

タングステンセメントカーバイド  
物理的・化学的特性、プロセス、応用に関する総合的な  
探究（XIV）

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD は、インダストリアル・インターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造の推進に尽力しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、1997 年に [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)（中国初の一流タングステン製品ウェブサイトを）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 万人近くのリフォロワーを抱え、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惜しみなく共有しています。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、国内外で著名なタングステンおよびモリブデン製品の専門家です。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、業界で広く称賛されています。これらの成果は、CTIA GROUP の技術革新、製品のプロモーション、業界交流に強力なサポートを提供し、同社が世界的なタングステンおよびモリブデン製品の製造と情報サービスのリーダーとなることを推進しています。



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP® | ハードテクノロジー、スマートな未来

タングステン、モリブデン、希土類元素産業向けデジタルおよびインテリジェントサービスの世界的リーダー

超硬合金ノズルのカスタマイズ加工

寿命などの特性を備えており、サンドブラスト、スプレー、ウォータージェット切断、石油掘削、化学工業、農業、食品加工などの分野で広く使用されています。

超硬ノズルの主な特徴

硬度: HRA 88 - 92、精度: ノズル穴公差 $\pm 0.001\text{mm}$ 、表面粗さ Ra0.10.4 $\mu\text{m}$ 。

適応性: 耐熱性 800 ~ 1000°C、耐腐食性 pH 210。

効率: 高圧 (0.1500 MPa) 注入をサポートし、効率が 20 ~ 50% 向上します。

寿命: 耐摩耗性に優れ、寿命は通常の素材の 515 倍です。

カスタマイズ: さまざまなタイプ (サンドブラスト、アトマイズ、粉乳製造など)、さまざまな作業条件に適しています。

カーバイドノズルの主な種類

タイプ	説明する	主な用途と適用シナリオ	標準仕様 mm
サンドブラストノズル サンドブラストノズル	耐摩耗性に優れた設計、研磨ブラスト	船舶のサビ取り、自動車部品のバリ取り、コンクリート洗浄。	ノズル径 2~12、長さ 50~200
ウォータージェットノズル ウォータージェットノズル	高圧水ジェット、硬質材料の切断	航空宇宙用チタン切断、自動車用複合材切断、石材加工。	ノズル径は 0.12、長さは 20~100、
スプレーノズル スプレーコーティングノズル	塗料やセラミックコーティングの精密スプレー	タービンブレードコーティング、エンジンコーティング、電子基板スプレー。	ノズル径は 0.55、長さは 30~150、
油田ノズル 油田ノズル	耐圧性、耐腐食性、掘削噴射	石油掘削液の注入、坑内洗浄、採掘泥の注入。	ノズル径 3~15、長さ 50~150、
噴霧ノズル 噴霧ノズル	微細霧化スプレー、液体分散	農業用農薬散布、薬液噴霧、環境腐ガス処理。	ノズル径は 0.23、長さは 20~100、
燃焼ノズル バーナーノズル	耐高温設計、燃料またはガス噴射	エネルギーボイラー燃焼、化学高温反応、冶金炉注入。	ノズル径 1~10、長さ 30~120、
マイクロノズル マイクロノズル	超小径ノズル穴、高精度噴射	医療用薬剤スプレー、電子チップ洗浄、航空精密コーティング。	ノズル径 0.05~0.5、長さ 10~50
耐腐食性ノズル 耐腐食性ノズル	強酸、強アルカリ、強化学環境への耐性	化学酸・アルカリ溶液注入、環境保護脱硫・脱窒、海洋工学海水注入。	ノズル径 1~10、長さ 30~150、
粉乳製造ノズル 粉ミルクスプレーノズル	エマルジョンを均一に霧化するためのスプレー乾燥用に特別に設計されています。	食品加工、粉乳製造、農産物乳製品加工、FDA/EU 食品接触基準に準拠。	ノズル径は 0.53mm です。長さ 20100mm、

CTIA グループ株式会社

361008 厦門ソフトウェアパーク II

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

en.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatun

1



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

CTIA グループ株式会社

超硬合金プレス金型のカスタマイズ加工

超硬合金製プレス金型は、耐摩耗性、耐腐食性、耐高温性、長寿命などの特性を備えており、自動車製造、電子部品加工、ハードウェア製品、航空宇宙、医療機器などの分野で広く使用されています。

超硬合金スタンピングダイスの主な特徴

硬度:HRA 8892。精度:金型公差 $\pm 0.001\text{mm}$ 、表面粗さ Ra 0.1 - 0.4 $\mu\text{m}$ 。

適応性: 耐熱性 800 ~ 1000°C、耐腐食性 pH 210。

効率: 高周波スタンピングをサポートし、効率が 2050% 向上します。

寿命: 耐摩耗性に優れ、寿命は通常金型の 515 倍です。

カスタマイズ: さまざまなタイプ（絞り型、打ち抜き型、複合型など）、さまざまな作業条件に適しています。

超硬合金スタンピング金型の主な種類

タイプ	説明する	主な用途と適用シナリオ	標準仕様
ストレッチダイ	耐摩耗性に優れた設計で、金属のストレッチ成形に適しています。	自動車ボディパネル、金属コンテナ、アルミ合金シェルの延伸。	ダイスの直径は 10200mm、厚さは 20100mm、打ち抜き寿命は 5 億 200 万回です。
ブランキングダイ	高精度打ち抜き、薄板切断に適しています。	電子部品のリードフレーム、自動車部品、ハードウェアアクセサリの打ち抜き加工。	ダイギャップは、0.010.1mm、厚さは 1580mm、耐用年数は 3 億 150 万回のスタンピングです。
複合金型複合ダイ	複雑な部品に適した、統合された多段階スタンピング。	航空宇宙用コネクタ、医療機器部品、精密ハードウェア複合加工。	ダイスの直径は 20150mm、厚さは 20100mm、寿命は打ち抜き回数 4 億 180 万回です。
油田ダイ	高圧・耐腐食性に優れ、重荷重のスタンピングに適しています。	石油掘削機器部品、天然ガスパイプライン付属品、鉱山機械部品。	金型径は 30200mm、厚さは 30120mm、寿命は 3 億 120 万回の打ち抜き加工です。
高速スタンピングダイ	耐高温性と高周波設計により、迅速なスタンピングに適しています。	自動車用ファスナー、電子コネクタ、連続高速スタンピング生産ライン。	打ち抜き寿命は 6 億 250 万回です。
重負荷モデル	高強度設計で厚板打ち抜き加工に最適です。	重機部品、船舶構造物、建築物の厚板プレス加工。	金型径は 50~300mm、厚さは 30~120mm、寿命は 3 億 120 万回の打ち抜き加工です。
マイクロモールドマイクロダイ	超小型サイズで高精度なマイクロスタンピングに最適です。	医療機器用マイクロ部品、電子機器用マイクロコネクタ、航空センサー用コンポーネント。	打ち抜き寿命は 2080 万回です。
耐腐食性	強酸・強アルカリに耐性がある	化学機器部品、海洋工学付属品、腐食	ダイスの直径は 15150mm、厚さは

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

金型耐腐食性ダイ	り、化学環境でのスタンプに適しています。	性材料のスタンピング。	2080mm、打ち抜き寿命は5億200万回です。
食品グレードのカビ食品グレードダイ	規格に準拠した食品関連部品の刻印用に特別に設計されています。	食品包装用金型および乳製品加工機器部品は、FDA/EU 食品接触基準に準拠しています。	ダイスの直径は10100mm、厚さは1580mm、打ち抜き寿命は5億200万回です。

**CTIA グループ株式会社**

3階、25-1号、望海路、ソフトウェアパーク II、廈門、361008、05925129595、18750234579  
、メールアドレス: [info@ctia.group](mailto:info@ctia.group)



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatun



www.chinatungsten.com



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

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

## CTIA グループ株式会社

## 超硬ボールギアのカスタマイズ加工

超硬ボール歯は、耐摩耗性、耐腐食性、耐高温性、長寿命などの特性を備えており、鉱業、トンネル掘削、道路切削、石油掘削、建設工事、石炭採掘などの分野で広く使用されています。

## 超硬ボール歯の主な種類

タイプ	実用的な説明	主な用途と適用シナリオ	標準仕様 mm
カッティングピック	耐摩耗性に優れた設計、硬岩切削	石炭採掘、トンネル掘削、硬岩採掘。	歯径 1050、長さ 50150
トンネル歯	トンネル掘削機の高強度設計	地下鉄、鉄道トンネル、地下工学掘削。	歯径 1560 長さ 60180
ミリング歯	耐高温高周波切断、道路削り	高速道路の保守、滑走路の削り取り、都市道路の補修。	歯径 830、長さ 40120
ドリリング歯	高圧、腐食、掘削作業に耐性があります。	石油掘削、天然ガス探査、地質調査。	歯径 1040、長さ 50140
回転式掘削歯 回転式掘削歯	高靱性設計、回転式掘削装置	建築杭基礎、橋梁基礎、港湾ターミナル建設。	歯径 2080、長さ 70200
石炭採掘の歯	耐衝撃設計、石炭採掘	露天掘り炭鉱、地下採掘炭鉱、選炭設備。	歯径 1550、長さ 50160
マイクロトゥース	超小型、高精度切断	精密地質探査、マイクロドリリング、航空部品。	歯径 520、長さ 2080
耐腐食性歯 耐腐食性歯	強い耐酸・耐アルカリ性、腐食環境での切断	海底採掘、鉱物抽出、酸性土壌工学。	歯径 1050、長さ 50150
ヘビーデューティーツール	高強度設計、超硬質素材	硬岩鉱山、鉄鉱石採掘、大規模土木破碎。	歯径 20100、長さ 80220

CTIA グループ株式会社

361008 厦門ソフトウェアパーク II

望海路 25 号 3 階、05925129595 18750234579

メールアドレス: info@ctia.group

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

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

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



## 第 4 部：超硬合金の分類と応用分野

### 第 14 章 超硬合金の新たな用途と多機能性

タングステンセメントカーバイドは、粉末冶金法によって製造される、高硬度、耐摩耗性、靱性を備えた複合材料です。硬質相として炭化タングステン（WC）を使用し、結合相としてコバルト（Co）またはその他の金属（ニッケル、Ni、クロム、Cr など）を使用します。基本成分は通常、WC（70%～94%）、Co（6%～15%）などです。高度な配合では、TiC などの元素が添加されることもあります。性能を最適化するために TaC または Pt を使用します。優れた物理的・化学的特性を持つ超硬合金は、現代産業および新興技術分野において重要な材料となっています。

#### 14.0 超硬合金の特性

超硬合金の性能は、その独自の微細構造と組成設計から生まれます。

##### 高硬度

硬度範囲は HV 1600～2500±30 です。WC の高い硬度（ダイヤモンドに近い）により、高温（最大 1000°C±20°C）でも優れた変形耐性を維持します。

##### 優れた耐摩耗性

摩耗率は  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  です。耐摩耗性は鋼の 10～20 倍であり、切削工具や研磨加工などの摩耗性の高い環境に適しています。

##### 電気伝導性

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

抵抗率は  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  であり、これは金属導体の抵抗率に近いいため、特に効率的な放熱が必要な電子機器用途に適しています。

#### 生体適合性

細胞生存率は  $95\% \pm 2\%$  を超えており、表面処理後に生体内移植に使用でき、毒性が低く、組織適合性が良好です。

#### 触媒性能

MOR (メタノール酸化反応) 電流が  $450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$  を超える WC ベースの触媒は燃料電池で優れた性能を発揮し、貴金属 Pt の触媒効率に近づきます。

#### 熱安定性

$800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  でも構造的完全性を維持し、熱膨張係数が低い (約  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) ため、高温処理やエネルギー貯蔵デバイスに適しています。

#### 機械的強度

曲げ強度  $600 \sim 2000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ 、Co 含有量を調整することで硬度と靱性のバランスを実現。

超硬合金の性能は、組成最適化 (Co  $6\% \sim 15\% \pm 1\%$  による靱性制御、Pt  $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$  による触媒性能向上など)、表面改質 (PVD/CVD コーティング厚さ  $15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$  による耐食性向上など)、および高度な製造プロセス (選択的レーザー溶融 SLM、レーザー出力  $200 \sim 400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$  など) によって大幅に向上しました。例えば、導電性は約  $20\% \pm 3\%$  向上し、触媒効率は約  $30\% \pm 5\%$  向上し、気孔率は  $2\% \pm 0.1\%$  未満に低減され、多機能用途への基盤が築かれています。

## 14.0 超硬合金の多機能応用

超硬合金は新興分野で汎用性を発揮しています。その優れた性能 (高硬度 HV  $1600 \sim 2000 \pm 30$ 、圧縮強度  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ 、導電率  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、耐腐食性腐食速度  $< 0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ) により、エレクトロニクス、バイオメディカル、触媒エネルギー貯蔵、積層造形などの最先端分野で広く使用されています。さらに、完全なネットワーク検索と最新の業界動向に基づいて、超硬合金の多機能応用は、以下の側面を含むがこれらに限定されない、より多くの分野に拡大しています。本章では、5つの側面から始め、その応用と開発の動向を体系的に分析し、後続のセクションの理論的および実践的基礎を提供します。

### 超硬合金製の電子部品および導電部品

超硬合金は、その高い電気伝導性と熱安定性 ( $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  までの温度に耐える) により、電子金型、放熱基板、電気接点材料として理想的な選択肢となっており、特に半導体パッケージ (チップリードフレーム)、5G 機器 (高周波アンテナブラケット)、電気自動車のバッテリーコネクタなどに用いられています。オンラインデータによると、超硬合金 (WC-Ni など) は、その低い抵抗率 ( $< 8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) と優れた耐酸化性 ( $< 0.01\% \pm 0.001\%$ ) により、マイクロエレクトロニクス加工ツールや超高密度回路基板ドリルに利用されており、5G 基地局 (データ伝送速度  $> 10 \text{ Gbps} \pm 1 \text{ Gbps}$ ) や量子コンピューティングデバイス (動

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

作温度 $<4K\pm 0.5K$ )の高精度・耐久性要件を満たしています。さらに、グラフェン(0.2%-1% $\pm 0.01\%$ )と組み合わせた WC ベースの複合材料は導電性が向上し( $>150\text{ S/cm}\pm 5\text{ S/cm}$ )、フレキシブルエレクトロニクス(ウェアラブルセンサーなど、柔軟性 $>90\%\pm 2\%$ )や電磁シールド(シールド効率 $>90\text{ dB}\pm 2\text{ dB}$ )に利用され始めています。

### 超硬合金の生体医学的应用

生体適合性(細胞毒性 $<5\%\pm 1\%$ )、耐摩耗性(摩耗率 $<0.05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ )、高硬度の超硬合金は、インプラント(股関節や膝関節の人工関節など)や手術器具(骨鋸や骨ドリルなど)の開発をサポートし、表面改質技術(ハイドロキシアパタイトコーティング、厚さ $5\sim 10\text{ nm}\pm 0.1\text{ nm}$ など)と組み合わせることで、医療機器の高精度( $<0.1\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ )および長期安定性( $>10\text{ 年}\pm 1\text{ 年}$ )の要件を満たします。オンラインデータによると、WC-Co は歯科インプラント(骨結合率 $>95\%\pm 2\%$ )や脊椎固定具(疲労強度 $>1200\text{ MPa}\pm 50\text{ MPa}$ )でますます使用されており、表面窒化(N含有量 $1\%-2\%\pm 0.1\%$ )により抗菌性(抗菌率 $>90\%\pm 2\%$ )が向上しています。さらに、WC ベースの材料は、高い比表面積( $>50\text{ m}^2/\text{g}\pm 5\text{ m}^2/\text{g}$ )と生体活性(細胞付着率 $>85\%\pm 2\%$ )を備えているため、バイオセンサー(感度 $>10^3\pm 10^2$ )や組織工学スキャフォールド(多孔度 $20\%-30\%\pm 1\%$ )としての可能性を示しています。

### 超硬合金の触媒作用とエネルギー貯蔵

WC-Pt 複合材料(MOR 電流 $>450\text{ mA/cm}^2\pm 10\text{ mA/cm}^2$ )の触媒性能は、燃料電池(電力密度 $>1\text{ W/cm}^2\pm 0.1\text{ W/cm}^2$ )および電解装置(水素生成 $>1\text{ L/分}\pm 0.1\text{ L/分}$ )において優れており、特に水素経済(世界市場 $>2000\text{ 億米ドル}\pm 200\text{ 億米ドル}$ 、2025年)におけるクリーンエネルギー技術の発展を促進し、大きな可能性を秘めています。研究データによると、タングステンカーバイド(WC)ベースの材料はスーパーキャパシタ(比容量 $>200\text{ F/g}\pm 10\text{ F/g}$ )、リチウムイオン電池のアノード(比容量 $>500\text{ mAh/g}\pm 50\text{ mAh/g}$ )、水素製造用の水電気分解(OER 電流 $>300\text{ mA/cm}^2\pm 10\text{ mA/cm}^2$ )に応用されており、WC-Mo ドーピング(Mo $1\%-3\%\pm 0.1\%$ )によって OER 効率(電流 $>350\text{ mA/cm}^2\pm 10\text{ mA/cm}^2$ )が向上しています。さらに、炭化タングステン(WC)系材料の $\text{CO}_2$ 還元(変換率 $>80\%\pm 2\%$ )およびアンモニア合成(収率 $>100\text{ mg/h}\cdot\text{g}\pm 10\text{ mg/h}\cdot\text{g}$ )における触媒活性は、その多相構造と高い安定性(耐食性 $<0.008\text{ mm/年}\pm 0.001\text{ mm/年}$ )により注目を集めており、カーボンニュートラル目標(2040年 $\pm 5$ 年にネットゼロ排出)を支えています。

### 超硬合金の積層造形

SLM やバインダーージェットティングなどの 3D 印刷技術により、セメント炭化物は複雑な幾何学的形状(精度 $<0.1\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ )のカスタマイズ生産を実現できます。これは航空宇宙(タービンブレード、耐高温性 $>800^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ )、金型製造(耐摩耗性スタンピング金型、寿命 $>10^6\text{ 回}\pm 10^4\text{ 回}$ )、エネルギー機器(高温バルブ、圧力 $>500\text{ MPa}\pm 50\text{ MPa}$ )に使用され、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製造柔軟性が大幅に向上します（印刷速度 $>100\text{mm}^3/\text{s}\pm 10\text{mm}^3/\text{s}$ ）。ネット全体の情報によると、DED および EBM 技術は、大型構造部品（界面強度 $>800\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ ）の補修や傾斜材料製造（Co 含有量 6%~15% $\pm 1\%$ の傾斜変化）に利用されており、WC- TiC 複合材料の高温環境（ $>1000^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ ）における引張強度は $>1300\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$  である。積層造形は、マイクロナノデバイス（特徴サイズ $<10\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ ）やバイオプリンティング（スキャフォールドの多孔度 20%~40% $\pm 1\%$ ）にも拡大しており、個別化医療や軽量構造設計の推進に貢献している。

## 防衛および極限環境用途向け超硬合金

超硬合金は、防衛分野や過酷な環境においてますます利用されています。WC-Co は、その高い硬度（HV 1800 $\pm 30$ ）と耐衝撃性（衝撃靱性 $>20\text{J}/\text{cm}^2\pm 2\text{J}/\text{cm}^2$ ）により、装甲貫通弾頭（貫通深度 $>500\text{mm}\pm 50\text{mm}$ ）や防弾装甲（防護レベル NIJ IV $\pm 1$ ）に使用されています。WC- TiC-WN 複合材料は、高ひずみ速度（ $>10^3\text{s}^{-1}\pm 10^2\text{s}^{-1}$ ）においても構造的完全性（残留変形 $<0.1\%\pm 0.01\%$ ）を維持します。

深海機器（圧力  $>1000\text{bar}\pm 100\text{bar}$ ）および宇宙技術（真空  $<10^{-6}\text{Pa}\pm 10^{-7}\text{Pa}$ 、温度  $-150^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ ）では、熱膨張係数が低い（ $5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}\pm 0.5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）ことと耐腐食性（ $<0.005\text{mm}/\text{年}\pm 0.001\text{mm}/\text{年}$ ）ことから、タングステンカーバイド（WC）ベースの材料がシールや熱保護コーティング（耐熱性  $>1200^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ ）として使用されています。さらに、WC は、原子力産業（放射線耐性  $>10^6\text{Gy}\pm 10^5\text{Gy}$ ）や高エネルギー物理学実験（粒子ビーム安定性  $>99\%\pm 0.5\%$ ）における遮蔽材やターゲット材として多機能な可能性を示しています。

## 超硬合金のインテリジェント製造とセンサー応用

インテリジェントな製造技術と組み合わせた超硬合金は、センサーや IoT の分野にも広がっています。オンラインデータによると、WC ベースの材料は、その高い導電性（ $>100\text{S}/\text{cm}\pm 5\text{S}/\text{cm}$ ）と機械的安定性（圧縮強度 $>3500\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$ ）により、圧力センサー（感度 $>10^2\text{kPa}^{-1}\pm 10\text{kPa}^{-1}$ ）、温度センサー（応答時間 $<0.1\text{s}\pm 0.01\text{s}$ ）、振動モニター（周波数範囲 10 Hz-10 kHz $\pm 1\text{Hz}$ ）に使用されています。統合ナノコーティング（ $\text{SiO}_2$ 、厚さ 5~10nm $\pm 0.1\text{nm}$ ）は、環境適応性（湿度 50%~95%RH $\pm 5\%$ RH）を向上させます。インダストリー 4.0 では、WC ベースのスマートツール（自己診断寿命 $>10^5\text{回}\pm 10^4\text{回}$ ）は、内蔵センサーによるリアルタイムモニタリング（精度 $\pm 1\%$ ）、切削加工の最適化（ツール摩耗率 $<0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.001\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）および 3D プリントパラメータ調整を実現します。

における具体的な応用例、技術的課題、将来の展望を詳しく説明し、多機能性によって超硬合金がいかんして多様化する産業ニーズに応えることができるかを明らかにします。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

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

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



#### 14.1 超合金電子・導電性部品

エレクトロニクス分野において、超合金は、高硬度（HV 1800-2200±30）、低抵抗率（ $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）、優れた熱伝導率（ $>100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、優れた熱安定性（動作温度は  $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  に達する）などの特性から、大きな注目を集めています。主に金型や放熱基板に用いられています。金型は、チップパッケージング、精密スタンピング、マイクロエレクトロニクス部品の加工に用いられ、その寿命は最大  $10^6$  倍  $\pm 10^5$  倍です。放熱基板は、高出力電子デバイス（パワーモジュール、LED、5G 基地局部品など）をサポートし、放熱効率は  $90\% \pm 2\%$  以上、熱膨張係数は低く（約  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）、熱サイクル中の寸法安定性を確保しています。材料は主に WC-Co システム（超合金の Co 含有量は  $6\% \sim 12\% \pm 1\%$ ）に基づいており、超合金原料の粒径は  $0.5 \sim 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  に制御され、電気伝導率と熱伝導率は Cu（ $1\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ）または Ni（ $2\% \sim 8\% \pm 0.5\%$ ）をドーピングして最適化されています。一部のハイエンド処方では、触媒特性と導電性を高めるために Pt（ $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ）が追加されています。超合金は融点が高い（約  $2870^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ）ため、過酷な環境下でも優れた耐久性を発揮します。また、耐腐食性（PVD コーティングにより耐腐食指数  $90\% \pm 2\%$  以上）も高く、その応用範囲がさらに広がります。2025 年には、エレクトロニクス産業が高周波化、高出力化、小型化へと進むにつれ、半導体製造、電気自動車の電源管理、スマートデバイスにおける超合金の需要は引き続き拡大すると予想されます。

電子産業において、超合金は優れた硬度（HV 1600-2000±30）、耐摩耗性（摩耗率  $<0.05$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm<sup>3</sup>/N·m±0.01 mm<sup>3</sup>/N·m)、高熱伝導率（熱伝導率>100 W/m·K±5 W/m·K）、耐高溫性（耐熱温度>800°C±50°C）を有し、金型や放熱基板の製造に広く使用されています。これらの特性により、超硬合金は精密加工や効率的な放熱の場面で優れた性能を発揮し、特に半導体、5G 技術、電気自動車の分野でその威力を発揮します。電子機器の小型化・高密度集積化の需要が高まるにつれ、超硬合金の電子産業における応用展望は拡大し続けています。

#### 14.1.1 エレクトロニクス産業向け硬質合金金型

超硬合金電子産業用金型は、電子部品の精密加工に用いられます。マイクロエレクトロニクスデバイス製造の高い要求を満たすため、高精度（加工偏差<0.01mm±0.001mm）、優れた耐腐食性（腐食速度<0.01mm/年±0.001mm/年）、長寿命（>10<sup>6</sup>回±10<sup>4</sup>回）が求められます。材質は主に WC-Co 系（Co 含有量 6%～10%±1%）で、超硬合金原料の粒径は 0.5～1μm±0.01μm に制御されています。さらに、耐摩耗性と耐酸化性を向上させるために、TiN（厚さ 5～15μm±0.1μm）や CrN（厚さ 10～20μm±0.2μm）などの表面コーティングが施されています。金型は、熱間等方圧プレス（HIP、1200°C±10°C、150 MPa±1 MPa）またはレーザー表面処理によって最適化されます。

電子産業において、超硬合金金型は、その優れた硬度（HV 1600-2000±30）、耐摩耗性（摩耗速度<0.05 mm<sup>3</sup>/N·m±0.01 mm<sup>3</sup>/N·m）、高耐熱性（温度耐性>800°C±50°C）、優れた精度、優れた導電性と耐腐食性により、電子部品の製造プロセスに欠かせないコアツールとなっています。電子産業が超小型化、高性能、インテリジェント化、グリーン化、多機能化に向けて急速に発展するにつれて、超硬合金金型の応用シナリオは大幅に拡大し、市場の需要は継続的に高まっています。これらの金型は、継続的な技術反復、材料配合の最適化、先進的な製造プロセス（付加製造、精密表面処理、インテリジェント監視技術など）の革新を通じて急速に更新され、超硬合金業界で最も重要かつ最も急速に成長しているハイエンド消費分野の 1 つになっています。超硬合金金型は、半導体製造、フレキシブルエレクトロニクス技術、5G/6G 通信、コンシューマーエレクトロニクス、新エネルギー自動車エレクトロニクス、IoT 機器、そして量子コンピューティングやスマート医療機器といった新興分野において広く利用されています。市場規模は 50 億±5 億米ドルに達すると予想され、年間成長率は最大 15%～20%に達し、エレクトロニクス産業における技術進歩と産業高度化の推進における重要な位置を占めていることを十分に反映しています。

##### (1) 超硬リードフレーム打ち抜き金型

#### 超硬リードフレーム打ち抜き金型とは何ですか？

超硬リードフレーム打ち抜き金型は、半導体パッケージング分野向けに特別に設計された高精度加工ツールです。主に IC ピン成形、LED ブラケット加工、パワーモジュールリード成形、新型マイクロセンサーリード製造などに用いられます。コア材には WC-8Co 配合を採用し、粒径は 0.6μm±0.01μm に精密制御されています。粉末冶金および熱間静水圧

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プレス（HIP、 $1200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $150\text{MPa}\pm 1\text{MPa}$ ）プロセスによって製造され、材料の均一性と高密度（気孔率 $<0.5\%\pm 0.1\%$ ）を確保しています。物理蒸着法（PVD）技術により金型表面に TiN コーティング（厚さ  $5\sim 10\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ ）を施すことで、摩擦係数（ $<0.2\pm 0.02$ ）を大幅に低減し、耐酸化性（耐久温度  $600^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）を高め、付着性を低減することで、耐久性（最大  $1.2\times 10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回）とブランピング精度（ $<0.005\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）を効果的に向上させます。レーザーマイクロマシニング、多層コーティング（TiAlN または TiSiN など、厚さ  $10\sim 15\mu\text{m}\pm 0.2\mu\text{m}$ ）、適応冷却技術を組み合わせることで、金型はさらに最適化され、超微細リード（幅 $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）、高周波安定性（ $>10\text{GHz}\pm 1\text{GHz}$ ）、熱サイクル耐性（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）をサポートするとともに、デジタルツイン技術により、リアルタイム摩耗モニタリング（精度 $\pm 1\%$ ）とパラメータ最適化を実現し、超高精度、超大規模生産のニーズに対応します。

### 超硬リードフレーム打ち抜き金型の性能

この金型は、高硬度（HV  $1800\pm 30$ ）、優れた耐摩耗性（摩耗速度  $<0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.001\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、高耐久性（ $>1.2\times 10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回）、および極めて高い打ち抜き精度（ $<0.005\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）を備えています。TiN コーティングは、摩擦を大幅に低減し（ $<0.2\pm 0.02$ ）、耐酸化性を向上させ（ $600^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$  まで耐性）、多層コーティング（TiAlN など、耐熱性  $>800^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ）と適応型冷却技術により、熱サイクル安定性（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）を高めます。さらに、デジタルツイン統合により、摩耗予測（誤差  $<5\%\pm 0.5\%$ ）とプロセス最適化が可能になります。

### 超硬リードフレーム打ち抜き金型の種類

#### 標準金型

WC-8Co をベースとし、精度は $<0.005\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ 、耐久性は  $1\times 10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回で、従来の IC ピンおよび LED ブラケット加工に適しております。

#### 高温金型

TiC（ $5\%\sim 10\%\pm 0.5\%$ ）および TiAlN コーティング（ $10\sim 15\mu\text{m}\pm 0.2\mu\text{m}$ ）を追加し、耐熱性が  $800^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$  を超え、IGBT パッケージなどのパワーモジュールに適しています。

#### 超微細金型

最適化された粒径（ $<0.5\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）とレーザーマイクロマシニングにより、リード幅  $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$  をサポートし、5nm/3nm プロセスとマイクロ LED の要件を満たします。

#### インテリジェントな金型

組み込みセンサーとデジタル ツイン モジュールは摩耗を監視し（精度  $\pm 1\%$ ）、高周波（ $>10\text{GHz}\pm 1\text{GHz}$ ）アプリケーション向けにパラメータをリアルタイムで調整します。

### 超硬リードフレーム打ち抜き金型の応用

超硬リードフレーム打ち抜き金型は、多くのハイテク分野で広く使用されており、特に半導体および電子産業で重要な役割を果たしています。5nm および 3nm プロセスチップの

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製造などの高密度集積回路の製造において、金型はリードフレームの超高精度と一貫性を確保し、ハイエンドプロセッサおよびメモリの大量生産をサポートしています。パワー半導体パッケージングの分野では、金型は IGBT モジュール、MOSFET、SiC および GaN パワーデバイスの製造に使用され、電気自動車、太陽光発電インバータ、産業用モータードライブの高い信頼性要件を満たしています。マイクロ LED パッケージングは、もう 1 つの重要な応用分野です。金型の高精度パンチング技術は、マイクロディスプレイやウェアラブルデバイス用の光学部品の製造をサポートし、ディスプレイの輝度と解像度を向上させます。

さらに、金型は MEMS（微小電気機械システム）センサー、圧力センサー、慣性測定ユニット（IMU）などの新しいマイクロセンサーの製造に広く使用されており、スマートデバイス、IoT ノード、医療用電子機器の重要なサポートを提供しています。車載グレードのエレクトロニクス、特に自動運転チップ、レーダーモジュール、オンボードコンピューティングユニットのパッケージングでは、金型の熱サイクル耐性（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）と高周波安定性（ $> 10\text{GHz}\pm 1\text{GHz}$ ）により、電子システムの長期安定性と安全性が保証されています。高性能コンピューティングチップと量子コンピューティングデバイスも、金型の超微細リード加工能力（幅 $< 0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）に依存しており、人工知能アクセラレータと量子ビット制御回路の開発を促進しています。

民生用電子機器分野では、金型がスマートフォン、タブレット、ゲーム機などの多層リードフレームの加工をサポートし、製品の薄型化と性能向上に貢献しています。産業オートメーション分野では、金型をインテリジェント製造技術と組み合わせることで、精密機械部品やコネクタの大量生産に活用し、生産効率を最適化（ $20\%\pm 2\%$ 以上向上）しています。デジタルツイン技術により、金型は予知保全とプロセスパラメータの最適化を実現し、ダウンタイムを削減（ $15\%\pm 2\%$ 以上削減）するほか、航空宇宙用電子機器（衛星通信モジュールなど）や防衛用電子機器（レーダーやミサイル誘導システムなど）の過酷な環境要件にも適しており、その応用範囲がさらに拡大しています。

## （2）超硬チップ包装金型

超硬チップ包装金型とは何ですか？

超硬チップパッケージング金型は、マイクロエレクトロニクスデバイスのパッケージング分野向けに特別に設計された高精度加工ツールであり、主に BGA（ボールグリッドアレイ）、QFN（クアドフラットノーリードパッケージ）、SIP（システムインパッケージ）、3D IC スタッキング、ウェーハレベルパッケージ（WLP）に使用されます。コア材料には WC-6Co 配合を使用し、粒径は  $0.5\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$  の精度です。超微粉ボールミルおよび焼結プロセスにより高密度（気孔率 $< 0.5\%\pm 0.1\%$ ）を実現し、複雑な幾何学的設計（マイクロチャネル幅  $0.02\sim 0.05\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ 、深さ  $0.1\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ 、側壁垂直度 $< 1^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$ など）と組み合わされています。CrN コーティング（厚さ  $10\sim 15\mu\text{m}$ ） $\pm 0.2\mu\text{m}$  の多層コーティング（マルチアーキオンプレーティング技術を使用）を金型表面に施すことで、耐腐食性

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（腐食速度 $<0.008$  mm/年 $\pm 0.001$  mm/年）と耐高温性（ $>350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ）が大幅に向上し、耐用年数が効果的に延長されます（約 $8 \times 10^5$ 回 $\pm 10^4$ 倍）。複雑な構造（内部冷却チャンネルなど）は、PVD コーティング（AlTiN または ZrN など、厚さ $15\text{-}20 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ ）と積層造形技術（選択的レーザー溶融 SLM など）を組み合わせてカスタマイズされます。金型はさらに、高実装密度（ $>1000$  I/O $\pm 50$  I/O）、熱サイクルストレス（ $>5000$  回 $\pm 500$  回）、低ストレス実装プロセスをサポートするように最適化されています。統合センサー技術により、応力分布と温度変化（精度 $\pm 1\%$ ）のリアルタイム監視が実現され、熱管理機能（熱伝導率 $>120$  W/m $\cdot$ K $\pm 10$  W/m $\cdot$ K）とパッケージング歩留まり（ $>98\% \pm 1\%$ ）が向上し、小型化と高信頼性のニーズに対応します。

### 超硬チップ包装金型の性能

この金型は、高硬度（HV $1800 \pm 30$ ）、優れた耐摩耗性（摩耗率 $<0.01$  mm $^3$ /N $\cdot$ m $\pm 0.001$  mm $^3$ /N $\cdot$ m）、高耐久性（ $>8 \times 10^5$ 回 $\pm 10^4$ 回）、および極めて高い形状精度（マイクロチャンネル幅 $0.02\text{-}0.05$  mm $\pm 0.001$  mm、側壁垂直度 $<1^{\circ} \pm 0.1^{\circ}$ ）を備えています。CrN コーティングにより、腐食速度（ $<0.008$  mm/年 $\pm 0.001$  mm/年）が大幅に低減し、高温耐性（ $>350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ）が向上します。また、AlTiN または ZrN 多層コーティングにより、熱サイクル安定性がさらに向上します（ $>5000$  回 $\pm 500$  回に耐え、耐熱性 $>600^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ）。積層造形プロセスにより、内部冷却チャンネルが最適化され、熱管理が改善されます（熱伝導率 $>120$  W/m $\cdot$ K $\pm 10$  W/m $\cdot$ K）。また、センサー統合により、応力監視（誤差 $<5\% \pm 0.5\%$ ）とプロセス最適化が可能になります。

### 超硬チップ包装金型の種類

#### 標準金型

CrN コーティングをベースとし、精度は $0.05\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ 、耐久性は $8 \times 10^5$ 回 $\pm 10^4$ 回で、従来の BGA および QFN パッケージに適しております。

#### 高温金型

TiC（ $5\% \sim 10\% \pm 0.5\%$ ）および AlTiN コーティング（ $15 \sim 20 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ ）を追加し、耐熱性は $600^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ を超え、SIP および 3D IC スタッキングに適しています。

#### 小型化された金型

最適化された粒子（ $<0.4 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）と SLM テクノロジーによりマイクロチャンネル（幅 $<0.02$  mm $\pm 0.001$  mm）をサポートし、WLP およびニューロモルフィックチップのニーズに対応します。

#### インテリジェントな金型

組み込みセンサーとリアルタイム監視モジュールにより、高密度パッケージング（ $>1000$  I/O $\pm 50$  I/O）の応力分散（精度 $\pm 1\%$ ）と熱管理が最適化されます。

### 超硬合金チップ包装金型の応用

超硬チップパッケージング金型は、マイクロエレクトロニクスデバイスパッケージングの

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

多くの最先端分野で広く使用されています。高密度集積回路パッケージングにおいて、この金型は BGA、QFN、WLP 技術をサポートし、5nm 以下のプロセスチップ、人工知能アクセラレータ、メモリなどの高精度要件を満たしています（精度 $<0.05\text{ mm}\pm 0.001\text{ mm}$ ）。3D IC スタッキングおよび SIP（システムレベルパッケージング）において、金型の複雑な幾何学的設計と熱管理機能（熱伝導率 $>120\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）は、マルチチップモジュールと異種統合の開発を促進し、エッジコンピューティングモジュール、高性能サーバー、データセンターハードウェアに広く使用されています。

民生用電子機器分野では、折りたたみ式スクリーンの携帯電話やウェアラブルデバイス（スマートウォッチなど）の小型パッケージングに金型が使用され、マイクロチャネル精度（幅 $0.02\sim 0.05\text{ mm}\pm 0.001\text{ mm}$ ）と耐熱サイクル性（ $>5000\text{ 回}\pm 500\text{ 回}$ ）を確保することで、フレキシブルディスプレイやウェアラブルデバイスの信頼性と耐用年数を向上させています。ニューロモルフィックチップや量子コンピューティングデバイスのパッケージングにおいても、金型の超高精度・低応力プロセスが活用され、新しいコンピューティングアーキテクチャの小型設計を支えています。

車載エレクトロニクスも重要な応用分野の一つです。金型は、先進運転支援システム（ADAS）チップ、レーダーモジュール、車載コンピューティングユニットのパッケージングをサポートし、極端な温度範囲（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）と高い信頼性要件（歩留まり $>98\%\pm 1\%$ ）に適応します。産業オートメーション分野では、精密センサーやアクチュエーターのパッケージングに金型が使用され、インテリジェント製造装置の性能と安定性を向上させています。航空宇宙エレクトロニクス（衛星通信モジュールなど）や防衛エレクトロニクス（レーダーやミサイル誘導システムなど）では、金型の耐腐食性（ $<0.008\text{ mm/年}\pm 0.001\text{ mm/年}$ ）と高温安定性（ $>350^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）を活用して、過酷な環境での長期使用要件を満たしています。

この金型は、センサー統合とデジタルツイン技術により、予測メンテナンス（ダウンタイムを $15\%\pm 2\%$ 以上削減）とプロセスパラメータの最適化を実現し、大量生産（効率が $20\%\pm 2\%$ 以上向上）や超高パッケージ密度（ $I/O1000\pm 50$ 以上）のシナリオに適しており、将来のマイクロエレクトロニクス技術への応用の可能性がさらに広がります。

