費や積載量を向上させるために、放熱材料は高性能を前提に、可能な限り軽量化する必要があります。第六に、小型化と高集積化の傾向により、小型航空電子機器に適応するために、薄型設計、精密加工、複雑な構造（マイクロチャネルやヒートシンクなど）をサポートする放熱材料が求められています。モジュールレイアウト。最後に、航空電子機器は厳格な航空規格（DO-160、MIL-STD-810 など）を満たす必要があり、放熱材料の信頼性、耐久性、一貫性に極めて高い要求が課せられます。従来の放熱材料（純銅やアルミニウムなど）は、熱

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

膨張係数が高く、重量が重く、耐環境性が不十分なため、航空電子機器の放熱ニーズを完全に満たすことが困難です。高性能で軽量の放熱ソリューションが緊急に求められています。

7.1.2 航空機航空電子機器システムにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用

タングステン銅ヒートシンクは、タングステンと銅の比率（W50Cu50 と W90Cu10 など）を調整し、粉末冶金、溶融浸透、熱間静水圧プレス、放電プラズマ焼結、3D プリントなどの高度なプロセスを組み合わせることで、航空機の航空電子システムのレーダーモジュール、通信機器、飛行制御ユニット、電力増幅器、センサーの放熱管理に広く使用されています。レーダーシステムでは、W70Cu30 と W80Cu20 が RF モジュールと電力増幅器の放熱基板として使用されています。これらは熱を効率的に伝導し、熱膨張係数がガリウムヒ素チップまたは窒化アルミニウム基板と一致しているため、熱応力が軽減されます。これらは熱間静水圧プレスまたは放電プラズマ焼結によって製造され、緻密な微細構造と高い導電性を備えているため、電磁干渉が低減し、高周波信号の安定性が確保されます。表面のニッケルまたはクロムコーティングにより、湿気、熱、塩水噴霧腐食に対する耐性が向上し、高地や海洋環境に適しています。

通信機器分野では、高性能プロセッサや光電子モジュールの放熱に W60Cu40 が使用されています。高い熱伝導性と迅速な放熱性を備え、信号伝送効率を維持し、溶融浸透による製造コストの抑制に加え、精密加工による薄型設計により、コンパクトな航空電子機器キャビンレイアウトにも適応します。飛行制御ユニット分野では、W90Cu10 がキーチップのヒートシンクとして使用されています。熱膨張係数はシリコンやセラミックに近いため、高温や強い振動にも耐えられます。熱間静水圧プレス加工により高密度化を実現し、高い信頼性要件を満たしています。軍用機やドローンにも使用されています。

パワーアンプでは、W50Cu50 が高出力用途に採用されています。高い熱伝導性と導電性を持つため、熱を素早く放散し、過熱による故障を防止します。粉末冶金法は大量生産に適しています。センサーモジュールでは、W70Cu30 は 3D プリント技術を用いてマイクロチャネル構造を作製し、液体冷却システムと組み合わせることで熱流路を最適化し、放熱効率を向上させ、耐放射線性と耐振動性を備えています。宇宙船や高高度ドローンに適しています。

応用例: W80Cu20 は軍用航空機のレーダーシステムに使用され、高高度の低温と振動に耐え、検出精度を確保します。W60Cu40 は民間航空通信モジュールに使用され、湿熱腐食を抑制し、メンテナンスサイクルを延長します。W70Cu30 はドローン制御ユニットに使用され、小型設計をサポートし、耐久性を向上させます。タングステン銅ヒートシンクは、微量のグラフェンを添加することで熱伝導率を向上させることができ、精密加工により複雑な形状に加工することで、航空電子機器システムの多様なニーズに対応できます。これらの応用例は、タングステン銅ヒートシンクが航空電子機器の放熱において重要な役割を果たすことを示しています。

7.1.3 タングステン銅ヒートシンクは航空分野における軽量かつ高性能の要件を満たしています

タングステン銅ヒートシンクは、優れた材料特性と高度なプロセスにより、航空分野の軽量か

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

つ高性能な要件に理想的なソリューションを提供します。その満足メカニズムには次の側面が含まれます。第一に、高い熱伝導率により効率的な熱伝導ネットワークが形成され、航空電子機器の熱がラジエーターに素早く伝導され、チップまたはモジュールの動作温度が低下し、レーダー、通信、制御システムの高性能動作が維持され、熱性能の低下が抑えられ、飛行の安全性が確保されます。第二に、適度な熱膨張係数がシリコンチップ、ガリウムヒ素デバイス、またはセラミック基板に適合し、熱サイクルによる熱応力が軽減され、インターフェースの亀裂やチップの故障を防ぎ、極端な温度差環境における航空電子機器の長期信頼性を高め、航空規格（MIL-STD-810 など）を満たしています。

第三に、高い導電性により、電磁干渉と信号損失が減少し、高周波信号伝送がサポートされ、RF モジュールと通信機器の性能が最適化され、信号の整合性とデータ処理効率が確保され、高精度の航空電子工学アプリケーションに適しています。第4に、優れた機械的強度と靱性により、超音速航空機や宇宙船の過酷な条件など、強い振動、衝撃、高高度低圧環境でのヒートシンクの構造的完全性が確保されます。耐食性と耐高温性は、ニッケルまたはクロムコーティングによってさらに強化され、高湿度、塩水噴霧、放射線環境に適応し、機器の寿命を延ばし、メンテナンスコストを削減します。第5に、タングステン銅ヒートシンクの密度（純銅より低い）は、高性能を確保しながら重量を軽減し、コンポーネント比率（高タングステングレードの W90Cu10 など）を最適化すると密度がさらに低下します。薄型設計と精密加工を組み合わせることで、航空分野の軽量化ニーズを満たし、燃費や積載量を向上させます。

第六に、高度なプロセスが高性能とカスタマイズをサポートします。熱間静水圧プレスと放電プラズマ焼結により、高密度で微細な微細構造を持つヒートシンクを製造し、熱伝導率と強度を向上させます。3D プリント技術は、マイクロチャネルや複雑な放熱構造を実現し、熱流路を最適化して放熱効率を高め、小型化された航空電子モジュールに適します。微量添加剤（グラフェンなど）は微細構造を改良し、熱伝導率と靱性をさらに向上させます。第七に、タングステン銅ヒートシンクのカスタマイズ機能により、さまざまな航空電子機器（レーダーの高伝導率や制御ユニットの高信頼性など）に応じてコンポーネント比率を調整できます。また、コストを最適化したプロセス（粉末冶金や溶融浸透など）と組み合わせることで、大規模生産をサポートし、性能と経済性のバランスをとることができます。さらに、タングステン銅ヒートシンクは、厳格な品質管理（密度、微細構造、性能試験など）を通じて一貫性を確保し、厳しい航空宇宙基準を満たし、ドローン、商用航空機、宇宙船の高性能化を促進します。これらのメカニズムを通じて、タングステン銅ヒートシンクは、軽量、高性能、信頼性の面で航空電子機器をしっかりと支え、航空宇宙技術の進歩に貢献します。

7.2 衛星および宇宙船の熱制御

衛星や宇宙船は過酷な宇宙環境で運用されるため、熱制御システムは電子機器、エネルギーシステムの安定した動作、そして全体的な性能を確保するための鍵となります。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、優れた機械的特性、そして耐環境性を備えており、特に高電力密度、複雑な環境、そして高い信頼性が求められる状況において、熱制御システムに欠かせない材料となっています。以下では、衛星熱制御システムの動作原理と要件、衛星電子機器およびエネルギーシステムにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

そして宇宙船の長期安定運用を確保する上での重要性について詳細に分析します。

7.2.1 衛星熱制御システムの動作原理と要件

衛星熱制御システムは、受動および能動的な熱管理技術を用いて衛星内外の温度を制御し、電子機器、エネルギーシステム、および構造部品を適切な動作範囲（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 、一部の機器はさらに狭い範囲）に維持します。その動作原理は、熱伝導（ヒートシンク、ヒートパイプなど）を利用して高出力部品（プロセッサ、パワーアンプ、バッテリーなど）の熱を放熱面へ伝達すること、熱放射（ヒートシンク、コーティングなど）によって宇宙空間へ熱を放出すること、そして能動制御（電気ヒーター、冷蔵庫など）を組み合わせることで極端な温度差に対応することなどです。

熱制御システムは、以下の要件を満たす必要があります。第 1 に、熱をすばやく伝導し、局所的な過熱を防ぎ、高出力電子機器（RF モジュール、衛星コンピューターなど）の放熱ニーズを満たすための高い熱伝導率。第 2 に、熱膨張係数がチップ（シリコン、ガリウムヒ素など）または基板（窒化アルミニウム、酸化アルミニウムなど）と一致して、熱サイクルによる応力を軽減し、インターフェースの亀裂やデバイスの故障を回避する必要があります。第 3 に、軽量化を実現し、打ち上げコストを削減し、衛星のペイロード容量を増やすために、材料の密度が低くなければなりません。第 4 に、真空（低圧、対流による放熱なし）、極端な温度差（軌道の陰陽の周期的な切り替え）、高放射線（宇宙線、太陽風）、微小隕石の衝突など、極端な環境に耐える能力が重要です。熱制御材料は、耐腐食性、耐高温性、耐放射線性、および高い機械的強度を備えている必要があります。第五に、高い導電性は高周波信号伝送をサポートし、電磁干渉を低減し、通信およびナビゲーションシステムの性能を確保します。第六に、熱制御部品は精密加工、薄型化、複雑な構造（マイクロチャネル、ヒートシンクなど）をサポートし、高集積設計に適応する必要があります。最後に、熱制御システムは航空宇宙規格（ECSS、MIL-STD など）を満たし、長期信頼性（メンテナンスなしで 10～15 年）を確保する必要があります。従来の材料（アルミニウムや銅など）は、熱膨張係数の不一致、高密度、または耐放射線性の不足により、衛星の熱制御ニーズを完全に満たすことが困難であり、高性能な熱制御材料が緊急に必要とされています。

7.2.2 衛星電子機器におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

タングステン銅ヒートシンクは、タングステンと銅の比率（W50Cu50 と W90Cu10 など）を調整し、粉末冶金、溶融浸透、熱間静水圧プレス、放電プラズマ焼結、3D プリントなどのプロセスを組み合わせることで、オンボードコンピューター、RF モジュール、電力増幅器、センサー、ナビゲーションシステムを含む衛星電子機器の放熱管理に広く使用されています。

RF モジュールでは、W70Cu30 と W80Cu20 が放熱基板として使用され、パワーアンプからの熱を効率的に伝導します。熱膨張係数は、ガリウムヒ素チップまたは窒化アルミニウム基板の熱膨張係数と一致し、熱応力を低減します。熱間静水圧プレスプロセスにより高密度が確保されます。高い導電性により電磁干渉が低減し、高周波通信の安定性が確保されます。表面のニッケルまたはクロムコーティングは、真空および放射線耐性を高め、静止軌道（GEO）衛星に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

適しています。衛星コンピューターでは、W60Cu40 が高性能プロセッサの放熱に使用され、熱伝導が速く、溶融浸透による製造コストが適度で、精密加工により薄型設計がサポートされ、コンパクトなレイアウトに適応し、振動や温度差に強いです。低軌道（LEO）リモートセンシング衛星に使用されます。

ナビゲーションシステムでは、W90Cu10 がキーチップの放熱パッドとして使用されています。その熱膨張係数はシリコンに近いです。放電プラズマ焼結法で作製された微細構造は均一で、高温と放射線に強く、高精度の測位を保証し、全地球航法衛星システムに適しています。センサーモジュールでは、W70Cu30 は 3D プリントでマイクロチャネル構造を作製し、ヒートパイプまたは液体冷却と組み合わせて熱流路を最適化し、微小隕石の衝突に耐性があり、科学探査衛星に使用されています。応用例としては、通信衛星の無線周波数モジュールの W80Cu20 が高高度放射線に耐性があり、信号の安定性を維持します。CubeSat のオンボードコンピューターの W60Cu40 が小型放熱をサポートします。リモートセンシング衛星センサーの W70Cu30 は温度差と振動に強く、寿命が長くなります。タングステン銅ヒートシンクは、微量のグラフェンを追加することで熱伝導率を向上させ、高出力電子機器のニーズを満たします。

7.2.3 衛星エネルギーシステムにおけるタングステン銅ヒートシンクの応用

衛星エネルギーシステム（太陽電池パネル、リチウム電池、電源管理モジュールなど）は、衛星運用の核心であり、その放熱管理はエネルギー変換効率と寿命に直接影響を及ぼします。タングステン銅ヒートシンクは、エネルギーシステムの放熱基板または放熱パッドとして使用され、熱伝導と温度制御を最適化します。太陽電池パネルでは、光電変換によって発生した熱を速やかに伝導する放熱基板として W70Cu30 が使用されています。熱膨張係数はシリコンベースの電池と一致するため、熱応力が低減します。熱間静水圧プレスプロセスは、高密度、耐真空性、耐放射線性を確保し、電池効率を向上させます。表面コーティングは耐腐食性を高め、深宇宙探査機に適しています。リチウム電池モジュールでは、電池セルまたはモジュールの放熱に W60Cu40 が使用され、充放電熱を効率的に伝導します。溶融浸透法は製造コストが比較的安く、薄型設計によりコンパクトなレイアウトに適応し、振動や温度差に強く、熱暴走を防止します。通信衛星電源システムに使用されます。電力管理モジュールでは、DC-DC コンバータや電力レギュレータの放熱に W80Cu20 と W90Cu10 が使用されています。熱膨張係数はセラミック基板に近いです。放電プラズマ焼結法で作製された微細構造は均一です。高い導電性が電磁干渉を低減します。高温や放射線に強く、科学衛星に適しています。3D プリント技術はマイクロチャネル構造を作製し、ヒートパイプと組み合わせて熱流を最適化し、放熱効率を高めることができます。応用例としては、光電効率を維持するための GEO 衛星太陽電池パネルの W70Cu30、急速充放電の安全性を確保するための LEO 衛星リチウム電池の W60Cu40、極端な温度差に耐え、ミッション寿命を延ばすための深宇宙探査機電源モジュールの W80Cu20 などがあります。タングステン銅ヒートシンクのカスタマイズされた設計は、エネルギーシステムの多様な放熱ニーズを満たしています。

7.2.4 宇宙船の長期安定運用を保証するためのタングステン銅ヒートシンクの重要性

タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱管理、材料特性、およびプロセスの利点により、宇

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

宇宙船の長期安定動作に重要なサポートを提供します。その重要性は次の側面に反映されています。まず、高い熱伝導率により効率的な熱伝導ネットワークが形成され、電子機器やエネルギーシステムからラジエーターに熱をすばやく伝導し、チップ、バッテリー、またはモジュールの動作温度が下がり、熱性能の低下を防ぎ、RF モジュール、オンボードコンピューター、および太陽電池の効率的な動作を確保し、ミッション寿命を延ばします。次に、適度な熱膨張係数がチップ、基板、またはバッテリー材料と一致し、熱サイクルによって引き起こされる熱応力が軽減され、インターフェースの亀裂やデバイスの故障を防ぎ、軌道温度差（-150℃～150℃）における宇宙船の信頼性を高め、10～15 年間のメンテナンスフリーの要件を満たします。

第三に、高い導電性は電磁干渉と信号損失を低減し、高周波通信およびナビゲーションシステムの性能をサポートし、データ伝送と測位精度を確保し、深宇宙探査および科学ミッションの成功を促進します。第四に、優れた機械的強度と靱性は、真空、振動、微小隕石の衝突または放射線環境におけるヒートシンクの構造的完全性を保証します。耐食性と耐高温性はコーティングによって強化され、高湿度、塩水噴霧または宇宙線に適応し、性能低下を低減し、GEO、LEO または深宇宙ミッションに適しています。第五に、タングステン銅ヒートシンクの密度は純銅よりも低く、最適化された構成（高タングステングレードなど）によりさらに軽量化されます。薄型設計と精密加工を組み合わせることで、宇宙船の軽量要件を満たし、打ち上げコストを削減し、積載量を向上させます。第六に、高度なプロセスが高性能とカスタマイズをサポートします。例えば、熱間静水圧プレスと放電プラズマ焼結法を用いて高密度ヒートシンクを作製し、熱伝導率と強度を向上させます。3D プリンティングは複雑な放熱構造を実現し、熱流路を最適化します。微量添加剤（グラフェンなど）は熱伝導率と靱性を向上させます。第七に、タングステン銅ヒートシンクのカスタマイズ機能は、さまざまなシステム（電子機器の高伝導率やエネルギーシステムの高信頼性など）に応じて組成を調整し、粉末冶金などのコスト最適化プロセスと組み合わせることで、大規模生産をサポートし、性能と経済性のバランスをとります。第八に、厳格な品質管理（密度や微細構造試験など）により、一貫性が確保され、航空宇宙基準を満たし、通信衛星、航法衛星、科学衛星の長期安定運用を促進します。これらのメカニズムを通じて、タングステン銅ヒートシンクは、熱管理、信頼性、軽量化、性能最適化の面で宇宙船に確固たる保証を提供し、航空宇宙技術の継続的な発展に貢献します。

7.3 特殊環境におけるタングステン銅ヒートシンクの性能

高温、低温、高真空、強い放射線、激しい振動など、航空宇宙分野の特殊な環境では、ヒートシンク材料の性能に対する要求は非常に高くなります。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、優れた機械的特性、耐環境性により、これらの過酷な条件下でも優れた性能を発揮し、衛星、宇宙船、航空機の熱制御システムに最適です。タングステン銅ヒートシンクは、タングステンと銅の比率（W50Cu50 と W90Cu10 など）を調整し、高度なプロセス（粉末冶金、溶融浸透、熱間静水圧プレス、放電プラズマ焼結、3D プリントなど）を使用することで、高温および低温環境で安定した熱伝導率、機械的強度、信頼性を維持します。以下は、高温と低温がタングステン銅ヒートシンクの性能に及ぼす影響と、それらの対応

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

能力に関する詳細な分析です。

7.3.1 タングステン銅ヒートシンクに対する高温の影響

航空宇宙機器（衛星 RF モジュール、宇宙船推進システム、航空機エンジン制御ユニットなど）が動作中、または太陽光や高速飛行時の摩擦熱などの高温環境に晒されている場合、温度は数百℃（例えば 200℃～600℃、場所によってはそれ以上）に達する可能性があり、ヒートシンク材料の性能に大きな影響を与えます。タングステン銅ヒートシンクの高温における性能と対応能力には、以下の側面があります。

まず、タングステン銅ヒートシンクの高い熱伝導率は、高温でも安定しています。タングステンの高融点（約 3422℃）と銅の優れた熱伝導率は互いに補完し合い、銅相は連続した熱伝導ネットワークを形成します。タングステン銅（W70Cu30、W80Cu20 など）は高温下でも効率的に熱を伝導し、電子機器やエネルギーシステムの過熱を防止します。高温下では銅相の熱伝導率はわずかに低下する場合がありますが、タングステン骨格の安定性により、全体的な熱伝導率は確実に保たれ、高出力 RF アンプやオンボードプロセッサの放熱に適しています。次に、熱膨張係数は高温下でも適度な値を維持します。タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数（ $6\sim 12\times 10^{-6}/\text{K}$ ）は、シリコンチップ（ $2.6\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、ガリウムヒ素（ $5.7\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、またはセラミック基板（窒化アルミニウムなど、 $4.5\times 10^{-6}/\text{K}$ ）の熱膨張係数に近いです。高温でも膨張挙動は一定で、熱応力を低減し、界面の亀裂や溶接剥離を防ぎ、航空電子機器や衛星モジュールの長期信頼性を確保します。W90Cu10 などの高タングステングレードは、高温での熱膨張係数が低く、特にセラミック基板とのマッチングに適しています。

第三に、高温での機械的特性が優れています。タングステンの高強度・高硬度は、タングステン銅ヒートシンクに優れた変形抵抗を与えます。銅相の靱性により高温軟化効果が緩和され、高温でも構造的完全性を維持し、振動や衝撃に強く、航空機エンジン制御ユニットや宇宙船推進モジュールに適しています。高温では銅相がわずかに軟化することがありますが、タングステン骨格の支持作用により全体の強度が確保されます。W80Cu20 と W90Cu10 は特に高温で安定しています。第四に、プロセスの最適化により耐酸化性と耐腐食性が向上します。高温、高高度、真空環境では銅相の酸化が誘発され、熱伝導率と電気伝導性が低下する可能性があります。タングステン銅ヒートシンクは、真空焼結または水素雰囲気下で酸素含有量を低減し、表面にニッケルまたはクロムめっきを施して保護層を形成することで、耐酸化性と耐腐食性を大幅に向上させ、衛星の高高度放射線環境や海洋宇宙打ち上げ環境にも適応します。電気めっきプロセスによりコーティングの均一性が最適化され、高温下でも長期にわたる保護性能を確保します。

第五に、微細構造の安定性は高温性能の鍵です。タングステンと銅は混和せず、界面は機械的に連結されています。高温でも明らかな相変化や粒成長は見られず、微細で均一な微細構造（例えば、タングステン粒子 $2\sim 4\mu\text{m}$ ）が維持されます。放電プラズマ焼結法や熱間静水圧プレス法は、密度（気孔率 $<0.5\%$ ）をさらに向上させ、高温での気孔拡大や亀裂発生を低減し、熱伝導率と機械的特性を向上させ、深宇宙探査機の長期運用に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応用例としては、静止衛星 RF モジュールにおける W80Cu20 の太陽放射による周期的な高温に耐え、放熱効率を維持すること、宇宙船の推進制御ユニットにおける W70Cu30 の高温振動への耐性と安定した動作の確保、軍用航空機レーダーシステムにおける W60Cu40 の液体冷却マイクロチャネルとの組み合わせによる高速飛行時の摩擦熱への対応などが挙げられます。これらの特性により、タングステン銅ヒートシンクは高温環境における航空宇宙の熱制御において信頼性の高い選択肢となります。

7.3.2 低温によるタングステン銅ヒートシンクへの影響

航空宇宙機器は、高高度、深宇宙、または極地ミッションにおいて、極低温環境（例えば、人工衛星や月探査機の暗部など、 $-150^{\circ}\text{C}\sim-270^{\circ}\text{C}$ ）にしばしばさらされます。低温は、材料の熱伝導率、機械特性、および界面安定性に課題をもたらします。タングステン銅ヒートシンクの低温における性能と対応能力には、以下の側面があります。

まず、低温での熱伝導率が大幅に向上します。銅相の熱伝導率は低温で向上し（電子散乱の減少による）、タングステン銅ヒートシンク（W50Cu50、W60Cu40 など）全体の熱伝導率は室温よりも向上します。これにより、電子機器やバッテリーからの熱を効率的に伝導し、局所的な過熱を防ぎ、衛星搭載コンピューターやナビゲーションシステムの性能を維持します。タングステン骨格の安定性により、低温でも熱ネットワークが完全であり、高出力機器の放熱に適しています。第二に、低温でも熱膨張係数は適度な値を維持します。タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数は温度低下に伴いわずかに低下しますが、シリコン、ガリウムヒ素、またはセラミック基板と同等であり、低温熱サイクル（衛星軌道の正負の切り替えなど）による熱応力を低減し、インターフェースの割れやチップの反りを防止します。W90Cu10 タングステン銅ヒートシンクはタングステン含有量が高く、低温での熱膨張係数はセラミックスと同等です。高信頼性ナビゲーションモジュールに適しており、機器の安定した動作を保証します。

第三に、低温下でも優れた機械的特性を維持します。タングステンは高い硬度と強度を有し、低温下でも安定した特性を維持します。銅相の靱性はわずかに低下するものの、脆化の影響を緩和するには十分であり、タングステン銅ヒートシンク（W80Cu20 など）は低温下でも振動、衝撃、微小隕石の衝突に耐性があり、宇宙船や高高度ドローンに適しています。タングステン骨格の支持構造により、低温下でも材料が破損せず、構造の完全性を維持します。第四に、界面接合の安定性が低温性能の鍵となります。タングステンと銅の機械的な接合界面は低温でも著しく弱まらず、微細構造は均一に保たれ、放電プラズマ焼結や熱間静水圧プレスによる高密度化により、気孔や亀裂の発生リスクが低減します。低温下では銅相がわずかに収縮する可能性があります、タングステン骨格の剛性により界面の分離が効果的に抑制され、熱伝導性と信頼性が確保されるため、深宇宙探知センサーの放熱に適しています。

第五に、低温環境下でも優れた耐環境性を発揮します。低温・高真空環境（月探査や火星探査など）では、材料の揮発や表面劣化が生じる可能性があります。タングステン銅ヒートシンクは、真空焼結により揮発性不純物を低減し、ニッケルまたはクロムコーティングにより表面脆

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

化や放射線損傷を防ぎます。宇宙線や真空低圧にも耐性があり、極寒環境にも適応します。3D プリントされたマイクロチャネル構造は、熱流をさらに最適化し、ヒートパイプを組み合わせることで温度均一性を維持します。第六に、プロセスの最適化は低温性能を向上させます。タングステン銅ヒートシンクは、微量元素（グラフェンなど）を添加することで低温熱伝導率を向上させ、また放電プラズマ焼結法を用いてタングステン粒子（ $<2\mu\text{m}$ ）を微細化することで靱性と強度を向上させます。精密機械加工は薄型設計をサポートし、重量を軽減し、宇宙船の軽量化要件を満たします。品質管理（SEM 微細構造分析や密度試験など）により、材料が低温でも安定した性能を発揮し、航空宇宙規格（ECSS など）を満たすことが保証されます。

応用例としては、W70Cu30 は LEO 衛星搭載コンピュータに使用され、軌道の暗部における低温にも耐え、安定したデータ処理を実現します。W80Cu20 は月探査センサーに使用され、極寒や放射線にも耐え、放熱効率を維持します。W60Cu40 は高高度 UAV 通信モジュールに使用され、マイクロチャネル設計と組み合わせることで、低温の高高度環境にも対応します。これらの特性により、タングステン銅ヒートシンクは低温環境下における航空宇宙分野に信頼性の高い熱制御サポートを提供します。