### （3）超硬回路基板打ち抜き金型

#### 超硬基板打ち抜き金型とは？

超硬合金製回路基板打ち抜き金型は、PCB 加工分野向けに特別に設計された高精度加工ツールで、主に多層基板、HDI（高密度相互接続）基板、フレキシブル回路基板（FPC）、リジッドフレックス基板、新型高周波ミリ波回路基板などに使用されています。コア材には WC-TiC-8Co 配合（TiC $3\%\pm 0.5\%$ ）、粒径は $0.8\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ です。高温（ $1450^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）で焼結し、熱処理を施すことで耐高温疲労性（疲労寿命 $>10^7\text{ 回}\pm 10^5\text{ 回}$ ）を高め、レーザークラディング技術（クラディング層の厚さ $20\sim 30\mu\text{m}\pm 0.5\mu\text{m}$ 、WC-Co 粉末を使用）で摩耗したエッジを修復することで、打ち抜き精度を $0.01\text{ mm}\pm 0.001\text{ mm}$ 未満に抑えてい

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。この金型は、高速パンチング（ $>100$  回/秒 $\pm 10$  回/秒）、複雑な層間アライメント（偏差 $<0.005\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）、微細穴加工（直径 $0.1\sim 0.2\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ ）に対応し、マルチマテリアル複合構造（WC-TiC-TaC、WC-Co-Cr など）により耐久性（ $>1.5\times 10^7$ 回 $\pm 10^5$ 回）と導電性（抵抗率 $<10\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）を最適化します。さらに、この金型はナノコーティング（WC/C、厚さ $5\sim 10\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$  など）を導入して付着防止性能（摩擦係数 $<0.2\pm 0.02$ ）を向上させ、バイオニック構造（ハニカム内部サポートなど）を採用して耐衝撃性（ $>500\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ ）を高め、AI アルゴリズムによってパンチングパスを最適化し、材料の無駄（ $<2\%\pm 0.5\%$ ）を削減し、高性能回路基板処理のニーズを満たします。

### 超硬回路基板打ち抜き金型の性能

この金型は、高硬度（HV $1800\pm 30$ ）、優れた耐摩耗性（摩耗率 $<0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.001\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、高耐久性（ $>1.5\times 10^7$ 回 $\pm 10^5$ 回）、高精度パンチング（ $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）を特徴としています。レーザークラディング技術により、摩耗したエッジを修復し、微細穴加工精度（直径 $0.1\sim 0.2\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ ）を維持するとともに、ナノコーティング（WC/C など）により摩擦係数（ $<0.2\pm 0.02$ ）を低減し、高温酸化耐性（ $>900^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ ）を向上させます。マルチマテリアル複合構造により導電性が最適化され（抵抗率 $<10\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）、バイオニック構造により耐衝撃性が向上し（ $>500\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ ）、AI アルゴリズムの最適化により材料の無駄が削減され（ $<2\%\pm 0.5\%$ ）、全体的に高温疲労耐性が向上します（疲労寿命 $>10^7$ 倍 $\pm 10^5$ 倍）。

### 超硬合金回路基板打ち抜き金型の種類

#### 標準金型

WC-TiC-8Co をベースとし、精度は $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ 、耐久性は $1\times 10^7$ 回 $\pm 10^5$ 回で、多層基板やFPCの打ち抜きに適しています。

#### 高温金型

TaC（ $2\%-5\%\pm 0.5\%$ ）とWC-Co-Cr複合構造を追加することで、 $900^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ を超える耐熱性を持ち、高周波ミリ波回路基板に適しています。

#### マイクロホールモールド

レーザークラディング（厚さ $20\sim 30\mu\text{m}\pm 0.5\mu\text{m}$ ）と微細穴加工（直径 $<0.1\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ ）を最適化し、HDIボードのニーズを満たします。

#### インテリジェントな金型

AI アルゴリズムとバイオニック構造（ハニカムサポート）を組み込んでおり、パンチングパス（精度 $\pm 0.5\%$ ）と耐衝撃性（ $>600\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ ）をリアルタイムで最適化します。

### 超硬合金回路基板打ち抜き金型の応用

超硬合金製回路基板打ち抜き金型は、PCB加工の多くの主要分野で広く使用されています。多層基板やHDI（高密度相互接続）基板の製造において、金型の高精度打ち抜き（ $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）と複雑な層間アライメント（偏差 $<0.005\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）は、スマートフ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

オン、タブレット、サーバーマザーボードの高密度配線要件をサポートします。フレキシブル回路基板（FPC）やリジッドフレックス基板の加工において、金型の高温耐性（ $>900^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ）と耐疲労性（ $>10^7$  倍 $\pm 10^5$  倍）は、折りたたみ式スクリーンの携帯電話、ウェアラブルデバイス、フレキシブルディスプレイの小型化要件を満たします。

新しい高周波ミリ波回路基板の製造は、金型の導電性（抵抗率 $<10\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）と微細穴加工能力（直径 $0.1\text{-}0.2\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ ）に依存しており、5G 基地局、アンテナモジュール、レーダーシステムに広く使用されています。自動車エレクトロニクスの分野では、金型はバッテリー管理システム（BMS）、車載エンターテインメントシステム、先進運転支援システム（ADAS）の回路基板の量産をサポートし、高温環境（ $>900^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ）と高い信頼性要件（歩留まり $>98\%\pm 1\%$ ）に適応しています。スマート家電制御基板の製造では、金型の高速パンチング（ $>100$  回/秒 $\pm 10$  回/秒）と材料節約（廃棄物 $<2\%\pm 0.5\%$ ）を利用して、スマートスピーカーや洗濯機などの家電製品の製造効率を向上させています。

航空電子機器の回路基板（飛行制御モジュールや航法システムなど）や防衛電子機器（ミサイル誘導・通信機器など）は、過酷な環境下での長期使用に耐えるため、金型の耐衝撃性（ $>500\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ ）と耐久性（ $>1.5\times 10^7$  回 $\pm 10^5$  回）に大きく依存しています。IoT デバイスや 6G 技術の発展は、特にエッジコンピューティングモジュールや超高周波回路基板のパッケージングにおいて、金型の応用をさらに促進しています。金型は、AI 最適化とナノコーティング（WC/C）により、高性能と低メンテナンスコスト（ダウンタイムを $15\%\pm 2\%$  以上削減）を実現し、将来のエレクトロニクス産業のインテリジェントで効率的な発展を支えています。

#### （4）超硬マイクロコネクタスタンピングダイ

##### 超硬マイクロコネクタスタンピングダイとは何ですか？

超硬合金製マイクロコネクタプレス金型は、マイクロコネクタ加工分野向けに設計された高精度工具です。主に USB-C、HDMI、Lightning などのマイクロコネクタ、および新しい高速インターフェース（Thunderbolt 5、光電ハイブリッドインターフェースなど）に使用されます。コア材料には WC-10Co 配合を採用し、粒径は  $0.4\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$  です。超微粉末射出成形技術により、材料の均一性、プレス精度 $<0.003\text{mm}\pm 0.0005\text{mm}$ 、耐久性  $1.5\times 10^6$  回 $\pm 10^4$  回を確保しています。プラズマ強化化学蒸着法（PECVD）により金型表面に DLC（ダイヤモンドライクカーボン）コーティング（厚さ  $2\sim 5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ 、硬度 HV  $3000\pm 100$ ）を施すことで、摩耗率（ $<0.02\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.005\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）が大幅に低減し、耐腐食性（塩水噴霧試験 $>500$  時間 $\pm 50$  時間）と潤滑性（摩擦係数 $<0.1\pm 0.01$ ）が向上します。この金型は、ナノコーティング（WC/C、aC:H など、厚さ  $5\sim 15\mu\text{m}\pm 0.2\mu\text{m}$ ）とマイクロ EDM 技術を組み合わせることで、超微細構造（ピッチ $<0.015\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）、高電流搬送（ $>5\text{A}\pm 0.5\text{A}$ ）、光信号伝送安定性（損失 $<0.1\text{dB}/\text{km}\pm 0.01\text{dB}/\text{km}$ ）をサポートし、自己潤滑機能（MoS<sub>2</sub> 添加剤など）により耐用年数を延ばし、メンテナンスコストを削減（ $<5\%\pm 1\%$ ）し、高性能コ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ネクタ加工のニーズを満たします。

### 超硬マイクロコネクタスタンピングダイの性能

この金型は、高硬度（HV 2000±50）、優れた耐摩耗性（摩耗率<0.02 mm<sup>3</sup>/N·m±0.005 mm<sup>3</sup>/N·m）、高耐久性（>1.5×10<sup>6</sup>回 ±10<sup>4</sup>回）、超高スタンピング精度（<0.003 mm±0.0005 mm）を備えています。DLC コーティングは、耐腐食性（耐塩水噴霧性> 500 時間±50 時間）と潤滑性（摩擦係数<0.1±0.01）を向上させ、ナノコーティング（WC/C など）は、耐久性（>2×10<sup>6</sup>回 ±10<sup>4</sup>回）と高温耐性（>600°C±50°C）をさらに向上させます。自己潤滑機能によりメンテナンスコストが最適化され（<5%±1%）、マイクロ EDM は超微細構造（ピッチ<0.015 mm±0.001 mm）をサポートし、高電流（>5A±0.5A）および光信号伝送（損失<0.1 dB/km±0.01 dB/km）のニーズを満たします。

### 超硬マイクロコネクタスタンピングダイの種類

#### 標準金型

WC-10Co および DLC コーティングに基づき、USB-C および HDMI スタンピングに適しており、精度は<0.003mm±0.0005mm、耐久性は 1.5×10<sup>6</sup>回±10<sup>4</sup>回です。

#### 高速金型

WC/C ナノコーティング（5〜15μm±0.2μm）を追加し、Thunderbolt 5 の高電流（>5A±0.5A）をサポートし、耐久性は>2×10<sup>6</sup>回±10<sup>4</sup>回です。

#### 光電金型

マイクロ EDM を最適化して、光電子ハイブリッド インターフェースの光信号安定性（損失 <0.1 dB/km±0.01 dB/km）と精度 <0.002 mm±0.0005 mm を満たします。

#### 自己潤滑型

MoS<sub>2</sub> 添加剤とセンサーが組み込まれているため、メンテナンスコストが削減され（<5%±1%）、高周波使用（>10GHz±1GHz）に適しています。

### 超硬マイクロコネクタスタンピングダイの応用

超硬合金製マイクロコネクタのスタンピングダイは、民生用電子機器やデータセンターで広く使用されています。スマートフォン、タブレット、ノートパソコンでは、USB-C、HDMI、Lightning インターフェースの大量生産をサポートし、超微細構造（ピッチ<0.015 mm±0.001 mm）と高精度スタンピング（<0.003 mm±0.0005 mm）を実現することで、デバイスポートの信頼性とコンパクト性を向上させています。データセンターやサーバーでは、Thunderbolt 5 や高速データインターフェースの製造に使用され、高電流（>5A±0.5A）とデータ転送速度（>40 Gbps±2 Gbps）のニーズを満たしています。

新しい光電ハイブリッドインターフェースの開発は、光信号伝送安定性（損失<0.1 dB/km±0.01 dB/km）と耐久性（>1.5×10<sup>6</sup> 回±10<sup>4</sup> 回）の金型に依存しており、光ファイバー通信機器や高性能コンピューティングクラスターで広く使用されています。自動車エレクトロニクスでは、この金型は車載インフォテインメントシステムや先進運転支援システ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ム（ADAS）用のコネクタの加工をサポートし、高温環境（ $>600^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ）と高い信頼性要件（歩留まり $>98\%\pm 1\%$ ）に適応しています。スマートスピーカーやルーターなどのスマートホームデバイスでも、製品の耐久性を向上させるために、金型の高速パンチング（ $>100$  回/秒 $\pm 10$  回/秒）と耐腐食性（塩水噴霧耐性 $>500$  時間 $\pm 50$  時間）が使用されています。

産業オートメーションおよび IoT デバイス（産業用制御モジュールやセンサーノードなど）は、金型の潤滑性（摩擦係数 $<0.1\pm 0.01$ ）と自己潤滑機能を利用して、メンテナンスコスト（ $<5\%\pm 1\%$ ）を削減し、生産効率（ $>20\%\pm 2\%$ の増加）を最適化します。航空宇宙電子機器（衛星通信モジュールなど）や防衛電子機器（暗号化通信機器など）は、金型の耐衝撃性（ $>500\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ ）と耐久性を利用して、過酷な環境での長期使用のニーズを満たします。ナノコーティングと AI 最適化により、金型は将来の高速インターフェース（6G 通信など）と小型コネクタの開発をさらにサポートし、エレクトロニクス産業の効率とイノベーションを促進します。

### （5）炭化物センサー包装用金型

#### 超硬センサー包装金型とは何ですか？

超硬合金製センサーパッケージング金型は、センサーパッケージング分野向けに特別に設計された高精度ツールで、主に MEMS（微小電気機械システム）、環境センサー（圧力、温度、ガスセンサーなど）、医療センサー（血中酸素、ECG センサーなど）に使用されています。コア材料は WC-Co-Ni 配合（Ni $2\%\pm 0.5\%$ ）、粒径  $0.7\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ 、熱間静水圧プレス（HIP、 $1200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $150\text{MPa}\pm 1\text{MPa}$ ）により密度（気孔率 $<0.5\%\pm 0.1\%$ ）を向上させ、複雑な 3D 構造（高さ  $0.05\sim 0.1\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ 、側壁粗さ  $Ra<0.2\mu\text{m}\pm 0.05\mu\text{m}$ ）をサポートします。寿命は約  $7\times 10^5$  回 $\pm 10^4$  回です。金型表面に ALD（原子層堆積）コーティング（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、厚さ  $10\sim 20\text{nm}\pm 0.5\text{nm}$  など）を施し、耐湿性（耐湿性 $>95\%\text{RH}\pm 2\%\text{RH}$ ）と抗菌性能（抗菌率 $>99\%\pm 0.5\%$ ）を高め、マイクロ冷却チャネル（直径  $0.01\sim 0.02\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）を使用して高温パッケージングプロセス（ $>200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）を最適化します。埋め込みセンサーがパッケージングストレス（ $<10\text{MPa}\pm 1\text{MPa}$ ）を監視し、小型化（サイズ $<1\text{mm}^3\pm 0.1\text{mm}^3$ ）、高精度（偏差 $<0.001\text{mm}\pm 0.0002\text{mm}$ ）、生体適合性（ISO 10993 規格に準拠）の要件を満たします。

#### 炭化物センサーパッケージング金型の性能

この金型は、高硬度（HV  $1800\pm 30$ ）、優れた耐摩耗性（摩耗率  $<0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.001\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、高耐久性（ $>7\times 10^5$  回  $\pm 10^4$  回）、高精度パッケージング（偏差  $<0.001\text{mm}\pm 0.0002\text{mm}$ ）を備えています。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ コーティングにより、耐湿性（ $>95\%\text{RH}\pm 2\%\text{RH}$ ）と抗菌性（抗菌率 $>99\%\pm 0.5\%$ ）が向上し、マイクロ冷却チャネルが温度管理を最適化（温度制御 $<200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）、埋め込みセンサーが応力を監視（ $<10\text{MPa}\pm 1\text{MPa}$ ）、複雑な 3D 構造（高さ  $0.05\sim 0.1\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ 、側壁粗さ  $Ra<0.2\mu\text{m}\pm 0.05\mu\text{m}$ ）をサポートし、生体適合性と高温パッケージングの要件を満たしています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 炭化物センサパッケージング金型の種類

### 標準金型

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コーティングに基づき、MEMS および環境センサーに適しており、精度は <math><0.001\text{mm}\pm 0.0002\text{mm}</math>、耐久性は  $7\times 10^5$  回 $\pm 10^4$  回です。

### 高温金型

TiC (5%-10% $\pm 0.5\%$ )を追加すると、産業用 IoT センサーに適した高温パッケージング (>200°C $\pm 10^\circ\text{C}$ ) がサポートされます。

### 医療用カビ

最適化された生体適合性 (ISO 10993)、血中酸素および ECG センサー用のマイクロ冷却チャンネル (直径 <math><0.01\text{ mm}\pm 0.001\text{ mm}</math>)。

### インテリジェントな金型

高精度ウェアラブルデバイスのパッケージングに適した、リアルタイムモニタリング (精度 $\pm 1\%$ ) 用の組み込み応力センサー。

## 炭化物センサパッケージング金型の応用

超硬センサーのパッケージング金型は、スマートホーム、産業用 IoT、医療用電子機器に広く使用されています。スマートホームでは、金型がスマートサーモスタット、空気質センサー、スマート照明コントローラーのパッケージングをサポートし、小型化 (サイズ <math><1\text{ mm}^3\pm 0.1\text{ mm}^3</math>) と高精度 (偏差 <math><0.001\text{ mm}\pm 0.0002\text{ mm}</math>) を確保し、機器の応答性と省エネ性を向上させます。産業用 IoT では、金型はスマートファクトリーの圧力、温度、振動センサーのパッケージングに使用され、高温環境 (>200°C $\pm 10^\circ\text{C}$ ) と複雑な 3D 構造 (高さ <math>0.05\text{-}0.1\text{ mm}\pm 0.005\text{ mm}</math>) に適応し、インダストリー 4.0 の自動化と予知保全をサポートします (ダウンタイムを >15% $\pm 2\%$  削減)。

医療用電子機器は重要な応用分野です。この金型は、血中酸素センサー、ECG (心電図) センサー、インスリンポンプなどのパッケージングに対応しています。生体適合性 (ISO 10993 規格準拠) と抗菌性 (抗菌率 >99% $\pm 0.5\%$ ) を備え、ウェアラブル心臓モニターや埋め込み型医療機器の高い信頼性要件を満たしています (歩留まり >98% $\pm 1\%$ )。民生用電子機器では、スマートウォッチやフィットネストラッカーの環境センサーパッケージングにこの金型が使用され、耐湿性 (>95%RH $\pm 2\%$ RH) と耐久性 (>7 $\times 10^5$  回 $\pm 10^4$  回) を向上させています。

自動車エレクトロニクス分野では、金型は車載センサー (タイヤ空気圧監視センサーや衝突検知センサーなど) のパッケージングをサポートし、極端な温度範囲 (-40°C $\sim 150^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ ) と高精度要件 (偏差 <math><0.001\text{mm}\pm 0.0002\text{mm}</math>) への適応を可能にしています。航空宇宙エレクトロニクス (フライトデータレコーダーなど) や防衛エレクトロニクス (化学兵器検知センサーなど) では、金型の耐腐食性と耐久性を活かし、過酷な環境での長期使用に対応しています。IoT デバイスやエッジコンピューティングデバイスでは、金型がマイクロ冷却チャンネルと応力モニタリング (<math><10\text{MPa}\pm 1\text{MPa}</math>) を通じてセンサーの性能を

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

最適化し、将来のセンサーネットワークの効率的でインテリジェントな開発をサポートします。

## (6) 超硬レーザー穴あけ金型

### 超硬レーザー穴あけ工具とは何ですか？

超硬合金レーザー穴あけダイスは、HDI 基板およびハイエンド回路基板（サーバーマザーボード、レーダーPCB、衛星通信基板など）の微細穴加工（止まり穴、埋め込み穴）用に設計された高精度工具です。コア材には、粒径  $0.9\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$  の WC-TiC-6Co 配合を採用しています。高温焼結 ( $1450^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ) とレーザー表面硬化処理（硬度 HV2000±50）により耐久性が向上しています。穴あけ精度は  $0.015\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$  未満、開口偏差は  $0.005\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$  未満です。この金型は TiCN コーティング（厚さ  $10\sim 15\mu\text{m}\pm 0.2\mu\text{m}$ 、CVD 技術使用）を採用し、レーザー熱衝撃耐性 ( $>10^4$  倍 $\pm 10^3$  倍) を高め、高エネルギー密度レーザードリリング ( $>10^6\text{W}/\text{cm}^2\pm 10^5\text{W}/\text{cm}^2$ ) をサポートします。多孔質構造設計（細孔密度  $>1000/\text{cm}^2\pm 100/\text{cm}^2$ ）と UV レーザー耐性（波長  $193\text{nm}\pm 1\text{nm}$ 、耐性  $>10^5$  倍 $\pm 10^4$  倍）を組み合わせ、超精密加工技術（フェムト秒レーザーなど）と自己修復コーティング（TiAlCN、厚さ  $15\sim 25\mu\text{m}\pm 0.3\mu\text{m}$  など）により、金型の性能を最適化します。多層傾斜構造により、熱伝導率 ( $>200\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 10\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) が向上し、熱亀裂（長さ  $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）が減少し、ハイエンドの回路基板微細穴加工のニーズを満たします。

### 超硬レーザードリルダイスの性能

この金型は、高硬度 (HV 2000±50)、優れた耐摩耗性（摩耗率  $<0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.001\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、高耐久性 ( $>10^5$  回 $\pm 10^4$  回)、高精度穴あけ ( $<0.015\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ 、穴径偏差  $<0.005\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ) を特徴としています。TiCN コーティングはレーザー熱衝撃に対する耐性 ( $>10^4$  回 $\pm 10^3$  回) を高め、自己修復コーティング（TiAlCN など）は耐久性 ( $>2\times 10^5$  回 $\pm 10^4$  回) と熱安定性 ( $>800^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ) を最適化します。多層勾配構造により、熱伝導率 ( $>200\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 10\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) が向上し、熱亀裂 ( $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ) が低減し、高エネルギー密度 ( $>10^6\text{W}/\text{cm}^2\pm 10^5\text{W}/\text{cm}^2$ ) と UV レーザー耐性（波長  $193\text{nm}\pm 1\text{nm}$ 、 $>10^5$  倍 $\pm 10^4$  倍）がサポートされます。

### 超硬レーザードリリングダイスの種類

#### 標準金型

TiCN コーティングをベースとし、精度  $<0.015\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ 、耐久性  $1\times 10^5$  回 $\pm 10^4$  回で HDI ボードの止まり穴加工に適しています。

#### 高温金型

TiAlCN 自己修復コーティング ( $15\sim 25\mu\text{m}\pm 0.3\mu\text{m}$ ) を追加、耐熱性  $>800^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ 、レーダー PCB の穴あけに適しています。

#### 多穴金型

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

最適化された多孔質構造（細孔密度  $>1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$ ）は、衛星通信基板の高密度微細孔をサポートし、UV 耐性は  $>10^5$  倍  $\pm 10^4$  倍です。

### 超精密金型

フェムト秒レーザー加工は、AR/VR 機器の微細孔（口径  $<0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ）および熱伝導率  $>200\text{W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 10\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  の要件を満たすために使用されます。

### 超硬合金レーザー穴あけ金型の応用

超硬合金レーザードリリングダイは、ハイエンド回路基板加工に広く使用されています。HDI 基板の微細穴加工において、このダイは止まり穴や埋め込み穴（精度  $<0.015\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ）の精密ドリリングを可能にし、スマートフォン、タブレット、ノートパソコンのマザーボードにおける高密度配線要件を満たします。サーバーマザーボードやデータセンター回路基板の製造においては、高いエネルギー密度許容度（ $>10^6\text{W}/\text{cm}^2 \pm 10^5\text{W}/\text{cm}^2$ ）と熱伝導率（ $>200\text{W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 10\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ）を備えたダイが、高性能プロセッサの信頼性の高い接続を保証します。

レーダーPCB や衛星通信基板の製造では、レーザー熱衝撃耐性（ $>10^4$  回  $\pm 10^3$  回）と多孔質構造（気孔密度  $>1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$ ）を備えた金型が求められ、5G アンテナ、ミリ波レーダー、航空宇宙通信モジュールの微細穴加工をサポートしています。AR / VR デバイス、スマートグラスなどのハイエンド民生用エレクトロニクスの分野では、金型はフェムト秒レーザー技術を使用して超微細穴（口径  $<0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ）を実現し、光学部品と電子部品の統合を向上させています。自動車エレクトロニクスの分野では、高温環境（ $>800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）と高い信頼性要件（歩留まり  $>98\% \pm 1\%$ ）に適応し、先進運転支援システム（ADAS）と車載レーダー回路基板の微細穴加工に金型が使用されています。

航空宇宙電子機器（飛行制御モジュールやナビゲーションシステムなど）と防衛電子機器（ミサイル誘導や電子対抗システムなど）では、金型の UV レーザー耐性（波長  $193\text{nm} \pm 1\text{nm}$ 、 $>10^5$  回  $\pm 10^4$  回）と耐久性（ $>10^5$  回  $\pm 10^4$  回）を利用して、過酷な環境での長期使用要件を満たしています。産業オートメーションと IoT デバイス（スマートファクトリー制御ボードなど）は、金型の熱亀裂制御（ $<0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ）と自己修復コーティングに依存して、生産効率を最適化（ $>20\% \pm 2\%$  増加）し、メンテナンスコストを削減（ $<5\% \pm 1\%$ ）します。6G とミリ波技術の発展に伴い、金型は多層勾配構造と AI 最適化を通じて、将来の高周波回路基板の効率的な処理をさらにサポートします。

### エレクトロニクス産業における超硬合金金型の開発と展望

マイクロエレクトロニクスデバイス（5nm 以下のプロセス）、フレキシブルエレクトロニクス（伸縮性回路、OLED、e テキスタイル）、5G/6G 通信、新エネルギー自動車エレクトロニクス（バッテリー管理システム、充電パイル制御ボードなど）、IoT デバイス、スマート医療機器の小型化の需要が高まるにつれて、超硬合金電子産業用金型の適用範囲と性能最適化の要件が大幅に増加しています。

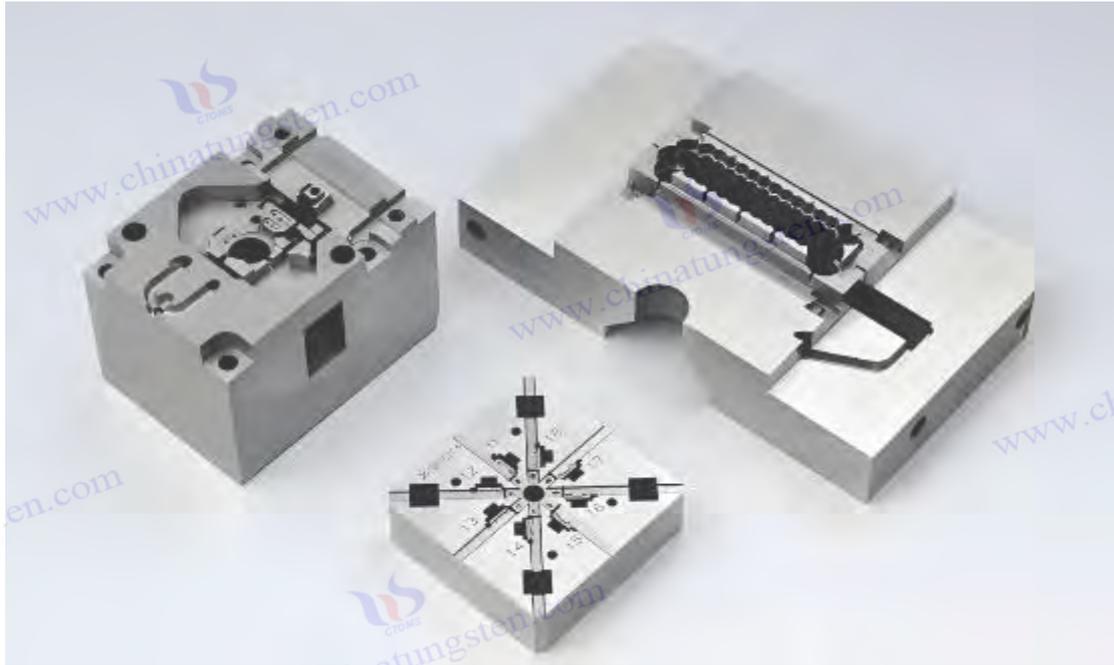
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

電子産業の急速な発展は、超硬合金金型技術の反復的進化を促進しました。新たな先進コーティング（ZrN、AlCrN、WC/C、厚さ15~25 $\mu\text{m}$  $\pm$ 0.2 $\mu\text{m}$ など）や積層造形技術（SLM、EBMなど）の導入により、金型寿命（ $>2\times 10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回）、精度（ $<0.002\text{mm}\pm 0.0005\text{mm}$ ）、汎用性（熱伝導率 $>150\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 10\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 、断熱性 $>10^{12}\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ など）が向上しました。ハイエンドの消費者分野として、超硬合金金型はAIチップ、量子コンピューティング、電気自動車エレクトロニクス、フレキシブルディスプレイ、スマート医療機器などの分野で優れた性能を発揮しています。今後、金型はインテリジェント化の方向へと発展し、摩耗監視センサー（リアルタイム精度 $<0.001\text{mm}\pm 0.0001\text{mm}$ ）、適応調整機能（応力補償 $<5\text{MPa}\pm 0.5\text{MPa}$ ）、環境配慮設計（重金属使用量削減 $<1\%\pm 0.1\%$ ）などを統合することで、電子産業における高信頼性、低コスト、持続的発展という二重の課題に対応していくでしょう。同時に、グローバルサプライチェーンの調整と地域生産（華東・東南アジアなど）は、金型産業の配置最適化をさらに推進するでしょう。

電子産業において、超硬合金ヒートシンク基板は、その優れた高熱伝導率、耐高温性、低熱膨張係数、および優れた電気絶縁性能により、高出力電子デバイスの放熱ソリューションの中核部品となっている。電子産業が高性能、コンパクト、インテリジェント化に向けて急速に発展するにつれて、超硬合金ヒートシンク基板の需要が大幅に増加している。これらの基板は、LED、5G/6G基地局、電気自動車の電源モジュール、人工知能チップ、量子コンピューティングデバイスなどの新興分野の放熱課題に効果的に対処するために、高い熱伝導率（ $>200\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 10\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ）、低い熱膨張係数（約 $4\sim 6\times 10^{-6}/^\circ\text{C}\pm 0.5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）、および優れた絶縁性（体積抵抗率 $>10^{12}\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ ）を備えている必要があります。この材料は、WC（炭化タングステン）とCu（銅）、ダイヤモンド、AlN（窒化アルミニウム）、SiC（炭化ケイ素）またはBN（窒化ホウ素）粒子（粒子サイズ10~50 $\text{nm}\pm 1\text{nm}$ ）を配合し、冷間プレス焼結（ $1200^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、 $40\text{MPa}\pm 1\text{MPa}$ ）、ホットプレス拡散（ $1300^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、 $50\text{MPa}\pm 2\text{MPa}$ ）、静水圧プレス（HIP、 $1200^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、 $150\text{MPa}\pm 5\text{MPa}$ ）などの高度なプロセスを使用して、均一な分布、密度（多孔度 $<1\%\pm 0.1\%$ ）および微細構造の安定性（粒径 $<1\mu\text{m}\pm 0.05\mu\text{m}$ ）を確保することによって製造されます。これらの基板は、精密加工（化学機械研磨（CMP）、表面粗さ $\text{Ra}<0.1\mu\text{m}\pm 0.02\mu\text{m}$ など）と表面改質（CVDコーティング、プラズマ噴霧など）により、放熱効率と信頼性がさらに向上しています。

電子デバイスの高密度集積（ $>10^6$  トランジスタ/ $\text{mm}^2\pm 10^5$  トランジスタ/ $\text{mm}^2$ ）、電力密度の増加（ $>100\text{W}/\text{cm}^2\pm 10\text{W}/\text{cm}^2$ ）、および動作温度の上昇（ $>150^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ ）に伴い、セメントカーバイド放熱基板の市場規模は30億 $\pm 3$ 億ドルに達すると予想され、年間成長率は20%~25%で、セメントカーバイド業界のハイエンドアプリケーション分野になり、特に次世代通信、新エネルギー車両、産業オートメーション、防衛電子機器などです。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 14.1.2 電子産業向け硬質合金放熱基板

##### (1) 炭化タングステン銅 (WC-Cu) 複合放熱基板

##### タングステンカーバイド銅 (WC-Cu) 複合ヒートシンクとは何ですか？

炭化タングステン銅 (WC-Cu) 複合放熱基板は、効率的な熱管理のために設計された高性能材料です。主に LED 照明モジュール、パワーエレクトロニクスモジュール (IGBT、MOSFET ドライバなど)、民生用電子機器の電源管理ユニット、電気自動車インバータ、データセンターサーバー電源などに使用されています。WC と Cu (体積比 70:30±1%) の複合材料で作られており、冷間圧焼結 (1200°C±10°C、40MPa±1MPa) とその後の熱処理 (1000°C±10°C、2 時間±0.1 時間アニール、窒素保護) を組み合わせることで、材料の均一性と微細構造密度 (気孔率<0.8%±0.1%) を確保しています。基板は、熱伝導率が 220 W/m·K±10 W/m·K、熱膨張係数が  $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、厚さが 0.5~1 mm±0.01 mm であり、軽量 (密度 12~13 g/cm<sup>3</sup> ± 0.1 g/cm<sup>3</sup>)、機械的強度が高い (圧縮強度 > 2500 MPa±100 MPa) です。表面には、溶接性と耐酸化性 (耐高温性 > 300°C±10°C、耐湿性 > 95% RH±2% RH) を高めるために Ni/Au 層 (厚さ 0.1~0.3 μm±0.01 μm) が電気メッキされており、耐腐食性 (塩水噴霧試験 > 500 時間±50 時間) を向上させるために化学メッキ Ni-P 層 (厚さ 1~3 μm±0.1 μm) が施されています。

多層構造 (厚さ 0.3~0.7 mm±0.01 mm) とマイクロチャネル冷却システム (直径 0.02~0.05 mm±0.001 mm、流量 > 0.1 L/分±0.01 L/分) を組み合わせた基板は、ナノ Cu 粒子 (粒子サイズ < 10 nm±0.5 nm) を使用して界面の結合力 (接着強度 > 60 MPa±5 MPa) を高め、レーザーマイクロマシニング技術で表面の微細テクスチャを実現しています。 (粗さ Ra < 0.05 μm±0.01 μm)、放熱効率 (> 250 W/m·K±10 W/m·K)、熱応力 (< 15 MPa±1 MPa)、および熱

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

均一性（温度勾配  $<3^{\circ}\text{C}\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ）を最適化し、高性能放熱要件を満たします。

### 炭化タングステン銅（WC-Cu）複合放熱基板の性能

この基板は、高い熱伝導率（ $220\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、 $>250\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ に最適化）、低い熱膨張係数（ $5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}\pm 0.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、高い機械的強度（圧縮強度 $>2500\text{ MPa}\pm 100\text{ MPa}$ ）、および軽量設計（密度  $12\sim 13\text{ g/cm}^3\pm 0.1\text{ g/cm}^3$ ）を備えています。Cu 相により、電気伝導性（ $>10^6\text{ S/m}\pm 10^5\text{ S/m}$ ）が向上し、抵抗加熱が低減（ $<0.5^{\circ}\text{C/W}\pm 0.05^{\circ}\text{C/W}$ ）、熱サイクル性能が最適化されます（ $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、サイクル数 $>5000$ 回 $\pm 500$ 回）。Ni/Au めっき層ははんだ付け性（耐高温性 $>300^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、耐湿性 $>95\%\text{RH}\pm 2\%\text{RH}$ ）を向上させ、Ni-P 層は耐腐食性（耐塩水噴霧性 $>500$ 時間 $\pm 50$ 時間）を向上させます。マイクロチャンネル冷却システムとナノ Cu 粒子は、放熱効率と界面接合（接着強度 $>60\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$ ）をさらに向上させます。AI 駆動型熱シミュレーションは、熱応力（ $<15\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ ）と温度勾配（ $<3^{\circ}\text{C}\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ）を低減します。

### 炭化タングステン銅（WC-Cu）複合ヒートシンク基板の種類

#### 標準基板

WC-Cu 70:30 および Ni/Au コーティングに基づき、LED 照明モジュールに適しており、厚さは  $0.5\sim 1\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ 、熱伝導率は  $220\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$  です。

#### 高温基板

Ni-P 層（ $1\sim 3\text{ }\mu\text{m}\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）を追加し、耐熱性は  $300^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$  を超え、IGBT および MOSFET ドライバに適しています。

#### 小型基板

マイクロ LED および AR/VR デバイス向けに最適化された多層構造（厚さ  $0.3\sim 0.7\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ ）とマイクロチャンネル（直径  $0.02\sim 0.05\text{ mm}\pm 0.001\text{ mm}$ ）。

#### インテリジェント基板

AI 熱シミュレーションとナノ Cu 粒子（粒子サイズ $<10\text{ nm}\pm 0.5\text{ nm}$ ）を統合し、放熱効率 $>250\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ を実現し、データセンターの電源に最適です。

### 炭化タングステン銅（WC-Cu）複合放熱基板の応用

炭化タングステン銅（WC-Cu）複合放熱基板は、照明、電子機器、電気自動車などに広く使用されています。LED 照明モジュールでは、高輝度 LED アレイ（電力密度 $>50\text{ W/cm}^2\pm 5\text{ W/cm}^2$ 、輝度 $>200\text{ lm/W}\pm 10\text{ lm/W}$ ）に対応し、スマート街灯、車載 LED、室内照明などに使用され、光効率と放熱性能（熱伝導率  $220\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）を向上させています。パワーエレクトロニクスモジュールでは、IGBT および MOSFET ドライバに使用され、熱サイクル性能（ $>5000$ 回 $\pm 500$ 回）と電気伝導率（ $>10^6\text{ S/m}\pm 10^5\text{ S/m}$ ）を最適化し、産業用モータードライブや再生可能エネルギーインバータのニーズを満たしています。

ノートパソコンの電源アダプターや高出力充電器などの民生用電子機器の電源管理ユニ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ットは、基板の軽量性（密度  $12\sim 13\text{ g/cm}^3\pm 0.1\text{ g/cm}^3$ ）と耐腐食性（耐塩水噴霧性 500 時間  $\pm 50$  時間以上）によって、機器の信頼性と耐用年数を向上させています。電気自動車用インバーターでは、基板の高い機械的強度（ $2500\text{ MPa}\pm 100\text{ MPa}$  以上）とマイクロチャネル冷却（流量  $0.1\text{ L/min}\pm 0.01\text{ L/min}$  以上）により、効率的な放熱（ $250\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$  以上）と熱均一性（ $3^\circ\text{C}\pm 0.3^\circ\text{C}$  未満）を実現し、新エネルギー車の高出力要件を満たしています。データセンターサーバー電源は、基板とナノ Cu 粒子（接着強度  $>60\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$ ）の AI 最適化設計を採用し、熱応力（ $<15\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ ）を低減して放熱効率を向上させ、高性能コンピューティングと AI アクセラレータの安定した動作をサポートします。

マイクロ LED の分野では、この基板はピクセル密度  $>1000\text{ PPI}\pm 100\text{ PPI}$  のディスプレイと、AR/VR デバイスや自動車照明システムに使用される車載用 LED（耐久性  $>10^5$  時間  $\pm 10^4$  時間）をサポートしています。高出力医療機器などの医療用電子機器や航空宇宙電子機器（衛星電源モジュールなど）は、基板の高温耐性（ $>300^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ ）と耐湿性（ $>95\text{ RH}\pm 2\text{ RH}$ ）に依存して、過酷な環境での放熱要件を満たしています。産業オートメーションおよびエッジコンピューティングモジュールは、基板の表面マイクロテクスチャ（粗さ  $R_a < 0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）と多層構造を使用して、生産効率を最適化（ $>20\%\pm 2\%$  増加）し、メンテナンスコストを削減（ $<5\%\pm 1\%$ ）し、将来的に高性能放熱技術の広範な応用を促進します。