7.3.3 タングステン銅ヒートシンクへの放射線の影響

航空宇宙機器は、高高度または深宇宙環境において、長期間にわたり宇宙放射線（太陽風、ガンマ線、陽子、重イオンなど）に曝露されます。放射線はタングステン銅ヒートシンクの性能に様々な影響を及ぼす可能性がありますが、その優れた材料特性により、放射線環境下でも安定した性能を発揮します。以下では、タングステン銅ヒートシンクへの放射線の影響とその耐性について分析します。

まず、放射線は材料の微細構造に格子欠陥（空孔、格子間原子）や転位などの損傷を引き起こし、熱伝導率や機械的特性に影響を与える可能性があります。タングステン銅ヒートシンクは、高融点のタングステン（放射線損傷に対する強い耐性）と銅（高い靱性）で構成されています。タングステン骨格は高エネルギー粒子の衝撃に効果的に抵抗し、欠陥の蓄積を低減します。銅相の延性は局所的な応力を緩和し、微細構造の完全性を維持します。W80Cu20 と W90Cu10 はタングステン含有量が多いため耐放射線性に優れており、静止軌道（GEO）衛星や深宇宙探査機に適しています。第二に、放射線は表面劣化や揮発を引き起こす可能性があり、特に真空環境では、銅相が放射線によって揮発し、熱伝導率と電気伝導率が低下する可能性があります。タングステン銅ヒートシンクは、真空焼結または水素雰囲気下で製造され、酸素や揮発性不純物の含有量を低減します。表面にはニッケルまたはクロムメッキが施され、放射線粒子を遮蔽する保護層が形成され、銅原子の揮発を防ぎ、表面性能を維持します。最適化されたコーティング厚さ（ $5\sim 10\mu\text{m}$ ）は耐久性を確保し、高放射線環境（木星探査ミッションなど）に適しています。

第三に、放射線は導電性の低下や電磁干渉の増加といった電気特性の変化を引き起こし、RF モジュールやナビゲーションシステムに影響を与える可能性があります。タングステン銅ヒートシンクの高い導電性（ $30\sim 45\% \text{ IACS}$ ）は、銅相の連続ネットワーク、放射線誘起電子散乱効果の抑制、そしてタングステン骨格の安定性によって欠陥が導電性に与える影響をさらに

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

低減しているためです。W50Cu50 と W60Cu40 は銅含有量が多いため導電性が高く、高周波通信衛星に適しています。第四に、熱膨張係数と界面結合は放射線照射下でも安定しています。タングステンと銅の機械的結合界面には化学結合がないため、放射線照射によって界面に化学変化が生じる可能性は低いです。タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数 ($6-12 \times 10^{-6}/K$) はチップまたは基板と整合しており、放射線誘起の微小応力はタングステン骨格によって吸収され、割れを防止します。放電プラズマ焼結法または熱間静水圧プレス法の高密度（気孔率 $<0.5\%$ ）は、放射線損傷の拡大経路を低減します。

応用例としては、W80Cu20 は静止軌道衛星の RF モジュールに使用され、高線量放射線への耐性を備え、放熱性と信号安定性を維持します。また、W70Cu30 は火星探査機のセンサーに使用され、重イオン放射線への耐性を備え、長期動作を保証します。タングステン銅ヒートシンクの耐放射線性は、深宇宙ミッションの熱制御において信頼性の高い選択肢となります。

7.3.4 極限環境におけるタングステン銅ヒートシンクの安定性に関する研究

航空宇宙分野における過酷な環境（高温、低温、高真空、強い放射線、振動、微小隕石の衝突など）は、タングステン銅ヒートシンクの安定性に包括的な課題をもたらします。以下は、その安定性性能を複数の側面から分析したものです。

高温安定性: タングステン銅ヒートシンクは、タングステンの高融点と銅の熱伝導性により、高温（200～600℃）においても優れた熱伝導性と機械的強度を維持します。微細構造の相変化がなく、タングステン骨格が銅相の軟化を抑制し、コーティングが酸化を防止します。W90Cu10 は宇宙船の推進モジュールに使用され、高温サイクルに耐え、安定した動作を実現します。

低温安定性: 低温（-150℃～-270℃など）では、銅相の熱伝導性が向上し、タングステン骨格が脆性破壊を防ぎ、熱膨張係数が基板と一致し、界面が強固に接合されます。W70Cu30 は、極寒に耐え、放熱効率を維持するために月探査機に使用されています。

放射線安定性: 高エネルギー粒子の照射により格子欠陥が発生する可能性がありますが、タングステンの耐放射線性と銅の靱性により欠陥の蓄積が抑制され、コーティングにより揮発や表面損傷が防止されます。W80Cu20 は、静止軌道衛星において長年にわたり耐放射線性を発揮し、性能低下は極めて少ないです。

真空安定性: 高真空環境（ 10^{-6} Pa）において、タングステン銅ヒートシンクは低揮発性不純物とコーティングによって保護され、銅相からのガス放出や劣化を防止します。3D プリントされたマイクロチャネル構造は熱流を最適化し、安定性を向上させるため、深宇宙ミッションに適しています。

振動・衝撃安定性 タングステンの高強度と銅の靱性により、タングステン銅ヒートシンクは、ロケット打ち上げなどの強い振動や微小隕石の衝突にも耐え、緻密な微細構造により亀裂の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

伝播を抑制します。W80Cu20 タングステン銅合金は、優れた高周波耐振動性を備え、UAV 航空電子機器システムに使用され、振動や衝撃に効果的に抵抗し、機器の動作を安定させ、航空電子機器の信頼性を確保します。

耐腐食性: 高湿度環境や塩水噴霧環境（海洋発射場など）では腐食が発生する可能性があります。ニッケルメッキまたはクロムコーティングにより保護層を形成し、真空焼結と組み合わせることで酸素含有量を低減し、耐腐食性を向上させます。W60Cu40 は通信衛星に使用され、湿熱腐食を抑制し、耐用年数を延ばします。

研究によると、タングステン銅ヒートシンクの安定性は、タングステンと銅の相補的な特性、高密度微細構造、そして表面保護プロセスによってもたらされています。熱間静水圧プレスと放電プラズマ焼結により耐環境性がさらに向上し、3D プリンティングにより複雑な構造をサポートすることで、多様なシナリオのニーズに対応します。安定性試験（熱サイクル試験、放射線量試験、振動試験など）は、航空宇宙規格（ECSS や MIL-STD など）に準拠しており、長期運用を保証します。

7.3.5 極限環境用タングステン銅ヒートシンクの最適化戦略

過酷な航空宇宙環境におけるタングステン銅ヒートシンクの性能をさらに向上させるには、材料設計、準備プロセス、アプリケーションの最適化に関して、以下の戦略を実施する必要があります。

- 組成最適化:** タングステンと銅の比率を特定の環境に合わせて調整します。例えば、高温および放射線安定性を高めるには高タングステングレード（W90Cu10）を使用し、低温熱伝導率と電気伝導率を向上させるには高銅グレード（W50Cu50）を使用します。グラフェンやカーボンナノチューブを微量添加することで、熱伝導率と靱性を向上させ、放射線欠陥を低減できます。
- 高度な製造技術:** スパークプラズマ焼結（SPS）は急速加熱に使用され、タングステン粒子（ $< 2 \mu\text{m}$ ）を微細化し、密度と強度を向上させ、高温および低温での安定性を強化します。熱間静水圧プレス（HIP）は多孔性を排除し、放射線および振動に対する耐性を最適化します。3D プリント（SLM または EBM）はマイクロチャネルまたはカスタマイズされた構造を準備するために使用されます。これにより、熱流効率が向上し、真空環境に適応します。
- 表面保護技術:** ニッケルメッキ、クロムメッキ、または多層コーティング（Ni/Cr/ Al_2O_3 など）を最適化することで、耐酸化性、耐腐食性、耐放射線性を向上させ、高温・真空環境における寿命を延ばします。プラズマ溶射または PVD プロセスを用いることで、コーティングの均一性と密着性を確保し、放射線誘起揮発を低減します。
- 微細構造制御:** プロセスパラメータ（焼結温度や圧力など）によってタングステン粒子径と銅相分布を制御し、界面の接合性を高め、高温軟化や低温脆化を低減します。界面活性剤として微量のニッケルまたはコバルトを添加することで、濡れ性を向上させ、高温および放射線下における界面安定性を高めます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. **熱管理統合設計:** ヒートパイプ、液体冷却、または相変化材料を組み合わせ、タングステン銅ヒートシンクの熱流路を最適化し、高温と低温での温度均一性を高めます。複雑な放熱構造（埋め込みチャネルなど）を 3D プリントして、真空環境での放熱効率を向上させ、重量を軽減し、軽量要件を満たします。
6. **環境適応性試験:** 極限環境シミュレーション試験（熱真空、放射線量、振動衝撃など）を実施し、タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率、機械特性、微細構造変化を評価し、プロセスパラメータを最適化します。オンライン監視技術（赤外線温度測定、X線探傷など）を活用することで、生産の一貫性を確保し、航空宇宙規格への適合性を確保します。
7. **コストと性能のバランス:** 大規模用途向けの低コストグレード（W60Cu40 など）の製造には、粉末冶金法または溶融浸透法を優先します。一方、高信頼性が求められる用途に対応する高性能グレード（W90Cu10 など）の製造には、熱間静水圧プレス法または 3D プリンティングに投資します。タングステン銅廃棄物のリサイクルは、原材料コストを削減し、環境に優しい製造を促進します。

応用事例としては、静止軌道衛星の高い放射線および温度差に耐えられるよう SPS および Ni/Cr コーティングによる W80Cu20 の最適化、深宇宙探知機の低温放熱性向上のための 3D プリントマイクロチャネルの活用、低軌道衛星のコスト効率を満たすための粉末冶金による W60Cu40 の最適化などが挙げられます。これらの戦略は、極限環境下におけるタングステン銅ヒートシンクの性能を向上させ、航空宇宙熱制御技術の発展を促進します。

最適化された タングステン銅ヒートシンク は、多くの分野で大きな潜在能力を発揮し、その応用範囲はさらに拡大し、利用効率も大幅に向上しました。民生用電子機器：スマートフォン、タブレットなどのデバイスにおいて、最適化されたタングステン銅ヒートシンクは放熱効率を大幅に向上させ、チップから発生する熱をより速く伝導することで、過熱による性能低下を効果的に回避します。大規模なゲームを長時間実行したり、動画編集などの高負荷タスクを実行したりしても、デバイスはスムーズな動作を維持できます。スマートウォッチやワイヤレスヘッドホンなどのウェアラブルデバイスでは、最適化されたヒートシンクは、より小さな体積で効率的な放熱を実現します。同時に、優れた耐腐食性により、人の装着環境への適応性を高め、機器の安定した動作を確保し、寿命を延ばします。新エネルギー車：新エネルギー車のバッテリー管理システムやモーターコントローラーにおいて、最適化されたタングステン銅ヒートシンクは、より高い温度とより複雑な動作条件に耐えることができます。航空宇宙：航空宇宙機器は、極端な温度、圧力、放射線環境にさらされます。最適化されたタングステン銅ヒートシンクは、優れた耐高温性、高強度、耐放射線性を備えており、衛星の熱制御システム、航空機エンジンの熱管理部品などの主要部品に使用できます。衛星では、内部電子機器の温度を調節し、複雑な宇宙環境下でも衛星の正常な動作を確保します。また、航空機エンジンでは、高温部品の熱を効果的に管理し、エンジンの信頼性と性能を向上させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第 8 章 タングステン銅ヒートシンクの他の分野への応用

8.1 医療機器におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

高精度、高出力、そして複雑な環境で稼働する医療機器（医療用画像システム、レーザー治療装置、手術用ロボットなど）では、放熱管理に対する厳しい要求が求められます。タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、良好な機械的特性、そして耐腐食性を備えており、特に高信頼性、小型化、高性能が求められる用途において、医療機器の放熱に不可欠な材料となっています。

8.1.1 医用画像機器の放熱要件

医療用画像機器（CT、MRI、PET、X線装置など）は、高解像度の画像を実現するために高出力電子デバイス（X線管、検出器、無線周波数コイル、信号プロセッサなど）に依存しており、動作中に大量の熱が発生します。放熱要件には次の特徴があります。まず、熱流束密度が高いため、放熱材料には優れた熱伝導性が求められ、コアコンポーネントからヒートシンクに熱をすばやく伝達し、機器の動作温度を安全な範囲（20～50℃ など）に維持し、過熱による画像の歪み、デバイスの老化、システムのシャットダウンを防ぐ必要があります。次に、熱膨張係数は、チップ（シリコンなど）、検出器材料（テルル化カドミウムなど）、または基板（酸化アルミニウムなど）と一致して、熱サイクルによる応力を軽減し、インターフェースの開放を防ぐ必要があります。第三に、機器は病院環境で長時間稼働させる必要があるため、放熱材料は耐腐食性（防菌、防湿）と生体適合性を備え、患者とオペレーターの安全を確保する必要があります。第四に、小型化と高集積化の傾向により、放熱材料はコンパクトな機器レイアウトに適応するために薄型設計、精密加工、複雑な構造（マイクロチャネルやヒートシンクなど）をサポートする必要があります。第五に、高い伝導性は、特に MRI 無線周波数コイルや PET 検出器において、電磁干渉を低減し、信号処理と画像精度を確保するのに役立ちます。最後に、放熱ソリューションは、大規模生産と病院の予算に適した、低ノイズ（空冷振動干渉画像化を回避）と費用対効果を考慮する必要があります。従来の放熱材料（アルミニウムや銅など）は、熱膨張係数の不一致、重量の重さ、耐腐食性の不足などの理由で、医療用画像機器のニーズを完全に満たすことが難しく、高性能の放熱ソリューションが緊急に必要とされています。