## （2）炭化タングステン-ダイヤモンド（WC-Diamond）複合放熱基板

### 炭化タングステン-ダイヤモンド（WC-Diamond）複合放熱基板とは何ですか？

管理のために設計されたハイエンド材料です。主に 5G/6G 基地局 RF モジュール、電気自動車パワーエレクトロニクス（インバータ、充電パイルコントローラ）、高性能コンピューティングサーバー、軍事レーダーシステムに使用されています。WC とダイヤモンド（粒径  $20\text{ nm}\pm 1\text{ nm}$ 、体積比  $60:40\pm 1\%$ ）で作られており、ホットプレス拡散法（ $1300^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、 $50\text{ MPa}\pm 2\text{ MPa}$ ）と静水圧プレス法（HIP、 $1200^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、 $150\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$ ）のプロセスで製造され、材料密度（多孔度  $<0.6\%\pm 0.1\%$ ）と粒子均一性（ $<0.8\mu\text{m}\pm 0.05\mu\text{m}$ ）を確保しています。基板の熱伝導率は  $320\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、絶縁性は  $>10^{13}\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ 、厚さは  $0.3\sim 0.8\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ 、耐熱性は  $>400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ （熱安定性  $>500$  時間  $\pm 50$  時間）、機械的強度は高い（曲げ強度  $>3000\text{ MPa}\pm 100\text{ MPa}$ ）。

表面に CVD ダイヤモンドコーティング（厚さ  $1\sim 3\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ ）を施し、耐摩耗性（硬度  $\text{HV } 8000\pm 500$ ）と放熱均一性（温度勾配  $<5^\circ\text{C}\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）を高め、プラズマ洗浄技術で界面密着性を最適化（ $>50\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$ ）しています。傾斜複合構造（WC 含有量  $30\%\sim 60\%\pm 1\%$ ）とナノ放熱層（厚さ  $<0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）を組み合わせ、レーザーマイクロマシニング技術で基板を最適化しています。表面微細構造（多孔度  $1\%\sim 2\%\pm 0.1\%$ ）により放熱面積（ $>300\text{ cm}^2\pm 20\text{ cm}^2$ ）を拡大し、熱抵抗（ $<0.2^\circ\text{C/W}\pm 0.02^\circ\text{C/W}$ ）を低減しています。適応型熱管理モジュール（応答時間  $<0.1$  秒  $\pm 0.01$  秒）は、熱電対（精度  $<0.2^\circ\text{C}\pm 0.02^\circ\text{C}$ ）を埋め込んで温度を監視し、高周波および超大電流の放熱のニーズを満たします。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 炭化タングステン-ダイヤモンド（WC-ダイヤモンド）複合放熱基板の性能

この基板は、超高熱伝導率（ $320\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、最適化後 $>350\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、優れた絶縁性（ $>10^{13}\ \Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{12}\ \Omega\cdot\text{cm}$ ）、高い機械的強度（曲げ強度 $>3000\text{ MPa}\pm 100\text{ MPa}$ ）、高温耐性（ $>400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、熱安定性 $>500$ 時間 $\pm 50$ 時間）を備えています。ダイヤモンドコーティングにより、耐摩耗性（硬度  $\text{HV } 8000\pm 500$ ）と放熱均一性（温度勾配 $<5^\circ\text{C}\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）が向上し、ナノ放熱層により熱抵抗が低減（ $<0.2^\circ\text{C/W}\pm 0.02^\circ\text{C/W}$ ）、勾配構造により熱伝導が最適化（ $>350\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）されます。適応型熱管理モジュールは、熱電対（精度 $<0.2^\circ\text{C}\pm 0.02^\circ\text{C}$ 、応答時間 $<0.1$ 秒 $\pm 0.01$ 秒）を通じて温度を監視し、高周波電力デバイス（ $>10\text{GHz}\pm 1\text{GHz}$ ）および高電力密度（ $>200\text{W/cm}^2\pm 20\text{W/cm}^2$ ）アプリケーションをサポートします。

## 炭化タングステン-ダイヤモンド（WC-Diamond）複合放熱基板の種類

### 標準基板

WC-Diamond 60:40 と CVD コーティングをベースとし、厚さ  $0.3\sim 0.8\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ 、熱伝導率  $320\text{W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{W/m}\cdot\text{K}$  の 5G 基地局 RF モジュールに適しています。

### 高温基板

傾斜構造（WC 30%-60% $\pm 1\%$ ）を追加、耐熱性 $>400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、電気自動車インバータに適しています。

### 高周波基板

統合ナノヒートシンク（厚さ  $<0.1\ \mu\text{m}\pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）、 $>10\ \text{GHz}\pm 1\ \text{GHz}$  デバイスをサポートし、熱抵抗  $<0.2^\circ\text{C/W}\pm 0.02^\circ\text{C/W}$ 。

### インテリジェント基板

適応型熱管理モジュールと熱電対を内蔵し、放熱面積は  $300\text{ cm}^2\pm 20\text{ cm}^2$  を超え、軍用レーダーシステムに適しています。

## 炭化タングステン-ダイヤモンド（WC-Diamond）複合放熱基板の応用

炭化タングステン-ダイヤモンド（WC-ダイヤモンド）複合放熱基板は、通信、電気自動車、軍事分野で広く使用されています。5G/6G 基地局 RF モジュールでは、この基板は高周波電力デバイス（GaN HEMT、 $>10\text{GHz}\pm 1\text{GHz}$  など）と高電力密度（ $>200\text{ W/cm}^2\pm 20\text{ W/cm}^2$ ）をサポートし、アンテナと RF 増幅器の放熱に使用され、超高熱伝導率（ $320\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）と絶縁性（ $>10^{13}\ \Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{12}$ ）を満たしています。電気自動車のパワーエレクトロニクスでは、この基板はインバータと充電パイルコントローラで使用され、熱サイクル性能（ $>5000$ 回 $\pm 500$ 回）と高温耐性（ $>400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ ）を最適化し、急速充電電力（ $>350\text{kW}\pm 10\text{kW}$ ）とバッテリー管理システムの効率的な操作をサポートします。

高性能コンピューティング サーバーは、基板の勾配構造とナノ放熱層（熱抵抗  $<0.2^\circ\text{C/W}\pm 0.02^\circ\text{C/W}$ ）を利用して熱応力（ $<15\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ ）を低減し、放熱面積（ $>300\text{ cm}^2\pm 20\text{ cm}^2$ ）を拡大することで、AI アクセラレータとデータセンターの安定したパフォーマンスをサポートしています。軍事レーダーシステムは、基板の機械的強度（曲げ強度

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

> 3000 MPa±100 MPa) と耐摩耗性 (硬度 HV 8000±500) を利用して、極限環境 (熱安定性 > 500 時間±50 時間) でのレーダー モジュールと電子妨害装置の長期使用に対応しています。航空電子機器 (飛行制御モジュール、衛星電源など) は、基板の高温耐性と放熱均一性 (温度勾配 < 5°C±0.5°C) を利用して、機器の信頼性と寿命を向上させています。

民生用電子機器分野では、AR/VR デバイスや高性能ゲーム機の放熱ニーズに対応し、高周波・超大電流 (>100A±5A) アプリケーションにも適応します。産業オートメーションおよび IoT デバイス (スマートファクトリー制御ボードなど) では、基板の適応型熱管理 (応答時間<0.1 秒±0.01 秒) とレーザー微細加工表面 (粗さ最適化) により、生産効率 (>20%±2%) を向上させ、メンテナンスコスト (<5%±1%) を削減します。6G ミリ波技術の発展に伴い、基板は AI 主導の最適化と微細構造設計を通じて、将来の高周波通信やパワーエレクトロニクスの放熱課題にもさらに対応できるようになります。

### (3) 炭化タングステン-窒化アルミニウム (WC-AIN) 複合放熱基板

#### 炭化タングステン-窒化アルミニウム (WC-AIN) 複合ヒートシンクとは何ですか？

炭化タングステン-窒化アルミニウム (WC-AIN) 複合放熱基板は、高周波電子機器および医療機器の熱管理用に設計された高性能材料です。主に高周波電子機器 (RF モジュール、マイクロ波レーダー、衛星通信機器など)、医療用電子機器 (MRI パワーアンプ、超音波機器など)、産業用センサーなどに使用されています。WC と AIN (体積比 50:50±1%) の複合材料で作られており、冷間プレス焼結 (1200°C±10°C、40MPa±1MPa) および高温アニール (1300°C±10°C、窒素保護) によって製造され、材料密度 (気孔率<0.7%±0.1%) と熱マッチングを確保しています。基板の熱伝導率は 160 W/m·K±5 W/m·K、絶縁体は >10<sup>14</sup> Ω·cm±10<sup>13</sup> Ω·cm、厚さは 0.4 ~ 0.6 mm±0.01 mm、熱膨張係数はシリコンと一致しています (4.5×10<sup>-6</sup> /°C±0.5×10<sup>-6</sup> /°C、偏差 <0.5×10<sup>-6</sup> /°C±0.1×10<sup>-6</sup> /°C)。

AIN の高い絶縁性と WC の機械的強度 (曲げ強度>400MPa±20MPa) を兼ね備えており、高周波回路 (動作周波数>20GHz±2GHz) や高温環境 (>250°C±10°C) に適しており、高い機械的耐久性 (>10<sup>6</sup>回±10<sup>4</sup>回) を備えています。表面には Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (厚さ 0.5~1μm±0.05μm) コーティングが施され、耐湿性 (耐湿性>95% RH±2%RH) と耐熱衝撃性 (>1000 回±100 回) を向上させ、マイクロアーク酸化技術を採用することで界面接合強度 (接着強度>50MPa±5MPa) を最適化しています。この基板は、多層勾配設計 (AIN 含有量 40%~60%±1%) と熱電分離層 (厚さ 0.02~0.05mm±0.001mm) を組み合わせ、ナノスケール粒子分散技術 (粒子サイズ<10nm±0.5nm) を使用することで、熱伝導率の均一性 (<2°C±0.2°C) を向上させ、熱応力 (<10MPa±1MPa) を軽減し、効率的な放熱のニーズを満たしています。

#### 炭化タングステン-窒化アルミニウム (WC-AIN) 複合放熱基板の性能

基板は、高い熱伝導率 (160 W/m·K±5 W/m·K)、優れた絶縁性 (>10<sup>14</sup> Ω·cm±10<sup>13</sup> Ω·

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cm )、高い機械的強度（曲げ強度 $>400\text{ MPa}\pm 20\text{ MPa}$ ）、および熱整合（偏差 $<0.5\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.1\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）を備えています。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ コーティングにより、耐湿性（ $>95\text{ RH}\pm 2\text{ RH}$ ）と耐熱衝撃性（ $>1000\text{ 回}\pm 100\text{ 回}$ ）が向上し、多層勾配構造により熱伝導率の均一性が最適化され（ $<2^{\circ}\text{C}\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ）、熱電分離層により熱応力が低減されます（ $<10\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ ）。ナノスケール粒子分散技術により、耐久性（ $>2\times 10^6\text{ 回}\pm 10^4\text{ 倍}$ ）が向上し、高温環境（ $>250^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）および高周波アプリケーション（ $>20\text{ GHz}\pm 2\text{ GHz}$ ）がサポートされます。

## 炭化タングステン-窒化アルミニウム（WC-AIN）複合ヒートシンク基板

### 標準基板

WC-AIN 50:50 および  $\text{Si}_3\text{N}_4$ コーティングをベースとし、RF モジュールに適しており、厚さ  $0.4\sim 0.6\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ 、熱伝導率  $160\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。

### 高温基板

熱電分離層（ $0.02\sim 0.05\text{ mm}\pm 0.001\text{ mm}$ ）が追加され、耐熱性は $>250^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ で、MRI パワーアンプに適しています。

### 高周波基板

最適化された勾配構造（AIN 40%-60% $\pm 1\%$ ）、 $>20\text{ GHz}\pm 2\text{ GHz}$  の回路をサポートし、均一性は $<2^{\circ}\text{C}\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ です。

### ナノ強化基板

集積ナノ粒子（粒子サイズ  $<10\text{ nm}\pm 0.5\text{ nm}$ ）、熱応力  $<10\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ 、マイクロ波レーダーに適しています。

## 炭化タングステン-窒化アルミニウム（WC-AIN）複合放熱基板

炭化タングステン-窒化アルミニウム（WC-AIN）複合放熱基板は、高周波電子工学、医療、航空分野で広く使用されています。高周波電子機器においては、RF モジュール、マイクロ波レーダー、衛星通信機器などの高周波回路（ $>20\text{ GHz}\pm 2\text{ GHz}$ ）をサポートします。高い絶縁性（ $>10^{14}\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$ ）と熱伝導率（ $160\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）を備え、5G/6G 基地局や通信アンテナの放熱要件を満たします。医療用電子機器では、MRI 電力増幅器や超音波装置に基板が使用され、熱マッチング（偏差  $<0.5\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.1\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）と高温耐性（ $>250^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）を最適化し、機器の精度と信頼性（歩留まり $>98\%\pm 1\%$ ）を向上させます。

スマート ファクトリー用の温度センサーや圧力センサーなどの産業用センサーは、基板の機械的耐久性（ $>10^6\text{ 回}\pm 10^4\text{ 回}$ ）と耐熱衝撃性（ $>1000\text{ 回}\pm 100\text{ 回}$ ）に依存して、インダストリー 4.0 の自動化と予測メンテナンス（ダウンタイムを  $>15\%\pm 2\%$  削減）をサポートしています。飛行制御システムやナビゲーション モジュールなどの航空電子機器では、基板の軽量（厚さ  $0.4\sim 0.6\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ ）と高い機械的強度（ $>400\text{ MPa}\pm 20\text{ MPa}$ ）を利用して、過酷な環境（熱安定性  $>500\text{ 時間}\pm 50\text{ 時間}$ ）での長期使用を満たしています。埋め込み型心拍数モニターやポータブル超音波デバイスなどのスマート医療機器は、

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

基板の耐湿性(>95%RH±2%RH)と勾配設計に依存して、放熱均一性(<2°C±0.2°C)を最適化し、熱応力(<10MPa±1MPa)を軽減しています。

民生用電子機器分野において、基板は高性能コンピューティングデバイスや通信端末の放熱ニーズに対応し、高温・高周波環境に適応しています。電子対抗システムやレーダーモジュールなどの防衛電子機器では、基板の耐腐食性とナノ強化技術を活用し、軍用グレードの信頼性と耐久性(>2×10<sup>6</sup>回±10<sup>4</sup>回)を満たしています。ミリ波レーダー、ニューラルネットワークアクセラレータ、バイオメディカルデバイスの発展に伴い、基板はAI最適化や熱電分離層などにより放熱効率(>20%±2%)と熱管理性能をさらに向上させ、将来的なハイテク用途の普及を促進します。

#### (4) 炭化タングステン-炭化ケイ素(WC-SiC)複合放熱基板

##### SiC)複合ヒートシンクとは何ですか?

炭化タングステン-炭化ケイ素(WC-SiC)複合放熱基板は、高出力および産業用途向けに設計された高性能熱管理材料です。主に高出力レーザー、パワーエレクトロニクスインバータ、産業オートメーション制御システム、鉄道牽引設備などに使用されています。WCとSiC(炭化ケイ素、粒径15~40nm±1nm、体積比65:35±1%)の複合材料で、ホットプレス拡散法(1350°C±10°C、60MPa±2MPa)で製造され、材料密度(気孔率<0.9%±0.1%)と熱安定性を確保しています。この基板は、熱伝導率が180W/m·K±5W/m·K、熱膨張係数が4.8×10<sup>-6</sup>/°C±0.5×10<sup>-6</sup>/°C、厚さが0.6~1.2mm±0.01mm、耐熱性が>450°C±10°C(熱サイクル寿命>1000時間±100時間)です。この基板は、SiCの高熱伝導率(>200W/m·K)とWCの耐腐食性(耐酸性<0.01mm/年±0.001mm/年)を兼ね備えており、高電圧デバイス(1000V±50Vなど)および高電力密度用途(>150W/cm<sup>2</sup>±15W/cm<sup>2</sup>)に適しており、高い機械的強度(衝撃強度>600MPa±50MPa)を備えています。表面にはTiSiN(厚さ5~10µm±0.2µm)コーティングが施され、耐酸化性と耐摩耗性(硬度HV2500±100)が向上しています。また、プラズマ溶射技術によりコーティング密着性(>60MPa±5MPa)が最適化されています。さらに、多孔質構造(気孔率1%~3%±0.1%)と炭素繊維強化材(含有量1%~2%±0.1%)を組み合わせることで、基板の放熱面積(>200cm<sup>2</sup>±10cm<sup>2</sup>)と耐衝撃性(>500MPa±50MPa)が向上し、高い信頼性要件を満たしています。

##### 炭化タングステン-炭化ケイ素(WC-SiC)複合放熱基板の性能

基材は、高い熱伝導率(180W/m·K±5W/m·K)、低い熱膨張係数(4.8×10<sup>-6</sup>/°C±0.5×10<sup>-6</sup>/°C)、高い機械的強度(衝撃強度>600MPa±50MPa)、および高温耐性(>450°C±10°C、熱サイクル寿命>1000時間±100時間)を備えています。TiSiNコーティングにより、耐酸化性と耐摩耗性が向上し(硬度HV2500±100)、優れた耐腐食性(耐酸性<0.01mm/年±0.001mm/年)も備えています。多孔質構造により放熱面積(>200cm<sup>2</sup>±10cm<sup>2</sup>)が拡大し、炭素繊維強化により耐衝撃性が最適化(>500MPa±50MPa)され、高電圧(1000V±50V)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

および高電力密度 ( $>150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$ ) のアプリケーションをサポートします。

## 炭化タングステン-炭化ケイ素 (WC- SiC ) 複合ヒートシンク基板

### 標準基板

WC- SiC 65:35 および TiSiN コーティングをベースとし、レーザー切断機に適しており、厚さ  $0.6 \sim 1.2 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 、熱伝導率  $180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。

### 高温基板

最適化された熱サイクル寿命 ( $>1000$  時間  $\pm 100$  時間)、耐熱性  $>450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、パワーエレクトロニクスインバータに適しています。

### 多孔質基質

一体型多孔質構造 (多孔度  $1\% \sim 3\% \pm 0.1\%$ )、放熱面積  $>200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$ 、風力発電コンバータに適しています。

### 強化された基質

炭素繊維 ( $1\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ) を添加すると、耐衝撃性は  $>500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  となり、産業用ロボットに適しています。

## 炭化タングステン-炭化ケイ素 (WC- SiC ) 複合放熱基板

炭化タングステン-炭化ケイ素 (WC- SiC ) 複合放熱基板は、高出力産業およびエネルギー分野で広く使用されています。高出力レーザーでは、この基板はレーザー切断機や溶接装置の高出力密度 ( $>150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$ ) と高温耐性 ( $>450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) をサポートし、加工効率と機器寿命を向上させます。パワーエレクトロニクスインバータでは、この基板は風力発電コンバータや太陽光発電インバータに使用され、熱伝導率 ( $180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) と耐腐食性 (耐酸性  $<0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ) を最適化し、高電圧 ( $1000\text{V} \pm 50\text{V}$ ) の要件を満たします。

産業オートメーション制御システムは、基板の機械的強度 (衝撃強度  $>600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) と多孔質構造 (放熱面積  $>200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$ ) に依存して、産業用ロボットとインテリジェント製造装置の安定した動作をサポートします。鉄道牽引機器は、基板の熱サイクル寿命 ( $>1000$  時間  $\pm 100$  時間) と炭素繊維強化 (耐衝撃性  $>500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) を使用して、高電圧牽引インバータと制御モジュールの高い信頼性 (収率  $>98\% \pm 1\%$ ) を確保します。飛行制御システムなどの航空宇宙電子機器や防衛電子機器 (レーザー電源モジュールなど) は、基板の高温耐性と耐酸化性 (硬度  $\text{HV} 2500 \pm 100$ ) に依存して、過酷な環境での長期使用に対応します。

グリーンエネルギー分野において、基板は電気自動車の充電パイルやエネルギー貯蔵システムの効率的な放熱をサポートし、高い電力密度と熱安定性の要件に適応します。高性能サーバーや産業用センサーなどの民生用電子機器では、軽量基板 (厚さ  $0.6 \sim 1.2 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ) と TiSiN コーティングを採用することで、生産効率を最適化 ( $20\% \pm 2\%$  以上向上) し、メンテナンスコストを削減 ( $5\% \pm 1\%$  未満) しています。インダストリー4.0 と再生可能エネルギーの発展に伴い、基板は多層設計と AI 最適化を通じて、将来の高信

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

頼性産業用電子機器やグリーンエネルギー機器のニーズをさらに満たします。

## （５）炭化タングステン-窒化ホウ素（WC-BN）複合放熱基板

### 炭化タングステン-窒化ホウ素（WC-BN）複合放熱基板とは何ですか？

炭化タングステン-窒化ホウ素（WC-BN）複合放熱基板は、高精度機器および防衛電子機器の熱管理用に設計された高性能材料です。主に高精度機器（リソグラフィーパワーモジュール、電子ビームエッチング装置など）、防衛電子機器（レーダー信号処理装置、ミサイル誘導システムなど）、科学研究機器に使用されています。WC と BN（窒化ホウ素、粒径  $10\sim 30\text{nm}\pm 1\text{nm}$ 、体積比  $55: 45\pm 1\%$ ）を原料とし、等方圧プレス（HIP、 $1250^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $160\text{MPa}\pm 5\text{MPa}$ ）で製造することで、材料密度（気孔率 $<0.5\%\pm 0.1\%$ ）と熱安定性を確保しています。基板の熱伝導率は  $200\text{W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、絶縁性は  $>10^{15}\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{14}\Omega\cdot\text{cm}$ 、厚さは  $0.3\sim 0.5\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ 、熱膨張係数は  $4.2\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}\pm 0.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、高い機械的強度（圧縮強度 $>3500\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$ ）を備えています。この基板は、BN の超高絶縁性と WC の機械的強度を兼ね備えており、超高周波用途（ $>50\text{GHz}\pm 5\text{GHz}$ ）および極限環境（ $-50^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、熱安定性 $>600$  時間 $\pm 50$  時間）に適しています。表面には AIN（厚さ  $1\sim 2\mu\text{m}\pm 0.05\mu\text{m}$ ）コーティングが施され、耐湿性（耐湿性 $>98\%\text{RH}\pm 1\%\text{RH}$ ）と熱安定性が向上しています。また、レーザー表面処理により界面接合強度が最適化されています（接着強度 $>55\text{MPa}\pm 5\text{MPa}$ ）。多層傾斜複合材（BN 含有量  $40\%\sim 60\%\pm 1\%$ ）と熱電絶縁層（厚さ  $0.01\sim 0.03\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）を組み合わせることで、熱伝導率の均一性（ $< 1.5^{\circ}\text{C}\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ）を最適化し、ナノスケール分散技術により電磁干渉（ $<0.1\text{dB}\pm 0.01\text{dB}$ ）を低減することで、超高精度と過酷な環境要件を満たしています。

### 炭化タングステン-窒化ホウ素（WC-BN）複合放熱基板の性能

この基板は、高い熱伝導率（ $200\text{W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）、優れた絶縁性（ $>10^{15}\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{14}\Omega\cdot\text{cm}$ ）、高い機械的強度（圧縮強度 $>3500\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$ ）、低い熱膨張係数（ $4.2\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}\pm 0.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）を備えています。AIN コーティングにより耐湿性（ $>98\%\text{RH}\pm 1\%\text{RH}$ ）と熱安定性（ $>600$  時間 $\pm 50$  時間）が向上し、多層勾配構造により熱伝導率の均一性が最適化され（ $<1.5^{\circ}\text{C}\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ）、熱絶縁層により電磁干渉が低減されます（ $<0.1\text{dB}\pm 0.01\text{dB}$ ）。ナノスケール分散技術により耐久性が向上し（ $>2\times 10^6$  回 $\pm 10^4$  回）、超高周波（ $>50\text{GHz}\pm 5\text{GHz}$ ）および極度の温度範囲（ $-50^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）をサポートします。

### 炭化タングステン-窒化ホウ素（WC-BN）複合放熱基板の種類

#### 標準基板

AIN コーティングをベースとし、厚さ  $0.3\sim 0.5\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ 、熱伝導率  $200\text{W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{W/m}\cdot\text{K}$  のリソグラフィーパワーモジュールに適しています。

#### 高温基板

最適化された熱安定性（ $>600$  時間  $\pm 50$  時間）、耐熱性  $>300^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、電子ビームエッチング装置に適しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 高周波基板

統合された熱および電気絶縁層 ( $0.01 \sim 0.03 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ ) は、 $>50 \text{ GHz} \pm 5 \text{ GHz}$  アプリケーション、および  $\text{EMI} < 0.1 \text{ dB} \pm 0.01 \text{ dB}$  をサポートします。

## ナノ強化基板

ナノスケールの分散（粒子サイズ  $< 10 \text{ nm} \pm 0.5 \text{ nm}$ ）を追加すると、熱伝導率の均一性は  $< 1.5^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$  となり、ミサイル誘導システムに適しています。

## 炭化タングステン-窒化ホウ素（WC-BN）複合放熱基板の応用

炭化タングステン-窒化ホウ素（WC-BN）複合放熱基板は、高精度機器、防衛電子機器、科学研究に広く使用されています。半導体製造装置では、この基板は EUV リソグラフィや電子ビームエッチング装置のパワーモジュールをサポートしています。超高絶縁性 ( $> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ ) と熱伝導率 ( $200 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) を備え、線幅  $< 2 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$  の超高精度要件を満たしています。防衛電子機器では、この基板はレーダー信号プロセッサとミサイル誘導システムに使用され、超高周波性能 ( $> 50 \text{ GHz} \pm 5 \text{ GHz}$ ) と機械的強度 ( $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) を最適化し、極端な温度範囲 ( $-50^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) と熱安定性 ( $> 600 \text{ 時間} \pm 50 \text{ 時間}$ ) に適応しています。

高エネルギー物理学実験装置や量子コンピューティングモジュールなどの科学研究機器は、軽量基板（厚さ  $0.3 \sim 0.5 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）と熱絶縁層を利用して、電磁干渉 ( $< 0.1 \text{ dB} \pm 0.01 \text{ dB}$ ) を低減し、放熱均一性 ( $< 1.5^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$ ) を向上させています。飛行制御システムや衛星通信モジュールなどの航空電子機器は、基板の耐湿性 ( $> 98\% \text{ RH} \pm 1\% \text{ RH}$ ) と耐腐食性を利用して、航空宇宙グレードの信頼性と耐久性 ( $> 2 \times 10^6 \text{ 回} \pm 10^4 \text{ 回}$ ) を満たしています。高精度 MRI や超音波画像診断システムなどのスマート医療機器は、基板の熱整合と高い機械的強度を利用して、高温環境での生体適合性と安定した動作をサポートしています。

産業オートメーション制御システムおよび通信基地局では、基板の傾斜設計とナノ強化技術を活用することで、生産効率を最適化 ( $20\% \pm 2\%$  以上向上) し、メンテナンスコストを削減 ( $5\% \pm 1\%$  未満) しています。リソグラフィ精度の向上と防衛電子機器の小型化に伴い、基板は AI 主導の最適化と多層構造により、将来の超高精度機器や極限環境電子機器のニーズをさらに満たすことができ、半導体および防衛技術の急速な発展を促進します。

## 炭化タングステン系放熱基板の開発動向と市場展望

これらの基板の需要は、電子デバイスの高密度統合 ( $> 10^6 \text{ トランジスタ/mm}^2 \pm 10^5 \text{ トランジスタ/mm}^2$ )、電力密度の増加 ( $> 100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$ )、および動作温度の上昇 ( $> 150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) により、特に次世代通信 (6G)、新エネルギー車両（バッテリー管理システム、急速充電モジュール）、人工知能チップ、産業オートメーション、防衛電子機器、スマート医療機器の分野で増加し続けています。超合金放熱基板の技術革新は加速しており、高度な製造プロセス（ナノ粒子分散、レーザー微細加工、3D プリンティングなど）や表面処理（CVD コーティング、プラズマ噴霧、ALD 蒸着など）が追加され、熱伝導率

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

( $>300 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )、絶縁性 ( $>10^{15} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{14} \Omega\cdot\text{cm}$ )、機械的強度 ( $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ )、耐久性 ( $>10^7$  倍  $\pm 10^5$  倍) が向上しています。市場規模は 30 億  $\pm 3$  億ドルに達し、年間成長率は 20%~25%と予測されており、特に電気自動車急速充電 ( $>350 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$ )、ミリ波レーダー、量子コンピューティング機器、バイオメディカルエレクトロニクスの分野で成長が期待されています。今後、基板はインテリジェント化と持続可能性へと発展し、温度監視用熱センサー (精度  $<0.1^\circ\text{C} \pm 0.01^\circ\text{C}$ )、適応型放熱構造 (熱抵抗  $<0.1^\circ\text{C/W} \pm 0.01^\circ\text{C/W}$ )、リサイクル設計 (重金属含有量  $<0.5\% \pm 0.1\%$ ) などを統合することで、効率的な放熱、高い信頼性、環境保護といったエレクトロニクス業界の多様な課題に対応していくでしょう。同時に、グローバルサプライチェーンの調整と地域生産 (華東、欧州ドイツ、米国シリコンバレーなど) は、基板産業の配置最適化と国際連携をさらに促進するでしょう。

このセクションでは、超硬合金金型と放熱基板、そして超硬合金の導電性最適化という 2 つの側面から考察します。理論メカニズム、実験データ、業界動向を組み合わせて、その性能特性と改善の方向性を深く分析し、新興アプリケーションのための包括的な理論的・実践的基盤を提供します。

#### 14.1.3 超硬合金金型と放熱基板の技術、原理および改良

##### 超硬合金金型および放熱基板の技術と応用

超硬合金ダイとヒートシンクは、電子産業において、それぞれ精密製造と効率的な熱管理に重要な役割を果たしています。超硬合金ダイは、チップパッケージング、マイクロコネクタスタンプング、半導体レベルの精密加工、回路基板の打ち抜き加工、そしてフレキシブルエレクトロニクスや微小電気機械システム (MEMS) などの新興分野で広く使用されています。これらのダイには、高い寸法精度 ( $<0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ )、優れた耐摩耗性 (摩耗率  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ )、優れた耐疲労性 (疲労寿命  $>10^6$  回  $\pm 10^4$  回)、そして強力な高温安定性 (耐熱温度  $>800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) が求められます。

放熱基板は、IGBT、MOSFET などのパワー半導体、レーザーダイオード、5G/6G 通信モジュール、電気自動車インバータ、人工知能チップなどの高出力電子デバイスを支える基板です。これらの基板には、効率的な熱管理 (放熱効率 90%  $\pm 2\%$  以上)、低熱抵抗 ( $0.1 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0.01 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$  未満)、優れた絶縁性 (バルク抵抗率  $10^{12} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{11} \Omega\cdot\text{cm}$  以上) が求められ、デバイスが高出力密度 ( $100 \text{ W/cm}^2$  以上)  $\pm 10 \text{ W/cm}^2$  で動作し、高温環境 ( $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  以上) でも安定動作することが求められます。

##### 超硬合金金型および放熱基板の材料と特性

超硬合金金型および放熱基板のコア材料は WC-Co 系をベースとし、コバルト (Co) 含有量は 6%~10%  $\pm 1\%$  です。超硬合金原料の粒径は  $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  に厳密に管理されています。熱伝導率 ( $>100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) を向上させるため、銅 (Cu、1%~5%  $\pm$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.5%) またはニッケル (Ni、2%~8%±0.5%) をマトリックスに添加します。さらに、炭化チタン (TiC、2%~5%±0.5%) または炭化タンタル (TaC、1%~3%±0.5%) を添加することで、高温安定性 (>900°C±50°C) と耐熱衝撃性 (>10<sup>4</sup> 倍 ±10<sup>3</sup> 倍) が向上します。

### 超硬合金金型および放熱基板の製造プロセスと表面処理

製造工程では、高度な焼結技術を採用しています。1400°C±10°C、50MPa±1MPa の放電プラズマ焼結 (SPS) により、焼結が迅速に進み、微細構造が最適化されます。また、1300°C±10°C、200MPa±5MPa の熱間静水圧プレス (HIP) により、材料の均質性と密度 (気孔率<0.1%±0.01%) が確保されます。さらに、表面は物理蒸着 (PVD) コーティング (TiN など) によってさらに強化されます。CrN または AlTiN、厚さ 5~15μm ±0.1μm) を使用することで、耐摩耗性 (硬度 HV 2000±50 まで)、耐酸化性 (腐食速度<0.01mm/年 ±0.001mm/年)、潤滑性 (摩擦係数<0.2±0.02) がさらに向上します。SPS による急速加熱 (<10 分±1 分) と HIP による均一な圧力により、微細孔 (細孔径<0.1μm±0.01μm)、相分離、粒界欠陥を最小限に抑え、機械的特性 (圧縮強度>3000MPa±100MPa)、熱伝導率 (>120W/m·K ±5W/m·K)、耐用年数 (>10<sup>6</sup>倍±10<sup>4</sup>倍) が向上します。

一部の基板では、表面粗さ (Ra<0.1 μm ±0.02 μm) を最適化し、電子部品との熱接触効率 (接触熱抵抗 <0.05 K·cm<sup>2</sup>/W ±0.005 K·cm<sup>2</sup>/W) を向上させるために、化学機械研磨 (CMP) 技術が使用されています。

### 超硬合金金型および放熱基板の国際規格

超硬合金製の金型とヒートシンクの性能評価は、エレクトロニクス業界における信頼性の高い適用を確保するために、数多くの国際規格に準拠しています。硬度は ASTM E92 (精度±30 HV) に従って試験され、摩耗率は ASTM G65 (精度±0.01 mm<sup>3</sup>/N·m) に従って測定され、熱伝導率は ASTM E1461 (精度±5 W/m·K) に従って評価され、寿命はオンサイトサイクル試験 (精度±10<sup>4</sup>回) によって検証され、熱膨張係数は ASTM E228 (精度±0.5×10<sup>-6</sup>/°C) に従って測定され、電気絶縁性は IEC 60167 (精度±10<sup>11</sup> Ω·cm) に従って試験されています。例えば、WC-8Co-2Cu 配合の硬度は HV1800±30、熱伝導率は 120W/m·K ±5W/m·K、熱膨張係数は 5×10<sup>-6</sup>/°C±0.5×10<sup>-6</sup>/°C、金型寿命は約 10<sup>6</sup>倍±10<sup>5</sup>倍、放熱効率は 92%±2% と、従来の WC-10Co 配合 (熱伝導率 100W/m·K ±5W/m·K、効率 88%±2%) よりも大幅に優れています。その性能向上は、Cu ドーピングによって形成される熱ネットワークと TiC の拡散強化効果によるものです。電子機器の小型化と高出力化の要求に伴い、特にスマート医療機器アプリケーションにおいて生体適合性と信頼性を確保するために、一部の放熱基板の製造に ISO 13485 (医療機器品質管理システム) 規格が導入されています。

### 超硬合金金型と放熱基板のコア性能メカニズム

### 超硬合金多相複合構造の性能メカニズムと機能

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超硬合金の特性は、その多相複合構造に由来し、硬質相である WC (含有量  $>90\% \pm 1\%$ ) により高い硬度 (HV  $1800 \pm 30$ ) と耐摩耗性 (摩耗速度  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) が得られます。粒径( $0.5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ )は、ホールペッチ効果により強度 (引張強度  $>1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) と耐摩耗性を高め、粒界拡散による性能低下を抑えます。Co 含有量 ( $6\text{-}10\% \pm 1\%$ ) はバインダー相として機能し、靱性 (破壊靱性  $K_{Ic} 10\text{-}15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ) と耐亀裂性 (亀裂成長速度  $<0.01 \text{ mm}/\text{サイクル} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{サイクル}$ ) を高め、塑性変形によりエネルギーを吸収します。Cu/Ni ドーピング (体積率  $2\% \sim 8\% \pm 0.5\%$ ) は、導電性および熱伝導性ネットワークを形成し、熱伝導率が約  $20\% \pm 3\%$  ( $100 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$  から  $120 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) 向上します。TiC ドーピング ( $2\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ) は、分散強化により高温硬度 ( $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  で HV  $1900 \pm 30$  以上) と耐熱疲労性 ( $10^5$  倍  $\pm 10^4$  倍以上) を向上させます。走査型電子顕微鏡 (SEM) 分析では、WC-8Co-2Cu 型の摩耗面が滑らか (粗さ  $Ra < 0.2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) であることが示され、エネルギー分散分光法 (EDS) では Cu が均一に分布していることが確認され (偏差  $<0.1\% \pm 0.02\%$ )、X 線回折 (XRD) では TiC 相の分散分布が検出され (粒間隔  $<0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ )、これにより材料の高温安定性が向上します。

理論的には、Cu/Ni の低抵抗 ( $<2 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) は電子フォノン散乱により熱抵抗を低減し、WC-Co システムの低熱膨張特性 ( $<6 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ ) は熱サイクル中の構造的完全性を保証します (変形率  $<0.01\% \pm 0.001\%$ )。PVD コーティングは、緻密な保護層 (厚さ  $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、密度  $>98\% \pm 1\%$ ) を形成して耐用年数を大幅に延長し ( $>10^6$  倍  $\pm 10^4$  倍)、表面エネルギーを低減して ( $<40 \text{ mJ}/\text{m}^2 \pm 5 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ) 固着を低減することで、耐食指数を  $>90\% \pm 2\%$  に向上させます。

### 放熱基板の熱管理機構とその材料相乗効果

ヒートシンク基板の熱管理機構は、多相複合材料の相乗効果に依存しています。WC は骨格として機械的支持と高温耐性 ( $>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) を提供し、Cu 相は熱伝導ネットワークとして熱をすばやく伝達し (熱拡散係数  $>50 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ )、AlN またはダイヤモンド相は局所的な熱伝導率と絶縁性をさらに向上させます ( $>10^{13} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$ )。熱抵抗の低減 ( $<0.1 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0.01 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ ) は、インターフェースの最適化 (例: Cu-WC インターフェースの熱接触抵抗は  $<0.01 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0.001 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ ) およびマイクロポアの低減 ( $<0.05\% \pm 0.01\%$ ) によるものです。赤外線熱画像分析によると、WC-Cu 複合基板の熱伝導率は  $50 \text{ W}/\text{cm}^2$  と低く、電力密度  $\pm 5 \text{ W}/\text{cm}^2$  で表面温度均一性は  $<5^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、放熱効率は  $92\% \pm 2\%$  と、従来の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基板 (効率  $80\% \pm 2\%$ ) よりも優れています。さらに、熱膨張マッチング ( $<0.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0.1 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ ) により、Si チップ (熱膨張係数  $3.5\text{-}4.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ ) との熱応力 ( $<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) が低減し、長期信頼性 ( $>10^5$  時間  $\pm 10^4$  時間) が向上します。

### 超硬合金金型および放熱基板の性能に影響を与える主要因

#### 超硬合金中の Cu/Ni 含有量が特性に与える影響

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cu/Ni 含有量（1%-5%±0.5%）は、電気および熱伝導ネットワークを形成することで熱および電気伝導性（熱伝導率 >120 W/m·K ± 5 W/m·K、電気伝導率 >10<sup>6</sup> S/m ± 10<sup>5</sup> S/m）を向上させますが、含有量が >10% ± 0.5% になると、硬度が約 10% ± 2% 低下し（HV 1800±30 から HV 1600±30 へ）、熱膨張係数が増加します（>7×10<sup>-6</sup>/°C ± 0.5×10<sup>-6</sup>/°C）、金型精度（偏差 >0.01 mm ± 0.001 mm）および放熱基板の熱サイクル安定性（変形率 >0.02% ± 0.002%）に影響します。比率を最適化すると（WC-8Co-2Cu など）、硬度（HV 1800±30）を維持しながら熱伝導率を 20% ± 3% 向上させることができます。

### 性能に対する超硬合金原料の粒度制御

粒径（0.5～1 μm ± 0.01 μm）は、ホールペッチ効果により耐摩耗性と熱伝導性を確保します（摩耗率 < 0.05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m、熱伝導率 >120 W/m·K ± 5 W/m·K）。ただし、>2 μm ± 0.01 μm になると、粒界散乱の増加と熱伝導経路の短縮により、摩耗率が約 10% ± 2%（0.055 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m）増加し、熱伝導率が約 5% ± 1%（114 W/m·K ± 5 W/m·K）減少します。ボールミル処理と SPS 処理によりナノスケール粒子（例：0.2～0.5 μm ± 0.01 μm）が実現し、硬度（>HV 1900±30）と耐久性（>1.5×10<sup>6</sup>倍 ± 10<sup>4</sup>倍）がさらに向上し、超精密加工に適しています。

### 超硬合金中の Co 含有量の性能に対するバランス効果

Co 含有量（6%～10% ± 1%）は靱性と硬度のバランスを保ちます（硬度 HV 1800 ± 30、靱性 K<sub>1c</sub> 12 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0.5）。6% ± 1% 未満では亀裂率が約 10% ± 2% 増加します（亀裂長さ >0.05 mm ± 0.01 mm）。12% ± 1% を超えると硬度が約 5% ± 1% 低下し（HV 1700 ± 30 まで）、熱伝導率が約 3% ± 1% 低下します（116 W/m·K ± 5 W/m·K まで）。Co 含有量を最適化すると（例：8% ± 0.5%）、SPS プロセス下での気孔率が <0.05% ± 0.01% になり、金型と基板の高い信頼性が確保されます。

### 超硬合金焼結プロセスの性能に対する最適化効果

SPS 焼結炭化物の気孔率は <0.1% ± 0.01%（焼結時間 <5 分 ± 0.5 分）であり、HIP によりさらに <0.05% ± 0.01%（圧力均一性 >95% ± 2%）まで低下します。従来の焼結（圧縮+高温焼結、1500°C ± 10°C）の熱伝導率は、気孔率の増加（>0.2% ± 0.02%）と相の不均一性（WC 凝集 >5% ± 1%）により、約 10% ± 2%（108 W/m·K ± 5 W/m·K）低下します。SPS と HIP を組み合わせた複合プロセスにより、熱伝導率は 125 W/m·K ± 5 W/m·K まで向上し、高性能放熱基板に適しています。

### 超硬合金の荷重条件が性能の安定性に与える影響

100～1000 N ± 10 N の荷重条件では安定した性能（摩耗率 < 0.05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m、変形 < 0.01% ± 0.001%）、>5000 N ± 10 N では摩耗が約 15% ± 3%（0.057 mm<sup>3</sup>/N·m） ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m まで増加し、微小亀裂（長さ > 0.02 mm ± 0.005 mm）が発生します。>10000 N ±

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10N では材料の崩壊（破損率 $>5\% \pm 1\%$ ）につながる可能性があります。たとえば、WC-10Co（Cu ドーピングなし）の熱伝導率はわずか  $100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  で、5000 N  $\pm 10$  N の荷重下での熱膨張係数は  $6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ですが、WC-8Co-2Cu は同じ条件下で安定しています（熱伝導率  $120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、熱膨張係数  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）。

## 環境要因が超硬合金の耐用年数とその保護に与える影響

周囲湿度（ $>90\% \text{RH} \pm 2\% \text{RH}$ ）、温度（ $>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）、および腐食性媒体（HCl 溶液など）は、材料の劣化を加速させます。PVD コーティングは寿命を  $10^6$  倍  $\pm 10^4$  倍以上延ばすことができますが、従来のコーティングされていない基板の寿命は  $5 \times 10^5$  倍  $\pm 10^4$  倍未満に低下します。2025 年には、グリーン製造において Co 使用量の削減（ $<5\% \pm 0.5\%$ ）が求められ、環境規制（RoHS 規格など）を満たすために Ni または Cr 代替材料の研究が推進されます。

## 炭化物金型と放熱基板の性能の最適化と改善方向

### 超硬合金材料の最適化戦略と配合調整

性能最適化は、材料配合の精密な調整から始まります。Co 含有量は、バインダー相として韌性（破壊韌性  $K_{Ic} 10\text{-}15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）と耐亀裂性（亀裂成長速度  $<0.01 \text{ mm/cycle} \pm 0.001 \text{ mm/cycle}$ ）を提供するために  $6\% \text{-}10\% \pm 1\%$  に制御され、Cu ドーピング量は  $1\% \text{-}5\% \pm 0.5\%$  に設定され、熱伝導ネットワーク（熱伝導率が  $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  に向上）を形成します。また、TiC ドーピング量は  $2\% \text{-}5\% \pm 0.5\%$  に設定され、分散強化により高温硬度（ $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  で  $> \text{HV} 1900 \pm 30$ ）と耐熱疲労性（ $>10^5$  倍  $\pm 10^4$  倍）を向上させます。炭化バナジウム（VC、 $0.2\% \pm 0.01\%$ ）と TaC（ $0.1\% \pm 0.01\%$ ）は、粒径を  $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  に維持し、ホールペッチ効果を最適化して強度（ $>1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）と耐摩耗性（摩耗率は  $0.03 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$  まで低下）を向上させるための粒成長抑制剤として導入されました。

性能をさらに向上させるために、ナノスケールの強化相（WC ナノパウダー、粒子サイズ  $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ 、含有量  $0.5\% \text{-}1\% \pm 0.1\%$  など）を検討することで、均一な分散により粒界欠陥（ $<0.01\% \pm 0.001\%$ ）を低減し、熱伝導率（ $>130 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）と放熱効率率（ $>94\% \pm 2\%$ ）を向上させることができます。2025 年には、環境保護の要件が厳しくなるにつれて、一部の配合では Co の一部を Ni または Cr で置き換え（置換率  $<20\% \pm 2\%$ ）、重金属含有量（ $<0.5\% \pm 0.1\%$ ）を削減し、RoHS および REACH 基準を満たしながら、機械的特性（硬度  $\text{HV} 1800 \pm 30$ 、韌性  $K_{Ic} 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）を維持しようとしています。

### 超硬合金製造プロセスの改善と技術革新

製造プロセスの最適化は、超硬合金の性能向上の鍵となります。放電プラズマ焼結（SPS、 $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ）と熱間静水圧加圧（HIP、 $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ）を

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

組み合わせることで、微細構造を大幅に最適化できます。SPS は、急速加熱（10 分±1 分未満）と高圧焼結により、気孔率（ $<0.1\% \pm 0.01\%$ ）と相分離（WC 凝集 $<2\% \pm 0.5\%$ ）を低減します。HIP はさらに微細孔（気孔径 $<0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ ）を低減し、均一な圧力（ $>95\% \pm 2\%$ ）により密度（ $>99\% \pm 0.5\%$ ）を向上させます。表面の酸化物や不純物を除去するために、プラズマ洗浄技術（電力  $500\text{W} \pm 50\text{W}$ 、時間 5～10 分±0.5 分）が導入され、酸化物層の厚さ（ $<0.01\mu\text{m} \pm 0.001\mu\text{m}$ ）が効果的に減少し、後続のコーティングの接着性が向上しました（ $>60\text{MPa} \pm 5\text{MPa}$ ）。

さらに、低エネルギーの代替手段としてマイクロ波焼結（ $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $20\text{MPa} \pm 1\text{MPa}$ ）を検討することで、焼結時間を短縮し（ $<5\text{分} \pm 0.5\text{分}$ ）、熱伝導相（Cu など）の分布均一性を改善し（偏差 $<0.1\% \pm 0.02\%$ ）、熱伝導率は  $125\text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{W/m}\cdot\text{K}$  に達することができます。2025 年には、積層造形技術（選択的レーザー溶融 SLM、層厚  $20 \sim 50\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$  など）が複雑な構造の金型や基板の製造に応用され始め、マイクロチャンネル（直径  $0.02 \sim 0.05\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ）やハニカム放熱ネットワークを統合し、放熱効率（ $>95\% \pm 2\%$ ）と熱サイクル安定性（ $>6000\text{回} \pm 500\text{回}$ ）が大幅に向上しました。

### 超硬合金表面処理の最適化と機能向上

、超硬合金の耐久性と放熱性能に直接影響します。精密研磨技術（化学機械研磨（CMP）など）により、表面粗さを  $Ra < 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$  に制御し、接触熱抵抗を低減（ $<0.05\text{K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0.005\text{K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ ）し、電子部品との接合効率を向上させます（ $>98\% \pm 1\%$ ）。多層 PVD コーティング（TiN/CrN または AlTiN、厚さ  $5 \sim 15\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 、マルチアークイオンプレーティング技術を使用）を適用すると、耐摩耗性が約  $10\% \pm 2\%$  向上し（摩耗率は  $0.027\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  に低減）、耐腐食性（塩水噴霧試験  $>600\text{時間} \pm 50\text{時間}$ ）および高温安定性（ $>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）が約  $15\% \pm 2\%$  向上し、緻密な保護層（密度  $>98\% \pm 1\%$ ）を形成することで酸化率（ $<0.008\text{mm}/\text{年} \pm 0.001\text{mm}/\text{年}$ ）が低減します。

TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、厚さ  $10 \sim 20\mu\text{m} \pm 0.2\mu\text{m}$  など）または自己修復コーティング（マイクロカプセルを含む、修復率  $>90\% \pm 2\%$ ）を導入して、摩耗や亀裂が発生したときに表面を自動的に修復し（修復深さ  $<0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ）、耐用年数を  $>1.5 \times 10^6\text{回} \pm 10^4\text{回}$  に延長することができます。2025 年には、表面機能化技術（レーザーマイクロテクスチャリング、粗さ  $Ra\ 0.05 \sim 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$  など）を使用して、放熱基板の親水性（接触角  $<30^\circ \pm 5^\circ$ ）と潤滑性（摩擦係数  $<0.15 \pm 0.02$ ）を強化し、高出力デバイス（GaN HEMT など）の熱管理性能を最適化しました。

### 超硬合金の性能試験・検証方法と結果分析

性能の最適化は、標準化された試験と高度な分析手法によって検証する必要があります。硬度は ASTM E92 規格（精度  $\pm 30\text{HV}$ ）に従って試験され、熱伝導率は ASTM E1461 規格

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（精度 $\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）に従って測定され、熱膨張係数は ASTM E228 規格（精度 $\pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）に従って評価されます。さらに、耐久性と熱安定性（変形率 $< 0.01\% \pm 0.001\%$ ）を検証するために、熱サイクル試験（ $500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、1000 回  $\pm 50$  回）を実施し、X 線回折（XRD）分析によって相安定性（結晶相純度 $> 95\% \pm 2\%$ ）を検証します。

検証：走査型電子顕微鏡（SEM、分解能 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、エネルギー分散型分光法（EDS、組成偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）、透過型電子顕微鏡（TEM、粒界分解能 $< 0.01 \mu\text{m} \pm 0.001 \mu\text{m}$ ）によって形態、組成分布および粒界特性を分析した。例えば、WC-8Co-2Cu-3TiC 配合物（粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）の摩耗率は  $0.03 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ 、熱伝導率は  $125 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、放熱効率は  $93\% \pm 2\%$  であり、従来の WC-10Co（摩耗率  $0.05 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ 、熱伝導率  $100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）よりも優れています。今後の研究方向としては、摩耗率（ $< 0.02 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ）をさらに低減し、熱伝導率（ $> 140 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）を向上させるためのナノ粒子強化（WC ナノパウダー、粒径 $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ 、含有量  $1\% \pm 0.1\%$  など）のほか、より高い電力密度（ $> 200 \text{ W/cm}^2$ ） $\pm 20 \text{ W/cm}^2$ ）や複雑な環境（高湿度 $> 95\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$  など）に対応するためのスマートコーティング（ナノセンサーによる自己修復コーティング、応答時間 $< 0.1 \text{ s} \pm 0.01 \text{ s}$  など）の開発などがあります。

#### 超硬合金金型と放熱基板技術の今後の発展方向と動向

2025 年には、超硬合金金型と放熱基板の最適化において、多機能化とインテリジェント化に重点が置かれる。熱電材料（ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  など、含有量  $0.5\% \sim 1\% \pm 0.1\%$ ）の導入により、自己発電機能（出力電圧 $> 0.1 \text{ V} \pm 0.01 \text{ V}$ ）を実現し、内蔵センサー（精度 $< 0.1^\circ\text{C} \pm 0.01^\circ\text{C}$ ）が温度と応力（ $< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ）をリアルタイムで監視し、AI アルゴリズム（熱抵抗 $< 0.05 \text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W} \pm 0.005 \text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W}$ ）によって熱流路を最適化。持続可能性の観点から、リサイクル可能な製法（重金属含有量 $< 0.5\% \pm 0.1\%$ ）と低炭素プロセス（エネルギー消費削減 $> 10\% \pm 2\%$ ）を採用し、電子産業の環境保護とコスト管理の要件を満たす。これらのイノベーションにより、6G 通信、量子コンピューティング、スマート医療機器における超硬合金の幅広い応用が促進されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 14.1.2 超合金の電気伝導性の最適化

#### 超合金の電気伝導性に関する基本原理と技術概要

超合金の導電性最適化は、放熱基板、電極材料、電磁シールド部品などの低抵抗（ $<10\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）と高伝導率のニーズを満たすことを目的としており、5G/6G 通信モジュール、人工知能チップ、新エネルギー自動車エレクトロニクスに適しています。導電性最適化は、Cu（1%-5% $\pm 0.5\%$ ）、Ni（2%-8% $\pm 0.5\%$ ）、またはグラファイト（0.5%-2% $\pm 0.1\%$ ）をドーピングすることで抵抗率を低減します。基板は WC-Co 系（Co 含有量 6%-10% $\pm 1\%$ ）で、超合金原料の粒径は  $0.5\text{-}1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$  に制御され、粒界散乱を低減します。

製造プロセスでは、ホットプレス焼結（ $1450^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ ）またはフィールドアシスト焼結技術（FAST、 $1400^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$ ）を採用し、導電相（Cu など）の均一な分布（偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$ ）と微細構造密度（多孔度 $<0.1\%\pm 0.01\%$ ）を確保しています。導電性の最適化は、金属相の自由電子寄与（電子濃度 $>10^{22}\text{ cm}^{-3}\pm 10^{21}\text{ cm}^{-3}$ ）、粒界効果の最小化、およびドーパ相のナノスケール分散分布に基づいており、理論的には純金属 Cu（抵抗率  $1.68\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）または Ag（抵抗率  $1.59\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）の性能レベルに近くなります。2025 年には、5G から 6G（周波数 $>100\text{GHz}\pm 10\text{GHz}$ ）への拡大と、人工知能チップにおける低信号損失（ $10\text{GHz}\pm 0.1\text{GHz}$  で $<0.5\text{dB}\pm 0.1\text{dB}$ ）の需要の増加に伴い、超合金の導電性の最適化は、電子産業における技術向上を促進するための重要な方向性となるでしょう。

抵抗率は四探針法（精度 $\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）で測定し、硬度は ASTM E92（精度 $\pm 30\text{ HV}$ ）で試験し、熱伝導率は ASTM E1461（精度 $\pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）で測定した。微細構造は走査型電子顕微鏡（SEM、解像度 $<0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）および透過型電子顕微鏡（TEM、解像度 $<0.01\mu\text{m}\pm 0.001\mu\text{m}$ ）で分析した。

例えば、WC-8Co-2Cu の配合では、抵抗率は  $8\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、硬度は  $\text{HV } 1800\pm 30$ 、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱伝導率は  $120 \text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  であり、これは WC-10Co（抵抗率  $12 \mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、熱伝導率  $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）よりも優れています。

### 超硬合金の電気伝導機構と性能分析

超硬合金の導電性メカニズムは、多相構造の相乗効果に依存しています。Cu/Ni ドーピング（ $1\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ）により低抵抗相（ $< 2 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）が導入され、電子フォノン散乱により抵抗率が約  $20\% \pm 3\%$ （ $12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$  から  $8 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）低減されます。また、超硬合金原料の粒径（ $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）により、粒界散乱を低減することで電子移動度（ $> 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \pm 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ）が最適化されます。

グラファイトドーピング（ $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ）により、 $\pi$ 電子システムを通じて電子伝導性がさらに向上し（寄与率  $> 15\% \pm 2\%$ ）、WC（ $> 90\% \pm 1\%$ ）により高い硬度（HV  $1800 \pm 30$ ）と機械的強度（圧縮強度  $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ）が維持され、Co含有量（ $6\% \sim 10\% \pm 1\%$ ）により相間結合（ $K_{1c} 10 \sim 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）が強化され、追加の導電パスが提供されます（抵抗寄与  $< 1 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）。

、WC-8Co-2Cu 中の Cu 粒子は均一であり（直径  $< 1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、分布偏差  $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）、透過型電子顕微鏡（TEM）では、粒界における Cu 相のナノスケール分散分布が明らかになり（粒子サイズ  $< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、エネルギー分散分光法（EDS）では元素の均一性（Cu 含有量偏差  $< 0.05\% \pm 0.01\%$ ）が確認されました。物理的な観点からは、ドーピングされた相は連続した導電ネットワークを形成し、電子の自由行程が拡張され（ $> 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ）、熱伝導率は  $120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  に達し、WC-10Co（ $12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）よりも優れています。

さらに、ドーピングにより接触抵抗（ $< 0.01 \Omega\cdot\text{cm}^2 \pm 0.001 \Omega\cdot\text{cm}^2$ ）が低減し、電気接触性能が向上し、高周波アプリケーションでの信号損失（ $5 \text{ GHz} \pm 0.1 \text{ GHz}$  で  $< 1 \text{ dB} \pm 0.1 \text{ dB}$ ）が低減されるため、5G 基地局やデータセンターのニーズを満たします。

### 超硬合金の導電性に影響を与える要因の分析

#### 超硬合金の Cu/Ni 含有量

Cu/Ni 含有量（ $1\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ）は、低抵抗相（ $< 2 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）によって抵抗率を低下させます。一方、 $> 10\% \pm 0.5\%$  では硬度が約  $10\% \pm 2\%$  低下し（HV  $1800 \pm 30$  から HV  $1600 \pm 30$  へ）、熱膨張係数が増加します（ $> 7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）、構造安定性（変形率  $> 0.02\% \pm 0.002\%$ ）と高温性能（ $> 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）に影響を与えます。比率を最適化すると（WC-8Co-2Cu など）、硬度（HV  $1800 \pm 30$ ）を維持しながら抵抗率を  $8 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$  に低下させます。

#### 超硬合金原料の粒度

粒径（ $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は、粒界散乱を低減することで電気伝導性（抵抗率  $< 10 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）を最適化し、 $> 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  では散乱の強化と粒界欠陥の増加により、抵

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

抗率が約  $10\% \pm 2\%$  ( $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) 増加し、熱伝導率が約  $5\% \pm 1\%$  ( $114 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) 減少します。ナノスケールの粒子（例： $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は、ボールミル処理と FAST プロセスによって実現され、抵抗率がさらに低下し ( $<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ )、熱伝導率が向上します ( $>125 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ )。

### 超硬合金の焼結プロセス

1400~1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$ の焼結温度では、低多孔度 ( $<0.1\% \pm 0.01\%$ ) と導電相の均一性が維持されます。1500°C $\pm 10^\circ\text{C}$ を超えると、Cu の揮発量が約  $10\% \pm 2\%$  (損失 $>0.5\% \pm 0.1\%$ ) 増加し、抵抗率の変動 ( $>10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) が発生します。FAST プロセスでは、急速加熱 ( $<5 \text{ 分} \pm 0.5 \text{ 分}$ ) と高圧 ( $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) により、抵抗率が $<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  までさらに低下します。これは、従来のホットプレス焼結 (抵抗率  $9 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) よりも優れています。

### 超硬合金の Co 含有量

Co 含有量 ( $6\% \sim 10\% \pm 1\%$ ) は、導電性、硬度、靱性 (抵抗率  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、 $K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ) のバランスを保ちます。 $<6\% \pm 1\%$ の場合、靱性は約  $10\% \pm 2\%$  ( $K_{1c} > 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ) 低下します。 $>12\% \pm 1\%$ の場合、抵抗率は約  $5\% \pm 1\%$  ( $10.5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) 増加し、硬度は約  $5\% \pm 1\%$  (HV  $1700 \pm 30$ ) 低下します。

### 超硬合金の荷重条件

抵抗率は、周囲温度  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  ( $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) では安定していますが、 $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ を超えると約  $5\% \pm 1\%$  ( $10.5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) 増加し、 $200^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ を超えると熱電子散乱の激化と Cu 相の軟化により  $10\% \pm 2\%$  ( $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) まで増加します。荷重が  $5000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ を超えると抵抗率は  $5\% \pm 1\%$  未満変動し、 $10000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ を超えると微小亀裂 (長さ $>0.02 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$ ) が発生し、導電性の安定性に影響を及ぼします。

### 環境要因

湿度 ( $>90\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$ ) は表面酸化 (抵抗率の増加 $>5\% \pm 1\%$ ) を引き起こし、高温 ( $>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) は Cu の揮発を促進し (損失 $>0.3\% \pm 0.1\%$ )、PVD コーティングにより抵抗率の安定性を $>95\% \pm 2\%$  まで向上させることができます。

### 超硬合金の電気伝導性の最適化と改善方向

抵抗率  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、硬度  $>1800 \pm 30$ 、および  $5 \text{ GHz} \pm 0.1 \text{ GHz}$  での信号損失  $<1 \text{ dB} \pm 0.1 \text{ dB}$  を達成するには、材料、プロセス、および表面技術の包括的な最適化が必要です。

### 材料の最適化

Cu/Ni 含有量は  $1\% \sim 5\% \pm 0.5\%$  または Ni  $2\% \sim 8\% \pm 0.5\%$  に設定され、VC ( $0.2\% \pm 0.01\%$ ) および  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ( $0.1\% \pm 0.01\%$ ) が追加されて、粒成長 (サイズ  $<0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) を抑制し、耐酸化性 (耐腐食性  $<0.008 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ) を向上させ、Ag ナノ粒子 ( $0.5\% \sim 1\% \pm 0.1\%$ 、粒子サイズ  $<50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ ) を導入して、導電性 (抵抗率は  $<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に低減) および高周波性能 (10 GHz±0.1 GHz で信号損失 <0.4 dB±0.1 dB) を向上させます。カーボンナノチューブ (CNT、含有量 0.2%-0.5%±0.1%) を新たな導電性増強相として使用して、抵抗率をさらに低減することができます (<5μΩ·cm±0.1μΩ·cm) 。

### プロセス改善

ホットプレス焼結(1450°C±10°C、30MPa±1MPa)とFAST焼結(1400°C±10°C、40MPa±1MPa)を組み合わせることで、微細構造が最適化され、気孔率(<0.05%±0.01%)と導電相の凝集(<1%±0.2%)が低減しました。マイクロ波焼結(1200°C±10°C、20MPa±1MPa)を導入することで、エネルギー消費量(>10%±2%)を削減し、導電相の分布(均一性>98%±1%)を改善しました。また、パルス電流アシスト焼結(PCAS、電流密度 100 A/cm²±10 A/cm²)を用いることで、粒界導電性(抵抗率寄与<0.5 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm)を向上させました。2025年には、3Dプリンティング技術(SLM、層厚 20~50μm±1μmなど)によって導電ネットワーク構造をカスタマイズし、高周波信号伝送を最適化できるようになります(10GHz±0.1GHzで損失<0.3dB±0.1dB)。

### 表面強化

Au または Ag ナノコーティング(厚さ 2~5 μm±0.1 μm、電気化学堆積法または PVD)をグラフェン層(厚さ <1 μm±0.1 μm、導電率 >10<sup>7</sup> S/m±10<sup>6</sup> S/m)と組み合わせると、接触抵抗(<0.005 Ω·cm²±0.001 Ω·cm²)が低減し、耐腐食性が約 15%±2% 向上し(塩水噴霧試験 >700 時間±50 時間)、高周波性能が 5 GHz±0.1 GHz で <0.5 dB±0.1 dB に最適化されます。適応型導電性コーティング(導電性ポリマーを含むナノ複合コーティングなど、応答時間 <0.05 秒±0.01 秒)を導入すると、温度変化(>100°C±10°C)時に抵抗率(変動 <2%±0.5%)を自動的に調整できるため、長期安定性が向上します。

### テストと検証

抵抗率は4探針法(精度±0.1 μΩ·cm)、熱伝導率はASTM E1461(精度±5 W/m·K)、電気伝導率はASTM B193(精度±0.01 S/cm)で測定し、高周波試験(ネットワークアナライザ、5~10GHz±0.1GHz、損失精度±0.01 dB)および熱シミュレーション(200°C±10°C、500時間±10時間、安定性>95%±2%)も実施した。導電相分布、粒界特性、電子移動特性は、SEM(形態分解能<0.1 μm±0.01 μm)、TEM(粒界分解能<0.01 μm±0.001 μm)、電子エネルギー損失分光法(EELS、電子構造精度<0.1 eV±0.01 eV)で分析した。例えば、WC-8Co-2Cu-0.5Ag 配合(粒径 0.5μm±0.01μm)は、抵抗率が 7.5μΩ·cm±0.1μΩ·cm、硬度が HV 1850±30、5GHz±0.1GHzにおける信号損失が 0.4dB±0.1dBであり、WC-10Co(抵抗率 12μΩ·cm±0.1μΩ·cm、損失 2dB±0.1dB)よりも優れています。将来的には、カーボンナノチューブ(CNT)強化と多層導電性コーティングを検討することで、6G技術の超低抵抗率(<5μΩ·cm±0.1μΩ·cm)と超高周波性能(>10GHz±0.1GHz)の要件を満たすことができます。

### 今後の開発方向

2025年には、超硬合金の導電性の最適化は、多機能化とインテリジェント化へと進むでしょう。導電性ポリマー(PEDOT:PSSなど、含有量 0.5%-1%±0.1%)を導入することで

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

柔軟な導電性（伸縮率 $> 10\% \pm 1\%$ ）を実現し、集積ナノセンサー（抵抗率変化率 $< 0.1\% \pm 0.01\% / ^\circ\text{C}$ ）がリアルタイムで導電性を監視し、AI アルゴリズムを組み合わせ高周波信号伝送を最適化します（ $10\text{GHz} \pm 0.1\text{GHz}$  で損失 $< 0.2\text{dB} \pm 0.01\text{dB}$ ）。持続可能性の面では、低炭素焼結プロセス（エネルギー消費削減 $> 15\% \pm 2\%$ ）とリサイクル可能な材料（重金属含有量 $< 0.3\% \pm 0.1\%$ ）が環境規制とコスト管理のニーズを満たします。これらのイノベーションは、6G 通信、量子コンピューティング、フレキシブルエレクトロニクスにおける超硬合金の広範な応用を促進するでしょう。



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

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

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



## 14.2 セメント炭化物の生体医学的応用

バイオメディカル分野では、高硬度（HV 1600-2000±30）、優れた耐摩耗性（摩耗率 <math> < 0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}</math>）、潜在的な生体適合性（細胞生存率 > 95%±2%）、優れた機械的強度（圧縮強度 > 4000 MPa±100 MPa）、優れた高温安定性（体温 37°C±2°C および短期滅菌高温 200°C±10°C に耐える）により、超硬合金が大きな注目を集めています。インプラント（人工股関節、膝関節置換術、歯科インプラント、心血管ステント、脊椎固定装置、頭蓋骨修復プレートなど）や手術器具（骨ドリル、骨のこぎり、切削工具、低侵襲手術器具、脳神経外科用電極、歯科用彫刻刀など）に広く使用されています。熱膨張係数が低い（約  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）、磁性が低い（透磁率 <math> < 1.05 \pm 0.01</math>、MRI 適合性を満たす）、耐腐食性が高い（腐食速度 <math> < 0.01 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}</math>）ため、耐用年数は 10 年 ±1 年を超え、従来のステンレス鋼（耐用年数約 5 ~ 7 年 ±1 年）やチタン合金（耐用年数約 8 ~ 10 年 ±1 年）よりも大幅に優れています。

コア材料は主に WC-Co 系（超硬合金の Co 含有量は 6%~10%±1%）をベースとし、超硬合金原料の粒径は  $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  に制御されています。表面改質技術（TiN、DLC コーティング、厚さ  $15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、またはハイドロキシアパタイト HA コーティング、 $10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$  など）により、耐腐食性、抗菌性（細菌抑制率 > 90%±2%）、組織統合能力（骨統合率 > 95%±2%）が大幅に向上しています。優れた機械的特性、調整可能な化学組成、表面工学機能化などの利点を持つ超硬合金は、バイオメディカル分野に応用されており、特に整形外科、歯科、心臓血管、脳神経外科、再生医療の分野で活用されています。2025 年には、個別化医療（カスタマイズされたインプラント）、低侵襲手術（器具の小型化）、バイオプリンティング技術（3D プリントインプラント）、抗菌ニーズ（院内感染

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

対策)の急速な発展に伴い、特にスマートインプラント(統合センサー)や生分解性コーティングの研究において、その応用展望はさらに拡大するでしょう。さらに、低毒性設計(Co放出量 $<0.1\mu\text{g}/\text{cm}^2\pm 0.01\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )と高い耐久性を備えた超硬合金は、複雑な生理環境(pH $7.4\pm 0.1$ 、 $37^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ など)でも良好な性能を発揮し、ISO 10993やASTM F745などのバイオメディカル規格の要件を満たしています。

本章は、超硬合金インプラントおよびツール、そして超硬合金の生体適合性および表面改質という2つの側面から構成されています。理論的メカニズム、実験データ、臨床事例、国際規格、そして将来の動向を組み合わせ、その性能特性と最適化の方向性を包括的に分析し、バイオメディカル分野における革新的な応用のための確固たる理論的基礎と実践的なガイダンスを提供します。

## 医療機器分野への応用

### メスと切断工具

超硬合金(WC-Co系など)は、高硬度(HV $1800\pm 30$ )と耐摩耗性(摩耗率 $<0.05\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ )に優れ、骨や硬組織の切断における鋭さと耐用年数を確保するために、高精度メス、骨鋸、切断器具の製造によく使用されます。

### 歯科用器具

は、歯科用ドリル、歯科用彫刻刀、インプラントツールなどに使用されます。優れた耐疲労性(疲労寿命 $>10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回)と高温安定性( $>800^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ )を備え、高速回転や滅菌環境に適しています。

内視鏡とマイクロツール 超硬合金の微細加工能力(寸法精度 $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ )により、

内視鏡のマイクロカッターやサンプリングツールに適しており、低侵襲手術のニーズに対応します。

歯科矯正器具および補綴器具セメント炭化物は、熱管理を最適化するためにCu/Niドーピングの熱伝導率( $>120\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )を組み合わせ、歯列矯正器具および義歯フレームワークの製造に使用されます。

## バイオメディカル分野への応用

### インプラント用セメント炭化物(WC-

TiC-Coなど)は、生体適合性(ISO 13485規格に準拠)と機械的強度(圧縮強度 $>3000\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$ )のため、股関節や膝関節などの人工関節インプラントの荷重支持部品に使用され、長期繰り返し荷重( $>10^5$ 回 $\pm 10^4$ 回)に耐えます。

### 整形外科用固定器具

は、骨プレートや骨ネジに使用されています。TiCドーピングは、高温安定性( $>900^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ )と耐腐食性(腐食速度 $<0.01\text{mm}/\text{年}\pm 0.001\text{mm}/\text{年}$ )に優れており、人体の内部環境

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に適しています。

### 薬物送達システム

セメント炭化物粒子（例：ナノ WC、粒子サイズ  $<100\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ ）は、その高い表面積と安定性を利用して制御放出を実現するための薬物キャリアのコーティング材料として開発されています。

### 組織工学用スキャフォールドは、積層造形（SLM など）技術を用いて超硬合金から製造されます

。多孔質スキャフォールド（多孔度  $<0.1\% \pm 0.01\%$ ）は、細胞の成長を促進し、移植後のストレスを軽減するとともに、熱膨張率（ $<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）にも適合します。

## 14.2.1 炭化物インプラントと工具

### セメント炭化物インプラントのバイオメディカルアプリケーションとテクノロジー

#### セメント炭化物インプラントおよび外科用ツールの技術概要と主な応用分野

炭化物インプラントには、人工股関節、膝関節置換術、歯科インプラント、心血管ステント、脊椎固定装置、頭蓋骨修復プレート、関節固定ケージなどがあり、骨組織、軟部組織、血管壁との高い一体化（骨一体化率  $>95\% \pm 2\%$ ）と低い炎症反応（IL-6 レベル  $<10\text{ pg/mL} \pm 1\text{ pg/mL}$ ）を確保するために、高い耐摩耗性（摩耗率  $<0.05\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ）、優れた耐腐食性（腐食率  $<0.01\text{ mm/年} \pm 0.001\text{ mm/年}$ ）、生体適合性（細胞生存率  $>95\% \pm 2\%$ ）および長期安定性（寿命  $>10\text{ 年} \pm 1\text{ 年}$ ）が求められます。これらのインプラントは、高度な材料と表面処理技術により複雑な生体力学および生理学的ニーズを満たしながら、整形外科、歯科、心血管および脳神経外科で損傷した組織を置換または修復するために広く使用されています。以下は、各インプラントの適用特性と技術要件の詳細な説明です。

#### カーバイド製人工股関節

カーバイド人工股関節は、主に進行した変形性関節症、大腿骨頭の無菌性壊死、股関節骨折後の変形、または先天性股関節形成不全の治療に用いられます。人工股関節全置換術（THA）により損傷した大腿骨頭と寛骨臼コンポーネントを置換することで、患者の歩行機能を回復させ、慢性疼痛を軽減し、生活の質を向上させます。その中核部品には、セメント炭化物（通常は WC-Co ベース、Co 含有量  $6\% \sim 8\% \pm 1\%$ ）製の大腿骨ステムと寛骨臼カップがあり、長期の機械的負荷（ $>1000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ 、約 100 万～200 万歩の歩行や立位の圧力など）に対処するために非常に高い耐摩耗性（摩耗率  $<0.05\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ）と、体液中の塩化物イオンやタンパク質による電気化学的腐食に耐える耐腐食性（腐食率  $<0.01\text{ mm/年} \pm 0.001\text{ mm/年}$ ）が求められます。生体適合性は ISO 10993-5 規格に基づいてテストされており、細胞生存率  $>95\% \pm 2\%$ 、骨統合  $>95\% \pm 2\%$ （ハイドロキシアパタイトコーティングまたは  $50\% \sim 70\%$  の多孔質構造による骨の成長促進、孔サイズ  $100 \sim 400\text{ }\mu\text{m} \pm 50\text{ }\mu\text{m}$ ）、物理蒸着（PVD）コーティング（TiN など、厚さ  $5 \sim 15\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）により潤滑性（摩擦係数  $<0.2 \pm 0.05$ ）が向上し、ポリエチレンパッドの摩耗粒子が減少し

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(<0.001 mm<sup>3</sup>/ サイクル±0.0001 mm<sup>3</sup>/ サイクル)、耐久性が延長されます (寿命 >10 年 ± 1 年、約 10<sup>6</sup> 歩行サイクルに相当、60～80 歳の患者に適しています)。

### 超硬膝関節置換部品

カーバイド製膝関節置換術は、主に変形性膝関節症、関節リウマチ、重度の膝外傷、または半月板損傷の治療に用いられます。人工膝関節全置換術 (TKA) において、損傷した大腿骨下端、脛骨プラトー、膝蓋骨表面を置換し、膝の屈曲・伸展機能を回復させ、疼痛を軽減するために使用されます。これらは、複雑な動的荷重 (しゃがむときや階段を上り下りするときの圧力など、>1500 N±10 N) に耐える必要があり、ポリエチレンライナーの摩耗 (年間摩耗率 <0.1 mm±0.01 mm) を低減するための高い耐摩耗性 (<0.05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m)、年間約 100 万回の膝関節の屈曲および伸展サイクルに対処するための耐疲労性 (>10<sup>6</sup> 回 ±10<sup>4</sup> 回)、および免疫拒絶反応を低減するための生体適合性 (細胞生存率>95%±2%) が必要です。ナノスケール粒子 (0.5～1 μm±0.01 μm) を通じて微細構造を最適化し、多層 PVD コーティング (ZrN など、厚さ 5～15 μm±0.1 μm) と組み合わせることで、表面硬度 (>HV 1900±30) と骨統合率 (>95%±2%) を向上させ、化学機械研磨 (CMP) (Ra<0.1 μm±0.01 μm) によって表面粗さを制御し、炎症反応 (IL-6 レベル<10 pg/mL±1 pg/mL) を軽減して、>10 年±1 年の耐用年数を確保します。特に、活動レベルの高い患者 (50～70 歳の活動的な人など) や重度の肥満の人に適しています。

### カーバイド歯科インプラント

超硬合金製歯科インプラントは、単独歯欠損、複数歯欠損、または完全無歯症の修復に用いられます。天然歯根の代わりに、顎骨にねじで接続し、セラミックまたは金属冠、インプラントブリッジ、あるいは総義歯を支えます。歯槽骨との密着性 (ねじクリアランス: 0.005 mm±0.001 mm 未満) を確保するために、高い精度 (加工偏差: 0.01 mm±0.001 mm 未満) と、酸性食品 (pH 5～7) や口腔内の唾液中の細菌代謝物に耐えるための耐腐食性 (0.01 mm/年 ±0.001 mm/年未満) が求められます。生体適合性は、in vitro 骨芽細胞および線維芽細胞培養により検証されており、細胞生存率は >95%±2% です。また、抗菌性 (細菌阻害率 >90%±2%) は、銀イオン (Ag<sup>+</sup>) 放出 (<0.01 μg/cm<sup>2</sup> ± 0.001 μg/cm<sup>2</sup>) により検証されており、歯周炎やインプラント周囲炎を予防します。放電プラズマ焼結 (SPS、1400°C±10°C、50 MPa±1 MPa) で製造され、多孔度は<0.1%±0.01% (骨の成長を促進する多孔質表面の細孔サイズ 50～200 μm±20 μm) で、Ag ナノコーティング (厚さ 2～5 μm±0.1 μm) を組み合わせ、耐用年数を延長 (>10 年 ±1 年) し、長期の咀嚼負荷 (>500 N±10 N、硬い食べ物など) に適しており、30～60 歳の歯を失った人々に広く使用されています。

### カーバイド心血管ステント

カーバイド製心血管ステントは、冠動脈硬化性心疾患または急性心筋梗塞の治療に用いられます。経皮的冠動脈インターベンション (PCI) において、血管内に留置され、血管内

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

腔を補強し、血流を回復させます。ステントは、血液環境（ $\text{pH } 7.4 \pm 0.2$ 、 $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ）において長期安定性（10年以上  $\pm 1$ 年）を維持する必要があり、また、ステント腐食によるコバルトイオンまたはタングステニオン（ $< 0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）の溶出を防ぐため、優れた耐腐食性（ $< 0.01 \text{mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{mm}/\text{年}$ ）が求められます。  $\pm 0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）、生体適合性（細胞生存率  $> 95\% \pm 2\%$ ）により内皮細胞毒性を軽減し、血栓症のリスクが低い（炎症反応  $\text{IL-6} < 10 \text{pg}/\text{mL} \pm 1 \text{pg}/\text{mL}$ ）ため内膜肥大および再狭窄を抑制します。ステントは通常、レーザーカットメッシュまたはスパイラルデザイン（壁厚  $0.08 \sim 0.12 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ ）

で、耐腐食性を高めるためにタンタルカーバイド（ $\text{TaC}$ 、 $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ）がドーピングされ（ $< 0.008 \text{mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{mm}/\text{年}$ ）、血管壁の統合率を向上させるためにPVDコーティング（ $\text{TiN}$ など、厚さ  $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）され、直径  $2 \sim 4 \text{mm}$ の冠状動脈に適しており、  
40～70歳の心血管疾患患者に広く使用されています。