8.1.2 医療用レーザー機器におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

医療用レーザー装置（レーザー手術システム、皮膚治療用レーザー、眼科用レーザーなど）は、高出力レーザーダイオードと光学部品を使用しており、これらから大量の熱が発生します。放熱にはタングステン銅ヒートシンクが重要な役割を果たします。レーザーダイオードの放熱基板としては、W60Cu40 と W70Cu30 がよく使用されます。これらの材料は熱伝導性に優れ、熱膨張係数がガリウムヒ素基板や窒化アルミニウム基板と一致するため、熱応力が低減します。これらの材料は、熔融浸透法または放電プラズマ焼結法で製造され、緻密な微細構造と表面のニッケルまたはクロムコーティングにより、湿気や消毒剤による腐食に対する耐性が向上しているため、手術室環境に適しています。W80Cu20 は、高出力レーザー（CO2 レーザー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

など）に使用され、熱膨張係数がセラミックに近い、熱間静水圧プレスにより高密度、高温耐性、頻繁な熱サイクルが確保され、レーザー切断装置やアブレーション装置に使用されます。W50Cu50 は、高い熱伝導率と電気伝導性、迅速な放熱性、波長ドリフトの抑制といった特性から、高周波パルスレーザーに用いられています。粉末冶金法による製造コストは比較的安く、大量生産に適しています。

眼科用レーザーにおいて、W70Cu30 は 3D プリンティング技術を用いてマイクロチャネル構造を作製し、液体冷却システムと組み合わせることで、熱流路を最適化し、安定したレーザー出力を維持し、治療精度を向上させます。皮膚治療用レーザーにおいて、W60Cu40 は薄型設計をサポートし、携帯機器への適応性、汗や消毒液による腐食への耐性、そして長寿命化を実現します。

応用例としては、眼科用 YAG レーザーにおける W70Cu30 の波長安定性維持と網膜治療効果の確保、皮膚美容レーザーにおける W60Cu40 の湿気・熱腐食耐性と長期稼働の実現、外科用 CO2 レーザーにおける W80Cu20 の高温耐性と機器寿命の延長などが挙げられます。タングステン銅ヒートシンクは、精密加工により複雑な形状にも対応し、微量のグラフェンを添加することで熱伝導率を向上させることで、医療用レーザー機器の多様なニーズに応えます。

8.1.3 医療機器の性能向上におけるタングステン銅ヒートシンクの役割

タングステン銅ヒートシンクは、熱管理の最適化、信頼性の向上、高精度動作のサポートにより、医療機器の性能を大幅に向上させます。その機能は、以下の側面に反映されています。第一に、高い熱伝導率により効率的な熱伝導ネットワークが形成され、画像機器やレーザー（ダイオードなど）の熱がヒートシンクに素早く伝導されます。これにより、コア部品の温度が低下し、熱性能の低下が抑制されます。CT 画像の解像度やレーザー治療の精度が向上し、レーザー波長のドリフトが低減されるため、手術結果が確実になります。第二に、適度な熱膨張係数は、チップ、検出器、または基板に適合し、熱サイクルによる応力を軽減し、パッケージの割れやデバイスの反りを防止します。頻繁な起動停止や長期動作時の機器の信頼性を高め、耐用年数を延ばし、病院のメンテナンスコストを削減します。第三に、高い熱伝導率により電磁干渉が低減され、MRI 無線周波数コイルや PET 信号処理装置の信号品質が維持され、画像品質とデータ処理効率が向上し、高精度診断のニーズに応えます。

第 4 に、優れた機械的強度と耐腐食性により、湿気、消毒剤、振動環境でもヒートシンクの構造の完全性が確保されます。ニッケルまたはクロムコーティングは、化学的耐腐食性と生体適合性をさらに高め、患者の安全を確保し、手術室や画像撮影環境に適しています。第 5 に、精密機械加工と 3D プリント技術は、マイクロチャネル、薄型またはカスタマイズされた設計をサポートし、熱流路を最適化し、放熱効率を高め、小型化された機器（ポータブル X 線装置、ハンドヘルドレーザーなど）に適応し、医療機器の統合と携帯性を促進します。第 6 に、タングステン銅ヒートシンクのカスタマイズ機能により、さまざまな機器（画像機器の高伝導性、レーザーの高信頼性など）に応じてコンポーネント比率を調整し、コストを最適化したプロセス（粉末冶金または溶融浸透など）を組み合わせることで、大規模生産をサポートし、性能と

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

経済性のバランスをとることができます。さらに、微量添加剤（グラフェンなど）や放電プラズマ焼結により微細構造が微細化され、熱伝導率と靱性が向上し、高解像度 PET やフェムト秒レーザーといった次世代医療機器のニーズにも対応します。これらの機能により、タングステン銅ヒートシンクは、医療機器の性能、信頼性、患者体験の向上を促進し、精密医療や現代の診断・治療技術の発展に重要な支援を提供してきました。

8.2 工業製造におけるタングステン銅ヒートシンクの応用

タングステン銅ヒートシンクは、優れた熱伝導率、適度な熱膨張係数、高い機械的強度、耐摩耗性、耐腐食性などから、エレクトロニクス、エネルギー、航空宇宙分野で広く使用されています。また、工業製造分野、特に放電加工（EDM）や金型製造においても重要な価値を示しています。タングステン銅材料は、タングステンと銅の比率（W50Cu50 から W90Cu10 など）を調整し、粉末冶金、溶融浸透、熱間静水圧プレスなどのプロセスを用いることで、工業製造における高性能材料のニーズを満たしています。以下は、タングステン銅ヒートシンクの EDM 電極材料への応用と、金型製造における潜在的な応用探索の詳細な分析です。

8.2.1 EDM における電極材料の応用

放電加工（EDM）は、電気火花放電によって材料を除去する高精度加工技術です。航空宇宙、自動車、金型、医療機器の製造において、複雑な形状や硬質材料（チタン合金や金型鋼など）の加工に広く利用されています。EDM 電極材料として、タングステン銅ヒートシンクは優れた性能を有し、高精度・高効率加工に広く使用されています。EDM におけるその利点と用途には、以下のものがあります。

まず、タングステン銅ヒートシンクの高い導電性（30～45% IACS）は、電気火花放電の安定性と効率を確保します。銅相は効率的な電流伝導を提供し、火花放電を迅速に開始します。タングステン骨格は電極構造の安定性を高め、アークの不均一性による加工欠陥を低減します。W70Cu30 と W80Cu20 は、導電性と耐摩耗性のバランスに優れているため、高精度放電加工用電極によく使用され、複雑な金型や航空部品の加工に適しています。

第二に、高い耐摩耗性と耐電食性により、電極の寿命が延びます。放電加工中は、高温の火花や材料の蒸発により電極が摩耗します。タングステンは硬度が高く、融点も高い（約 3422℃）ため、耐電食性が大幅に向上します。銅相の靱性により、電極表面の亀裂の拡大が緩和され、電極の消耗が抑えられます。W90Cu10 はタングステン含有量が高いため、耐摩耗性が高く、超硬合金や耐熱合金の加工に適しており、電極交換頻度を低減し、加工経済性を向上させます。

第三に、優れた熱伝導性により、放電熱を効果的に制御します。放電加工では、局所的に高温（6000℃以上）が発生し、電極の過熱や変形、あるいは加工面品質の低下を引き起こす可能性があります。タングステン銅ヒートシンク（W60Cu40、W70Cu30）は、銅相の熱伝導ネットワークを通じて熱を素早く放散し、安定した電極温度を維持し、熱変形を低減し、加工精度を向

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

上させます。また、微細加工（微細穴やスリットなど）にも適しています。

第4に、適度な熱膨張係数が加工安定性を確保します。タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数（ $6-12 \times 10^{-6}/K$ ）は加工材料（鋼やセラミックなど）の熱膨張係数に近いため、熱サイクルや治具との熱応力による電極の変形を軽減し、電極とワーク間のギャップの安定性を確保し、放電効率を最適化し、高精度な金型加工に適しています。

第五に、優れた加工性能は複雑な電極設計をサポートします。タングステン銅ヒートシンクは、粉末冶金法または溶融浸透法によって製造されます。これらの方法は、機械加工（フライス加工、研削加工など）や放電成形が容易で、複雑な幾何学的形状（深い空洞や薄壁など）の電極を作製できます。3D プリント技術は、航空宇宙部品や医療用インプラントの精密加工要件を満たすカスタマイズされた電極構造を実現します。

応用例：W80Cu20 電極は、耐摩耗性に優れ、優れた表面仕上げを有するため、航空機タービンブレード金型加工に使用されています。W70Cu30 電極は、優れた電気伝導性と熱伝導性、高効率性を有し、自動車プレス金型の微細穴加工に使用されています。W60Cu40 電極は、耐電食性と長寿命性を有し、医療機器のチタン合金加工に使用されています。タングステン銅ヒートシンクは、ニッケルなどの表面めっきによりさらに強化され、湿式放電加工環境にも適応します。これらの特性により、タングステン銅ヒートシンクは放電加工電極に最適な材料となっています。

8.2.2 金型製造における潜在的用途の探究

金型製造は、射出成形、スタンピング、ダイカスト、鍛造などの工程を含む、工業製造の中核分野です。金型は高温、高圧、摩耗、腐食に耐える必要があります。放熱性能は金型寿命と製品品質にとって極めて重要です。タングステン銅ヒートシンクは、その高い熱伝導率、耐摩耗性、そして加工柔軟性から、金型製造における潜在的な応用として大きな注目を集めています。以下では、その応用の可能性について考察します。

まず、高い熱伝導率により、金型の熱管理が最適化されます。射出成形やダイカスト工程では、高温の溶融樹脂（プラスチック $>200^{\circ}C$ 、アルミニウム合金 $>600^{\circ}C$ ）により金型が発熱し、過熱により金型の変形や製品不良が発生します。タングステン銅ヒートシンク（W60Cu40 など）は、金型インサートや放熱チャネル基板として使用することで、熱伝導を高速化し、金型温度を下げ、冷却時間を短縮し、生産効率を向上させることができます。高精度射出成形金型（携帯電話の筐体など）やダイカスト金型（自動車のシリンダーブロックなど）に適しています。

第二に、適度な熱膨張係数により金型の安定性が向上します。タングステン銅ヒートシンクの熱膨張係数は、金型鋼（ $10-12 \times 10^{-6}/K$ ）またはセラミックインサートと整合しており、熱サイクルによる応力を低減し、金型の割れやインサートの剥離を防止します。W80Cu20 は熱膨張係数が低く、高硬度鋼やセラミックスとの組み合わせに適しています。高温ダイカスト金型に使用され、金型寿命を延ばします。第三に、高い耐摩耗性と耐腐食性により、金型の耐久性が向上します。金型表面は、繰り返しの摩擦や溶融腐食によって摩耗します。タングステンの高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

硬度と銅の靱性により、タングステン銅ヒートシンク（W90Cu10 など）は耐摩耗性に優れています。表面のニッケルまたはクロムコーティングはさらに耐腐食性を高め、熔融プラスチックや金属の化学的侵食にも適応します。スタンピング金型（ステンレス鋼板など）や押出成形金型に適しています。

第四に、機械的強度が高負荷運転をサポートします。タングステン銅ヒートシンクは圧縮強度と靱性に富み、プレス加工や鍛造加工における高圧・衝撃に耐えることができます。W70Cu30 は金型インサートとして使用され、機械的ストレスに耐え、金型疲労による破損を軽減するため、自動車のプレス金型や航空部品の鍛造金型に適しています。

第五に、加工の柔軟性とカスタマイズ性です。タングステン銅ヒートシンクは、粉末冶金法や熱間静水圧プレス法によって複雑な形状に容易に加工できます。3D プリント技術は、冷却チャネルを内蔵した金型インサートを作製し、熱流路を最適化して冷却効率を向上させ、製品の変形を低減できるため、高精度金型（光学レンズ射出成形金型など）に適しています。放電プラズマ焼結は微細構造を微細化し、強度と熱伝導性を向上させ、ハイエンド金型のニーズを満たします。