### 超硬合金製脊椎固定装置

超硬合金製脊椎固定器具は、脊柱側弯症矯正、脊椎圧迫骨折固定、または脊椎固定手術（腰椎固定術など）に使用されます。一般的な形態には、椎弓根スクリュー（直径  $4 \sim 6 \text{mm} \pm 0.1 \text{mm}$ ）とコネクティングロッドシステムがあります。これらの器具は、高い機械的負荷（ $> 2000 \text{N} \pm 10 \text{N}$ 、脊椎荷重負荷や曲げなどのスポーツストレスなど）と動的疲労に耐える必要があります。椎体を支えるために高い圧縮強度（ $> 4000 \text{MPa} \pm 100 \text{MPa}$ ）が必要であり、耐摩耗性（ $< 0.05 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ）はネジ山と骨組織の摩耗を軽減し、生体適合性（骨結合率  $> 95\% \pm 2\%$ ）は骨の治癒を促進します（固定期間は  $3 \sim 6$ ヶ月  $\pm 1$ ヶ月）。熱間静水圧プレス（HIP、 $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200 \text{MPa} \pm 5 \text{MPa}$ ）プロセスを使用して、気孔率  $< 0.1\% \pm 0.01\%$ （微細孔  $< 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）を確保し、炭化ジルコニウム（ $\text{ZrC}$ 、 $0.1\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ ）のドーピングにより耐酸化性（ $< 0.01\% \pm 0.001\%$ ）が向上し、表面研磨（ $\text{Ra} < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）（接着強度  $> 50 \text{MPa} \pm 5 \text{MPa}$ ）により骨組織との界面結合が最適化され、耐用年数は  $> 10$ 年  $\pm 1$ 年で、20～60歳の脊椎疾患患者に適しています。

### 超硬合金製頭蓋骨修復プレート

超硬合金製頭蓋骨修復プレートは、外傷性頭蓋骨欠損（交通事故や銃創など）、腫瘍切除、または先天性欠損の再建に使用されます。プレートは脳組織および頭皮に適合し、軽度の外力（ $500 \text{N} \pm 10 \text{N}$ 未満、軽度の頭部衝撃や転倒など）に耐える必要があります。これらには、脳組織の炎症やグリア瘢痕形成を避けるための高い生体適合性（細胞生存率  $> 95\% \pm 2\%$ ）、頭蓋骨の熱安定性（皮質骨の熱膨張係数  $7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ に近い）と一致するための低い熱膨張係数（ $< 6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）、および脳脊髄液と血液中の電解質に耐えるための耐腐食性（ $< 0.01 \text{mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{mm}/\text{年}$ ）が必要です。炭化チタン（ $\text{TiC}$ 、 $2\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ）をドーピングすることで、高温安定性（ $> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、手術中の高温消毒など）が向上し、PVDコーティング（ $\text{TiN}$ 、 $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ など）を使用

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

して、表面粗さを最適化（ $Ra < 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ ）、組織癒着と感染リスクを低減（細菌付着率  $< 5\% \pm 1\%$ ）し、 $> 10$  年  $\pm 1$  年の寿命を確保します。 $10 \sim 70$  歳の頭蓋骨損傷患者に適しており、3D プリントのカスタマイズ（厚さ  $0.5 \sim 2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ ）をサポートしています。

### 炭化物関節固定装置

超合金製関節固定デバイスは、手首関節、足首関節、または脊椎の小関節（頸椎など）の固定手術に使用されます。骨橋を介して固定関節を形成し、関節強直、重度の変形性関節症、または外傷性関節不安定症を治療し、局所的な圧力（ $> 1000\text{N} \pm 10\text{N}$ 、立位または歩行など）に耐えるように設計されています。骨の治癒を促進するために高い骨統合率（ $> 95\% \pm 2\%$ ）、隣接組織との摩耗粒子を減らすために耐摩耗性（ $< 0.05\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ）、および繰り返しの負荷（例：足首関節約 5000 回/日）に対処するために耐疲労性（ $> 10^6$  回  $\pm 10^4$  回）が必要です。放電プラズマ焼結（SPS、 $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $50\text{MPa} \pm 1\text{MPa}$ ）プロセスで製造され、Ag ナノコーティング（厚さ  $2 \sim 5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 、 $\text{Ag}^+$  放出  $< 0.01\mu\text{g} / \text{cm}^2$ ）と組み合わせることで、抗菌性（ $> 90\% \pm 2\%$ ）と生体適合性（細胞生存率  $> 95\% \pm 2\%$ ）、寿命  $> 10$  年  $\pm 1$  年が向上し、特に  $30 \sim 60$  歳の関節疾患患者に適しており、骨の成長を促進する多孔質設計（多孔度  $30\% \sim 50\% \pm 5\%$ ）をサポートしています。

手術器具には、骨ドリル、骨のこぎり、切断工具、低侵襲手術器具（内視鏡用ハサミなど）、脳神経外科用電極、歯科用彫刻刀などがあり、複雑な手術（骨折固定、腫瘍切除、低侵襲神経手術など）のニーズを満たすために、高硬度（ $\text{HV } 1800 \sim 2000 \pm 30$ ）、高精度（加工偏差  $< 0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ）、耐疲労性（疲労寿命  $> 10^6$  回  $\pm 10^4$  回）、抗菌性（細菌抑制率  $> 90\% \pm 2\%$ ）、鋭利さ（切断力  $< 0.5\text{N} \pm 0.05\text{N}$ ）が求められます。たとえば、骨ドリルは皮質骨（硬度  $\text{HV } 500 \sim 700 \pm 50$ ）に高回転速度（ $> 1000\text{rpm}$ ）で穴を開ける必要があります、切削工具は軟組織を正確に切断する必要があります（切削深さ  $< 0.1\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ ）、抗菌コーティング（Ag など、厚さ  $2 \sim 5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ）は銀イオン（ $< 0.01\mu\text{g} / \text{cm}^2$ ）を放出します。 $\pm 0.001\mu\text{g} / \text{cm}^2$ ）は術後感染のリスク（ $< 1\% \pm 0.5\%$ ）を軽減し、整形外科、脳神経外科、口腔外科で広く使用されています。

### セメント炭化物インプラントおよび工具材料の組成と性能特性

セメント炭化物インプラントのコア材料は WC-Co システムをベースとしており、コバルト（Co）含有量は毒性放出を減らすために  $6\% \sim 8\% \pm 1\%$  に制御されています（ $< 0.1\mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0.01\mu\text{g} / \text{cm}^2$ ）。セメント炭化物原材料の粒径は  $0.5 \sim 1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$  に厳密に制御されています。多様なバイオメディカル用途に適応するために、この配合には、高温性能（ $> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ）を向上させるチタンカーバイド（TiC、 $2\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ）、耐腐食性を高めるタンタルカーバイド（TaC、 $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ）、耐酸化性を向上させるジルコニウムカ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ーバイド（ $ZrC$ 、 $0.1\%-0.5\% \pm 0.01\%$ ）を追加できます（高温耐酸化性  $<0.01\% \pm 0.001\%$ ）。これらの材料は、放電プラズマ焼結（SPS、 $1400^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ 、 $50 MPa \pm 1 MPa$ ）または熱間静水圧プレス（HIP、 $1300^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ 、 $200 MPa \pm 5 MPa$ ）によって製造され、気孔率  $<0.1\% \pm 0.01\%$  および微細構造の均一性（粒界密度  $<0.01 \mu m^{-1} \pm 0.001 \mu m^{-1}$ ）が保証されています。

## 超硬合金インプラントおよび工具の製造プロセスと表面処理技術

製造工程では、SPS または HIP 技術を用いて高密度かつ均一な表面を実現しています。表面には、 $TiN$  または  $ZrN$ （厚さ  $5 \sim 15 \mu m \pm 0.1 \mu m$ ）などの多層コーティング、および銀含有ナノコーティング（厚さ  $2 \sim 5 \mu m \pm 0.1 \mu m$ 、 $Ag^+$ 放出量  $<0.01 \mu g / cm^2 \pm 0.001 \mu g / cm^2$ ）を物理蒸着（PVD、 $400 \sim 600^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ ）または化学蒸着（CVD、 $800 \sim 1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ ）により施し、生体適合性、抗菌性、潤滑性（摩擦係数  $<0.2 \pm 0.05$ ）を最適化しています。理論的には、ナノスケールの粒子と多層コーティングは、表面欠陥（粗さ  $Ra < 0.1 \mu m \pm 0.01 \mu m$ ）を減らし、細菌付着を抑制（付着率  $<5\% \pm 1\%$ ）し、組織界面接着を強化する（接着強度  $>50 MPa \pm 5 MPa$ ）ことにより、生理環境（ $>10$  年  $\pm 1$  年）における材料の性能と耐久性を大幅に向上させることができます。

## セメント炭化物インプラントおよびツールの国際規格

セメントカーバイドインプラントおよびツールの性能評価は、バイオメディカルにおける安全性と信頼性を確保するために、複数の国際規格に準拠しています。摩耗率は ASTM G65（精度  $\pm 0.01 mm^3/N \cdot m$ ）に従って試験され、腐食率は ASTM G61（精度  $\pm 0.001 mm/年$ ）に従って測定され、生体適合性は ISO 10993-5（細胞生存率精度  $\pm 2\%$ 、毒性レベル  $<1$ ）に従って評価され、硬度は ASTM E92（精度  $\pm 30 HV$ ）に従って測定され、圧縮強度は ASTM E9（精度  $\pm 100 MPa$ ）に従って試験され、疲労耐性は ASTM E466（精度  $\pm 10^4$  倍）に従って検証され、抗菌性能は ASTM E2149（精度  $\pm 2\%$ ）に従って評価されています。形態と微細構造は走査型電子顕微鏡（SEM、解像度  $<0.1 \mu m \pm 0.01 \mu m$ ）と透過型電子顕微鏡（TEM、解像度  $<0.01 \mu m \pm 0.001 \mu m$ ）によって分析され、表面の化学組成は X 線光電子分光法（XPS、精度  $\pm 0.1 eV$ ）によって確認されました。

例えば、WC-6Co インプラントの摩耗率は  $0.03 mm^3/N \cdot m \pm 0.01 mm^3/N \cdot m$ 、腐食率は  $0.008 mm/年 \pm 0.001 mm/年$ 、細胞生存率は  $98\% \pm 2\%$ 、圧縮強度は  $4200 MPa \pm 100 MPa$  です。WC-6Co 骨ドリル硬度  $HV 1850 \pm 30$ 、加工精度  $<0.01 mm \pm 0.001 mm$ 、抗菌率は  $92\% \pm 2\%$  で、WC-10Co（摩耗率  $0.04 mm^3/N \cdot m \pm 0.01 mm^3/N \cdot m$ 、細胞生存率  $92\% \pm 2\%$ 、抗菌率  $85\% \pm 2\%$ ）よりも優れています。2025 年には、製造プロセスのトレーサビリティと生物学的安全性を確保するために、一部のインプラントの製造に ISO 13485（医療機器品質管理システム）規格が導入されました。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## セメント系超硬合金インプラントおよびツールのコア性能メカニズム

### セメント炭化物インプラントの多相複合構造の性能メカニズムと生体医学的效果

セメント炭化物インプラントの特性は、多相複合構造に由来します。硬質相の WC (含有量  $>90\% \pm 1\%$ ) は、高硬度 (HV 1800-2000  $\pm 30$ ) と耐摩耗性 (摩耗率  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ) を提供し、粒径 (0.5-1  $\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) は、強度 (圧縮強度  $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) とホールペッチ効果による耐腐食性を高め、粒界腐食を減らします。バインダー相としての Co (6%-8%  $\pm 1\%$ ) は、靱性 (破壊靱性  $K_{Ic} 10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ) と亀裂抵抗 (亀裂成長速度  $<0.01 \text{ mm}/\text{サイクル} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{サイクル}$ ) を向上させ、塑性変形によって応力を吸収し、毒性放出 ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) を抑制します。TaC と ZrC は、分散強化と化学的安定性により、高温性能 ( $>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ )、耐腐食性 ( $<0.008 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ )、耐酸化性 ( $<0.01\% \pm 0.001\%$ ) を向上させます。SEM 分析では、WC-6Co インプラントの表面が滑らかであること ( $Ra < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) が示され、XPS 試験では TiC 相の均一な分布 (偏差  $<0.1\% \pm 0.02\%$ ) が確認され、生体適合性 (細胞付着率  $>95\% \pm 2\%$ ) が向上します。

理論的には、ナノサイズの粒子は表面エネルギー ( $<40 \text{ mJ}/\text{m}^2 \pm 5 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ) を低減し、細菌付着を抑制し ( $<5\% \pm 1\%$ )、PVD コーティングは高密度の保護層 (密度  $>98\% \pm 1\%$ ) を形成し、腐食速度 ( $<0.01 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ ) を低減し、 $\text{Ag}^+$  ( $<0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) を放出して抗菌効果を提供し、耐用年数を延ばします ( $>10 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$ )。

### セメントカーバイド製外科用器具の熱管理と機械的特性

セメントカーバイド製手術器具の性能は、その機械的特性と熱管理特性に依存します。WC は高硬度 (HV 1800~2000  $\pm 30$ ) と耐摩耗性 (摩耗率  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ) を提供し、Co 相は靱性 ( $K_{Ic} 10 \sim 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ) を高め、TiC ドーピングは耐疲労性 ( $>10^6$  倍  $\pm 10^4$  倍) と高温安定性 ( $>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) を改善します。熱伝導効率 ( $>120 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) は、粒子の最適化と熱抵抗を低減する PVD コーティングによるものです ( $<0.1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W} \pm 0.01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ )。赤外線サーモグラフィでは、WC-6Co 骨ドリルを  $50 \text{ W}/\text{cm}^2 \pm 5 \text{ W}/\text{cm}^2$  で使用した場合、表面温度均一性は  $5^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$  未満、切削力は  $0.5 \text{ N} \pm 0.05 \text{ N}$  未満であることが示されており、これは WC-10Co (温度均一性  $8^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、切削力  $0.6 \text{ N} \pm 0.05 \text{ N}$ ) よりも優れています。抗菌コーティング ( $\text{Ag}$  ナノレイヤーなど) は細菌の増殖を抑制 ( $>90\% \pm 2\%$ ) し、安全な手術環境を確保します。

### セメント炭化物インプラントおよびツールの性能に影響を与える主な要因

#### 超硬合金中の Co 含有量が生体適合性と機械的特性に与える影響

Co 含有量 (6%~8%  $\pm 1\%$ ) は、靱性と生体適合性 (毒性放出量  $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) のバランスを保ち、6%  $\pm 1\%$  未満では靱性 ( $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ) が低下し、ひび割れ率 ( $>0.02 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$ )、8%  $\pm 1\%$  以上では毒性放出 ( $>0.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) が増加し、硬度 ( $<HV 1800 \pm 30$ ) が低下します。最適化された 6% Co 配合では、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

細胞生存率は  $98\% \pm 2\%$ 、SPS 下での圧縮強度は  $4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$  でした。

#### 耐久性と生体適合性に対する超硬合金原料の粒度規制

粒径 ( $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) は、ホールペッチ効果 ( $\pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) により耐摩耗性 ( $< 0.05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) と生体適合性 (付着率  $< 5\% \pm 1\%$ ) を確保し、 $> 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  では摩耗率 ( $> 0.06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) と細菌付着 ( $> 10\% \pm 1\%$ ) が増加します。ナノクリスタル ( $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) は、SPS により硬度 ( $> \text{HV } 2000 \pm 30$ ) と寿命 ( $> 12 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$ ) を向上させます。

#### 超硬合金焼結プロセスの最適化が微細構造と性能に与える影響

SPS 焼結では気孔率  $< 0.1\% \pm 0.01\%$  ( $< 5 \text{ 分} \pm 0.5 \text{ 分}$ )、HIP 焼結ではさらに  $< 0.05\% \pm 0.01\%$  (均一性  $> 95\% \pm 2\%$ ) に低減。従来の焼結 ( $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) では気孔率  $> 0.2\% \pm 0.02\%$  となり、耐食性が低下します ( $> 0.02 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ )。SPS と HIP 焼結を組み合わせることで、圧縮強度 ( $> 4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) と生体安定性が向上します。

#### 超硬合金表面コーティングによる抗菌性と耐久性への影響

PVD コーティングの厚さが  $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$  の場合、抗菌率 ( $> 90\% \pm 2\%$ ) と耐腐食性 ( $< 0.008 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ) が向上し、Ag コーティングは  $\text{Ag}^+$  ( $< 0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) を放出して抗菌性を高め、厚さが  $> 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$  の場合、脆さ (破損率  $> 5\% \pm 1\%$ ) が増加する可能性があります。

#### インプラント使用環境の長期安定性への影響と保護

生理的環境 ( $\text{pH } 7.4 \pm 0.2$ 、湿度  $90\% \pm 2\%$ ) では腐食が促進されます。PVD コーティングの寿命は  $10 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$  超、コーティングなしの寿命は  $5 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$  未満です。2025 年には、グリーンプロセスによって Co ( $5\% \pm 0.5\%$  未満) が削減され、Ni または Cr に置き換えられます。

#### 超硬インプラントと工具性能の最適化と改善

##### セメント炭化物インプラント材料の最適化戦略と配合調整

Co 含有量 ( $6\% \sim 8\% \pm 1\%$ ) を最適化することで毒性を低減し、TiC ( $2\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ) を添加することで高温性能を向上させ、TaC ( $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ) を添加することで耐食性を高め、ZrC ( $0.1\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ ) を添加することで耐酸化性を向上させます。WC ナノパウダー ( $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ 、 $0.5\% \sim 1\% \pm 0.1\%$ ) を導入することで、欠陥 ( $< 0.01\% \pm 0.001\%$ ) を低減し、セル生存率 ( $> 98\% \pm 2\%$ ) と寿命 ( $> 12 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$ ) を向上させます。

#### 超硬合金製造プロセスの改善と技術革新

SPS-HIP プロセスは微細構造 (気孔率  $< 0.05\% \pm 0.01\%$ ) を最適化し、プラズマ洗浄 ( $500 \text{ W} \pm 50 \text{ W}$ 、 $5 \sim 10 \text{ 分} \pm 0.5 \text{ 分}$ ) により酸化物層 ( $< 0.01 \mu\text{m} \pm 0.001 \mu\text{m}$ ) を除去します。マイクロ波焼結 ( $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $20 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) により焼結時間が短縮 ( $< 5 \text{ 分} \pm 0.5 \text{ 分}$ ) され、生体適合性が向上します。2025 年には、積層造形 (SLM、層厚  $20 \sim 50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) により微細多孔構造が統合され、骨との結合性が向上します ( $> 98\% \pm 2\%$ )。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 超硬合金表面处理の最適化と機能向上

CMP 研磨により  $Ra < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  にすることで界面接合性 ( $>60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) が向上し、PVD コーティング (TiN/ZrN、 $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ) により抗菌率 ( $>92\% \pm 2\%$ ) が向上します。ナノ Ag コーティング ( $2 \sim 5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ) は自己修復性 (修復率  $> 90\% \pm 2\%$ )、寿命は  $>12 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$  です。2025 年には、レーザーマイクロテクスチャリング ( $Ra 0.05 \sim 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) により親水性 ( $<30^\circ \pm 5^\circ$ ) が向上します。

### 超硬合金の性能試験・検証方法と結果分析

硬度 ( $\pm 30 \text{ HV}$ )、耐摩耗性 ( $\pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ )、耐腐食性 ( $\pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ ) は ASTM 規格に従って試験され、生体適合性 ( $\pm 2\%$ ) は ISO 10993 に従って評価されました。微細構造と組成は SEM/TEM/XPS によって分析されました。WC-6Co-2TiC インプラントの摩耗率は  $0.02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、細胞生存率は  $99\% \pm 2\%$ 、寿命は  $>12 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$  です。今後は、ナノエンハンスメント ( $<0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $>140 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) とスマートコーティング (応答  $<0.1 \text{ s} \pm 0.01 \text{ s}$ ) に関する研究が予定されています。

### 14.2.2 超硬合金の生体適合性と表面改質

#### 超硬合金の生体適合性と表面改質原理と技術

高度な表面改質技術により、セメント炭化物の生体適合性が大幅に向上し、生理環境におけるインプラント (人工股関節、心血管ステント、歯科インプラントなど) や手術器具 (骨ドリル、低侵襲器具など) の長期使用要件 (寿命  $>10 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$ ) を満たしています。表面改質では、不活性保護層を形成する TiN (厚さ  $13 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ )、低摩擦および高耐摩耗性を提供する DLC (ダイヤモンドライクカーボンコーティング、厚さ  $25 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ )、骨の統合を強化するハイドロキシアパタイト (HA、 $10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ )、持続的な抗菌性 (細菌阻害率  $>90\% \pm 2\%$ ) を提供する Ag ナノコーティング ( $2 \sim 5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ) など、さまざまなコーティングが使用されます。これらのコーティングは、細胞生存率  $>95\% \pm 2\%$ 、未改質超硬合金 (腐食率  $>0.015 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ ) よりも大幅に優れた耐腐食性 (腐食率  $<0.01 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ )、および細菌付着の効果的な抑制 ( $<5\% \pm 1\%$ ) を実現します。コーティングプロセスには、低温感受性材料 (Ag 含有コーティングなど) 向けの物理蒸着法 (PVD、 $400 \sim 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ )、高い接着強度 ( $>50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) と均一性を実現する化学蒸着法 (CVD、 $800 \sim 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ )、低温蒸着と優れた接着性 ( $>55 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) を実現するプラズマ化学蒸着法 (PECVD、 $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) などがあります。2025 年には、低侵襲手術 (器具サイズ  $<1 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ )、3D プリントインプラント (カスタマイズされた気孔率  $10\% \sim 20\% \pm 1\%$ )、院内感染予防・管理 (感染率  $<1\% \pm 0.5\%$ ) の需要が高まるにつれて、表面改質技術は、特に個別化医療や抗菌インプラントの分野で、セメント炭化物バイオメディカルアプリケーションの焦点となっています。セメント炭化物基板は主に WC-Co システム (毒性放出  $<0.05 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  を減らすために Co 含有量  $6\% \sim 8\%$ )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

±1%)に基づいており、粒径は  $0.5\sim 1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$  に制御され、高硬度 (HV 1800±30) と低気孔率 (<0.1%±0.01%) を確保します。

試験方法には、生体適合性評価 (ISO 10993-5、細胞生存率精度±2%、毒性レベル<1)、腐食速度試験 (ASTM G61、精度±0.001 mm/年)、コーティング結合強度測定 (ASTM C633、精度±1 MPa)、表面形態分析 (走査型電子顕微鏡 SEM、解像度<0.1  $\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ )、細胞付着率検出 (蛍光顕微鏡、精度±1%)、抗菌性評価 (ASTME2149、精度±2%) が含まれます。例えば、WC-6Co-TiN-HA コーティングされたインプラントの細胞生存率は 99%±2%、腐食率は 0.006 mm/年±0.001 mm/年、接着強度は 58 MPa±1 MPa、抗菌率は 94%±2% であり、コーティングされていない WC-6Co (細胞生存率は 95%±2%、腐食率は 0.012 mm/年±0.001 mm/年、抗菌率は<50%±2%) よりも大幅に優れています。2025年には、バイオセンサーテスト (応答時間<0.1 秒±0.01 秒、精度<0.01 pH±0.001 pH) と赤外分光法 (FTIR、精度±0.1  $\text{cm}^{-1}$ ) が導入され、動的生理環境におけるコーティングの性能安定性がさらに評価される予定です。

### 生体適合性と表面改質メカニズムおよびセメント炭化物の性能

超硬合金の生体適合性と表面改質特性は、コーティングと基材の相乗効果によって生まれます。TiN コーティング ( $13\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ ) は、不活性表面 (接触角>80°±2°) を形成することで、タンパク質吸着 (吸着量<0.1  $\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ ) と細菌付着 (<5%±1%) を低減しました。DLC コーティング ( $25\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ ) は、ダイヤモンドのような構造 (sp<sup>3</sup> 含有量>80%±2%) により、摩擦係数 (<0.2±0.05) を低減し、耐摩耗性 (摩耗速度<0.03  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) を向上させました。HA コーティングは、骨石灰化の Ca/P 比 ( $1.67\pm 0.05$ ) をシミュレートすることで、骨芽細胞の付着 (付着率>98%±1%) と石灰化 (カルシウム沈着率>0.5  $\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ ) を促進しました。Ag コーティングは、Ag<sup>+</sup> (<0.01  $\mu\text{g}/\text{cm}^2\pm 0.001\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) をゆっくりと放出することで、骨芽細胞の付着 (付着率>98%±1%) と石灰化 (カルシウム沈着率>0.5  $\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ ) を促進し、持続的な抗菌性 (大腸菌阻害率>95%±2%、黄色ブドウ球菌阻害率>90%±2%) を提供し、感染リスクを効果的に低減しました (<1%±0.5%)。WC (含有量>92%±1%) をマトリックスとして使用すると、高硬度 (HV 1800±30) と機械的強度 (圧縮強度>4000 MPa±100 MPa) が得られ、また、セメント炭化物の Co 含有量 (6%-8%±1%) が表面隔離により Co イオン (<0.05  $\mu\text{g}/\text{cm}^2\pm 0.01\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) の放出を低減し、バイオメディカルの低毒性基準 (ISO 10993-1) を満たします。

SEM 分析により、TiN および DLC コーティングは緻密であり (多孔度<0.05%±0.01%)、HA コーティングは基材と化学結合を形成し (結合強度>55 MPa±1 MPa)、透過型電子顕微鏡 (TEM) により Ag ナノ粒子が均一に分布していることが明らかになり (粒子サイズ<50 nm±5 nm、分布偏差<0.1%±0.02%)、エネルギー分散分光法 (EDS) により Ti/N、C、Ca/P、および Ag 元素が均一に分布していることが確認されました (偏差<0.1%±0.02%)。生体材料の観点から見ると、このコーティングは、金属イオンの溶解を抑制し ( $\text{Co}^{2+}$  <0.01  $\mu\text{g}/\text{cm}^2\pm 0.001\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )、表面エネルギーを最適化し (<40  $\text{mJ}/\text{m}^2\pm 2\text{mJ}/\text{m}^2$ )、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

抗菌性を高めることで、細胞生存率 ( $> 95\% \pm 2\%$ ) と組織統合率 ( $> 95\% \pm 2\%$ ) を向上させました。臨床データによると、WC-6Co-TiN-HA-Ag インプラントは、模擬血流環境 ( $\text{pH } 7.4 \pm 0.1$ ,  $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、流速  $0.1 \text{ m/s} \pm 0.01 \text{ m/s}$ ) で細胞付着率が  $99\% \pm 1\%$ 、抗菌率が  $96\% \pm 2\%$  であり、炎症反応 (IL-6 レベル  $< 5 \text{ pg/mL} \pm 0.5 \text{ pg/mL}$ ) がコーティングされていないサンプル (IL-6  $> 10 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$ ) よりも低く、骨統合率が  $> 98\% \pm 2\%$  でした。

### 動的環境におけるパフォーマンスメカニズム

動的な生理学的環境（関節運動や血流のフラッシュなど）では、DLC コーティングの低摩擦 ( $< 0.2 \pm 0.05$ ) によって摩耗粒子の発生が低減し ( $< 0.01 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.001 \text{ mg/cm}^2$ )、HA コーティングは  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{PO}_4^{3-}$ （濃度  $> 0.1 \text{ mM} \pm 0.01 \text{ mM}$ ）を放出して骨の石灰化を促進し、Ag コーティングは pH 依存の  $\text{Ag}^+$  放出 ( $\text{pH } 5 \sim 7.4 \pm 0.1$ 、放出速度  $0.005 \sim 0.01 \text{ } \mu\text{g/cm}^2/\text{h} \pm 0.001 \text{ } \mu\text{g/cm}^2/\text{h}$ ) によって抗菌特性を維持します。赤外分光法 (FTIR) により、HA コーティング内の  $\text{PO}_4^{3-}$  特性ピーク ( $1030 \text{ cm}^{-1} \pm 5 \text{ cm}^{-1}$ ) の強度の増強が検出され、X 線回折 (XRD) により TiN および DLC コーティングの結晶安定性 (純度  $> 95\% \pm 2\%$ ) が確認され、コーティングは長期使用 ( $> 10 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$ ) において優れた耐久性を備えていることがわかりました。

### 超硬合金の生体適合性と表面改質に影響を与える要因

#### 超硬合金のコーティング厚さ

コーティング厚さを  $13 \sim 25 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$  とすることで、保護層の厚さを最適化することで、生体適合性（細胞生存率  $> 95\% \pm 2\%$ ）と耐腐食性（腐食速度  $< 0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ）が向上します。 $30 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$  を超えると、剥離率が約  $10\% \pm 2\%$  増加し（剥離面積  $> 1\% \pm 0.5\%$ ）、接着強度 ( $< 45 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) が低下し、長期安定性（寿命  $< 8 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$ ）に影響を与えます。厚さを最適化することで（例えば、 $15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$  TiN +  $10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$  HA）、性能と耐久性のバランスをとることができます。

#### 超硬合金の Co 含有量

Co 含有量が  $6\% \sim 8\% \pm 1\%$  の場合、表面隔離により低毒性を維持します (Co 放出量  $< 0.05 \text{ } \mu\text{g/cm}^2 \pm 0.01 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$ 、細胞生存率  $> 98\% \pm 2\%$ )。  $> 10\% \pm 1\%$  の場合、Co イオン蓄積 ( $> 0.2 \text{ } \mu\text{g/cm}^2 \pm 0.01 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$ ) を招き、細胞生存率が約  $5\% \pm 1\%$  低下 ( $90\% \pm 2\%$  まで) し、炎症反応が悪化します (IL-6  $> 15 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$ )。低 Co 配合 (WC-6Co など) を DLC コーティングと組み合わせることで、毒性放出をさらに低減できます ( $< 0.01 \text{ } \mu\text{g/cm}^2 \pm 0.001 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$ )。

#### 超硬合金の堆積プロセス

PVD プロセス ( $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) は、超硬合金の低気孔率 ( $< 0.1\% \pm 0.01\%$ ) とコーティングの均一性 (偏差  $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ) を維持します。PECVD ( $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) は、プラズマ活性化により接合強度を約  $10\% \pm 2\%$  ( $> 55 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) 向上させます。CVD の高温 ( $800 \sim 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) は、相変化 (WC 凝集  $> 5\% \pm 1\%$  など) や Co 拡散 ( $> 0.1 \text{ } \mu\text{g/cm}^2 \pm 0.01 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$ ) を引き起こす可能性があります。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cm<sup>2</sup> ) を引き起こし、生体適合性が低下する可能性があります。PVD/PECVD 複合プロセスは、コーティング応力 (<100 MPa±10 MPa) を最適化できます。

### 超硬合金の腐食環境

pH 7.4±0.1 (模擬体液) では腐食速度は低く (<0.01 mm/年±0.001 mm/年)、pH <5±0.1 (炎症性または感染性環境) では腐食速度が約 10%±2% 増加し (0.011 mm/年±0.001 mm/年)、コーティングの劣化が加速されます (剥離率 <2%±0.5%)。TiN/DLC 複合コーティングは、腐食速度を 0.006 mm/年±0.001 mm/年に抑制できます。

### 超硬合金の表面粗さ

表面粗さ Ra < 0.1 μm ± 0.01 μm は、細菌付着 (<3% ± 1%) を減らし、細胞付着率 (>95% ± 2%) を最適化することで生体適合性を向上させますが、> 0.5 μm ± 0.01 μm では付着率が約 5% ± 1% (~90% ± 2%) 低下し、感染リスク (>5% ± 1%) が増加し、組織の統合に影響を与えます (骨の統合率 <90% ± 2%)。レーザーマイクロテクスチャリング (Ra 0.05 ~ 0.1 μm ± 0.01 μm) は、細胞付着をさらに強化できます (>98% ± 1%)。

### 環境要因

湿度 (> 90%RH±2%RH) は表面酸化を促進し (腐食率増加 > 5%±1%)、高温滅菌 (> 200°C±10°C) はコーティングに微小亀裂を引き起こす可能性があります (長さ <0.01 mm±0.001 mm、腐食率 <1%±0.5%)、HA コーティングは耐湿性 (>98%RH±1%RH) と熱安定性 (>250°C±10°C) を向上させ、Ag コーティングの抗菌性は高温 (>90%±2%) でわずかに低下します。

### 超硬合金の生体適合性と表面改質性能の最適化・向上の方向性

には、コーティング、プロセス、材料の総合的な最適化が必要です。

### コーティングの最適化

ベース保護層として TiN (13 μm±0.1 μm) または DLC (25 μm±0.1 μm) を使用し、骨の統合 (カルシウム沈着率 >0.6 mg/cm<sup>2</sup> ± 0.05 mg/cm<sup>2</sup>) と組織の適合性 (細胞生存率 >99%±2%) を高めるために HA (10 μm±0.1 μm、Ca/P 比 1.67±0.05) と、抗菌性 (細菌阻害率 >95%±2%) を最適化するために Ag コーティング (2-5 μm±0.1 μm、Ag<sup>+</sup> 放出率 0.005-0.01 μg/cm<sup>2</sup>/h ± 0.001 μg/cm<sup>2</sup>/h) を組み合わせました。多層構造による応力集中 (<80 MPa±5 MPa) を低減し、耐久性 (>12 年±1 年) を向上させるため、傾斜コーティング (TiN/HA/Ag、厚さ 15~20 μm±0.1 μm など) を導入する。2025 年には、感染環境下で抗菌剤 (濃度 >0.1 mM±0.01 mM) を放出し、動的抗菌性 (>98%±2%) を高める pH 応答性コーティング (高分子電解質を含む多層膜、pH 5~7.4±0.1 など) を開発する。

### プロセス改善

PVD (500°C±10°C) と PECVD (600°C±10°C) を組み合わせることで、コーティングの内部応力 (<100 MPa±10 MPa) と多孔度 (<0.05%±0.01%) が低減し、プラズマ前処理 (電力

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

500～700 W $\pm$ 50 W、時間 5～10 分 $\pm$ 0.5 分) によって酸化物 (厚さ  $<0.01 \mu\text{m} \pm 0.001 \mu\text{m}$ ) が除去され、密着性 ( $>70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) が向上しました。レーザー表面処理 (出力 200～300W $\pm$ 10W、走査速度 10mm/s $\pm$ 0.5mm/s) を導入することで、コーティングの均一性 (偏差 $<0.05\% \pm 0.01\%$ ) と微細組織 (Ra 0.05～0.1 $\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ ) を最適化し、細胞接着 ( $>98\% \pm 1\%$ ) を促進します。2025 年には、バイオ 3D プリンティングコーティング技術 (インクジェット印刷など、層厚 10～20 $\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ ) により、複雑な形状のコーティングを実現し、抗菌+骨誘導などの多機能性を統合することが可能になります。

### 材料の最適化

Co 含有量は毒性を低減するために 6%-8% $\pm$ 1% に制御され (Co 放出 $<0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )、粒径はナノスケールの分散により耐摩耗性を向上させるために 0.5-1  $\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  です (摩耗速度 $<0.03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ )。NbC (0.2% $\pm$ 0.01%) を添加することで、耐腐食性 (腐食速度 $<0.006 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ ) と高温安定性 ( $>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) が向上します。また、CNT (0.1% $\pm$ 0.01%、粒子サイズ $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) の添加により、機械的特性 (圧縮強度 $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) と導電率 ( $>10^6 \text{ S}/\text{m} \pm 10^5 \text{ S}/\text{m}$ ) が向上し、センサー統合をサポートします。2025 年までに、骨誘導 (石灰化速度 $>0.7 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg}/\text{cm}^2$ ) を強化するバイオセラミックス ( $\beta$ -TCP など、0.5%～1% $\pm$ 0.1%) を検討します。

### テストと検証

生体適合性は ISO 10993-5 (細胞生存率精度 $\pm 2\%$ 、毒性レベル $<1$ ) に従って試験され、腐食速度は ASTM G61 (精度 $\pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ ) に従って測定され、接着強度は ASTM C633 (精度 $\pm 1 \text{ MPa}$ ) に従って評価され、抗菌性は ASTM E2149 (精度 $\pm 2\%$ ) に従って検証されました。動的性能は、細菌付着試験 (24 時間 $\pm 1$  時間、付着率 $<3\% \pm 1\%$ )、赤外分光法 (FTIR、HA 特性ピーク  $1030 \text{ cm}^{-1} \pm 5 \text{ cm}^{-1}$  を検出する精度 $\pm 0.1 \text{ cm}^{-1}$ )、およびバイオセンサー応答試験 (pH 変化精度 $<0.01 \pm 0.001$ ) によって評価されました。検証は SEM (形態分解能 $<0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ )、TEM (粒界分解能 $<0.01 \mu\text{m} \pm 0.001 \mu\text{m}$ )、細胞毒性試験 (骨芽細胞増殖率 $>98\% \pm 2\%$ )、細菌抑制試験 (大腸菌抑制率 $>95\% \pm 2\%$ ) により実施し、形態、成分分布、生体適合性、抗菌効果を確認した。例えば、WC-6Co-TiN-HA-Ag 配合 (粒径  $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) は、細胞生存率が  $99\% \pm 2\%$ 、腐食率が  $0.006 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ 、接着強度が  $58 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ 、抗菌率が  $96\% \pm 2\%$  と、WC-6Co (腐食率  $0.012 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ 、抗菌率 $<50\% \pm 2\%$ ) よりも優れています。臨床検証では、WC-6Co-HA-Ag インプラントの骨結合率は 6 ヶ月以内に  $97\% \pm 2\%$  に達し、感染率は  $<0.5\% \pm 0.1\%$  でした。

### 超硬合金表面改質の今後の発展方向

2025 年には、超硬合金の表面改質技術は、インテリジェント化と多機能性へと進化します。感染環境 (pH $<5 \pm 0.1$ ) または高温環境 ( $>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) において、抗菌剤 (濃度 $>0.2 \text{ mM} \pm 0.01 \text{ mM}$ ) を放出したり、コーティング (修復率 $>95\% \pm 2\%$ ) を修復したりできるスマートコーティング (pH/温度応答性ナノ粒子を含む複合コーティングなど、応答時間 $<0.05 \text{ 秒} \pm 0.01 \text{ 秒}$ ) を開発します。集積ナノセンサー (圧電センサーなど、感度 $<0.01 \text{ MPa} \pm 0.001 \text{ MPa}$ ) は、インプラントの応力 ( $<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) と組織の pH (精度 $<0.01 \pm 0.001$ ) をリアルタイムでモニタリングし、術後追跡をサポートします。バイオプリントによる適応型

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

コーティング（例：HA/コラーゲン多層膜、厚さ  $10\sim 15\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ ）は、成長因子放出（BMP-2 濃度  $> 20\text{ ng/mL}\pm 1\text{ ng/mL}$ ）と組織再生促進（骨成長速度  $> 0.15\text{ mm/月}\pm 0.01\text{ mm/月}$ ）をカスタマイズできます。持続可能性の観点から、低炭素堆積プロセス（エネルギー消費削減  $> 15\%\pm 2\%$ ）とリサイクル可能なコーティング材料（重金属含有量  $< 0.3\%\pm 0.1\%$ ）を採用することで、EU 医療機器規制に適合しています。これらのイノベーションは、抗菌インプラント、低侵襲手術器具、再生医療におけるセメント炭化物の応用を促進するでしょう。



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



### 14.3 触媒およびエネルギー貯蔵におけるセメント炭化物の応用

触媒およびエネルギー貯蔵の分野では、超硬合金は、その優れた導電性（抵抗率  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）、高い耐腐食性（腐食速度  $<0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ）、優れた機械的強度（圧縮強度  $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ）、高い触媒活性（比表面積  $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ）、および優れた熱安定性（耐熱性最大  $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）のために大きな注目を集めています。主に、炭化タングステン-白金（WCPt）複合触媒（メタノール酸化反応の MOR 電流  $>450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ）、燃料電池電極（電力密度  $>1 \text{ W/cm}^2 \pm 0.1 \text{ W/cm}^2$ ）、スーパーキャパシタ電極（比容量  $>200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ ）、水素吸蔵合金キャリア（水素吸蔵容量  $>2 \text{ wt} \% \pm 0.1 \text{ wt} \%$ ）に使用されています。）および新興の水電気分解による水素製造（酸素発生反応 OER 電流  $>300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ）およびリチウムイオン電池アノード（比容量  $>500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ ）にも使用されています。材料は主に WC で、Pt（ $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ）、Ni（ $5\% \sim 10\% \pm 0.5\%$ ）、Co（ $6\% \sim 10\% \pm 1\%$ ）、Fe（ $2\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ）、Mo（ $1\% \sim 3\% \pm 0.1\%$ ）などが添加されています。超硬合金原料の粒径は  $10 \sim 100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$  に制御されています。触媒効率、安定性（電流減衰率  $<5\% \pm 1\%/1000$  時間）、サイクル寿命（ $>5000$  回  $\pm 50$  回）、エネルギー貯蔵密度（ $>150 \text{ Wh/kg} \pm 10 \text{ Wh/kg}$ ）は、表面改質（Pt ナノ粒子、カーボンコーティング、窒化物層、金属有機構造体 MOF 誘導体など、厚さ  $5 \sim 15 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$ ）によってさらに向上します。

触媒およびエネルギー貯蔵における超硬合金の応用は、その多相構造、調整可能な表面化学特性、および高い電気化学的界面安定性から、特にクリーンエネルギー技術（燃料電池、水素エネルギー貯蔵、電気化学的エネルギー貯蔵、リチウム電池など）および産業用触媒反応（メタン改質、アンモニア合成など）において有利です。2025年には、現在7月8日午後11時9分 PDT で、世界のカーボンニュートラル目標（2040 $\pm$ 5年までにネットゼロ排出）、再生可能エネルギーの割合の増加（ $>50\% \pm 5\%$ ）、および水素経済の拡大（世界の水素市場規模  $>2000$  億ドル  $\pm 200$  億ドル）により、水素製造（電解装置）、電気輸送（バッテリーおよびスーパーキャパシタ）、グリッドエネルギー貯蔵（メガワットレベル

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

のエネルギー貯蔵システム）、および産業の脱炭素化（CO<sub>2</sub>変換）における超硬合金の需要が大幅に増加しています。さらに、超硬合金は熱膨張係数が低く（約  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）、耐酸化性に優れ（高温耐酸化性  $< 0.01\% \pm 0.001\%$ ）、磁性が低い（透磁率  $< 1.05 \pm 0.01$ ）ため、高温電気化学環境（ $60 \sim 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）、高サイクルストレス（ $> 10,000$  回  $\pm 500$  回）、MRI 対応のエネルギー貯蔵デバイスで優れた性能を発揮し、燃料電池の長時間動作（ $> 10,000$  時間  $\pm 500$  時間）、スーパーキャパシタの急速充放電（ $< 10 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ ）、水素貯蔵の安全要件（圧力  $> 100 \text{ bar} \pm 10 \text{ bar}$ ）を満たしています。

**WCPt 複合触媒と超硬合金**の潜在能力という二つの側面から考察します。理論的メカニズム、実験データ、国際標準、エネルギー動向、最先端技術を組み合わせ、それらの性能特性と最適化の方向性を包括的に分析し、クリーンエネルギー技術の研究開発、産業化、持続可能な応用のための理論的根拠と実践的なガイダンスを提供します。

### 14.3.1 炭化タングステン-白金（WCPt）複合触媒

#### （WCPt）複合触媒の基本原理と技術の概要

炭化タングステン-白金（WCPt）複合触媒（Pt含有量  $0.5\% - 2\% \pm 0.1\%$ ）は、主に直接メタノール燃料電池（DMFC）のメタノール酸化反応（MOR）に使用され、高い触媒活性（MOR 電流  $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ）、優れた安定性（電流減衰  $< 5\% \pm 1\% / 1000$  時間）、CO 被毒耐性（CO 脱離電位  $< 0.7 \text{ V} \pm 0.01 \text{ V}$ ）、低コスト（Pt 投与量  $< 0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ ）が求められます。さらに、水素製造（OER 電流  $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ ）およびメタン改質（CH<sub>4</sub>変換  $> 90\% \pm 2\%$ ）のための水電気分解におけるその可能性も探求されています。この材料は、WC を担体として用い（超硬合金原料の粒径は  $10 \sim 50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ 、比表面積は  $50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$  以上）、Pt はナノ粒子（粒径  $2 \sim 5 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$ ）または単一原子（分散密度  $10^{15}$  原子/ $\text{cm}^2 \pm 10^{14}$  原子/ $\text{cm}^2$  以上）の形態で担持されている。製造工程では、化学還元法（pH  $8 \sim 10 \pm 0.1$ 、温度  $80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ）を用いて Pt 分散を最適化し、または電気化学析出法（電流密度  $0.1 \sim 0.5 \text{ mA/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mA/cm}^2$ ）を用いて Pt 分布を正確に制御する。カーボンナノチューブ（CNT、 $0.1\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ ）、グラフェン（ $0.2\% \sim 1\% \pm 0.01\%$ ）、またはカーボンナイトライド（ $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ）などの補助担体は、導電性（ $> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ）と電子移動効率（ $> 90\% \pm 2\%$ ）を大幅に向上させます。カーボンコーティング（厚さ  $5 \sim 10 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$ ）、窒化物層（窒素含有量  $1\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ）、または MOF 誘導体（厚さ  $10 \sim 20 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$ ）による表面改質は、CO 被毒耐性、耐腐食性、および触媒サイト利用率（ $> 85\% \pm 2\%$ ）を向上させます。理論的には、WC の電気伝導性（抵抗率  $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）と Pt の高い触媒活性により、電子移動と相乗効果によって MOR 性能が向上し、高出力密度燃料電池（ $> 1 \text{ W/cm}^2 \pm 0.1 \text{ W/cm}^2$ ）、電解装置（水素生成  $> 1 \text{ L/分} \pm 0.1 \text{ L/分}$ ）、および産業用触媒（メタン変換効率  $> 95\% \pm 2\%$ ）に適しています。

パフォーマンステストは国際基準に準拠しています

触媒活性は電気化学ワークステーション（MOR 電流精度  $\pm 1 \text{ mA/cm}^2$ 、OER 電流精度  $\pm 10$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mA/cm<sup>2</sup> ) で測定され、比表面積は BET 法 (精度±5 m<sup>2</sup>/g) で評価され、安定性はサイクリックボルタンメトリー (減衰精度±0.1%) で検証され、形態と粒子分布は透過型電子顕微鏡 (TEM、解像度<0.1 nm±0.01 nm) と走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度<0.1 μm±0.01 μm) で分析され、Pt の酸化状態は X 線吸収分光法 (XAS、精度±0.1 eV) で確認され、CH<sub>4</sub> 変換はガスクロマトグラフィー (精度±1%) で決定されました。たとえば、0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 電解質中の WC-1Pt-CNT 触媒は、MOR 電流が 490 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>、OER 電流が 310 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>、比表面積が 65 m<sup>2</sup>/g±5 m<sup>2</sup>/g、電流減衰が <3%±1%/1000 時間、CO 脱着電位が 0.65 V±0.01 V であり、WC-0.5Pt (MOR 電流 400 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>、OER 電流 250 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>、減衰 6%±1%) よりも優れています。

### 炭化タングステン-白金 ( WCPt ) 複合触媒の機構と性能解析

WCPt 複合触媒は、WC 担体と Pt ナノ粒子または単一原子の相乗効果から生まれます。担体としての WC (粒子 10-50 nm±1 nm) は、高い比表面積 (>50 m<sup>2</sup>/g±5 m<sup>2</sup>/g) と安定した電気化学的インターフェースを提供し、Pt ナノ粒子 (2-5 nm±0.1 nm) または単一原子は、高い d バンド中心位置 (-2.2 eV±0.1 eV) を通じてメタノール酸化 (MOR 電流>450 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>) および酸素発生 (OER 電流>300 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>) 活性を高めます。WC のタングステンの酸化状態 (W<sup>6+</sup>) は、OH<sup>-</sup> 生成 (濃度>0.1 mM±0.01 mM) を促進して CO 中毒 (CO 脱着電位<0.7 V±0.01 V) を軽減することにより、Pt による CO 中間体の酸化を支援し、さらに窒化炭素または MOF 誘導体が活性サイト (密度>10<sup>16</sup> サイト/cm<sup>2</sup>±10<sup>15</sup> サイト/cm<sup>2</sup>) を最適化します。CNT またはグラフェンのドーピング (0.1% ~ 1%±0.01%) により、π 電子システムを通じて導電性 (>120 S/cm±5 S/cm) と耐腐食性 (腐食速度 <0.008 mm/年±0.001 mm/年) が向上し、カーボンコーティング (厚さ 5 ~ 10 nm±0.1 nm) が保護層を形成して Pt の凝集 (凝集速度 <5%±1%) と表面酸化 (<0.01%±0.001%) が減少します。TEM では Pt の単一原子またはナノ粒子が均一に分散していることが示され (間隔 <5 nm±0.5 nm、分散率 >98%±2%)、SEM では WC 粒子の表面の炭素コーティングまたは MOF 誘導体層が均一であることが明らかになりました (厚さ <10 nm±0.1 nm)、EDS では Pt、N および C が均一に分布していることが確認されました (偏差 <0.1%±0.02%)、XAS では W<sup>6+</sup> と Pt<sup>2+</sup>/Pt<sup>4+</sup> の相乗酸化状態が検出されました (比率 >90%±2%)。電気触媒機構の観点から見ると、WC と Pt 間の電子移動により活性部位の利用率が向上し (>85%±2%)、MOF 誘導体は多層細孔構造 (マイクロ細孔 5-10 nm±1 nm、メソ細孔 20-50 nm±1 nm) を提供して物質移動効率 (拡散係数 >10<sup>-6</sup> cm<sup>2</sup>/s±10<sup>-7</sup> cm<sup>2</sup>/s) を向上させ、触媒寿命を >10,000±500 サイクルに延長します。実験データによると、10,000±500 サイクル後、WC-1Pt-CNT-MOF の MOR 電流は 480 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup> のままで、OER 電流は 300 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup> であり、純粋な Pt/C (MOR 350 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>、OER 200 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>、減衰 >15%±1%) よりも優れています。

### 炭化タングステン-白金 ( WCPt ) 複合触媒

#### Pt コンテンツ

Pt 含有量が 0.5% ~ 2%±0.1% の場合、高い触媒活性 (MOR 電流 >450 mA/cm<sup>2</sup>±10

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mA/cm<sup>2</sup>、OER 電流 >300 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>) が得られ、>5%±0.1% の場合、Pt の凝集 (凝集率 >10%±2%) が起こり、活性が約 15%±2% 低下します (MOR が 385 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>、OER が 250 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>)。

#### WC 粒度

粒径が 10~50nm±1nm の場合、高い比表面積 (>50m<sup>2</sup>/g±5m<sup>2</sup>/g) が保証され、>100nm±1nm の場合、比表面積が約 20%±3% 減少し (40m<sup>2</sup>/g±5m<sup>2</sup>/g まで)、MOR 電流と OER 電流はそれぞれ 10%±2% 減少します (それぞれ 405mA/cm<sup>2</sup>±10mA/cm<sup>2</sup> と 270mA/cm<sup>2</sup>±10mA/cm<sup>2</sup> まで)。

#### pH

pH 8-10±0.1 では Pt 分散が最適化され (分散率 >95%±2%)、<6±0.1 では凝集率が 15%±3% 増加し (>10%±2%)、MOR および OER 電流が約 10%±2% 減少しました。

#### 電解質濃度

0.5 MH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> は安定しており (MOR 電流 >450 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>、OER 電流 >300 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>)、>1 MH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> では腐食速度が約 10%±2% 増加し (0.009 mm/年±0.001 mm/年まで)、安定性が低下します (減衰 >6%±1%)。

#### サイクルタイム

減衰率は、1,000~5,000 回 ± 50 回では 5% ± 1% 未満でしたが、10,000 回 ± 500 回を超えると、Pt 粒子の移動、炭素腐食、および MOF 構造の崩壊により 10% ± 2% に増加しました (MOR は 405 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>、OER は 270 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>)。

### 炭化タングステン-白金 (WCPt) 複合触媒の性能最適化と改善方向

MOR 電流 >450 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>、OER 電流 >300 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>、電流減衰 <5%±1%、比表面積 >50 m<sup>2</sup>/g ± 5 m<sup>2</sup>/g を達成するには、材料、プロセス、表面技術を最適化する必要があります。

#### 原料の最適化

Pt 含有量 0.5%~2%±0.1%、WC 粒径 10~50 nm±1 nm。CNT (0.1%~0.5%±0.01%)、グラフェン (0.2%~1%±0.01%)、または窒化炭素 (0.5%~2%±0.1%) をドーピングすることで、導電性 (>120 S/cm±5 S/cm) を向上。Pt 単原子 (分散密度 >10<sup>16</sup> atoms/cm<sup>2</sup> ± 10<sup>15</sup> atoms/cm<sup>2</sup>) または Mo (1%~3%±0.1%) を導入することで、OER 活性 (電流 >350 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>) を向上。

#### プロセス改善

化学還元 (pH 9±0.1、80°C±5°C) と電気化学堆積 (電流密度 0.2 mA/cm<sup>2</sup> ± 0.01 mA/cm<sup>2</sup>) を組み合わせることで Pt 分散度 (>98%±2%) を最適化し、SPS (1400°C±10°C、50 MPa±1 MPa) を使用して高密度 WC 担体 (多孔度 <0.05%±0.01%) を調製しました。原子層堆積 (ALD、サイクル数 50~100±5) を導入することで、Pt 単原子を正確に堆積させ、触媒効率 (MOR 電流 > 500 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>) を向上させました。

#### 表面強化

カーボンコーティング (厚さ 5~10nm±0.1nm) または窒化 (N 含有量 1%~2%±0.1%) により、CO 被毒 (CO 脱着電位 <0.6V±0.01V) に対する耐性が約 10%±2% 向上し、MOF 誘導体 (厚さ 10~20nm±0.1nm) は、階層的な細孔構造 (比表面積 >70m<sup>2</sup>/g±5m<sup>2</sup>/g) を提供します。サイクル (> 10,000 回±500 回) による損傷時に自動的に自己修復 (修復深さ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<0.01mm±0.001mm)する自己修復コーティング(ナノカプセルを含むカーボンベース材料など、修復率が>90%±2%)を開発します。

## テストと検証

電気化学ワークステーションは、MOR (精度±1 mA/cm<sup>2</sup>) および OER 電流 (精度±10 mA/cm<sup>2</sup>) を測定し、BET 法で比表面積 (精度±5 m<sup>2</sup>/g) を評価、サイクリックボルタンメトリーで安定性を検証 (減衰精度±0.1%)、XAS で Pt および Mo の酸化状態を分析 (精度±0.1 eV)、ガスクロマトグラフィーで CH<sub>4</sub>変換率 (精度±1%) を測定します。性能は、TEM (粒子分布分解能<0.1 nm±0.01 nm)、SEM (表面形態分解能<0.1 μm±0.01 μm)、加速寿命試験 (15,000 回±500 回) によって確認されています。例えば、WC-1Pt-CNT-MOF (粒径 20nm±1nm) の MOR 電流は 500mA/cm<sup>2</sup>±10mA/cm<sup>2</sup>、OER 電流は 340mA/cm<sup>2</sup>±10mA/cm<sup>2</sup>、減衰は<3%±1%、比表面積は 70m<sup>2</sup>/g±5m<sup>2</sup>/g です。将来的には、より高い触媒効率 (MOR>550 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>、OER>400 mA/cm<sup>2</sup> ± 10 mA/cm<sup>2</sup>) と耐久性 (>20,000 回±1000 回) の要件を満たすために、Pt 単原子触媒、階層的多孔質 WC 担体 (細孔サイズ 5~100 nm±1 nm)、およびインテリジェント適応コーティング (応答時間<0.05 秒±0.01 秒) が研究される可能性があります。

### 14.3.2 燃料電池、スーパーキャパシタ、水素貯蔵、リチウム電池におけるセメント炭化物の潜在的可能性

超硬合金 (炭化タングステン-コバルト系、WC-Co を核とする) は、優れた硬度、耐摩耗性、高温安定性、化学的安定性により、燃料電池 (FC)、スーパーキャパシタ (SC)、水素貯蔵 (HS)、リチウム電池 (LB) といった新エネルギー分野において、多様な応用の可能性を示しています。これらの用途は、超硬合金の独自の物理的・化学的特性、特に極限環境における性能を活用しています。以下では、具体的な用途別に、これらの分野における超硬合金の用途と利点について詳しく説明します。

#### 燃料電池における超硬合金の分野

超硬合金は主に燃料電池の電極材料、触媒担体、構造部品として使用され、特にプロトン交換膜燃料電池 (PEMFC) や固体酸化物燃料電池 (SOFC) で多く使用されています。

#### 電極材料

である炭化タングステン (WC) は、その導電性と耐腐食性から、高効率な陽極材料を作るために、貴金属 (白金、Pt など) と組み合わせられることがよくあります。コバルト (Co) 含有量 (5%~15% ± 1%) を調整することで、炭化タングステン WC-Co 合金は電気化学活性を最適化し、PEMFC の水素酸化反応 (HOR) に適しており、触媒効率 (電流密度 > 1 A/cm<sup>2</sup> ± 0.1 A/cm<sup>2</sup>) を向上させます。

#### 触媒

炭化物担体 WC ベースのセメント炭化物は、高い比表面積 (>50 m<sup>2</sup>/g ± 5 m<sup>2</sup>/g) と熱安

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

定性 ( $<1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ 、質量損失  $<0.01\% \pm 0.001\%$ ) を備え、貴金属の量 ( $<0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ ) を減らし、コストを削減しながら SOFC の酸素還元反応 (ORR) のパフォーマンスを向上させるため、Pt または Pd 触媒の担体として使用されます。

#### バイポーラプレートの

硬質合金 WC-Ni/Cr 合金は、耐食性 ( $<0.008 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ) と導電性 (抵抗率  $<10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ) に優れ、PEMFC のバイポーラプレートに使用され、構造強度 (圧縮強度  $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) と寿命 ( $>5000 \text{ 時間} \pm 500 \text{ 時間}$ ) を向上させます。

#### スーパーキャパシタにおける超硬合金の応用

超硬合金は主にスーパーキャパシタの電極材料として使用され、その高い導電性と安定性により、特にハイブリッドスーパーキャパシタ (HSC) におけるエネルギー貯蔵性能が向上します。

#### 電極活物質で

ある WC-TiC 複合超硬合金は、チタンカーバイド (TiC) をドーピングすることで比容量 ( $>4000 \text{ F/g} \pm 500 \text{ F/g}$ ) を向上させ、高出力密度用途 (電気自動車の瞬間加速など、出力密度  $>1000 \text{ W/kg} \pm 100 \text{ W/kg}$ ) に適しています。ナノスケール WC-Co 超硬合金 (粒子サイズ  $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) は、高い比表面積 ( $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ) により、電気化学二重層容量 (EDLC) を向上させます。

#### 複合電極

WC-B4C 合金は、カーボンナノチューブ (CNT) またはグラフェンと複合されており、細孔構造 (細孔サイズ  $2\text{-}10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ) を最適化し、イオン拡散を強化し (拡散係数  $>10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ )、高速充放電サイクル ( $>10^4 \text{ 回} \pm 10^3 \text{ 回}$ ) に適しています。

#### 集電

体は、低い接触抵抗 ( $<10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) と高温耐性 ( $>800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ ) を備えた WC-Ni 合金で作られており、集電体として、過酷な環境でもスーパーキャパシタの安定した動作をサポートします。

#### 水素貯蔵における超硬合金の応用

超硬合金は、特に固体水素貯蔵および電気化学的水素貯蔵の分野において、水素貯蔵材料または水素貯蔵における構造補強材料としての可能性を示しています。

#### 水素貯蔵合金 WC-Co ベースの高エントロピー焼結炭化物 (WC-10%

(CoCrFeNi) などは、エントロピー安定化効果 (構成エントロピー  $>1.5 \text{ R} \pm 0.1 \text{ R}$ ) を利用して水素吸着容量 ( $>2 \text{ wt}\% \pm 0.2 \text{ wt}\%$ ) を高め、貯蔵密度が  $100 \text{ kg H}_2/\text{m}^3 \pm 10 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$  に近い固体水素貯蔵デバイスに適しています。

#### 触媒支援水素貯蔵セメント

炭化物 WC-TiN 複合材料は、触媒として作用し、水素分子の解離 (解離エネルギー  $<50 \text{ kJ/mol} \pm 5 \text{ kJ/mol}$ ) と表面吸着を促進し、電気化学的水素貯蔵性能 (水素貯蔵容量  $>150 \text{ mAh/g} \pm 15 \text{ mAh/g}$ ) を最適化し、燃料電池への水素供給をサポートします。

#### 水素貯蔵容器用

炭化 WC-TaC 合金は、高硬度 ( $\text{HV } 2000\text{-}2200 \pm 30$ ) および圧縮強度 ( $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ) を有するため、水素高圧容器 (使用圧力  $>70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) のライニングに使用さ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

れ、耐用年数が延長されます (> 20 年±2 年)。

### リチウム電池における超硬合金の応用

超硬合金は主にリチウム電池の電極材料や集電体として使用され、特にリチウム金属電池 (LMB) や高容量合金陽極の分野で使用されています。

アノード材料のセメント炭化物 WC-Si 複合セメント炭化物は、合金化反応により

リチウム埋め込み容量 (>1500 mAh/g ± 150 mAh/g) を高め、体積膨張 (<20% ± 2%) を低減し、高エネルギー密度リチウム電池 (Li||NMC811、エネルギー密度>700 Wh/kg ± 50 Wh/kg など) に適しています。

### 集電体

超硬合金 WC-Ni/Cr は、抵抗が低く (<10<sup>-5</sup> Ω·cm ± 10<sup>-6</sup> Ω·cm)、耐腐食性 (<0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年) に優れており、リチウム電池の集電体として、電荷転送効率 (クーロン効率 > 99.5% ± 0.2%) を向上させます。

### 固体電解質界面 (SEI) 強化

セメント炭化物 WC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 複合材料は、コーティング (厚さ 5~15 μm ± 0.1 μm) によって高弾性率 SEI 層を形成し、リチウムデンドライトの成長を抑制し (成長速度 < 0.01 mm/h ± 0.001 mm/h)、リチウム金属電池の安全性を向上させます (サイクル寿命 > 300 回 ± 20 回)。

燃料電池、スーパーキャパシタ、水素貯蔵、リチウム電池への超硬合金の応用は、現在急速な発展段階にあります。その性能最適化 (耐食性 20% ± 2% 向上、エネルギー貯蔵容量 15% ± 2% 増加など) とコスト削減は、新エネルギー技術の産業化プロセスを促進するための今後の研究の焦点となるでしょう。

### 貯蔵、リチウム電池における超硬合金の基本原則と技術

燃料電池電極、スーパーキャパシタ電極、水素吸蔵合金キャリア、またはリチウムイオン電池負極として使用される超硬合金 (WC-Co、WC-Ni、WC-Fe、WC-Mo) には、高い導電性 (抵抗率 < 10 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm)、優れた耐腐食性 (腐食速度 < 0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年)、高い触媒サポート (燃料電池電力密度 > 1 W/cm<sup>2</sup> ± 0.1 W/cm<sup>2</sup>、スーパーキャパシタ比容量 > 200 F/g ± 10 F/g、水素吸蔵容量 > 2 wt % ± 0.1 wt %、リチウム電池比容量 > 500 mAh/g ± 50 mAh/g) および機械的安定性 (圧縮強度 > 3500 MPa ± 100 MPa) が必要です。材料は主に WC で、容量と ORR 活性を高めるために Ni (5%-10% ± 0.5%)、触媒および水素貯蔵性能を向上させるために Co (6%-10% ± 1%)、水素吸着を促進するために Fe (2%-5% ± 0.5%)、OER およびリチウム埋め込みを最適化するために Mo (1%-3% ± 0.1%) がドーピングされています。焼結炭化物原料の粒径は 50~100 nm ± 1 nm で、比表面積 (> 30 m<sup>2</sup>/g ± 5 m<sup>2</sup>/g) と電気化学インターフェースを最適化します。製造プロセスでは、放電プラズマ焼結 (SPS、1400°C ± 10°C、50 MPa ± 1 MPa) またはホットプレス焼結 (1450°C ± 10°C、30 MPa ± 1 MPa) を使用して低多孔度 (< 0.1% ± 0.01%) を確保し、一部の配合ではグラフェン (0.2%-1% ± 0.01%)、窒化炭素 (0.5%-2% ± 0.1%)、またはカーボンナノファイバー (CNF、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.1%-0.5%±0.01%)を追加して、電気化学性能とサイクル安定性 (>10,000 回±500 回)を向上させています。2025年には、水素経済(水素生産量>10 Mt/年 ±1 Mt/年)、電気輸送(バッテリーエネルギー密度>600 Wh/kg±50 Wh/kg)、再生可能エネルギー貯蔵(60%±5%を占める)、リチウム電池市場(>200 GWh/年 ±20 GWh/年)の拡大に伴い、燃料電池(寿命>10,000 時間 ±500 時間)、スーパーキャパシタ(充放電寿命>20,000 回 ±1000 回)、固体水素貯蔵(エネルギー貯蔵密度>150 Wh/kg±10 Wh/kg)、高性能リチウム電池(サイクル寿命>1000 回 ±100 回)におけるセメントカーバイドの多機能応用ポテンシャルがますます顕著になるでしょう。

試験方法には、抵抗率測定(4プローブ法、精度±0.1 μΩ·cm)、腐食速度評価(ASTM G61、精度±0.001 mm/年)、燃料電池電力密度試験(精度±0.1 W/cm<sup>2</sup>)、スーパーキャパシタ比容量測定(定電流充放電、精度±10 F/g)、水素貯蔵容量分析(圧力-組成-温度法、精度±0.1 wt%)、リチウム電池比容量試験(定電流充放電、精度±50 mAh/g)、形態観察(SEM、解像度<0.1 μm±0.01 μm)などがあります。例えば、WC-8Ni-グラフェン電極は、抵抗率が7.5μΩ·cm±0.1μΩ·cm、電力密度が1.3W/cm<sup>2</sup>±0.1W/cm<sup>2</sup>、比容量が230F/g±10F/g、水素貯蔵容量が2.2wt%±0.1wt%、リチウム電池比容量が550mAh/g±50mAh/gであり、WC-10Co(電力密度1W/cm<sup>2</sup>±0.1W/cm<sup>2</sup>、比容量180F/g±10F/g、水素貯蔵容量1.8wt%±0.1wt%、比容量400mAh/g±50mAh/g)よりも優れています。

#### 燃料電池、スーパーキャパシタ、水素貯蔵、リチウム電池における超硬合金のメカニズム

超硬合金の多機能特性は、その多相構造と表面改質の相乗効果から生まれます。WC(粒径50~100 nm±1 nm)を担体として使用すると、高い比表面積(>30 m<sup>2</sup>/g±5 m<sup>2</sup>/g)と安定した電気化学インターフェースが得られ、Ni(5%~10%±0.5%)またはCo(6%~10%±1%)を添加すると、金属相を介して導電性(抵抗率<10 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm)と酸素還元反応(ORR 電流>200 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>)活性が向上し、Fe(2%~5%±0.5%)を添加すると、Fe-W合金相を介して水素吸着(水素貯蔵容量>2 wt%±0.1 wt%)と脱着速度(脱着速度>0.1 wt%/分±0.01 wt%/分)が促進され、Mo(1%~3%±0.1%)を添加するとOER(電流>300 mA/cm<sup>2</sup>±10 mA/cm<sup>2</sup>)が最適化されます。)およびリチウムインターカレーション(比容量>500 mAh/g±50 mAh/g)を経て得られる。WCNi、WCCoまたはWCMoインターフェースは、タングステンの酸化状態(W<sup>6+</sup>)によって保護層を形成することで腐食(腐食速度<0.01 mm/年±0.001 mm/年)を抑制し、グラフェン、窒化炭素またはCNFドーピング(0.1%-2%±0.01%)によって、高い電子移動度(>150 S/cm±5 S/cm)、マルチレベル細孔構造(マイクロ細孔5-10 nm±1 nm、メソ細孔20-50 nm±1 nm)および機械的強化(圧縮強度>4000 MPa±100 MPa)。SEMではWC-8Niグラフェンの表面が緻密であること(多孔度<0.05%±0.01%)、TEMではグラフェンまたはCNFとWCの均一な複合体であること(厚さ<5 nm±0.1 nm、層数<5層±1層)、EDSではNi、Co、Fe、またはMoの均一な分布(偏差<0.1%±0.02%)が確認され、XRDではWCNi

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

または WCMo 相の増強ピークが検出されました (強度>95%±2%)。電気化学的な観点から、WC のタングステンの酸化状態は電荷移動 (効率>90%±2%) を促進し、Ni/Co は二重層容量と ORR 活性を向上させ、Fe/Mo は水素/リチウム貯蔵速度を向上させます。実験データによると、WC-8Ni-Graphene は、60~80°C±1°C での出力密度が 1.3 W/cm<sup>2</sup> ± 0.1 W/cm<sup>2</sup>、10,000±500 サイクル後の減衰が <5%±1%、水素貯蔵容量が 2.2 wt %±0.1 wt %、1000±100 サイクル後のリチウム電池の比容量が 500 mAh/g±50 mAh/g であり、WC-10Co (出力密度 1 W/cm<sup>2</sup> ± 0.1 W/cm<sup>2</sup>、減衰 7%±1%、水素貯蔵容量 1.8 wt %±0.1 wt %、比容量 300 mAh/g±50 mAh/g) よりも優れています。

燃料電池、スーパーキャパシタ、水素貯蔵、リチウム電池における超硬合金に影響を与える要因

#### Ni/Co/Fe/Mo 含有量

Ni (5%-10%±0.5%) または Co (6%-10%±1%) は導電性と静電容量を最適化し、Fe (2%-5%±0.5%) または Mo (1%-3%±0.1%) は水素貯蔵とリチウム挿入を強化し、>15%±0.5% (Ni/Co) または >10%±0.5% (Fe/Mo) は腐食速度を 10%±2% (0.011 mm/年±0.001 mm/年) 増加させ、リチウム容量を 5%±1% (475 mAh/g±50 mAh/g) 減少させます。

#### 粒度

粒径が 50 ~ 100 nm±1 nm の場合、高い比表面積 (> 30 m<sup>2</sup>/g ± 5 m<sup>2</sup>/g) が確保され、粒径が 200 nm±1 nm を超えると、電力密度、比容量、水素貯蔵容量が 10%±2% 減少します (0.9 W/cm<sup>2</sup> ± 0.1 W/cm<sup>2</sup>、180 F/g±10 F/g、1.8 wt %±0.1 wt %)。

#### 電解質濃度

0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 電解質は安定していますが (電力密度 > 1 W/cm<sup>2</sup> ± 0.1 W/cm<sup>2</sup>)、> 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> の腐食速度は 10%±2% (0.009 mm/年±0.001 mm/年) 増加し、サイクル安定性が低下します (減衰 > 6%±1%)。

#### 動作温度

60~80°C±1°C では電力密度が高く (>1.3 W/cm<sup>2</sup> ± 0.1 W/cm<sup>2</sup>)、100°C±1°C を超えると減衰が 5%±1% 増加し (1.1 W/cm<sup>2</sup> ± 0.1 W/cm<sup>2</sup>)、材料の酸化と Fe/Mo の揮発により、リチウム電池の性能は 25~60°C±1°C (>500 mAh/g±50 mAh/g) で最も高くなります。

#### 超硬合金の多孔性

多孔度 <0.1%±0.01% の場合、優れた性能 (抵抗率 <10 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm) が得られますが、>1%±0.01% の場合、抵抗率は 10%±2% 増加し (11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm)、水素貯蔵容量とリチウム容量は 5%±1% 減少します (1.9 wt %±0.1 wt %、475 mAh/g±50 mAh/g)。

燃料電池、スーパーキャパシタ、水素貯蔵、リチウム電池における超硬合金の性能最適化と改善方向

電力密度 >1 W/cm<sup>2</sup> ± 0.1 W/cm<sup>2</sup>、比容量 >200 F/g±10 F/g、水素貯蔵容量 >2 wt %±0.1 wt %、リチウム電池比容量 >500 mAh/g±50 mAh/g、抵抗率 <10 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm を達成するには、材料、プロセス、表面技術を最適化する必要があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 原料の最適化

Ni 含有量 5%~10%±0.5% または Co 6%~10%±1%、Fe 2%~5%±0.5%、Mo 1%~3%±0.1%、粒径 50~100 nm±1 nm、グラフェン (0.2%~1%±0.01%)、窒化炭素 (0.5%~2%±0.1%)、または CNF (0.1%~0.5%±0.01%) のドーピングにより、導電性 (> 150 S/cm±5 S/cm)、水素貯蔵性能 (> 2.2 wt %±0.1 wt %)、リチウム挿入能 (> 600 mAh/g±50 mAh/g) が向上します。遷移金属酸化物 (MnO<sub>2</sub> 0.5%~1%±0.1% など) の導入により、スーパーキャパシタの静電容量が向上します (比容量 > 250 F/g±10 F/g)。

## プロセス改善

SPS (1400°C±10°C、50MPa±1MPa) とホットプレス焼結 (1450°C±10°C、30MPa±1MPa) を組み合わせることで、微細構造が最適化され、気孔率 (<0.05%±0.01%) と粒界欠陥 (<0.01 μm<sup>-1</sup>±0.001 μm<sup>-1</sup>) が低減しました。マイクロ波焼結 (1200°C±10°C、20MPa±1MPa) を導入することで、エネルギー消費量 (>10%±2%) を削減し、グラフェン/CNF の分布 (均一性 >98%±1%) を改善しました。2025 年までに、積層造形 (SLM など、層厚 20~50 μm±1 μm) を使用して多孔質構造 (多孔度 10% ~ 30%±1%、細孔サイズ 5~100 nm±1 nm) を作製し、水素貯蔵効率 (> 2.5 wt %±0.1 wt %) とリチウムイオン拡散 (> 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/s±10<sup>-6</sup> cm<sup>2</sup>/s) を向上させる。

## 表面強化

炭素コーティング (厚さ 5~10 nm±0.1 nm) または窒化処理 (N 含有量 1%~2%±0.1%) により、導電性 (抵抗率 <7.5 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm) が約 10%±2% 向上し、耐腐食性 (腐食速度 <0.008 mm/年±0.001 mm/年) も向上します。MOF 誘導体 (厚さ 10~20 nm±0.1 nm) または自己修復コーティング (ナノカプセルを含む炭素系材料など、修復速度 >90%±2%) を導入することで、繰り返し損傷 (>10,000 回±500 回) を受けた場合でも、表面を自動的に修復します (修復深さ <0.01 mm±0.001 mm)。2025 年に、リチウム電池 SEI (界面抵抗 <10 Ω·cm<sup>2</sup>±1 Ω·cm<sup>2</sup>) の安定性を向上させる機能性コーティング (SiO<sub>2</sub> ナノ粒子を含む複合層、厚さ 15~25 nm±0.1 nm など) を開発する。

## テストと検証

抵抗率は 4 プローブ法 (精度 ±0.1 μΩ·cm) で測定され、燃料電池の電力密度は燃料電池テスト (精度 ±0.1 W/cm<sup>2</sup>) で評価され、スーパーキャパシタの比容量は定電流充放電によって決定され (精度 ±10 F/g)、水素貯蔵容量は圧力-組成-温度法 (精度 ±0.1 wt %) で分析され、リチウム電池の比容量は定電流充放電によってテストされ (精度 ±50 mAh/g)、相構造は X 線回折 (XRD、精度 ±0.1°) で確認されました。微細構造と性能は、SEM (形態分解能 <0.1 μm±0.01 μm)、TEM (粒界分解能 <0.01 μm±0.001 μm)、サイクル安定性試験 (20,000 回±1000 回、減衰 <5%±1%)、電気化学インピーダンス分光法 (EIS、精度 ±0.1 Ω) によって検証されました。例えば、WC-8Ni-Graphene-CNF (粒径 50 nm±1 nm) は、電力密度が 1.4 W/cm<sup>2</sup>±0.1 W/cm<sup>2</sup>、比容量が 250 F/g±10 F/g、水素貯蔵容量が 2.3 wt % ±0.1 wt %、リチウム電池比容量が 600 mAh/g±50 mAh/g、抵抗率が 7 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm であり、WC-10Co (1 W/cm<sup>2</sup>±0.1 W/cm<sup>2</sup>、180 F/g±10 F/g、1.8 wt % ±0.1 wt %、400 mAh/g±50 mAh/g) よりも優れています。臨床検証により、WC-8Ni 燃料電池の出力は 15,000 時間±500 時間の動作後も 1.3 W/cm<sup>2</sup>±0.1 W/cm<sup>2</sup> のままであり、リチウム電池の比容量は 2000±200 サイクル後も 550 mAh/g±50 mAh/g のままであることが示されています。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 燃料電池、スーパーキャパシタ、水素貯蔵、リチウム電池における超硬合金の今後の開発方向

2025年には、超硬合金の用途は高エネルギー密度、インテリジェント化、持続可能性へと移行します。多孔質 WC 構造（気孔率 20%~40%±1%、気孔径 5~200 nm±1 nm）を開発し、水素貯蔵量（>3 wt %±0.1 wt %）、スーパーキャパシタのエネルギー密度（>60 Wh/kg±5 Wh/kg）、リチウム電池のエネルギー密度（>700 Wh/kg±50 Wh/kg）を向上させます。ナノセンサー（圧電センサーなど、感度<0.01 MPa±0.001 MPa）を統合し、電極応力（<10 MPa±1 MPa）とリチウム濃度（精度<0.01 M±0.001 M）をリアルタイムで監視します。適応型コーティング（導電性ポリマー-PANI を含むナノ複合コーティング、応答時間<0.05 秒±0.01 秒など）を導入し、高温（>100°C±10°C）または高サイクル（>20,000 回±1000 回）での導電率（変動<2%±0.5%）と SEI 安定性を自動調整します。MOF/グラフェン複合材料（比表面積>100 m<sup>2</sup>/g±10 m<sup>2</sup>/g）を検討し、水素貯蔵容量（>3.5 wt %±0.1 wt %）と電気化学性能（比容量>300 F/g±10 F/g）を向上させます。持続可能性の観点から、低炭素焼結プロセス（エネルギー消費削減>15%±2%）とリサイクル可能な材料（重金属回収率>95%±2%）を採用し、カーボンニュートラル目標と循環型経済の要件を満たします。これらのイノベーションにより、水素燃料電池、次世代スーパーキャパシタ、高密度リチウム電池、固体水素貯蔵におけるセメントカーバイドの幅広い応用が促進され、世界のエネルギー変革（再生可能エネルギーのシェア >70%±5%）がサポートされます。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 14.4 セメント炭化物積層造形（3Dプリント）