潜在的な用途としては、射出成形金型における W60Cu40 インサート材の冷却時間の短縮と携帯電話ケースの生産効率向上、ダイカスト金型における W80Cu20 放熱チャネル基板の高温腐食耐性と自動車部品金型の寿命延長、スタンピング金型における W70Cu30 インサート材の耐摩耗性と高強度鋼板加工への適合、3D プリント金型における W70Cu30 カスタマイズ冷却チャネルによる航空複合材成形の最適化などが挙げられます。これらの用途を広く商業的に普及させるには、コストの更なる最適化（リサイクルされたタングステン銅廃棄物の利用など）とハイブリッドプロセスの開発（鋼製金型との併用など）が必要です。

探索上の課題としては、タングステン銅ヒートシンクの初期コストが従来の材料（銅や鋼など）よりも高く、これを性能向上と寿命延長で相殺する必要があること、熱伝導性と強度を確保するために 3D プリントされた金型インサートの多孔性制御をさらに改善する必要があること、金型製造では統合の難しさを軽減するために標準化されたタングステン銅インサート設計を開発する必要があることなどが挙げられます。今後は、低温焼結、微量添加剤（グラフェンなど）、自動化生産などにより、金型製造におけるタングステン銅ヒートシンクの潜在能力がさらに発揮されるでしょう。



CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第9章 タングステン銅ヒートシンクの開発展望

9.1 新しいタングステン銅ヒートシンクの研究開発方向

高電力密度デバイスの急速な成長、小型化、そして極限環境用途の拡大に伴い、タングステン銅ヒートシンクは、電子情報、エネルギー・電力、航空宇宙、医療分野における新たな需要を満たすために、熱伝導率、軽量性、耐環境性、汎用性を向上させる必要があります。新型タングステン銅ヒートシンクの研究開発は、傾斜構造設計、ナノ複合材料の強化とインターフェースエンジニアリング、そして多機能統合設計に重点を置き、材料革新とプロセスのブレークスルーを通じて、性能の最適化と用途拡大を推進しています。以下では、これらの研究開発の方向性とその主要技術について詳細に分析します。

9.1.1 勾配構造設計とプロセス革新

勾配構造設計は、タングステン銅ヒートシンク内部の組成、微細構造、性能を段階的に分布させることで、熱伝導率、熱膨張係数、機械的特性を最適化し、複雑な用途のニーズに対応します。たとえば、表面の銅含有量が高い（W50Cu50 など）と熱伝導率が向上し、内部のタングステン含有量が高い（W90Cu10 など）と熱膨張係数が低下し、チップや基板にフィットし、熱応力が軽減されるため、5G RF モジュールや衛星電子機器に適しています。表面の多孔質構造は冷媒との接触面積を増やし、コア部分の緻密な構造は強度を高め、液冷式 IGBT モジュールに適しています。プロセスの革新には、3D プリント（SLM または EBM）によるタングステンと銅の比率を層ごとに制御し、マイクロチャネルや複雑な形状を準備し、熱流路を最適化することが含まれます。連続勾配を形成するための積層プレスと真空焼結または熱間静水圧プレス（HIP）は、太陽光発電インバータの低コストの大規模生産に適しています。プラズマ噴霧は、噴霧パラメータを調整して組成勾配を形成し、風力発電コンバータに適しています。CVD 支援による銅勾配の堆積は、界面結合を強化し、航空宇宙における高信頼性ヒートシンクに適しています。これらのプロセスでは、気孔率（<0.5%）を低減し、熱伝導率と強度を確保するために、パラメータ（レーザー出力や焼結温度など）を最適化する必要があります。AI 支援による最適化と X 線 CT 検出は、プロセスの一貫性を改善できます。傾斜構造設計は、カスタマイズされた生産を通じて総合的なパフォーマンスを向上させますが、コストとのバランスを取る必要があります。将来的には、自動化された生産とプロセス統合により、高性能エレクトロニクスおよびエネルギー分野での広範な応用が促進されるでしょう。

9.1.2 ナノ複合材料の強化と界面工学

ナノ複合材強化とインターフェースエンジニアリングは、ナノ強化相を導入し、インターフェース結合を最適化することで、タングステン銅ヒートシンクの熱伝導率、機械的強度、および耐環境性を向上させます。グラフェンまたはカーボンナノチューブ（CNT、0.5~2 重量%）は効率的な熱伝導ネットワークを形成し、熱伝導率を向上させ、耐腐食性を高めるため、5G 基

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

地局やレーザーに適しています。ナノ SiC または AlN 粒子（0.1~5 重量%）は硬度と耐摩耗性を向上させ、熱膨張係数を低減するため、EDM 電極または航空アビオニクスシステムに適しています。微量の Ni または Co（<1 重量%）はタングステン銅の濡れ性を向上させ、高温および放射線安定性を高めるため、深宇宙探査機に適しています。インターフェースエンジニアリングは、Ni/Co ナノコーティングまたは SPS 急速焼結を使用して熱抵抗（ $<10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ）を低減し、熱伝導率と靱性を向上させます。CVD または電気めっきにより Cu-Ni 遷移層が形成され、界面応力が緩和され、温度差安定性が向上します。プラズマ処理または化学エッチングにより、タングステン粒子の粗さが増し、銅の接着性が向上し、放射線または振動による剥離が減少します。Cr/Al₂O₃ 複合コーティングは耐食性と耐放射線性が向上し、航空宇宙の真空環境に適しています。製造技術には、ナノ相の均一な分布を確保するための超音波分散、ボールミル処理、または CVD インサイチュー成長、ナノ構造を保持するための SPS および HIP 急速緻密化、および複雑な複合構造を実現するためのナノパウダーと組み合わせた 3D プリントが含まれます。ナノ複合材料の強化とインターフェースエンジニアリングにより性能が大幅に向上しますが、ナノ相の凝集、プロセスコスト、長期安定性の問題を解決する必要があります。将来的には、低コストのナノ製造と自動化プロセスにより、エレクトロニクスおよび航空宇宙分野での応用が促進されるでしょう。

9.1.3 多機能統合設計

多機能統合設計により、タングステン銅ヒートシンクは、放熱以外にも、電磁シールド、熱電変換、適応型熱調節、構造と放熱の統合、センシングなどの機能を備え、高度に統合されたシステムのニーズを満たします。表面微細構造（周期的な溝）や NiFe 添加と組み合わせた高伝導性により、電磁シールド効果（> 60 dB）が向上し、5G 基地局や航空電子工学システムに適しています。統合型 Bi₂Te₃ 熱電コーティング（CVD / PVD 堆積）により、廃熱を電力センサーにリサイクルし、衛星やエネルギー貯蔵システムに適しています。埋め込まれた相変化材料（パラフィンなどの PCM）またはマイクロ流体チャネルにより、熱容量を動的に調整して、レーザーパルスからの高熱流に対応します。構造部品として高強度ヒートシンクを使用することで、ドローンや金型の重量を軽減できます。実装技術には、SLM/EBM 印刷による複合構造、マイクロチャネルまたはセンシング層の精密レイアウト、シールドまたは熱電性能を向上させるための機能性コーティングのプラズマ噴霧/PVD 堆積、相変化特性を保持するための SPS 焼結と組み合わせた PCM のマイクロカプセル化、熱交換効率を向上させるための微細構造を作製するためのレーザーマイクロマシニング、放熱と強度を最適化するバイオニック設計などが含まれます。多機能設計は付加価値を高めますが、材料の適合性、プロセスの複雑さ、信頼性などの問題を解決する必要があります。将来的には、AI 支援によるトポロジー最適化とインテリジェント製造により、5G、衛星、医療分野における多機能タングステン銅ヒートシンクのブレークスルーが促進されるでしょう。

9.2 タングステン銅ヒートシンクと新技術の統合と開発

高性能放熱材料であるタングステン銅ヒートシンクは、電子情報、エネルギー・電力、航空宇

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

宙、医療などの分野で幅広い応用展望を持っています。人工知能（AI）、モノのインターネット（IoT）、インテリジェント製造などの新興技術の急速な発展に伴い、タングステン銅ヒートシンクはこれらの技術との融合により、材料設計効率、熱管理のインテリジェント化、システム統合性を大幅に向上させ、高出力密度、小型化、極限環境への応用など、将来のニーズを満たすことができます。以下は、AI 主導の材料遺伝子工学、モノのインターネットとインテリジェント熱管理システムの融合におけるタングステン銅ヒートシンクの開発方向と主要技術の詳細な分析です。

9.2.1 AI 駆動型材料遺伝子工学

AI 駆動型の Materials Genome Engineering (MGE) は、人工知能とビッグデータ分析を通じて新しいタングステン銅ヒートシンクの開発を加速し、構成、微細構造、性能を最適化し、開発サイクルを短縮してコストを削減します。

応用方向：従来のタングステン銅ヒートシンクの開発は、実験的な試行錯誤に依存しており、非効率的でコストがかかります。AI 駆動型 MGE は、タングステン銅合金の熱伝導率、熱膨張係数、機械的強度、耐環境性を予測し、カスタマイズされたヒートシンクを設計できます。たとえば、タングステン銅比（W50Cu50 から W90Cu10 など）を最適化して 5G RF モジュールの低熱膨張要件に適応したり、グラフェンの追加による熱伝導率の向上を予測したりして、高出力 IGBT モジュールに適しています。衛星の熱制御や医療用レーザーのニーズを満たすために、傾斜構造（表面に銅が多く、内部にタングステンが多いなど）やナノ複合材料（SiC 強化など）の性能をシミュレーションします。プロセスパラメータ（焼結温度、3D プリントレーザー出力など）の最適化、微細構造の一貫性の向上、多孔性の低減（<0.5%）、および高信頼性アプリケーションの促進。

技術的実装：AI 駆動型 MGE は、タングステン銅性能データベースに基づくディープニューラルネットワーク（DNN）またはランダムフォレスト（RF）モデルトレーニングを含む複数のテクノロジーを統合し、組成-プロセス-性能の関係を予測します。密度汎関数理論と分子動力学（MD）シミュレーションにより、タングステン銅界面の熱抵抗とナノ強化相（グラフェンなど）分布の影響を計算し、ML トレーニング用のビッグデータを生成します。生成的敵対的ネットワーク（GAN）により、CNT 強化ヒートシンクの高温安定性の予測など、新しい式や勾配構造を探索します。自動化されたハイスループット実験プラットフォーム（ロボットパッチング、SPS 焼結など）により、AI 予測を検証し、データベースを更新して閉ループ最適化を形成します。デジタルツインモデルにより、太陽光発電インバータまたは航空電子機器のヒートシンクの熱流、応力、老化挙動をリアルタイムでシミュレートして設計を導きます。

展望と課題：AI 主導の材料ゲノムエンジニアリング（MGE）は、タングステン銅ヒートシンクに革命的な変化をもたらしています。展望としては、機械学習アルゴリズムとハイスループットコンピューティングを深く統合した AI-MGE は、さまざまなコンポーネントとプロセスパラメータがタングステン銅ヒートシンクの性能に与える影響を迅速にシミュレートし、従来の数年かかる研究開発サイクルを 50%以上短縮し、研究開発コストを 30%削減し、企業の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

イノベーション効率を大幅に向上させることができます。この技術は、6G 通信の高周波・高速要件を満たす高伝導性放熱基板を正確にカスタマイズできるだけでなく、電気自動車の過酷な動作条件に対応する高強度・耐腐食性を備えたバッテリー熱管理部品を設計し、さらには宇宙ミッションにおける厳しい高温・耐放射線要件も満たし、製品性能の飛躍的な向上に貢献します。

しかし、この技術の導入には依然として多くの課題が残されています。第一に、高品質な実験データの不足が AI モデルのトレーニング精度を制限しており、業界は協力して標準化されたデータベースを構築し、組成からプロセス、性能に至るまでの完全なデータチェーンを統合する必要があります。第二に、既存の機械学習モデルは、極限環境（宇宙線や超高温など）における材料挙動の予測に限界があり、より一般化可能なアルゴリズムアーキテクチャの開発が急務となっています。第三に、高スループットの実験設備（自動 3D プリンターや現場性能試験システムなど）は高価で、中小企業には導入が困難です。そのため、技術適用のハードルを下げるための共有実験プラットフォームの構築が急務となっています。

今後、AI-MGE はクラウドコンピューティングの強力なコンピューティングサポートとオープンソースデータベースのエコシステム共創を活用し、材料イノベーションの反復を加速します。クラウドベースの共同設計を通じて、世界中の科学研究チームがタングステン銅ヒートシンクのシミュレーションデータと実験データを共有し、「データ・モデル・検証」という閉ループイノベーションシステムを構築することで、ハイエンド製造分野におけるタングステン銅ヒートシンクの応用範囲の継続的な拡大を促進し、次世代の情報技術と戦略産業の発展を支える中核材料技術となることが期待されます。

9.2.2 モノのインターネットとインテリジェント熱管理システム

モノのインターネット (IoT) とインテリジェント熱管理システム (ITMS) は、リアルタイム監視と動的制御を通じてタングステン銅ヒートシンクの放熱性能を向上させ、システム効率、信頼性、安全性を最適化します。