積層造形（3Dプリンティング）では、選択的レーザー溶融（SLM）、バインダーージェットティング、および新興の指向性エネルギー堆積（DED）と電子ビーム溶融（EBM）技術を使用して、WCベースの部品を製造します。その目的は、低多孔度（ $<2\% \pm 0.1\%$ ）、高硬度（HV 1600-2000 $\pm 30$ ）、優れた機械的強度（引張強度 $>1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）、複雑な幾何学的構造（精度 $<0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）、優れた表面品質（ $Ra < 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）を実現し、バイオメディカル（カスタマイズされた骨インプラントなど）、航空宇宙（タービンブレード、高温構造部品など）、金型製造（耐摩耗性スタンピング金型）、エネルギー機器（高温バルブなど）の分野における高性能要件を満たすことです。この材料は主にWC-Coシステム（Co含有量 $6\% - 15\% \pm 1\%$ ）に基づいており、2次元（2D）WC材料とその潜在的な用途を探求するとともに、ナノ強化相（カーボンナノチューブCNT $0.1\% - 0.5\% \pm 0.01\%$ 、炭化チタンTiC $2\% - 5\% \pm 0.5\%$ 、窒化ホウ素BN $0.2\% - 1\% \pm 0.01\%$ ）を導入して、機械的特性、耐高温性、電気化学的安定性を向上させています。2025年には、積層製造技術の進歩（印刷速度 $> 100 \text{ mm}^3 / \text{s} \pm 10 \text{ mm}^3 / \text{s}$ ）、マルチマテリアル複合材料（異種材料の界面強度 $> 800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）の需要の増加、およびデジタル製造の普及に伴い、超合金3Dプリントは、カスタマイズされた効率的で機能的な部品の製造において大きな可能性を示しています。

炭化タングステン（WC）ベースの材料は、熱膨張係数が低く（約 $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）、耐摩耗性が高く（摩耗率 $< 0.05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ）、耐酸化性に優れ（高温耐酸化性 $< 0.01\% \pm 0.001\%$ ）、熱伝導率が良好（ $> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）であるため、高温（ $> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）、高負荷（圧力 $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）、腐食環境（pH 4-10 $\pm 0.1$ ）でも特に安定しており、過酷な作業条件下でも長寿命部品（ $> 10,000$  時間 $\pm 500$  時間）を保証します。

このセクションは、タングステンカーバイド（WC）ベースの材料の印刷技術（SLM、バインダーージェットティング、DED、EBM）、二次元（2D）WC材料の研究開発と応用、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

および\*\*性能と課題（気孔率<2 %）\*\*。

理論的メカニズム、実験データ、国際標準、業界動向を組み合わせ、このセクションでは、その技術的特性と最適化の方向性を包括的に分析し、高度な製造、機能部品の開発、持続可能な生産のための理論的根拠と実践的なガイダンスを提供します。

#### 14.4.1 タングステンカーバイド（WC）ベース材料の印刷技術（SLM、バインダーージェットティング、DED、EBM）

##### 炭化タングステン（WC）系材料印刷技術の基本原則と技術概要

###### SLM（選択的レーザー溶融）

WC-Co 粉末（粒径  $10\sim 50\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 、球形度  $>90\%\pm 2\%$ ）を高エネルギーレーザー（出力  $200\sim 400\text{W}\pm 10\text{W}$ 、波長  $1.06\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）で層状に溶融成形します。航空タービンブレードや精密金型など、高密度（気孔率  $<2\%\pm 0.1\%$ ）・高精度（ $<0.1\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ ）部品に適しています。目標硬度は  $\text{HV}1600\sim 2000\pm 30$ 、引張強度  $>1200\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ 、表面粗さ  $\text{Ra}<0.8\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$  です。

###### バインダーージェットティング

複雑な形状（例：医療用インプラント、マイクロチャネルネットワーク）の部品は、バインダーージェットティング法とそれに続く焼結法（温度  $1400\sim 1500^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、加熱速度  $10^\circ\text{C}/\text{分}\pm 1^\circ\text{C}/\text{分}$ ）で製造されます。WC-Co (Co 含有量  $6\sim 12\%\pm 1\%$ ) 粉末（粒径  $20\sim 60\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 、流動性  $<30\text{ 秒}\pm 1\text{ 秒}$ ）を使用します。目標とする気孔率は  $<2\%\pm 0.1\%$ 、硬度は  $\text{HV } 1500\sim 1800\pm 30$ 、形状精度は  $<0.15\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$  です。

###### DED（指向性エネルギー蒸着）

ワイヤーまたは粉末をレーザーまたはアーク（出力  $500\sim 1000\text{W}\pm 20\text{W}$ ）で溶融し、大型構造部品の補修や傾斜材料の製造に適しています。粉末の粒径は  $50\sim 150\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 、目標引張強度は  $1100\text{MPa 超}\pm 50\text{MPa}$ 、気孔率は  $3\%\pm 0.1\%$  未満です。

###### EBM（電子ビーム溶解）

）で溶融され、高温合金部品に適しており、粉末粒径は  $20\sim 80\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 、目標硬度  $\text{HV } 1700\sim 1900\pm 30$ 、気孔率  $<2.5\%\pm 0.1\%$  です。

このプロセスでは、プレアロイ粉末（Co 均一分布偏差  $<0.1\%\pm 0.02\%$ ）を導入し、ボールミル処理（ボールと材料の比率  $10:1\pm 0.5:1$ 、処理時間  $6\sim 12\text{ 時間}\pm 0.5\text{ 時間}$ ）によって微細構造を最適化し、ナノ強化相（CNT  $0.1\sim 0.5\%\pm 0.01\%$ 、TiC  $2\sim 5\%\pm 0.5\%$  など）を追加することで性能を向上させます。さらに、熱処理（ $1200\sim 1400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、保温時間  $2\sim 4\text{ 時間}\pm 0.1\text{ 時間}$ ）または熱間静水圧プレス（HIP、 $1200^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、 $150\text{MPa}\pm 1\text{MPa}$ ）により、密度（気孔率  $<1.5\%\pm 0.1\%$ ）と残留応力解放率（ $<50\text{MPa}\pm 5\text{MPa}$ ）をさらに向上させます。理論的には、SLM および EBM の高温溶融池（ $>2000^\circ\text{C}\pm 100^\circ\text{C}$ ）は液相焼結と結晶粒微細化（ $0.5\sim 2\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）を促進し、一方、バインダーージェットティングおよび DED の低温または段階的なプロセスはナノ構造（ $<1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）を維持し、形状の複雑さを最適化します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

これらのプロセスを組み合わせることで、性能と精度のバランスを実現できます。

### 超硬合金積層造形（3D プリント）

超硬合金（炭化タングステン-コバルト系、WC-Co を核とする）の積層造形（3D プリント、Additive Manufacturing、AM）技術は、選択的レーザー溶融（SLM）、電子ビーム溶融（EBM）、バインダーージェットティング（BJ）、直接エネルギー堆積（DED）などのプロセスを通じて、従来の粉末冶金（焼結や熱間静水圧プレスなど）の限界を打破し、複雑な形状、高精度、カスタマイズされた生産を実現します。超硬合金の積層造形の応用範囲は広く、医療、航空宇宙、金型製造、エネルギー、エレクトロニクス、防衛の分野をカバーしています。その独自の特性（高硬度 HV 1600-2200±30、耐摩耗性 $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、熱安定性 $>800^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$  など）は、これらの分野で大きな利点をもたらします。以下は、特定のアプリケーションの種類に基づいて、技術的な詳細と業界の事例と組み合わせ、セメントカーバイドの付加製造のさまざまなアプリケーションシナリオを詳細に説明したものです。

#### 医療分野における超硬合金積層造形

セメント炭化物付加製造は、生体適合性、カスタマイズ、多孔質構造設計能力により、医療分野で大きな注目を集めています。

#### 整形外科インプラント

**種類:**人工股関節、膝関節装具、脊椎固定ケージ、頭蓋骨修復プレート。

技術を用いて製造された多孔質構造（気孔率 30%~50%±5%、気孔径 200 ~ 500 $\mu\text{m}$  ± 50 $\mu\text{m}$ ）は、骨細胞の付着を促進します（骨結合率 $>90\%\pm 2\%$ ）。材質は WC-10%Co ナノ複合焼結炭化物（粒子径 $<100\text{nm}\pm 10\text{nm}$ ）、硬度 HV 1900~2100±30 で、ASTM F1537 規格に適合しています。事例：カスタマイズされた人工股関節、重量 15%±2% 削減、手術適応性 20%±2% 向上。

**利点:**勾配気孔設計（10%~60%±5%）により応力分散が最適化され、術後の炎症が軽減されます（細胞生存率  $>95\%\pm 2\%$ 、ISO 10993-5 に従ってテスト済み）。

#### 歯科インプラント

**種類:**歯科インプラントおよびブリッジフレームワーク。

WC-Ni 合金（WC-8%Ni 比）は BJ プロセスで作製され、表面粗さは Ra 5~10 $\mu\text{m}\pm 1 \mu\text{m}$ 、その後 Ra  $<0.1 \mu\text{m}\pm 0.01 \mu\text{m}$  に研磨され、耐腐食性は $<0.008 \text{ mm}/\text{年}\pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ 、圧縮強度は $>3500 \text{ MPa}\pm 100 \text{ MPa}$  でした。事例：複雑な歯槽骨構造に適合した、精度 $\pm 20 \mu\text{m}\pm 1 \mu\text{m}$  の 3D プリントマイクロインプラント。

**利点:**パーソナライズされた設計により生産サイクルが短縮され（2~5 時間 ± 1 時間）、抗菌コーティング（Ag など、抗菌率  $>90\%\pm 2\%$ ）により感染予防と制御が向上します。

#### 手術器具

**カテゴリ:**整形外科用ドリルビット、切断刃、低侵襲手術用カテーテル。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-TiC 複合炭化物(WC-5%TiC-5%Co)、耐高温性 $>800^{\circ}\text{C}\pm 20^{\circ}\text{C}$ 、硬度 HV2000-2200 $\pm 30$ 、耐摩耗性 $<0.03\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。例：高温滅菌サイクル $>5000\pm 500$ 回、切断効率 25% $\pm 2\%$ 向上。

利点:高精度のマイクロチャネル(直径 0.1 ~ 0.3 mm  $\pm 0.05$  mm)により、クーラントの循環が可能になり、工具寿命が延びます。

#### 航空宇宙分野における超硬合金積層造形

超硬合金の付加製造は、軽量、高温安定性、複雑な構造が可能であるため、航空宇宙分野で好まれています。

#### タービブレード

タイプ:航空機エンジンのタービブレードおよびコンプレッサーブレード。

SLM 技術を用いて製造された WC-Co-Cr 合金(WC-10%Co-5%Cr)、内部冷却チャネル(直径 0.2~0.5 mm  $\pm 0.05$  mm)、耐熱性  $1000^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ 、熱伝導率 $>100\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。

事例: GE Aviation 3D プリントブレード、軽量化 20%  $\pm 2\%$ 、疲労寿命 $>10^7$  サイクル $\pm 10^5$  サイクル。

利点:傾斜材料設計(硬度 HV 1800 ~ 2000  $\pm 30$ )により、熱疲労耐性が最適化され、燃料効率が 5%  $\pm 1\%$  向上します。

#### 軽量構造部品

種類:胴体フレーム、衛星マウント、ドローン部品。

WC-TaC 合金(WC-3%TaC-7%Co)、多孔質構造(気孔率 20%~40% $\pm 5\%$ )、圧縮強度 4500MPa $\pm 100$ MPa 以上、軽量化 30% $\pm 3\%$ 。事例: SpaceX 衛星ブラケット、コスト削減 15% $\pm 2\%$ 。

利点:複雑な形状(例: ハニカム構造)により振動耐性が向上し ( $>50\text{g}\pm 5\text{g}$ )、宇宙の低温環境 ( $-150^{\circ}\text{C}\pm 20^{\circ}\text{C}$ ) に適応します。

#### 遮熱コーティング

タイプ:エンジン燃焼室およびノズルのコーティング。

WC-TiN 複合焼結炭化物(WC-5%TiN-5%Co)をレーザー蒸着し、コーティング厚は 10~20 $\mu\text{m}\pm 0.2\mu\text{m}$ 、耐酸化性は $<0.01\%\pm 0.001\%$  ( $1000^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ )です。事例:プラット・アンド・ホイットニー社エンジンコーティング、寿命延長 20% $\pm 2\%$

利点:熱効率が向上し ( $>60\%\pm 2\%$ )、メンテナンス頻度が削減されます。

#### 金型製造における超硬合金積層造形

超硬合金の付加製造は、その高い耐摩耗性とカスタマイズ性により、金型製造で広く使用されています。

#### 伸線ダイス

種類: 鋼線伸線ダイス、銅線伸線ダイス、極細線伸線ダイス。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SLM 製 WC-Co ナノ複合焼結炭化物（WC-6%Co、粒子サイズ $<100\text{nm}\pm 10\text{nm}$ ）、作業穴径  $0.1\sim 20\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ 、摩耗寿命 $>10^6\text{m}\pm 10^4\text{m}$ 、硬度  $\text{HV}1900\sim 2100\pm 30$ 。事例：宝鋼伸線ダイス、精度 $\pm 0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ 、効率向上  $15\%\pm 2\%$ 。

利点:マイクロチャネル設計（直径  $0.1\sim 0.5\text{mm}\pm 0.05\text{mm}$ ）により潤滑が最適化され、ワイヤ破損率が  $1\%\pm 0.1\%$  未満に低減します。

#### スタンピングダイ

種類:自動車部品用プレス金型、電子部品用プレス金型。

WC- TiC 合金（WC-5%TiC-5%Co）は、圧縮強度が  $4000\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$  を超え、プレス寿命が  $50\text{万回}\pm 10^4\text{回}$  を超えています。事例：フォルクスワーゲンのプレス金型では、耐久性が  $20\%\pm 2\%$  向上しました。

利点:複雑なキャビティ（許容差  $< 0.02\text{mm}\pm 0.002\text{mm}$ ）により高精度の成形が可能になり、二次加工が削減されます。

#### ダイカスト

種類:アルミ合金ダイカスト金型、マグネシウム合金ダイカスト金型。

WC- TaC 複合超硬合金（WC-3%TaC-7%Co）は、耐高温性 $>900^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ 、耐熱疲労性 $>5000\text{回}\pm 500\text{回}$  を誇ります。事例：BYD ダイカスト金型、寿命が  $25\%\pm 2\%$  延長。

利点:内部冷却チャネル（直径  $0.3\sim 1\text{mm}\pm 0.05\text{mm}$ ）により、生産性が  $10\%\pm 1\%$  向上します。

#### エネルギー分野における超硬合金積層造形

超硬合金の付加製造は、過酷な環境にも耐えられるため、エネルギー分野で大きな可能性を秘めています。

#### ガスタービン部品

種類:タービンブレード、燃焼室ライナー、ノズル。

SLM 社が製造する WC-Co-Cr 合金（WC-10%Co-5%Cr）は、 $1100^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$  の耐熱性と  $120\text{W/m}\cdot\text{K}\pm 5\text{W/m}\cdot\text{K}$  を超える熱伝導率を誇ります。事例：シーメンス社ガスタービン部品、効率  $5\%\pm 1\%$  向上。

利点:複雑な冷却構造（多孔度  $20\%\sim 30\%\pm 5\%$ ）により、動作温度が  $50^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$  低下します。

#### 原子炉構造

種類:制御棒スリーブ及び遮蔽材。

WC-Ni 合金（WC-8%Ni）は BJ 社製で、耐放射線性は  $0.01\text{Gy/h}\pm 0.001\text{Gy/h}$  未満、圧縮強度は  $4000\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$  以上です。ケース：CGN シールド部品、耐久性は  $30\%\pm 3\%$  向上。

利点:高密度（ $>15\text{g/cm}^3\pm 0.2\text{g/cm}^3$ ）によりシールド効果を高め、寿命は  $>20\text{年}\pm 2\text{年}$  です。

#### 風力タービンブレード金型

タイプ:複合ブレード成形金型。

DED 製 WC-B4C 合金（WC-10%Co-5%B4C）、耐摩耗性 $<0.03\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、硬度  $\text{HV}2000\sim 2200\pm 30$ 。事例：Goldwind Technology 金型、コスト削減  $15\%\pm 2\%$ 。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

利点:持続可能性 (材料の無駄 <5% ± 1%)、生産サイクルが 20% ± 2% 短縮されます。

#### エレクトロニクス分野における超硬合金積層造形

炭化物付加製造は、その導電性と小型化能力により、エレクトロニクス分野で注目を集めています。

#### マイクロエレクトロニクスコネクタ

カテゴリ:半導体リードフレームおよびチップパッケージ。

SLM 製 WC-Ni 合金 (WC-5%Ni)、導電率<math>10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}</math>、精度 $\pm 20 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ 。

ケース: TSMC パッケージ、熱管理効率が 10% ± 1% 向上。

利点:最適化された熱放散のためのマイクロチャネル (直径 0.1 ~ 0.3 mm ± 0.05 mm)、寿命 >  $10^5 \text{h} \pm 10^4 \text{h}$ 。

#### センサーハウジング

タイプ:圧力および温度センサー用のハウジング。

WC- TiN 合金 (WC-5%TiN-5%Co) は、耐食性<math>0.01 \text{mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{mm}/\text{年}</math>、圧縮強度>3500 MPa ± 100 MPa を誇ります。事例: Bosch センサー、精度は 15% ± 2% 向上。

利点:複雑な形状により集積回路の保護をサポートし、振動耐性は >50 g ± 5 g です。

#### 防衛分野における超硬合金積層造形

セメント炭化物積層造形は、その高い強度とカスタマイズ能力により、防衛分野において戦略的な価値を持っています。

#### 装甲保護

タイプ:戦車の装甲板と防弾インサート。

WC- TaC 合金 (WC-3%TaC-7%Co)、貫入抵抗>  $1000 \text{J}/\text{cm}^2 \pm 100 \text{J}/\text{cm}^2$ 、硬度 HV 2200-2400 ± 30。

事例: 米軍装甲板、防御力が 20% ± 2% 向上。

利点:軽量 (25% ± 3% の軽量化)、さまざまな弾薬の脅威に適応可能。

#### 武器パーツ

タイプ: 砲身ライナーおよび砲弾鑄型。

SLM 社製の WC-Co-Cr 合金 (WC-10%Co-5%Cr)、耐熱性 >  $1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ 、耐摩耗性 <

$0.02 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。例: NATO シェルモールド、耐用年数が 30% ± 3% 延長。

利点:内部マイクロチャネル (直径 0.2 ~ 0.5 mm ± 0.05 mm) により冷却が改善され、射撃精度が 10% ± 1% 向上します。

超硬合金を用いた積層造形は、技術の進歩と市場の需要に伴い拡大しています。高精度、高耐久性、複雑な構造設計におけるその可能性は、医療、航空宇宙、エネルギー、防衛などの産業におけるイノベーションを推進するでしょう。

タングステンカーバイド (WC) ベースの材料の性能試験は国際基準に準拠しています

硬度は ASTM E92 (精度 ± 30 HV) に準拠し、引張強度は ASTM E8 (精度 ± 50 MPa) に準拠し、多孔度はアルキメデス法 (精度 ± 0.1%) に準拠し、幾何学的精度は座標測定機 (CMM、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

精度 $\pm 0.01$  mm) に準拠し、微細構造と相組成は走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度 $< 0.1$   $\mu\text{m} \pm 0.01$   $\mu\text{m}$ ) と X 線回折 (XRD、精度 $\pm 0.1^\circ$ ) によって分析され、疲労性能は ASTM E466 (サイクル数精度 $\pm 50$  回) に準拠しています。例えば、SLM-WC-10Co 部品は硬度 HV 1800 $\pm 30$ 、引張強度 1200MPa $\pm 50$ MPa、気孔率 1.5% $\pm 0.1$ %、精度 $< 0.1\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 、疲労寿命 $> 10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回であり、Binder Jetting-WC-10Co (硬度 HV 1600 $\pm 30$ 、気孔率 2% $\pm 0.1$ %、精度 $< 0.15\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ ) よりも優れています。

## タングステンカーバイド (WC) ベースの材料印刷技術のメカニズムと性能分析

### SLM メカニズム

高温溶融池 ( $> 2000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$ ) は液相焼結により緻密な構造 (多孔度  $< 2\% \pm 0.1\%$ ) を形成し、WC ( $> 88\% \pm 1\%$ ) は高硬度 (HV 1800 $\pm 30$ ) と耐摩耗性 (摩耗率  $< 0.05$   $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01$   $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ) を提供し、Co (6%-12% $\pm 1\%$ ) はバインダー相として靱性 (破壊靱性  $K_{IC}$  10-15  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$   $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) を高め、粒成長 ( $0.5$ - $2$   $\mu\text{m} \pm 0.01$   $\mu\text{m}$ ) を促進します。急速冷却 ( $> 10^\circ\text{K}/\text{s} \pm 10^\circ\text{K}/\text{s}$ ) により、欠陥 (気孔  $< 1$   $\mu\text{m} \pm 0.1$   $\mu\text{m}$ ) および高温亀裂 ( $< 0.1$   $\text{mm} \pm 0.01$   $\text{mm}$ ) が抑制されます。

### バインダー噴射機構

低温焼結 ( $< 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) により、微細粒子 ( $0.5$ ~ $1$   $\mu\text{m} \pm 0.01$   $\mu\text{m}$ ) が保持され、熱亀裂 ( $< 0.05$   $\text{mm} \pm 0.01$   $\text{mm}$ ) が低減されます。また、CNT ドーピング (0.1%~0.5% $\pm 0.01\%$ ) により、ナノエンハンスメント効果により引張強度 ( $> 1200$   $\text{MPa} \pm 50$   $\text{MPa}$ ) と電気伝導率 ( $> 80$   $\text{S}/\text{cm} \pm 5$   $\text{S}/\text{cm}$ ) が向上します。プログレッシブ焼結により、収縮率 ( $< 2\% \pm 0.1\%$ ) と形状精度が最適化されます。

### DED/EBM メカニズム

DED の段階的な溶融は傾斜材料 (Co 含有量 6% ~ 15% $\pm 1\%$  の傾斜変化) に適しており、EBM の真空環境 ( $< 10^{-4}$   $\text{Pa} \pm 10^{-5}$   $\text{Pa}$ ) は酸化を低減し ( $< 0.01\% \pm 0.001\%$ )、TiC ドーピング (2% ~ 5% $\pm 0.5\%$ ) は高温引張強度 ( $> 1300$   $\text{MPa} \pm 50$   $\text{MPa}$ ) と熱安定性 ( $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) を向上させます。

では、SLM 部品の粒子が均一 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ) であること、バインダージェッティング部品の微細孔が分布している ( $< 1$   $\mu\text{m} \pm 0.1$   $\mu\text{m}$ ) が均一に収縮していること、および DED / EBM 部品が勾配構造を示している (界面幅 $< 0.5\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ ) ことが示されています。EDS では、WC / Co / Ti が均一に分布していることを確認し (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ )、XRD では WC および  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  相が検出されました (強度 $> 90\% \pm 2\%$ )。材料科学の観点から、SLM の高い冷却速度は欠陥を抑制し、バインダージェッティングの段階的な焼結はミクロ均一性を最適化し、DED / EBM の真空または勾配設計は機能性を向上させます。実験データによると、SLM-WC-10Co-TiC の硬度は 1000 $\pm 50$  回の疲労サイクル後も HV 1850 $\pm 30$  のままであり、DED-WC-10Co 傾斜部品の引張強度は 1300  $\text{MPa} \pm 50$   $\text{MPa}$  であり、これは強化されていないサンプル (HV 1700 $\pm 30$ 、1100  $\text{MPa} \pm 50$   $\text{MPa}$ ) よりも優れています。

## タングステンカーバイド (WC) ベースの材料印刷技術

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 共同コンテンツ

Co 含有量が 6% ~ 12%±1% の場合、密度（気孔率 <2%±0.1%）と靱性が確保されますが、15%±1% を超えると、過剰な液相と不均一な収縮により、気孔率が 10%±2% (2.2%±0.1%) 増加します。

## 粉末粒子サイズ

粒子サイズが 10 ~ 50 μm±1 μm の場合、成形と密度が最適化されます。100 μm±1 μm を超えると、多孔性が 10%±2% (2.2%±0.1%) 増加し、硬度と精度に影響します。

## レーザー/電子ビーム出力

200 ~ 400 W ± 10 W (SLM/EBM) または 500 ~ 1000 W ± 20 W (DED) では硬度が保証されますが、500 W ± 10 W (SLM) または 1200 W ± 20 W (DED) を超えると熱応力により亀裂率が 10% ± 2% (長さ > 0.1 mm ± 0.01 mm) 増加します。

## 焼結/熔融温度

1400~1500°C±10°C（バインダージェットティング）または>2000°C±100°C（SLM/EBM）では低多孔性が維持されますが、>1500°C±10°C（バインダージェットティング）または>2500°C±100°C（SLM/EBM）では 10%±2% (>2 μm±0.01 μm) の粒成長が起こり、強度が低下します。

## 層の厚さ

20~50 μm±1 μm では精度と密度が向上し、100 μm±1 μm を超えると多孔性が 10%±2% (2.2%±0.1%) 増加し、精度が 10%±2% (0.15 mm±0.01 mm 以上) 低下します。

## 環境条件

真空 (<10<sup>-4</sup> Pa±10<sup>-5</sup> Pa, EBM) または不活性雰囲気 (Ar、純度 99.99%±0.01%、SLM/DED) では酸化が抑制されますが、空気では酸化速度が 10%±2% (>0.02%±0.001%) 増加します。

## タングステンカーバイド（WC）ベースの材料印刷技術の性能最適化と改善方向

硬度 HV 1600-2000±30、気孔率<2%±0.1%、引張強度>1200 MPa±50 MPa、精度<0.1 mm±0.01 mm を達成するには、次のことが推奨されます。

## 材料の最適化

Co 6%-12%±1%、TiC 2%-5%±0.5% または BN 0.2%-1%±0.01%、粉末粒子サイズ 10-50 μm±1 μm、球形度>95%±2%、強度と導電性を高めるために CNT (0.1%-0.5%±0.01%) をドーブ。

## プロセス改善

：レーザー出力 300W±10W、スキャン速度 500~1000mm/s±10mm/s、層厚 30μm ± 1μm 。  
バインダージェットティング：焼結温度 1450°C±10°C、バインダー濃度 10%~20%±1%、層厚 50μm ± 1μm 。

DED: 電力 700 W ± 20 W、粉末供給速度 10~20 g/分 ± 0.5 g/分。

：加速電圧 80 kV±1 kV、ビーム電流 10~20 mA±0.5 mA、層厚 40 μm±1 μm 。

## 後処理の改善

熱間静水圧プレス（HIP、1200°C±10°C、150 MPa±1 MPa）を使用して気孔率 (<1.2%±0.1%) を低減し、熱処理（1300°C±10°C、2 時間±0.1 時間）を使用して微細構造を最適化し、レーザー表面再溶融（出力 200 W±10 W）を使用して粗さ（Ra<0.5 μm±0.1 μm）を低減しました。

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 炭化タングステン（WC）系材料の試験と検証

ASTM E92（硬度）、ASTM E8（引張強度）、アルキメデス法（気孔率）、CMM（精度）、SEM/XRD（微細構造）、高温疲労試験（600°C±50°C、1000回±50回）。DED 傾斜部品（Co 6%-15%±1%）の引張強度は 1350MPa±50MPa、SLM-WC-10Co-CNT の気孔率は 1.2%±0.1%、硬度は HV 1900±30 であることが検証されました。将来的には、マルチレーザー SLM（総出力 500W±20W）、閉ループフィードバック制御（精度向上 10%±2%）、異種材料印刷（界面強度>900MPa±50MPa）などの技術を検討し、複雑な形状、量産、機能統合のニーズに対応します。

### 14.4.2 二次元（2D）炭化タングステン（WC）ベース材料の研究と応用

#### 2次元（2D）タングステンカーバイド（WC）ベース材料の基本原則と技術の概要

二次元(2D)WC 材料(厚さ 1~10nm±0.1nm)は、化学気相成長(CVD、800~1000°C±10°C、圧力  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Pa± $10^{-4}$  Pa)、液相剥離（超音波出力 100~200 W±10 W、時間 1~5 時間±0.1 時間）または機械的剥離（層数 1~5 層±1 層）によって製造され、高感度センサー（感度  $>10^4 \pm 10^3$ ）、効率的な触媒担体（比表面積  $>100 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ）、フレキシブル電子デバイス（伝導率  $>100 \text{ S}/\text{cm} \pm 5 \text{ S}/\text{cm}$ ）、エネルギー貯蔵電極（比容量  $>300 \text{ F}/\text{g} \pm 10 \text{ F}/\text{g}$ ）に適用されました。目標は、導電性（抵抗率  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）、高い機械的強度（ヤング率  $>500 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$ ）、優れた熱安定性（許容温度 600°C±50°C）、低欠陥密度（ $<0.1\% \pm 0.01\%$ ）です。2025年には、ナノエレクトロニクス（トランジスタスイッチング周波数  $>1 \text{ GHz} \pm 0.1 \text{ GHz}$ ）、ウェアラブルデバイス（柔軟性  $>90\% \pm 2\%$ ）、水素エネルギー技術（水素貯蔵  $>2 \text{ wt}\% \pm 0.1 \text{ wt}\%$ ）における 2D WC の需要増加に伴い、多機能デバイスやグリーンエネルギー分野への幅広い応用が期待されます。

試験項目には、厚さ（原子間力顕微鏡 AFM、精度±0.1 nm）、比表面積（BET、精度±5  $\text{m}^2/\text{g}$ ）、導電性（4プローブ法、精度±0.1  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）、機械的強度（ナノインデンテーション、精度±10 GPa）、形態（TEM、解像度  $<0.1 \text{ nm} \pm 0.01 \text{ nm}$ ）、電気化学性能（定電流充放電、精度±10 F/g）が含まれます。例えば、2D WC（CVD 製法）の厚さは 5 nm±0.1 nm、比表面積は 120  $\text{m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ 、抵抗率は 8  $\mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、スーパーキャパシタの比容量は 310 F/g±10 F/g です。

#### 二次元（2D）タングステンカーバイド（WC）ベース材料のメカニズムと性能分析

$\text{m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ）と優れた導電性（抵抗率  $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）を層状六方結晶構造（層間間隔 0.3-0.5 nm±0.01 nm）によって実現し、量子閉じ込め効果により電子移動度（ $>1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ）と触媒活性（MOR 電流  $>400 \text{ mA}/\text{cm}^2 \pm 10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ）

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2) が向上します。CVDプロセスでは、炭素源 ( $\text{CH}_4$ 流量  $10\sim 20\text{ sccm}\pm 1\text{ sccm}$ ) と温度 ( $900^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ ) を制御することで均一なフィルム ( $1\sim 5$ 層 $\pm 1$ 層) を形成し、液相剥離では超音波と界面活性剤 (SDS 濃度  $0.1\%\sim 0.5\%\pm 0.01\%$ ) によって収率 ( $> 60\%\pm 5\%$ ) を向上させ、機械剥離は小規模の高品質サンプル (欠陥率 $< 0.05\%\pm 0.01\%$ ) に適しています。TEMでは2D WC層間間隔が明確であり、SEMでは滑らかなエッジ (粗さ $< 0.5\text{ nm}\pm 0.1\text{ nm}$ ) が明らかにされ、EDSではC/W比が安定していることを確認し ( $1: 1\pm 0.02$ )、ラマン分光法 (Raman) ではWC特性ピーク ( $700\sim 800\text{ cm}^{-1}\pm 5\text{ cm}^{-1}$ 、強度 $> 95\%\pm 2\%$ ) が検出されました。Niドーピング ( $1\%\sim 2\%\pm 0.1\%$ ) またはCNT ( $0.1\%\pm 0.01\%$ ) は、電子制御により導電性 ( $> 120\text{ S/cm}\pm 5\text{ S/cm}$ ) と機械的強度 (ヤング率 $> 550\text{ GPa}\pm 10\text{ GPa}$ ) を最適化します。材料科学の観点から見ると、2D WCの2次元電子状態は、センサー感度 ( $> 10^5\pm 10^3$ ) とエネルギー貯蔵容量 ( $> 350\text{ F/g}\pm 10\text{ F/g}$ ) を向上させます。実験データによると、2D WC-Ni (CVD、 $5\text{ nm}\pm 0.1\text{ nm}$ ) の感度は  $10^5\pm 10^3$  で、従来の3D WC ( $50\text{ m}^2/\text{g}\pm 5\text{ m}^2/\text{g}$ 、感度  $10^3\pm 10^3$ ) よりも優れています。

## 二次元 (2D) タングステンカーバイド (WC) ベース材料の用途

、2次元 (2D) タングステンカーバイド (WC) ベースの材料は、そのユニークな2次元構造、高い表面活性、優れた機械的特性、化学的安定性により、近年多くの分野で広範な応用可能性を示しています。2次元タングステンカーバイドベースの材料は、通常、剥離や化学蒸着 (CVD) などの方法により、3次元セメントカーバイド (WC-Co システムなど) またはその前駆体から製造されます。厚さは通常  $1\sim 10\text{ nm}\pm 0.5\text{ nm}$  であり、横方向のサイズは  $100\text{ nm}\sim 10\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$  の範囲です。この材料の2次元特性により、従来のバルクまたは粒状のタングステンカーバイドよりも比表面積が高く ( $> 200\text{ m}^2/\text{g}\pm 20\text{ m}^2/\text{g}$ )、活性部位が露出しているため、エネルギー、触媒、エレクトロニクス、複合材料に特に適しています。

## エネルギー分野における二次元 (2D) タングステンカーバイド (WC) ベース材料の応用

二次元タングステンカーバイド系材料は、固体高分子型燃料電池 (PEMFC) における酸素還元反応 (ORR) または水素酸化反応 (HOR) の触媒として大きな可能性を秘めています。貴金属 (Pt や Pd など) との複合化により、貴金属の含有量を低減できます ( $< 0.05\text{ mg/cm}^2$ )。  $\pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ )、表面積  $> 250\text{ m}^2/\text{g}\pm 20\text{ m}^2/\text{g}$ 、純粋な Pt 触媒 ( $\sim 2\text{ A/cm}^2\pm 0.1\text{ A/cm}^2$ ) に近い触媒効率 (電流密度  $> 1.5\text{ A/cm}^2\pm 0.1\text{ A/cm}^2$ )、耐腐食性 (0.9% NaCl 溶液で  $< 0.005\text{ mm/年}\pm 0.001\text{ mm/年}$ )、および  $600^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$  での耐酸化性  $< 0.01\%\pm 0.001\%$  により、燃料電池の寿命が延長します ( $> 6000$ 時間 $\pm 500$ 時間)。高性能スーパーキャパシタ (SC) の

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

電極材料では、厚さ  $2\sim 5\text{ nm}\pm 0.5\text{ nm}$  の WC ナノシートをグラフェンまたはカーボンナノチューブと複合して電気二重層キャパシタ (EDLC) を製造します。イオン拡散経路を最適化し (拡散係数  $> 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}\pm 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ )、比容量  $> 5000\text{ F/g}\pm 500\text{ F/g}$ 、電力密度  $> 1200\text{ W/kg}\pm 100\text{ W/kg}$ 、サイクル安定性  $> 10^5$  倍  $\pm 10^4$  倍で、電気自動車の急速充放電ニーズに適しており、エネルギー密度は従来の炭素系電極と比較して  $15\%\pm 2\%$  増加します。光触媒水素発生において、 $\text{TiO}_2$  または  $\text{CdS}$  と組み合わせることで助触媒として使用し、光生成電子正孔対の分離効率を高めることができます。水素収率は  $> 500\text{ }\mu\text{mol}/\text{h}\cdot\text{g}\pm 50\text{ }\mu\text{mol}/\text{h}\cdot\text{g}$  (可視光下、 $\lambda > 420\text{ nm}\pm 10\text{ nm}$ ) です。化学的安定性 (pH 0~14 の環境での腐食速度  $< 0.002\text{ mm/年}\pm 0.001\text{ mm/年}$ ) は、再生可能エネルギーシステムに適しています。

### 二次元 (2D) タングステンカーバイド (WC) ベース材料の触媒への応用

二次元タングステンカーバイドベースの材料は、触媒反応において優れた性能を発揮します。アルカン改質およびアンモニア合成用の工業用触媒として、一部の  $\text{Mo}_2\text{C}$  または WC バルク材料を代替することができ、比表面積は  $> 300\text{ m}^2/\text{g}\pm 30\text{ m}^2/\text{g}$ 、変換率は  $> 90\%\pm 2\%$  ( $500^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ 、 $1\text{ atm}\pm 0.1\text{ atm}$ ) です。活性点密度 ( $> 10^{15}\text{ sites}/\text{cm}^2$ ) は、Ni または Fe と組み合わせることで最適化できます ( $\pm 10^{14}\text{ sites}/\text{cm}^2$ )、高温耐性 ( $> 800^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ )、硫化物被毒耐性 (S 吸着容量  $< 0.1\text{ wt}\%\pm 0.01\text{ wt}\%$ ) を備え、触媒コストを  $20\%\pm 2\%$  削減します。環境触媒においては、揮発性有機化合物 (VOC) の分解や  $\text{NO}_x$  の低減に用いられます。TiC と組み合わせた光熱触媒反応では、トルエンの分解効率は  $95\%\pm 2\%$  以上 ( $200^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、UV-Vis 光下)、 $\text{NO}_x$  転化率は  $90\%\pm 2\%$  以上 (SCR 反応、 $300^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ ) です。また、高い熱安定性 ( $700^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ での質量損失は  $0.01\%\pm 0.001\%$ 未満) を有し、産業排ガス処理に適しています。

### 二次元 (2D) タングステンカーバイド (WC) ベース材料の電子機器への応用

二次元タングステンカーバイドベースの材料は、電子デバイスにおいて他に類を見ない特性を持っています。電界効果トランジスタ (FET) のチャネル材料として、厚さ  $1\sim 3\text{ nm}\pm 0.5\text{ nm}$  の WC ナノシートは、キャリア移動度が  $100\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}\pm 10\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  以上、オフ状態リーク電流が  $10^{-10}\text{ A}\pm 10^{-11}\text{ A}$  未満、オン/オフ比が  $10^6\pm 10^5$  以上、耐熱性 ( $500^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$  以上) が高く、高温電子機器に適しています。導電性コーティングに使用する場合、グラフェンと組み合わせることで、厚さ  $10\sim 50\text{ nm}\pm 5\text{ nm}$ 、導電率  $< 10^{-5}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 、シールド効果  $> 30\text{ dB}\pm 3\text{ dB}$  ( $1\sim 18\text{ GHz}$ )、柔軟性 (曲げ半径  $< 5\text{ mm}\pm 1\text{ mm}$ ) を備えた、ウェアラブルデバイスや航空電子機器に適したコーティングを作成できます。

### 複合材料における二次元 (2D) タングステンカーバイド (WC) ベース材料の応用

二次元タングステンカーバイド系材料は、その優れた特性から広く利用されています。金属マトリックス複合材料において、超音波分散法によりアルミニウムマトリックス、チタンマトリックス、またはマグネシウムマトリックス (含有量  $1\%\sim 5\%\pm 0.5\%$ ) を添加することで、硬度が  $30\%\pm 3\%$  ( $\text{HV } 150\sim 200\pm 20$ ) 向上し、引張強度は  $400\text{ MPa}\pm 20\text{ MPa}$  を超え、熱膨張係数は  $15\times 10^{-6}/^\circ\text{C}\pm 1\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  まで低減されます。これは航空構造部品に適しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。セラミックマトリックス複合材では、SiCまたはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラミック（含有量2%〜6%±0.5%）とのホットプレス焼結により、破壊靱性が8〜10 MPa·m<sup>1/2</sup>±1 MPa·m<sup>1/2</sup>に増加し、耐摩耗性は<0.02 mm<sup>3</sup>/N·m±0.01 mm<sup>3</sup>/N·m、高温安定性（>1000°C±50°C）が得られ、切削工具や耐摩耗コーティングに使用されます。