応用方向: タングステン銅ヒートシンクは、高出力デバイス（5G 基地局、衛星電子機器、電気自動車インバータなど）の動的な熱負荷と複雑な環境に対応する必要があります。IoT と ITMS の統合により、ヒートシンクの温度、熱流、応力を監視し、AI を組み合わせて熱負荷を予測し、放熱戦略（冷却剤の流れ、ファン速度など）を動的に調整し、エネルギー効率を最適化できます。たとえば、W60Cu40 ヒートシンクは、データセンターの IoT センサーと組み合わせて使用され、液体冷却を動的に調整してエネルギー消費を 20%削減します。W80Cu20 ヒートシンクは、衛星の軌道温度差を監視し、相変化材料(PCM)をトリガーして温度を調節し、寿命を延ばします。工業用金型では、W70Cu30 ヒートシンクに応力センサーが組み込まれており、故障を予測してダウンタイムを削減します。インテリジェントシステムは、リモート診

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

断をサポートし、メンテナンスコストを削減し、エネルギー貯蔵システムや風力発電アプリケーションに適しています。

技術の実装: IoT と ITMS はセンサー、ネットワーク、AI テクノロジーを統合します。これには、薄膜熱電対、ファイバー ブラッグ グレーティング、またはひずみゲージをタングステン銅ヒートシンクの表面または内部に埋め込み、温度、熱流、応力をリアルタイムで監視することや、3D プリントによるセンサー統合の実現が含まれます。5G または Zigbee プロトコルを介してエッジ デバイスまたはクラウド プラットフォームにデータを送信し、MQTT/CoAP プロトコルを使用して低電力通信を保証します。エッジ コンピューティングを LSTM または ARIMA 時系列分析と組み合わせて熱負荷を予測し、強化学習 (RL) を使用して冷却パラメーター (液体冷却フロー、PCM 相変化トリガー ポイントなど) を最適化します。クラウドベースのデジタル ツインは、ヒートシンクの経年劣化をシミュレートして寿命を予測します。ヒートシンクは、PCM (パラフィン マイクロカプセルなど)、マイクロ流体チャネル、または Bi_2Te_3 熱電コーティングと統合され、熱容量が動的に制御されるか、IoT コントローラーによってエネルギーが回収されます。IoT ダッシュボードは、熱状態をリアルタイムで表示し、AR/VR を活用したメンテナンスをサポートするために開発されています。

展望と課題: モノのインターネット (IoT) とインテリジェント熱管理システム (ITMS) の深い融合は、タングステン銅ヒートシンクの新たな応用展望を切り開いています。スマートグリッド分野では、IoT センサーを通じて送電設備の温度をリアルタイムで監視し、ITMS アルゴリズムと組み合わせてタングステン銅ヒートシンクの放熱戦略を最適化し、電力システムの稼働効率を 20~30% 向上させ、過熱による設備故障のリスクを大幅に低減します。6G 通信基地局では、融合システムによりタングステン銅ヒートシンクの放熱力を動的に調整し、極限環境下でも高周波デバイスの安定した動作を確保し、ネットワーク信号伝送の二重品質とカバレッジの向上に貢献します。航空宇宙アプリケーションシナリオでは、IoT と ITMS が連携して衛星ヒートシンクの放熱方向と強度を正確に制御し、温度差が 300°C を超える宇宙環境でも電子機器が常に最適な動作温度範囲内にあることを保証します。

しかし、この技術の実装には依然として多くの課題が残っています。センサーをタングステン銅ヒートシンクに組み込む場合、高温・高振動環境下でも安定した性能を維持しながら材料統合コストを削減する必要があります。IoT ネットワークにおけるデータ伝送は、低遅延と高信頼性の要件を満たす必要があります。重要な放熱データの漏洩を防ぐため、ハッカー攻撃に対抗するセキュリティ保護メカニズムも備えていなければなりません。AI アルゴリズムは、熱管理戦略の精度を確保するために、さまざまなシナリオ (電力網の過負荷や衛星の姿勢調整など) に迅速に適応する必要があります。

今後、低コスト MEMS センサーの普及、5G エッジコンピューティング技術の成熟、そして業界横断的な標準プロトコルの確立に伴い、インテリジェント熱管理システムはより効率的なリアルタイム制御を実現するでしょう。優れた熱伝導性と機械特性を持つタングステン銅ヒートシンクは、スマートグリッドのスマート変電所から 6G 時代のミリ波基地局、そして深宇宙探査のための宇宙船熱制御システムに至るまで、高動的かつ高信頼性が求められる分野で

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

重要な役割を果たし、将来の最先端技術の発展を支える中核的な放熱材料となるでしょう。

9.5 タングステン銅ヒートシンクの課題と解決策

タングステン銅ヒートシンクは、電子情報、エネルギー・電力、航空宇宙、医療分野など幅広い応用が期待されていますが、コストと性能という二重の制約に直面しています。現状では、生産コストの高さが大規模な商業利用を制限し、さらに性能向上（高熱伝導率、軽量化、過酷な環境への耐性など）への要求が高まり、材料設計とプロセスへの要求水準が高まっています。これらの課題を解決するには、コスト管理と性能向上から着手する必要があります。原材料の最適化、プロセス革新、性能向上、そしてインテリジェント設計によって、高性能用途におけるタングステン銅ヒートシンクの普及と発展を促進することができます。以下では、コスト管理戦略と性能向上の方向性、そしてその解決策について詳細に分析します。

9.5.1 コスト管理戦略

タングステン銅ヒートシンクの製造コストは、主に高純度原材料（タングステンや銅など）、複雑な製造工程（熱間静水圧プレス、3D プリントなど）、そして精密機械加工に起因します。この高コストは、消費者向け電子機器、電気自動車、工業生産といったコスト重視の分野への普及を制限しています。原材料、プロセス、リサイクル、大規模生産の観点から、以下のコスト管理戦略を提案します。

- **原材料の最適化:** タングステンと銅の高純度要件（99.9%超）は、原材料コストを押し上げます。中低純度タングステン粉末（99.5%など）またはリサイクルされたタングステン銅廃棄物（EDM 電極やヒートシンク廃棄物など）を原料として使用し、精製プロセス（水素還元など）を通じて性能要件を満たし、原材料コストを 30～40%削減します。低コストの代替強化相（グラフェンの代わりに炭素繊維など）を開発するか、希少添加剤（Ni、Co など）の量を減らすことで、性能とコストのバランスを取り、太陽光発電インバータや工業用金型用途に適しています。
- **プロセスの簡素化:** 熱間静水圧プレス（HIP）や放電プラズマ焼結（SPS）などの従来のプロセスは、コストが高く、エネルギーを大量に消費します。粉末冶金または溶融浸透は、焼結パラメータ（温度を 1000℃に下げ、保持時間を短縮するなど）を最適化するために推奨され、エネルギー消費を 20～30%削減します。これは、5G 基地局用 W60Cu40 ヒートシンクの大規模生産に適しています。低温焼結技術（微量焼結助剤の添加など）を開発し、設備要件を削減し、中小企業への適用を促進します。3D プリント（SLM/EBM）は、機能層（マイクロチャネルなど）を部分的に印刷することで全体印刷に取って代わり、粉末の使用量と後処理コストを削減します。これは、航空電子機器用のカスタマイズされたヒートシンクに適しています。
- **廃棄物の回収とリサイクル:** タングステン・銅廃棄物の回収システムを構築し、化学浸出法または電気分解法を用いてタングステンと銅を分離することで、回収率は 90%以上に達し、原材料コストを 40%削減できます。回収された粉末は、需要の少ない用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

途（工業用放電加工電極など）向けに再加工（ボールミル、ふるい分けなど）したり、新しい粉末と混合して高性能ヒートシンクを製造したりすることで、資源の無駄を削減します。グリーン製造認証は、市場競争力を高め、エネルギー貯蔵システムや風力発電プロジェクトへの誘致にも役立ちます。

- **大規模生産:** 自動化生産ライン（ロボットバッチ処理や連続焼結炉など）により生産効率を向上させ、人件費を 20%削減します。モジュール設計（標準サイズのヒートシンクなど）により、カスタマイズ加工の必要性が低減し、民生用電子機器や電気自動車への大量適用に適しています。上流と下流の産業チェーン（チップメーカーやラジエーターメーカーなど）を統合することで、サプライチェーンの統合を実現し、物流および中間コストを 10~15%削減します。
- **品質管理の最適化:** 従来の破壊検査に代えて、AI を活用したオンライン検査（X 線 CT や赤外線温度測定など）を導入することで、不良率を 5~10%削減します。迅速な性能評価手法（高速熱伝導率スキャンなど）を開発することで、品質検査時間を短縮し、検査コストを削減します。標準化された生産プロセス（ISO 認証など）により、一貫性を確保し、手直しコストを削減できるため、衛星の熱制御や医療機器への応用に適しています。

展望と課題: 上記の戦略により、タングステン銅ヒートシンクのコストを 30~50%削減でき、6G 通信、電気自動車、工業製造など、コストに敏感な分野での普及が促進されます。課題としては、材料性能を確保するためにリサイクルプロセスを最適化が必要があること、低温焼結は微細構造の密度に影響を与える可能性があるため、更なる検証が必要であること、大規模生産においてはカスタマイズと標準化の要件のバランスを取る必要があることなどが挙げられます。今後、グリーン製造とインテリジェント生産を通じて、コスト管理がタングステン銅ヒートシンクの市場競争力を大幅に向上させるでしょう。

9.5.2 パフォーマンス改善の方向性

タングステン銅ヒートシンクの性能向上は、高電力密度デバイス（SiC / GaN チップなど）、小型機器（5G 基地局、医療用レーザーなど）、極限環境用途（深宇宙探査機など）のニーズを満たすために、熱伝導性、軽量性、極限環境耐性、多機能性に重点を置く必要があります。材料設計、プロセス改善、機能拡張の観点から、以下の性能向上の方向性が提案されています。

- **熱伝導率の向上:** 従来のタングステン銅ヒートシンクの熱伝導率（180~250 W/m·K）は、次世代の高出力デバイス（6G RF モジュールなど）のニーズを満たすのが困難です。グラフェンまたはカーボンナノチューブ（CNT、0.5~2 wt%）を追加すると、効率的な熱伝導ネットワークが形成され、熱伝導率が 300~350 W/m·K に向上し、データセンターの CPU 冷却に適しています。銅の相分布を最適化すると（SPS でタングステン粒子を<2μm に精製するなど）、熱伝導効率が向上し、インターフェース熱抵抗（<10⁻⁶ m²·K/W）が低下します。3D プリントされたマイクロチャネル構造は、冷媒

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の接触面積を増やし、液体冷却と組み合わせることで、放熱効率を 50% 向上させ、電気自動車のインバータに適しています。

- **軽量設計:** タングステン銅ヒートシンクの密度 ($12\sim 17\text{g/cm}^3$) はアルミニウム (2.7g/cm^3) よりも高いため、航空宇宙およびポータブルデバイスへの応用が制限されています。

高タングステン・低密度グレード (W90Cu10 など、密度約 14g/cm^3) または多孔質タングステン銅構造 (多孔度 5~10%) を開発することで、重量を 20% 削減し、熱伝導性と強度を維持し、衛星の熱制御に適しています。3D プリントにより、内部骨格 (バイオニックハニカム構造など) を最適化し、材料使用量を削減し、機械的特性を向上させるため、ドローンの航空電子モジュールに適しています。

- **極限環境への耐性:** 宇宙および深海用途では、ヒートシンクに高温 ($> 600^\circ\text{C}$)、低温 ($< -150^\circ\text{C}$)、放射線、腐食への耐性が求められます。W90Cu10 を使用するか、ナノ SiC / AlN (0.1~5 重量%) を追加することで、熱膨張係数を低減し (シリコンまたはセラミックに近い)、高温安定性を向上させます。Cr / Al_2O_3 複合コーティング (5~10 μm) をめっきすることで、耐腐食性と耐放射線性が向上し、深宇宙検出器の寿命が延びます。SPS または HIP プロセスは密度を高め ($> 99.5\%$)、放射線欠陥や亀裂の発生を低減するため、静止軌道衛星 RF モジュールに適しています。
- **多機能統合:** 放熱、電磁シールド (60 dB 超)、熱電変換、センシング機能を備えた多機能ヒートシンクを開発します。表面微細構造 (周期溝など) や NiFe 添加により電磁シールドが強化され、6G 基地局に適しています。Bi₂Te₃ 熱電コーティング (CVD/PVD 蒸着) を統合し、廃熱をリサイクルして電力センサーを内蔵し、エネルギー貯蔵システムに適しています。パラフィンマイクロカプセルなどの埋め込み型 PCM やマイクロ流体チャネルを内蔵し、熱容量を動的に制御してレーザーパルスに応答し、医療用レーザーに適しています。光ファイバーセンサーを統合し、熱流/応力を監視してスマートグリッドインバータの安全性を向上させます。
- **プロセスとインテリジェンス:** SPS 急速焼結により微細構造を微細化し、熱伝導性と靱性を向上させます。3D プリンティング (SLM/EBM) により複雑な放熱構造を作製し、熱流路を最適化します。AI 支援によるトポロジー最適化により、熱伝導性と重量のバランスを考慮したヒートシンク形状を設計します。デジタルツインモデルは、経年劣化挙動をシミュレーションし、航空電子機器に適した寿命を予測します。温度感応型熱伝導コーティングなどの適応型熱材料を開発することで、熱負荷に動的に応答し、放熱効率を 20% 向上させます。

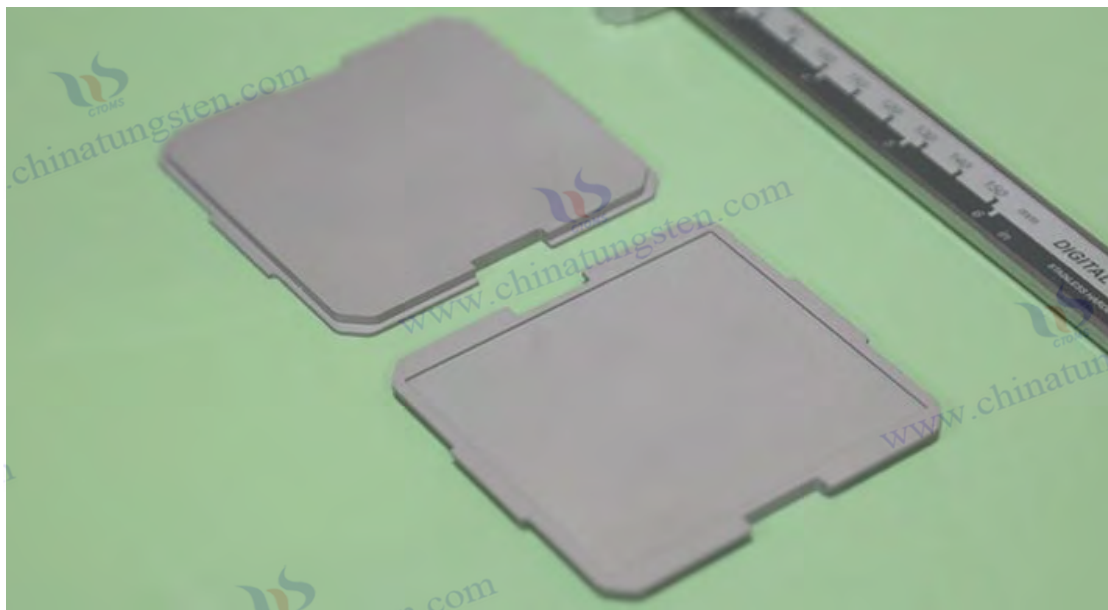
展望と課題: 材料科学と製造技術の革新に伴い、タングステン銅ヒートシンクの性能向上は、その優れた放熱効率と機械特性により、6G 通信、電気自動車、航空宇宙、医療などの最先端分野に深く浸透しています。6G 通信機器では、熱伝導率が 30~50% 向上し、ミリ波基地局や高周波チップから発生する高熱を素早く誘導して、信号伝送の安定性と信頼性を確保できます。電気自動車のバッテリー熱管理システムに適用すると、20% の軽量化の利点により、車両全体の負荷を効果的に軽減できるとともに、使用寿命を 2~3 倍に延ばし、充放電サイクルにおけるバッテリーパックの安全性を確保し、新エネルギー車の耐久性向上と高性能化に貢献します。航空宇宙分野では、タングステン銅ヒートシンクは耐熱性と耐放射線性に優れているため、衛星の熱制御システムや宇宙船の主要部品に最適な選択肢となっています。医療機器で

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は、その精密な熱伝導性により、CT 装置や MRI 装置などの大型機器の放熱効率を最適化し、機器の動作安定性と画像精度を向上させることができます。

しかし、技術革新への道は平坦ではありません。材料調製レベルでは、ナノ強化相の凝集がヒートシンクの性能に重大な影響を与えるため、強化相の均一な分布を確保するために超音波支援分散やマイクロ流体合成などの革新的なプロセスの開発が急務です。また、多機能統合（放熱、電磁シールド、構造支持の統合など）は応用価値を高めますが、界面接触熱抵抗の増加により放熱効率が低下する可能性があり、分子動力学シミュレーションやトポロジー最適化技術による精緻な設計が必要です。製造技術面では、3D プリント技術は複雑な構造を形成できる能力を与えましたが、設備と材料のコストが高く、多孔性を制御するのが難しいという問題があり、大規模生産への応用が制限されています。

今後、AI 駆動型材料設計プラットフォームは機械学習アルゴリズムを用いて最適な組成と構造の組み合わせを迅速に選別し、研究開発サイクルを大幅に短縮します。また、溶液自己組織化や化学蒸着などの低コストナノ材料調製技術の普及は、ナノ強化相分散問題を効果的に解決します。さらに、マルチマテリアル協働 3D プリンティングやインサイチューモニタリング成形などのインテリジェント製造技術は、ヒートシンクの多孔度の精密制御と性能のリアルタイム最適化を実現します。これらの技術の統合と飛躍的進歩は、タングステン銅ヒートシンクの性能の質的飛躍を促進し、6G 通信ネットワークの展開、電気自動車産業のアップグレード、深宇宙探査、ハイエンド医療機器のローカライズなど、新興技術の発展に強固な材料サポートを提供します。



CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第 10 章 タングステン銅ヒートシンクの関連規格と仕様

放熱材料であるタングステン銅ヒートシンクは、電子情報、エネルギー・電力、航空宇宙、医療などの分野で広く使用されています。その品質と性能は、一貫性と信頼性を確保するために標準化される必要があります。中国の国家規格、国際規格、そして欧州、米国、日本、韓国の規格は、タングステン銅ヒートシンクの製造、試験、応用に技術的な基盤を提供し、産業化と国際発展を促進しています。

10.1 タングステン銅ヒートシンクの中国国家規格

中国の国家規格 (GB/T) と業界規格 (YS/T) では、[タングステン銅ヒートシンクの詳細な仕様](#)が提供されており、組成、特性、試験方法が網羅されています。YS/T 1561-2022「タングステン銅合金板」では、タングステン銅比 (例: W50Cu50 から W90Cu10、銅偏差 $\pm 0.5\%$ 、不純物 $< 0.1\%$)、特性 (熱伝導率 $180 \sim 250 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、熱膨張係数 $6 \sim 12 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、密度 $12 \sim 17 \text{ g/cm}^3$ 、引張強度 $> 400 \text{ MPa}$)、微細構造 (多孔度 $< 0.5\%$ 、タングステン粒子 $< 10 \mu\text{m}$) および試験方法 (YS/T 1562.1-2022 化学分析、GB/T 3651 熱伝導率) が規定されています。YS/T 1562.1-2022 は銅含有量の測定 (ヨウ素滴定/ICP-AES、精度 $\pm 0.05\%$) を規定しています。GB/T 8320-2017 は導電率要件 ($> 30\%$ IACS) を規定しています。GB/T 3458-2006 はタングステン粉末の粒子サイズと純度を規制しています。

特徴と用途: 中国の規格は、組成管理、性能試験、プロセスの一貫性を重視し、低コスト生産をサポートし、5G 基地局、電気自動車インバータ、衛星熱制御、工業用金型などの大規模アプリケーションを促進します。YS/T 1561-2022 はライフサイクル全体をカバーし、業界標準化を促進します。

10.2 タングステン銅ヒートシンクの国際規格

国際標準化機構 (ISO) および国際電気標準会議 (IEC) は、タングステン銅ヒートシンクの特定の規格を策定していませんが、一般的な材料および放熱規格が適用されます。ISO 20483:2013「金属および合金の熱伝導率の測定方法」では、 $-100^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ の範囲で熱伝導率をテストするための定常法と過渡法 (レーザーフラッシュ法) を規定しています。

ISO 22007-2:2015「プラスチックおよび複合材料の熱伝導率を決定するための過渡平面熱源法」は迅速な検出方法を提供します。IEC 60747-15:2010「半導体デバイスの熱性能試験」では、ヒートシンクの熱抵抗が低く、熱膨張がチップ (SiC、GaN など) と一致することが求められます。ISO 6892-1:2019「金属材料の室温引張試験」は引張強度を試験します。ISO 4287:1997「表面粗さのパラメータと測定」は表面品質を標準化します。特徴と用途: 国際規格は、5G 基地局、衛星熱制御、電気自動車、データセンターのグローバル生産をサポートし、一貫性と信頼性を確保するための共通の試験フレームワークを提供します。将来的には、勾配構造や多機能ヒートシンクをカバーするための専用規格が必要になるでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.3 ヨーロッパ、アメリカ、日本、韓国、その他の世界各国におけるタングステン銅ヒートシンクの規格

欧州、アメリカ、日本、韓国では、主に業界および企業の標準に基づいており、材料と電子の放熱仕様が組み合わされています。米国 ASTM B702-93 (2019)「銅タングステン合金標準仕様」では、タングステン含有量が 50%~90%、密度が 12~17 g/cm³、導電率が 30% IACS 以上、硬度が HB>150 と規定されており、MIL-STD-883 では熱膨張率が 2×10^{-6} /K 未満、温度サイクルが -55℃~150℃ である必要があります。

欧州の EN 13604:2013「半導体装置用銅および銅合金製品」は熱伝導率と熱膨張率の整合を規制し、ECSS-Q-ST-70-08C は航空宇宙溶接をガイドします。日本の JIS H 2118:2006「銅合金板および条」および JIS Z 2244:2009「ビッカース硬さ試験」は伝導率と硬度を試験します。

韓国 KS D 9508:2016「銅および銅合金板」は ASTM を参照し、KS C IEC 60747-15:2012 は放熱試験を規定しています。特徴と用途: 米国規格は高い信頼性を重視し、航空宇宙・防衛分野（衛星やレーダーなど）で使用されています。欧州規格は半導体の互換性を確保し、5G や電気自動車に使用されています。日本と韓国の規格は、民生用電子機器（スマートフォンなど）、医療用レーザー、工業用金型などをサポートしており、地域ごとの差異は ISO/IEC を通じて調整・統一する必要があります。



CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Heat Sinks Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Heat Sinks

Tungsten copper heat sinks are composite materials composed of a tungsten matrix infiltrated with copper. They combine the high strength and high melting point of tungsten with the excellent thermal conductivity of copper. By adjusting the ratio of tungsten to copper, the coefficient of thermal expansion (CTE) can be tailored to match materials such as ceramics, semiconductors, or metals.

2. Features of Tungsten Copper Heat Sinks

- High Thermal Conductivity:** Efficient heat transfer ensures stable operation of electronic devices
- Excellent CTE Matching:** Customizable CTE to match a wide range of packaging materials
- Customizable Design:** Available in various thicknesses, dimensions, plating, and surface finishes

3. Typical Applications of Tungsten Copper Heat Sinks

- Heat sink substrates for laser diodes and modules
- Baseplates for IGBT and power modules
- Thermal management components in microwave/RF packaging
- Cooling solutions in aerospace electronic systems

4. Typical Properties of Tungsten Copper Heat Sinks

Grade	Tungsten Content (Wt%)	Copper Content (Wt%)	Density (g/cm³)	Thermal Conductivity (W/m • K at 25° C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /°C)
W90Cu10	90±1	Balance	17.0	180-190	6.5
W85Cu15	85±1	Balance	16.4	190-200	7.0
W80Cu20	80±1	Balance	15.6	200-210	8.3
W75Cu25	75±1	Balance	14.9	220-230	9.0
W50Cu50	50±1	Balance	12.2	310-340	12.5

4. Production Method of Tungsten Copper Heat Sinks

Tungsten copper heat sinks are primarily manufactured using the infiltration method, where a porous tungsten skeleton serves as the base structure and molten copper is infiltrated at high temperatures to form a dense composite. For high-precision applications, additional machining or surface treatment processes may be required to ensure dimensional accuracy and surface smoothness of the thermal interface, meeting the stringent requirements of electronic device assembly tolerances and thermal contact performance.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステン銅ヒートシンク用語集

中国語の用語	意味	アプリケーションの背景
表面粗さ	ヒートシンク表面の微細形状の偏差は Ra（単位： μm ）で表され、接触熱抵抗を低減するには $Ra < 0.8\mu\text{m}$ が必要です。	5G RF モジュールなどの高精度電子パッケージング。
割合	ヒートシンクの質量と体積の比率は g/cm^3 で表され、 $12 \sim 17 \text{g}/\text{cm}^3$ の範囲にあり、タングステン含有量とともに増加し、熱伝導率と重量に影響します。	衛星の熱制御には W80Cu20（密度約 $15.6 \text{g}/\text{cm}^3$ ）が使用されます。
残留ストレス	準備または加工中の残留応力（MPa）。応力が高すぎると反りや割れが生じる可能性があります。熱処理または SPS 処理によって軽減できます。	航空宇宙用の高信頼性ヒートシンク。
構成のグラデーション	表面には W50Cu50、内部には W90Cu10 など、厚さまたは空間方向に沿ったタングステンと銅の比率の勾配により、熱管理と機械的特性が最適化されます。	6G 基地局、電気自動車インバーター。
電気伝導性	電流を流す能力は % IACS で表され、 $30 \sim 45\%$ IACS の範囲で、銅相が導電性を支配し、電磁干渉を減らします。	W60Cu40 は高周波 RF モジュールに使用されます。
熱伝導率	熱伝導能力。単位は $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 、範囲は $180 \sim 250 \text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ です。	W70Cu30 はデータセンターの CPU 冷却に使用されます。
EDM	高精度の電気火花放電加工技術を使用して材料を除去し、優れた耐摩耗性と導電性を備えたタングステン銅ヒートシンクを電極として使用します。	金型などの金型製造。
粉末冶金	ヒートシンクは、タングステン銅粉末を混合し、プレスして焼結することによって製造され、低コストで、タングステン粒子サイズ（ $<10 \mu\text{m}$ ）と多孔度（ $<0.5\%$ ）が制御されています。	5G 基地局や産業用金型を量産。
複合材料	タングステン（高融点、高硬度）と銅（高熱伝導性、高導電性）で構成されており、両者の利点を組み合わせ、割合に応じて性能を調整します。	W90Cu10 は航空高温用に使用され、W50Cu50 は高熱伝導性に使用されます。
高スループットコンピューティング	AI とシミュレーション（DFT、MD など）を組み合わせ、グラフェンの追加による熱伝導率の向上を予測するなど、数式とプロセスを迅速にスクリーニングします。	5G と衛星のヒートシンクを最適化するための材料遺伝子工学。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

化学蒸着法	タングステン骨格の表面に銅または機能性コーティング（Ni など）を堆積して、界面の結合や耐腐食性を強化します。	深宇宙探査機などの高信頼性ヒートシンク。
放電プラズマ焼結	タングステン銅粉末はパルス電流と圧力によって高密度化され、熱伝導性と強度が向上します。	航空電子機器、医療用レーザーヒートシンク。
熱膨張係数	温度によって変化する寸法膨張率は $10^{-6}/K$ 単位で $6\sim 12\times 10^{-6}/K$ の範囲で、チップに適合し、熱応力を軽減します。	6G RF モジュール。
熱間等方圧プレス	高温高压下での気孔除去、密度向上、耐放射線性、高温安定性の向上を実現します。	衛星の熱制御および核融合装置。
熱抵抗	熱を遮断する能力 ($m^2\cdot K/W$) は最小限に抑える必要があります、マイクロチャネルによって低減されます。	W70Cu30 は電気自動車のインバーターに使用されます。
インターフェースエンジニアリング	Ni/Co コーティングや CVD 遷移層の追加など、タングステンと銅のインターフェースを最適化すると、熱抵抗と応力集中が低減し、高温および放射線安定性が向上します。	深宇宙探査機のヒートシンク。
精密機械加工	ヒートシンクは、フライス加工、研削加工、または EDM によって加工され、複雑な形状や表面を作成できます。	医療用レーザー、航空宇宙用ヒートシンク。
気孔率	を確保するには、内部気孔の体積率を 0.5%未満に抑える必要があります。HIP 処理により気孔率は低減されます。	5G 基地局と衛星熱制御。
イオン噴霧	（など）を噴霧して勾配層または保護層を形成し、耐腐食性と耐放射線性を向上させます。	風力発電コンバーター、航空宇宙用ヒートシンク。
密度汎関数理論	界面熱抵抗やナノ強化相相互作用を計算して材料設計を導き、それを AI 駆動型材料遺伝子工学に適用します。	6G ヒートシンクを最適化します。
型製造業	ヒートシンクは金型インサートや放熱チャネル基板として使用され、高温や摩耗に耐性があり、冷却時間を短縮できます。	W70Cu30 は射出成形金型（携帯電話ケースなど）に使用されます。
微細構造	タングステン粒子と銅の相分布は熱伝導率と機械的特性に影響を与えますが、これらは SPS または 3D プリントによって制御できます。	航空電子機器のヒートシンク。
ナノ複合強化材	SiC など、0.1~2 重量%）を追加すると、熱伝導率（最大 $300 W/m\cdot K$ ）と強度が向上します。	W70Cu30+グラフェンはデータセンターや 5G 基地局で使用されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

相变化材料	たとえば、パラフィンマイクロカプセルをヒートシンクに埋め込むことで、突然の高熱流に対応するために熱容量を動的に調整することができます。	W60Cu40+PCM は医療用レーザーに使用されます。
熱電交換	Bi_2Te_3 コーティングを通して回収され、センサーで使用するために電気エネルギーに変換されます。	衛星の熱制御およびエネルギー貯蔵システム。
熱管理	ヒートシンク、冷却システム、インテリジェントな制御により、デバイスの温度を最適化し、寿命を延ばします。	W80Cu20 は航空宇宙や 6G 基地局に使用されます。
焼結	真空焼結などによりタングステン銅粉末を加熱して緻密な構造を形成し、多孔性と粒子サイズを制御します。	工業用金型、5G ヒートシンク。
デジタルツイン	ヒートシンクの仮想モデル、熱の流れ、ストレス、老化のリアルタイムシミュレーション、および寿命の予測。	航空電子機器およびスマートグリッド用のヒートシンク設計。
3D プリント	マイクロチャネル構造は、SLM によってタングステン銅粉末を層ごとに溶解することによって作成されました。	医療用レーザー、衛星の熱制御。
トポロジー最適化	AI 駆動型ジオメトリ設計により、熱伝導性と重量のバランスが取れています。	UAV 航空電子機器と 6G 基地局。
モノのインターネット	センサーとネットワークを通じて温度と熱の流れを監視し、AI を使用して熱放散を動的に制御します。	W60Cu40 は、データセンターのインテリジェントな熱管理に使用されます。
マイクロチャネル	小さな内部冷却チャネルにより、冷却剤との接触面積が増加し、放熱効率が 50% 向上します。	自動車用インバータ用に 3D プリントされた W70Cu30。
選択的レーザー溶融	3D 印刷技術は、タングステン銅粉末を層ごとに溶かして複雑な構造を作り、多孔度を 0.5% 未満に制御します。	航空宇宙用ヒートシンク。
硬度	変形に耐える能力。単位は HB または HV で、範囲は HB 150 ~ 250 で、タングステン含有量に応じて増加します。	W90Cu10 は、EDM 電極および金型インサートに使用されます。
ストレス	インターフェースエンジニアリングと勾配構造によって軽減される、熱サイクル負荷下の内部力 (MPa)。	衛星熱制御ヒートシンク。
密度	熱伝導率と強度を確保するには、実際の密度と理論密度の比率が 99.5% を超える必要があり、これは HIP または SPS によって向上します。	深宇宙探査機のヒートシンク。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

参考文献:

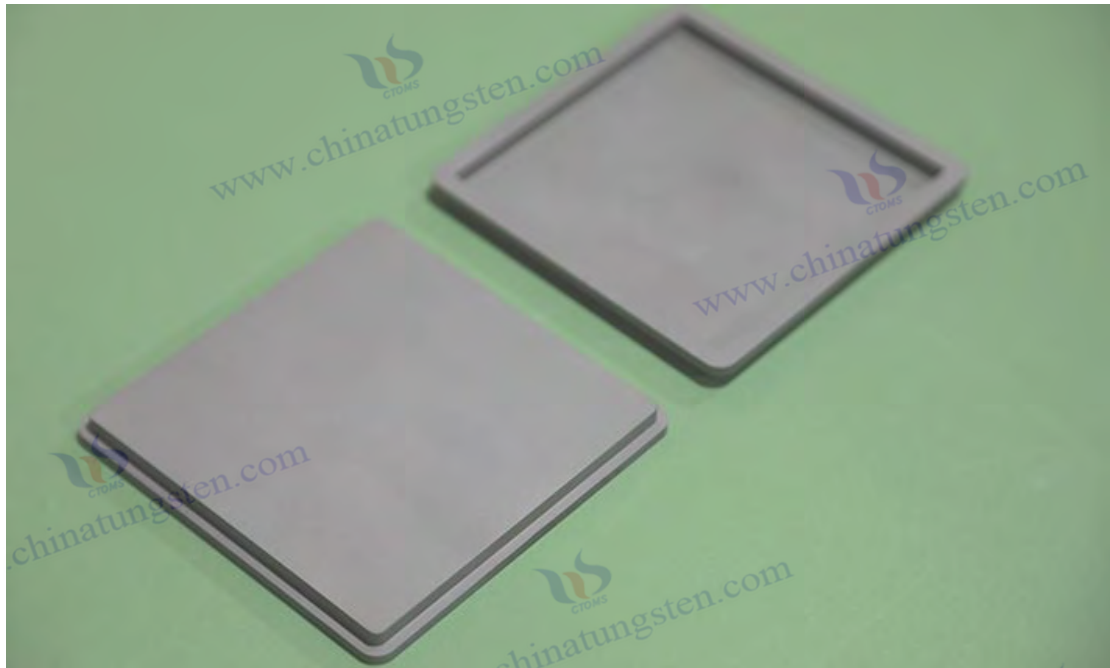
- [1] Callister, WD, & Rethwisch, DG (2020). 材料科学と工学: 入門 (第 10 版). ホーボーケン, ニュージャージー: Wiley.
- [2] ASM インターナショナル (1990). ASM ハンドブック 第 2 巻: 特性と選定: 非鉄合金および特殊用途材料. マテリアルズパーク, オハイオ州: ASM インターナショナル.
- [3] Chemetal USA. (2018). タングステン銅 | EDM 電極、ヒートシンク | W Cu の特性と用途. アーバイン、カリフォルニア州: Chemetal USA.
- [4] Chemetal USA. (2021). タングステン銅とモリブデン銅の微細構造と特性. アーバイン、カリフォルニア州: Chemetal USA.
- [5] ScienceDirect. (2008). パッケージングヒートシンク用途向けタングステン-銅金属マトリックス複合材料. アムステルダム: エルゼビア.
- [6] ScienceDirect. (2019). 新規カプセル化圧延技術によるタングステン/銅複合シートの作製. アムステルダム: エルゼビア.
- SiC 粒子の微量添加によるタングステン-銅複合材料の微細構造と特性の調整. アムステルダム: エルゼビア.
- [8] ScienceDirect. (2020). アモルファス Fe-W 合金転移によるタングステン、W-Cu 合金および銅の接合. アムステルダム: エルゼビア.
- [9] ScienceDirect. (2021). タングステン繊維マトリックスへの銅含浸法で製造された W-Cu 複合材料の熱特性. アムステルダム: エルゼビア.
- [10] トーリーヒルズテクノロジーズ (2023). タングステン銅 WCu CuW ヒートシンク. カリフォルニア州サンディエゴ: Torrey Hills Technologies.
- [11] ASTM International. (2019). ASTM E8/E8M-21: 金属材料の引張試験のための標準試験方法. ウェストコンショホッケン、ペンシルバニア州: ASTM International.
- [12] ASTM International. (2018). ASTM E9-19: 室温での金属材料の圧縮試験の標準試験方法. ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン: ASTM International.
- [13] ASTM International. (2016). ASTM E290-14: 延性を調べるための材料の曲げ試験の標準試験方法. ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン: ASTM International.
- [14] ASTM International. (2018). ASTM E92-17: 金属材料のピッカース硬さおよびヌープ硬さの標準試験方法. ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン: ASTM International.
- [15] ASTM International. (2019). ASTM E10-18: 金属材料のブリネル硬さの標準試験方法. ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン: ASTM International.
- [16] ASTM International. (2020). ASTM E399-20: 金属材料の線形弾性平面ひずみ破壊靱性 K_{Ic} の標準試験方法. ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン: ASTM International.
- [17] ASTM International. (2019). ASTM E23-18: 金属材料のノッチ付き棒衝撃試験の標準試験方法. ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン: ASTM International.
- [18] ASTM International. (2019). ASTM E831-19: 熱機械分析による固体材料の線熱膨張の標準試験方法. ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン: ASTM International.
- [19] ASTM International. (2019). ASTM E1461-13: フラッシュ法による熱拡散率の標準試験方法. ペンシルベニア州ウェストコンショホッケン: ASTM International.
- [20] 国際モリブデン協会 (IMOA). (2024). モリブデン市場概要. ロンドン: IMOA.
- [21] Market Research Intellect. (2025). モリブデン銅合金市場の規模、シェア、動向分析 2024-2033. ニューアーク、ニュージャージー州: Market Research Intellect.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- [22] MarkNtel Advisors. (2024). モリブデン市場規模、シェア、成長動向、2025-2030 年. ノイダ: MarkNtel Advisors.
- [23] C- Therm Technologies Ltd. (2022). 電子機器の冷却における熱伝導率
- [24] Electronics Cooling Magazine. (2020). 電子機器用熱管理材料の進歩.
- [25] Wikipedia (2010). 銅-タングステン.
- [26] タングステン銅ネット。タングステン銅ヒートシンク。
- [27] ScienceDirect. 核融合ヒートシンク用途の W-Cu 金属マトリックス複合材料の熱機械的挙動: Cu 含有量の影響。
- [28] Grand View Research. (2023). モリブデン市場規模、シェア、動向分析レポート 2023-2030. カリフォルニア州サンフランシスコ: Grand View Research.
- [29] Future Market Insights. (2025). モリブデン市場規模と成長見通し 2025-2035 年. ニューヨーク: Future Market Insights.



CTIA GROUP LTD タングステン銅ヒートシンク

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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