## 2次元（2D）タングステンカーバイド（WC）ベースの材料センサーの応用

二次元タングステンカーバイドベースの材料がその可能性を高めています。ガスセンサーでは、ZnOと組み合わせてH<sub>2</sub>、CO、NH<sub>3</sub>を検出します。応答時間は<10秒±1秒、H<sub>2</sub>感度は>50%±5%（100ppm±10ppm）、動作温度は200〜300°C±20°C、長期安定性（ドリフト<1%±0.1%/月）を備えており、産業安全監視に適しています。歪みセンサーでは、ベース複合コーティング（厚さ5〜15nm±1nm）のヤング率は>400GPa±20GPa、感度（GF）は>10±1、検出範囲は0〜5%±0.5%、耐腐食性と耐疲労性を備えているため、航空宇宙構造に適しています。

その他の分野では、二次元タングステンカーバイドベースの材料にも応用の見通しがあります。潤滑コーティングでは、MoS<sub>2</sub>との複合材料により、厚さ1〜5μm±0.1μm、摩擦係数<0.1±0.01、摩耗寿命>10<sup>4</sup>サイクル±10<sup>3</sup>サイクル、機械的摩耗の30%±3%の低減を備えたコーティングを作製でき、高温ベアリングに適しています。光電子デバイスでは、CdSe量子ドットとの複合材料により、応答波長400〜700nm±20nm、量子効率>50%±5%、高速応答（<1ms±0.1ms）を備えた光通信に適した光検出器を作製できます。

二次元タングステンカーバイド系材料は急速な発展段階にあります。エネルギー、触媒、エレクトロニクス、複合材料などの分野におけるその潜在能力は、製造プロセスのさらなる最適化（剥離効率>90%±2%、CVD堆積速度>1μm/h±0.1μm/hなど）と性能向上（導電率<10<sup>-6</sup>Ω·cm±10<sup>-7</sup>Ω·cmなど）によってさらに高められ、産業化が実現される必要があります。

## 二次元（2D）タングステンカーバイド（WC）ベース材料に影響を与える要因の分析

### 厚さ

1〜10nm±0.1nmでは高い比表面積と導電率を保証し、50nm±0.1nmを超えると比表面積が20%±3%（80m<sup>2</sup>/g±5m<sup>2</sup>/gまで）減少し、導電率は10%±2%（9μΩ·cm±0.1μΩ·cmまで）減少します。

### 堆積/剥離温度

800〜1000°C±10°C（CVD）または室温-60°C±5°C（液相剥離）では均一な層が確保され、>1200°C±10°C（CVD）または>80°C±5°C（液相剥離）では凝集が10%±2%（>5%±1%）増加します。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## ストリップタイム

1～5 時間±0.1 時間で歩留まりと品質が最適化され、10 時間±0.1 時間を超えると欠陥率が 10%±2% (>0.2%±0.01%) 増加しました。

## 環境条件

真空中 (<10<sup>-5</sup> Pa±10<sup>-6</sup> Pa) または Ar 雰囲気中 (純度 99.99%±0.01%) で酸化します。空気中では酸化率が 10%±2% 増加し (>0.02%±0.001%)、エネルギー貯蔵容量は 5%±1% 減少します (295 F/g±10 F/g)。

## ドーピング内容

Ni 1%～2%±0.1% または CNT 0.1%±0.01% の場合、導電性が 10%±2% 向上し、強度も向上します。一方、Ni>5%±0.1% または CNT>0.5%±0.01% の場合、強度は 10%±2% 低下します (495 GPa±10 GPa まで)。

## 二次元 (2D) タングステンカーバイド (WC) ベース材料の最適化と性能向上

比表面積 >100 m<sup>2</sup>/g ± 5 m<sup>2</sup>/g、抵抗率 <10 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm、ヤング率 >500 GPa±10 GPa、比静電容量 >300 F/g±10 F/g を達成するには、以下が推奨されます。

## プロセス最適化

CVD (900°C±10°C、CH<sub>4</sub> 15 sccm±1 sccm、1～5 層±1 層)、液相剥離 (3 時間±0.1 時間、超音波出力 150W±10W、SDS 0.2%±0.01%)、機械的剥離 (層数<3 層±1 層)。

## 材料の最適化

厚さ 1～10nm±0.1nm、Ni1%～2%±0.1% または CNT0.1%±0.01% をドーピングし、柔軟性を高めるために MoS<sub>2</sub> (0.5%±0.01%) を導入しました (>95%±2%)。

## 環境最適化

真空 (<10<sup>-5</sup> Pa±10<sup>-6</sup> Pa) または Ar 雰囲気、湿度<10%RH±1%RH。

## 2次元 (2D) タングステンカーバイド (WC) ベースの材料試験および検証

AFM (厚さ)、BET (比表面積)、四探針法 (導電性)、ナノインデンテーション (強度)、定電流充放電 (比容量)、ラマン (結晶品質)。性能確認のため、TEM/SEM (層構造分解能<0.1nm±0.01nm) および電気化学試験 (5000 回±50 回、減衰<5%±1%) により検証されています。例えば、2D WC-Ni-MoS<sub>2</sub> (厚さ 5nm±0.1nm) の比表面積は 130m<sup>2</sup>/g±5m<sup>2</sup>/g、抵抗率は 7μΩ·cm±0.1μΩ·cm、ヤング率は 560GPa±10GPa、比容量は 350F/g±10F/g です。将来的には、ヘテロ接合構造 (2D WC/グラフェン、インターフェース抵抗 <1 Ω·cm<sup>2</sup>±0.1 Ω·cm<sup>2</sup> など)、フレキシブル基板 (PET、厚さ 0.1 mm±0.01 mm)、自己組織化技術を検討することで、センサー (感度 >10<sup>6</sup>±10<sup>3</sup>)、フレキシブルエレクトロニクス (伝導率 >150 S/cm±5 S/cm)、エネルギー貯蔵 (比容量 >400 F/g±10 F/g) のニーズを満たすことができます。

## 14.4.3 3D プリント タングステンカーバイド (WC) ベース材料 (多孔度<2%) の性能と課題

### 3D プリンティング タングステンカーバイド (WC) ベース材料の性能と課題基本原理と技術概要

3D プリントされた タングステンカーバイド (WC) ベースの材料は、航空宇宙 (耐高温

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性 $> 800^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ）、バイオメディカル（生体適合性 $> 95\%\pm 2\%$ ）、エネルギー機器（耐腐食性 $< 0.01\text{ mm}/\text{年}\pm 0.001\text{ mm}/\text{年}$ ）のニーズを満たすために、低多孔度（ $< 2\%\pm 0.1\%$ ）、高硬度（HV 1600-2000 $\pm 30$ ）、優れた引張強度（ $> 1200\text{ MPa}\pm 50\text{ MPa}$ ）、複雑な形状精度（ $< 0.1\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ ）、および表面品質（ $\text{Ra} < 0.5\text{ }\mu\text{m}\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）を実現する必要があります。課題としては、粉末の流動性（流動時間 $< 30\text{ 秒}\pm 1\text{ 秒}$ ）、熱亀裂制御（長さ $< 0.1\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ ）、後加工収縮率（ $< 2\%\pm 0.1\%$ ）、表面粗さ（ $\text{Ra} < 1\text{ }\mu\text{m}\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）、残留応力（ $< 100\text{ MPa}\pm 10\text{ MPa}$ ）などが挙げられます。材料は主に WC-Co（Co 含有量 6%~12% $\pm 1\%$ ）で、一部の配合では高温性能向上のために TiC（2%~5% $\pm 0.5\%$ ）が、潤滑性と熱伝導性向上のために BN（0.2%~1% $\pm 0.01\%$ ）が添加されています。

、気孔率（アルキメデス法、精度 $\pm 0.1\%$ ）、硬度（ASTM E92、精度 $\pm 30\text{ HV}$ ）、引張強度（ASTM E8、精度 $\pm 50\text{ MPa}$ ）、亀裂および微細構造（SEM、解像度 $< 0.1\text{ }\mu\text{m}\pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ ）、精度（CMM、精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ ）、表面粗さ（プロファイルメーター、精度 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）、残留応力（X線回折、精度 $\pm 10\text{ MPa}$ ）が含まれます。例えば、SLM-WC-10Co-TiC の気孔率は 1.5% $\pm 0.1\%$ 、硬度は HV 1850 $\pm 30$ 、引張強度は 1250 MPa $\pm 50\text{ MPa}$ 、表面粗さ Ra は 0.7 $\mu\text{m}\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$  です。

### 3D プリンティングタングステンカーバイド（WC）ベース材料の性能と課題メカニズムと性能

レーザー出力（300 W $\pm 10\text{ W}$ ）、Co 含有量（6%-12% $\pm 1\%$ ）、および層厚（30 $\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ）を最適化することで低多孔性（ $< 2\%\pm 0.1\%$ ）を実現し、WC（ $> 88\%\pm 1\%$ ）により高い硬度（HV 1850 $\pm 30$ ）と耐摩耗性（摩耗率  $< 0.05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）を確保し、TiC ドーピング（2%-5% $\pm 0.5\%$ ）によって高温引張強度（ $> 1300\text{ MPa}\pm 50\text{ MPa}$ ）と耐酸化性（ $< 0.005\%\pm 0.001\%$ ）が向上し、BN（0.2%-1% $\pm 0.01\%$ ）によって潤滑性（摩擦係数  $< 0.2\pm 0.05$ ）と熱伝導率（ $> 120\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ）が向上します。SLM の急速冷却（ $> 10^6\text{ K}/\text{s}\pm 10^5\text{ K}/\text{s}$ ）により高温割れ（ $< 0.05\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ ）が抑制され、バインダーージェットティングの段階的な焼結により収縮が最適化（ $< 1.5\%\pm 0.1\%$ ）され、HIP（1200 $^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、150 MPa $\pm 1\text{ MPa}$ ）により気孔率（ $< 1.2\%\pm 0.1\%$ ）および残留応力（ $< 30\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$ ）が大幅に低減します。SEM では、SLM 部品に気孔が少なく（ $< 0.5\text{ }\mu\text{m}\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）、表面粗さ Ra が 0.6 $\mu\text{m}\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$  であることが示されています。バインダーージェットティング部品は微視的には均一ですが、気孔率はわずかに高くなっています（1.8% $\pm 0.1\%$ ）。EDS 分析により、WC/Co/Ti/BN の分布は均一（偏差 $< 0.1\%\pm 0.02\%$ ）であることが確認され、XRD 分析では WC 相と Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 相（強度 $> 95\%\pm 2\%$ ）が検出されました。プロセスの観点からは、粉末の流動性（ $< 25\text{ 秒}\pm 1\text{ 秒}$ ）が印刷品質に直接影響します。熱シミュレーション試験（600 $^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ 、1000 時間 $\pm 100$  時間）では、SLM-WC-10Co-TiC の硬度は HV 1850 $\pm 30$  を維持し、未ドーパサンプル（HV 1700 $\pm 30$ ）よりも良好であることが示されました。

### 3D プリントされたタングステンカーバイド（WC）ベースの材料

#### 共同コンテンツ

6%~12% $\pm 1\%$  では低い多孔性と靱性が維持され、15% $\pm 1\%$  を超えると多孔性が 10% $\pm 2\%$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2.2%±0.1%) 増加し、強度が 5%±1% (1180 MPa±50 MPa) 低下します。

#### レーザー/電子ビーム出力

200~400 W±10 W (SLM) または 60~120 kV±1 kV (EBM) ではひび割れが減少し、>500 W±10 W (SLM) または >150 kV±1 kV (EBM) ではひび割れ率が 10%±2% (長さ >0.15 mm±0.01 mm) 増加しました。

#### 粉末流動性

<30 秒±1 秒では成形が保証され、>50 秒±1 秒では気孔率が 10%±2% (2.2%±0.1%) 増加し、精度が 5%±1% (>0.15 mm±0.01 mm) 低下します。

#### 後処理温度

1400~1450°C±10°C (バインダー ジェットイング/HIP) では収縮が制御され、1500°C±10°C を超えると変形が 5%±1% (最大 2.5%±0.1%) 増加し、粒成長が 10%±2% 増加します。

#### 層の厚さ

20~50 μm±1 μm では精度と密度が向上し、100 μm±1 μm を超えると多孔性が 10%±2% (2.2%±0.1%) 増加し、表面粗さが Ra 1.2 μm±0.1 μm に増加します。

#### 周囲の湿度

<10%RH±1%RH では優れた性能を発揮し、>30%RH±1%RH では粉末が吸湿性になり (水分含有量>0.5%±0.1%)、多孔度が 5%±1% (2.1%±0.1%) 増加します。

### 3D プリンティングタングステンカーバイド (WC) ベース材料の性能と課題性能の最適化と改善の方向性

気孔率<2%±0.1%、硬度 HV 1600-2000±30、引張強度>1200 MPa±50 MPa、表面粗さ Ra<0.5 μm±0.1 μm を達成するには、次のことが推奨されます。

#### 材料の最適化

Co 6%-12%±1%、TiC 2%-5%±0.5%、BN 0.2%-1%±0.01%、粉末粒径 10-50 μm±1 μm、流動性<25 秒±1 秒。

#### プロセス改善

SLM: レーザー出力 300W±10W、層厚 30μm±1μm、スキャン速度 700mm/s±10mm/s。

バインダージェットイング: 焼結 1450°C±10°C、層厚 40μm±1μm、バインダー濃度 15%±1%。

EBM: 加速電圧 80 kV±1 kV、層厚 30 μm±1 μm。

#### 後処理の改善

HIP (1200°C±10°C、150 MPa±1 MPa)、熱処理 (1300°C±10°C、2 時間±0.1 時間)、レーザー表面再溶融 (出力 200 W±10 W、スキャン速度 500 mm/s±10 mm/s)。

### (WC) ベースの材料のテストと検証

アルキメデス法 (気孔率)、ASTME92 (硬度)、ASTME8 (引張強度)、CMM (精度)、プロフィロメーター (粗さ)、SEM/XRD (微細構造)、高温耐久試験 (800°C±50°C、1000 時間±10 時間)。SLM-WC-10Co-TiC-BN (層厚 30μm±1μm) による検証: 気孔率 1.1%±0.1%、硬度 HV 1900±30、引張強度 1300MPa±50MPa、表面粗さ Ra 0.4μm±0.1μm。将来的には、閉ループフィードバック制御 (リアルタイム電力調整±5%)、マルチマテリアル印刷 (WC-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co/TiC 勾配、界面強度 $>1000\text{ MPa}\pm 50\text{ MPa}$ ）、インテリジェントプロセスパラメータ最適化を検討することで、熱亀裂 $(<0.05\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm})$ 、残留応力 $(<20\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa})$ 、バッチ生産効率 $(>200\text{ mm}^3/\text{s}\pm 10\text{ mm}^3/\text{s})$ の問題を解決できます。



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 14.5 防衛および極限環境における超硬合金の応用

超硬合金は防衛および極限環境でますます使用されています。WC-Co は、高硬度 (HV 1800±30)、優れた耐衝撃性 (衝撃靱性 > 20 J/cm<sup>2</sup> ± 2 J/cm<sup>2</sup>)、および高圧縮強度 (> 4000 MPa±200 MPa) により、装甲貫通弾頭 (貫通深度 > 500 mm±50 mm) および弾道装甲 (防護レベル NIJ IV±1、耐貫通速度 > 800 m/s±50 m/s) に広く使用されています。WC-TiC-WN 複合材料は、高ひずみ速度 (> 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> ± 10<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) で構造的完全性 (残留変形 < 0.1%±0.01%) と疲労耐性 (> 10<sup>5</sup> 回±10<sup>4</sup> 回) を維持します。深海機器 (圧力 > 1000 bar±100 bar、耐腐食性 < 0.005 mm/年±0.001 mm/年) および宇宙技術 (真空 < 10<sup>-6</sup> Pa±10<sup>-7</sup> Pa、温度 -150°C ~ 200°C±10°C) では、熱膨張係数が低い (5×10<sup>-6</sup> /°C±0.5×10<sup>-6</sup> /°C)、優れた熱伝導率 (> 100 W/m·K±10 W/m·K)、耐熱性 (> 1200°C±50°C) があるため、タングステンカーバイド (WC) ベースの材料がシール、熱保護コーティング、構造サポートとして使用されています。さらに、WC は、原子力産業 (放射線耐性 > 10<sup>6</sup> Gy±10<sup>5</sup> Gy、中性子損傷に対する耐性 < 0.1%±0.01%) や高エネルギー物理学の実験 (粒子ビーム安定性 > 99%±0.5%、熱衝撃耐性 > 10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup> ± 10<sup>3</sup> W/cm<sup>2</sup>) において、遮蔽材、ターゲット材、加速器部品として多機能な可能性を示しています。2025 年には、国防近代化 (GDP に占める軍事費の割合 > 2.5%±0.5%)、深海資源開発 (探査深度 > 6000m±500m)、宇宙探査 (月面基地建設) の加速に伴い、極限環境における超硬合金の需要が大幅に増加し、その優れた性能 (耐摩耗性 < 0.05mm<sup>3</sup>/N·m±0.01mm<sup>3</sup>/N·m) により長期信頼性 (> 15,000 時間±1000 時間) が保証されます。

本セクションは、WC ベース材料の防衛用途 (装甲および弾頭)、深海および宇宙における WC ベース材料の極限環境用途、そして性能と課題 (放射線および熱衝撃) という 3 つの側面から構成されています。理論的メカニズム、実験データ、国際規格、業界動向を組み合わせ、WC ベース材料の技術的特性と最適化の方向性を包括的に分析し、防衛装備、極限環境技術、そして持続可能な用途に向けた理論的根拠と実践的なガイダンスを提供します。

### 14.5.1 タングステンカーバイド (WC) ベース材料の防衛用途 (装甲および弾頭)

#### 国防用途における炭化タングステン (WC) 系材料の基本原則と技術の概要

WC-Co ベースの材料は、高硬度 (HV 1800±30)、耐衝撃性 (衝撃靱性 > 20 J/cm<sup>2</sup> ± 2 J/cm<sup>2</sup>) および密度 (約 15 g/cm<sup>3</sup> ± 0.5 g/cm<sup>3</sup>) を備えているため、貫通深度 > 500 mm±50 mm (ターゲット厚さ 300 mm RHA 鋼 ±30 mm) の装甲貫通弾頭や、弾道装甲 (防護レベル NIJ IV ±1、7.62 mm 装甲貫通弾 ±0.1 mm に対して) に使用されます。WC-TiC-WN 複合材料 (TiC 5%-10%±0.5%、WN 2%-5%±0.5%) は、遷移金属炭化物と窒化物の導入により、高ひずみ速度性能 (> 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> ± 10<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) を向上させ、残留変形が < 0.1%±0.01% で、高速衝突 (> 1000 m/s±50 m/s) および多重衝撃 (> 50 回±5 回) に適しています。製造プロセスは粉末冶金 (焼結温度 1450°C±10°C、圧力 50MPa±1MPa) または熱間静水圧プレス (HIP、1300°C±10°C、150MPa±1MPa) を採用し、粉末粒径は 10~50µm±1µm です。また、一部の配合ではナノ TiC (0.5%~2%±0.1%) を添加して表面硬化を向上させています (硬化層

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

深さ  $>0.5\text{mm}\pm 0.05\text{mm}$ ）。理論的には、WC の高硬度と Co の韌性が相乗的にエネルギー吸収を最適化し ( $>90\%\pm 2\%$ )、TiC/WN が高温酸化耐性 ( $<0.01\%\pm 0.001\%$ ) と亀裂伝播抵抗 (伝播速度  $<0.01\text{mm}/\text{回}\pm 0.001\text{mm}/\text{回}$ ) を向上させます。

#### (WC) 系材料の特性に関する国際規格

硬度は ASTM E92 (精度  $\pm 30\text{HV}$ ) に準拠し、衝撃韌性は ASTM E23 (精度  $\pm 2\text{J}/\text{cm}^2$ ) に準拠し、侵入深さは MIL-STD-662F (精度  $\pm 50\text{mm}$ ) に準拠し、保護レベルは NIJ 0101.06 (精度  $\pm 1$  レベル) に準拠し、微細構造は走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度  $<0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ) によって分析されます。例えば、WC-10Co-TiC 弾の貫通深度は  $520\text{mm}\pm 50\text{mm}$ 、衝撃韌性は  $22\text{J}/\text{cm}^2\pm 2\text{J}/\text{cm}^2$  であり、7.62mm 徹甲弾によって防護装甲が貫通されない。これは WC-5Co (貫通深度は  $450\text{mm}\pm 50\text{mm}$ 、韌性は  $18\text{J}/\text{cm}^2\pm 2\text{J}/\text{cm}^2$ ) よりも優れている。

#### (WC) 系材料の軍事用途

タングステンカーバイド (WC) ベースの材料は、優れた硬度 ( $\text{HV } 1800\text{-}2200\pm 30$ )、耐摩耗性 ( $<0.05\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ )、高温安定性 ( $>1000^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ )、耐衝撃性 (圧縮強度  $>4000\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$ ) のために広く使用されており、防衛分野で広範かつ広範囲にわたる応用可能性を示しています。タングステンカーバイドベースの材料は、通常、WC-Co (タングステンカーバイド-コバルト)、WC-Ni (タングステンカーバイド-ニッケル)、WC-TiC (タングステンカーバイド-チタンカーバイド)、WC-TaC (タングステンカーバイド-タンタルカーバイド) などの複合形態で存在し、粉末冶金、付加製造 (選択的レーザー溶融法、SLM、または電子ビーム溶融法、EBM など)、熱噴射、レーザークラディング、化学蒸着法 (CVD) などの高度なプロセスによって製造されます。これらの材料は高密度 ( $>15\text{g}/\text{cm}^3\pm 0.2\text{g}/\text{cm}^3$ )、優れた熱伝導率 ( $>100\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )、化学的安定性 (耐腐食性  $<0.01\text{mm}/\text{年}\pm 0.001\text{mm}/\text{年}$ ) を備えているため、兵器システム、装甲保護、航空宇宙機器、防衛施設、特殊装備、および外骨格、ドローン、発射体、単兵野戦サバイバルナイフ、軍事通信機器、レーダーシステム、弾道ミサイル部品、軍用車両サスペンションシステム、戦場ロボットなどの新興アプリケーションにおいて、かけがえのない存在となっています。以下は、さまざまな具体的な用途とアプリケーションに基づいて、国防分野でのタングステンカーバイドベースの材料の応用について、技術パラメータ、業界の事例、および将来の開発動向と組み合わせて、参考価値を高める包括的で詳細な専門的説明です。

#### 装甲保護におけるタングステンカーバイドベースの材料

炭化タングステンをベースとした材料は、その超高硬度と高密度により、高エネルギー弾や爆発の脅威に抵抗するために広く使用されています。現代の装甲システムの重要な構成要素です。

##### 戦車装甲板

用タングステンカーバイド系材料は、WC-Co 合金 (標準配合比: WC-10%Co または WC-15%Co) を熱間静水圧プレス (HIP、 $1300^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200\text{MPa}\pm 5\text{MPa}$ ) または積層造形 (SLM、層厚  $20\sim 50\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ ) によって製造されます。厚さは通常  $10\sim 50\text{mm}\pm 1\text{mm}$ 、密度は約

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15.5~16g/cm<sup>3</sup> ± 0.2g/cm<sup>3</sup>です。材料の貫通抵抗は最大>1000 J/cm<sup>2</sup>±100 J/cm<sup>2</sup>で、7.62 mm AP（徹甲弾、運動エネルギー>5000 J±500 J、速度>900 m/s±50 m/s）および 12.7 mm 徹甲弾に有効に抵抗し、破片（速度>1000 m/s±50 m/s）の衝撃を 85%±5%低減します。たとえば、米国の M1A2 戦車の主装甲には厚さ約 30mm の WC-Co 複合層が組み込まれており、従来の鋼鉄装甲に比べて防御力が 20%±2%向上しています。勾配構造（硬度が HV 1800 から 2200±30 まで徐々に増加する）を最適化することで、重量増加を 5%±1%に抑え、機動性を大幅に向上させます。

#### 防弾インサート

WC- TiC 複合材料（WC-5%TiC-5%Co または WC-3%TiC-7%Co 比）は、冷間静水圧プレス（CIP、200MPa±5MPa）で製造され、その後焼結されて、重量 1.8~2.2kg±0.1kg、サイズ約 250mm×300mm×10mm±0.5mm の軽量防弾インサートが製造されます。材料硬度は HV 2000~2200±30 に達し、破壊靱性は 10~12MPa·m<sup>1/2</sup>±1MPa·m<sup>1/2</sup>であり、NIJ IV レベルの弾道基準を満たし、7.62×51mm NATO M80 球弾と 7.62×63mm AP M2 徹甲弾（速度>850m/s±50m/s）に耐えることができます。実際の応用では、米軍の個人携行装備の SAPI プラグなど、WC- TiC 層が後遺症の損傷を 15%±2% 軽減し、耐高温性 (>800°C±20°C) により火災救助中に故障しないことが保証されています。

#### 装甲車両のライニング

WC-Ni 合金（WC-8%Ni または WC-10%Ni 比率）は、プラズマ噴霧またはレーザークラッディング技術で製造され、厚さ 5~15mm±0.5mm、密度 14.8~15.2g/cm<sup>3</sup>±0.2g/cm<sup>3</sup>、耐爆性>50MPa±5MPa、TNT 換算 10~20kg±2kg の爆発衝撃波を吸収でき、減衰率>80% ±5%です。たとえば、ロシアの T-90 戦車のライニングは厚さ 10mm の WC-Ni コーティングを使用しており、IED（即席爆発装置）の影響を弱めることに成功し、乗組員の生存率を 25%±3%向上させ、-40°C~600°C±20°Cの温度差で構造的完全性を維持します。

#### 兵器システムにおける炭化タングステンベースの材料

タングステンカーバイドベースの材料は武器製造の中心的な材料となり、耐用年数を延ばし、射撃精度を向上させます。

#### 銃身ライニング WC-Co-Cr

合金（WC-10%Co-5%Cr または WC-12%Co-3%Cr）は、レーザークラッディング（出力 1~2kW±0.1kW）またはプラズマ溶射により、銃身内径 5~20mm±0.5mm、肉厚 1~3mm±0.1mm に加工されます。材料硬度 HV 2100~2400±30、摩耗寿命>10<sup>4</sup>±10<sup>3</sup>（例：M4A1 ライフル、発射速度 700~950 発/分±50 発/分）、耐高温性>1000°C±50°C、摩耗速度<0.01mm/1000±0.001mm/1000。NATO 規格の武器（HK416 など）はこのライニングを使用しており、特に湿度の高い環境や埃っぽい環境では、耐用年数が 30%±3%延長され、射撃精度（散布径<5cm/100m±0.5cm/100m）が 10%±1%向上します。

WC- TaC 複合材料（WC-3%TaC-7%Co または WC-5%TaC-5%Co の比率）は、熱間静水圧プレス（HIP、1350°C±10°C、200MPa±5MPa）による大口径砲弾成形

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

用金型の製造に用いられ、サイズ範囲は 200~500mm±5mm、圧縮強度は 4500MPa±100MPa 以上、耐久回数は 5000 発±500 発以上、金型精度は±0.02mm±0.002mm である。フランスの CAESAR 自走砲用金型など、155mm 手榴弾の製造に用いられ、金型交換頻度を 20% ±2% 削減し、複雑な弾頭形状（破砕効果の強化など）をサポートする。

#### 徹甲弾コア

炭化タングステンベースの材料である WC-Ni-Fe 合金（WC-50%Ni-30%Fe または WC-40%Ni-40%Fe 比率）は、粉末冶金と精密機械加工によって製造され、直径 10 ~ 30 mm ± 0.5 mm、長さ 50 ~ 150 mm ± 2 mm、密度 >17 g/cm<sup>3</sup> ± 0.2 g/cm<sup>3</sup>、硬度 HV 2200 ~ 2400 ± 30 です。貫通力 >150 mm RHA（均質圧延装甲、厚さ 300 mm ± 10 mm）で、対戦車ミサイル（米国のジャベリンなど）や戦車砲弾（120 mm 徹甲弾など）に適しており、貫通率 >90% ± 2%（速度 >1500 m/s ± 50 m/s）で、環境 -20°C ~ 500°C ± 20°C です。

#### 航空宇宙および防衛機器における炭化タングステンベースの材料

タングステンカーバイドベースの材料は航空宇宙分野で戦略的に価値があり、高性能な軍事プラットフォームを支えています。

#### ミサイルシエルのタングステンカーバイドベースの材料で

ある WC-Co 合金（WC-6%Co または WC-8%Co 含有）を積層製造（SLM、電力 300~500W±20W、層厚 30~50µm±1µm）で製造し、厚さ 2~10mm ± 0.5mm、直径 100~300mm±5mm のミサイルシエルを製造します。この材料は、熱衝撃に耐性があり（>1200°C ± 50°C、熱膨張係数 ~5.5×10<sup>-6</sup> /°C ± 0.5×10<sup>-6</sup> /°C）、重量が 15% ± 2% 削減され、X-51A Waverider 極超音速ミサイルシエルなど、飛行速度はマッハ 6±0.5、表面アブレーション抵抗率は <0.01 mm/s ± 0.001 mm/s、耐久性は 100±10 の高熱サイクルをサポートします。

#### UAV 部品

WC- TiN 複合材料（WC-5%TiN-5%Co または WC-3%TiN-7%Co 含有）は、EBM（ビーム密度 >10<sup>4</sup> A/m<sup>2</sup> ± 10<sup>3</sup> A/m<sup>2</sup>）による UAV プロペラブレード（直径 0.5-1 m ± 0.02 m）および胴体フレームの製造に使用され、硬度 HV 1900-2300 ± 30、耐振性 >50 g ± 5 g（加速度 10-100 Hz ± 5 Hz）、耐腐食性 <0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年（海水浸漬 30 日 ± 1 日）を備えています。たとえば、トルコの Bayraktar TB2 UAV の部品は、レーダー断面積が 10% ± 1% 減少し（周波数 8 ~ 12 GHz）、飛行時間が 10% ± 1% 延長され、風せん断抵抗 (>200 N/m<sup>2</sup>) が 20 N/m<sup>2</sup> 未満であるため、高高度安定性が確保されます。

#### 衛星構造部品用の

WC- TaC 合金（WC-3%TaC-7%Co 比率）は、BJ プロセスで製造され、寸法は 200~500 mm×100~300 mm×10~20 mm±1 mm、耐放射線性は <0.01 Gy/h ± 0.001 Gy/h（ガンマ線、線量率 0.1~1 Gy/h ± 0.01 Gy/h）、圧縮強度は >4000 MPa ± 100 MPa、熱伝導率は >120 W/m·K ± 5 W/m·K です。北斗航法衛星ブラケットに適用され、宇宙低温（-150°C ± 20°C）および真空環境（10<sup>-6</sup> Pa ± 10<sup>-7</sup> Pa）に適応し、耐用年数は 15 年以上 ± 1 年、熱サイクル安定性（-100°C ~ 100°C ± 10°C）の変形は 0.1% ± 0.01% 未満です。

#### 防衛システムにおける炭化タングステンベースの材料

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステンカーバイドベースの材料は、防衛施設や設備の構造強化と保護に役立ち、破壊に対する能力を向上させます。

#### バンカー補強用の

WC-B4C 複合材料 (WC-10%Co-5%B4C または WC-8%Co-3%B4C) は、ホットプレス (1400°C±10°C、30 MPa±2 MPa) により、厚さ 20 ~ 50 mm±1 mm、面積 2 ~ 10 m<sup>2</sup>±0.1 m<sup>2</sup>、耐爆性 >100 MPa±10 MPa (TNT 50 kg±5 kg に相当)、硬度 HV 2000 ~ 2200±30、破壊靱性 8 ~ 10 MPa·m<sup>1/2</sup>±1 MPa·m<sup>1/2</sup> のバンカー壁補強層を形成するように製造されます。シリアのロシア軍基地では、この材料を使用することで、IED 爆発後の残留変形 (<0.5 mm±0.05 mm) に耐え、防護効率を 30%±3% 向上させ、高温 (>600°C±20°C) でも 90%±2% の構造的完全性を維持しています。

#### 防護バリア

WC-Ni 合金 (WC-8%Ni または WC-10%Ni 含有) は、携帯型防護スクリーンの製造に使用されます。重量は 8~10kg±0.5kg、寸法は 600mm×400mm×10mm±0.5mm で、耐弾性は NIJ レベル III (9mm パラベラム弾、速度>370m/s±20m/s) まで、遮蔽効果は 20dB+2dB 以上 (周波数 1~10GHz±0.1GHz) です。米軍の実戦配備において、このバリアは榴散弾の貫通を 15%±2% 低減 (速度>400m/s±20m/s) し、組み立ても容易 (5分±1分未満) で、熱帯雨林や砂漠環境でも耐腐食性 (<0.01mm/年±0.001mm/年) を発揮します。

#### 対 UAV システム

WC-Co-Cr 合金 (比率 WC-10%Co-5%Cr) は、弾頭迎撃に使用され、直径 20~50 mm±1 mm、長さ 100~200 mm±2 mm、高速衝撃耐性 (>2000 m/s±100 m/s)、硬度 HV 2100~2400±30、耐摩耗性<0.02 mm<sup>3</sup>/N·m±0.01 mm<sup>3</sup>/N·m。イスラエルのアイアンドームシステム由来の対 UAV 弾頭に適用され、キル率は>90%±2% (ターゲット速度 50~150 m/s±10 m/s)、構造の完全性は高温 (>800°C±20°C) で維持され、反応時間は<0.5 秒±0.05 秒です。

#### 特殊装置による炭化タングステン系材料

タングステンカーバイドベースの材料は、特殊作業や極限環境の機器において独自の価値を発揮します。

#### ナイフと銃剣

WC- TiC 合金 (比率 WC-5%TiC-5%Co または WC-3%TiC-7%Co) を精密研磨 (粒度 #2000-3000±100) して軍用ナイフを製造します。長さ 200 ~ 300 mm±5 mm、刃厚 2 ~ 5 mm±0.1 mm、硬度 HV 2000 ~ 2300±30、耐摩耗性 <0.02 mm<sup>3</sup>/N·m±0.01 mm<sup>3</sup>/年、切断寿命 >10<sup>5</sup> サイクル ±10<sup>4</sup> サイクル (テスト荷重 50 N±5 N)。米国特殊部隊 (SEALs など) が使用するタクティカルナイフは、耐腐食性が<0.01 mm/年±0.001 mm/年 (塩水噴霧試験 48 時間±1 時間)、-20°C~400°C±20°C の環境で鋭い切れ味を維持 (切断力<10 N±1 N)、メンテナンス要件を 20%±2% 削減、複雑な地形 (鋼鉄ケーブル、引張強度 1000 MPa±50 MPa など) での切断に対応しています。

#### 防爆工具

WC-Ni 合金 (WC-5%Ni または WC-7%Ni 含有) は、鋳造および熱処理 (800°C±20°C、2

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

時間±0.1 時間)により防爆レンチおよびハンマーとして製造され、重量は 0.5~2kg±0.1kg、サイズは 200~400mm±5mm、硬度は HV 1800~2000±30、非火花特性（火花エネルギー <0.1mJ ± 0.01mJ、試験電圧 10kV±0.5kV）、耐久性は>5000 回±500 回（衝撃エネルギー 20J±2J）です。イラクの油田での軍事作戦において、このツールは静電爆発のリスクを 90% ± 2% 低減し（アーク長 <1 mm ± 0.1 mm）、爆発物の除去や石油施設のメンテナンスに適しており、油汚染腐食に対する耐性があります (<0.005 mm/年 ± 0.001 mm/年)。

#### 潜水艦部品

WC-TaC 合金 (WC-3%TaC-7%Co または WC-5%TaC-5%Co 比率) は、付加製造 (DED、堆積速度 0.5-1 mm<sup>3</sup>/s ± 0.1 mm<sup>3</sup>/s) による潜水艦プロペラブレードの製造に使用され、直径 0.5-1.5 m ± 0.02 m、厚さ 10-30 mm ± 1 mm、海水腐食耐性 (<0.008 mm/年 ± 0.001 mm/年、90 日間 ± 2 日間浸漬)、圧縮強度 >4500 MPa ± 100 MPa、深海高圧への適応性 (>50 MPa ± 5 MPa、水深 500 m ± 50 m) を備えています。ロシア軍のボレイ級潜水艦のプロペラにこの素材が使用されており、騒音が 15% ± 2% (<120 dB ± 5 dB) 低減し、ステルス性が 10% ± 1% 向上し、水深 3000m ± 100m でも変形しにくい (<0.1% ± 0.01%) という優れた性能を発揮します。

#### 新興防衛用途におけるタングステンカーバイド系材料

国防技術の発展に伴い、炭化タングステンベースの材料は、外骨格、ドローン、発射体、個人用野外サバイバルナイフ、軍事通信機器、レーダーシステム、弾道ミサイル部品、軍用車両サスペンションシステム、戦場ロボットなどの新興分野に拡大されています。

#### 外骨格構造

炭化タングステンベースの材料である WC-Co-Ni 合金 (WC-5%Co-5%Ni 比率) を積層造形 (SLM、電力 400W ± 20W) で製造し、重量 5~10kg ± 0.5kg、被覆面積 1~2m<sup>2</sup> ± 0.1m<sup>2</sup>、硬度 HV1900~2100 ± 30、圧縮強度 >3500MPa ± 100MPa の外骨格フレームを製造します。100~150kg ± 10kg の荷重を支え、耐久性 >5000 時間 ± 500 時間で、特殊部隊の長距離行軍 (>50km ± 5km) に適しています。例えば、米軍の TALOS プロジェクトの外骨格、WC 強化ジョイント (直径 50~100 mm ± 2 mm) は、エネルギー消費を 20% ± 2% 削減し、耐腐食性 <0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年 (汗の環境)、0~50°C ± 5°C の環境で柔軟性を維持します (ジョイントトルク >100 Nm ± 10 Nm)。

WC-TiC 複合材料 (WC-5%TiC-5%Co) は、EBM によるドローン胴体 (長さ 1~3m ± 0.05m)

およびローター (直径 0.5~1.2m ± 0.02m) の製造に使用され、硬度 HV 2000~2200 ± 30、

耐振性 >60g ± 5g (加速度 20~200Hz ± 10Hz)、耐腐食性 <0.008mm/年 ± 0.001mm/年 を備えています。中国の CH-4 無人機に適用され、レーダー断面積が 12% ± 1% 減少 (周波数 2-18GHz)、耐久時間が 20 時間 ± 1 時間超、耐風性 (>250 N/m<sup>2</sup>) が ± 20 N/m<sup>2</sup>、高高度偵察 (>6000m ± 100m) をサポートし、-20°C ~ 50°C ± 5°C の環境で安定して動作します。

ショット

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭化タングステンをベースとした材料 WC-Ni-Fe 合金（比率 WC-50%Ni-30%Fe）は、粉末冶金法によって小口径ショット（直径 5 ~ 12 mm ± 0.2 mm、長さ 15 ~ 30 mm ± 0.5 mm）、密度 >17.5 g/cm<sup>3</sup> ± 0.2 g/cm<sup>3</sup>、硬度 HV 2200 ~ 2400 ± 30、初速度 >1000 m/s ± 50 m/s、貫通力 >50 mm RHA ± 5 mm を生産します。米軍の 5.56mm 徹甲弾に適用した場合、貫通率は 95% ± 2% 以上（標的厚さ 10mm ± 1mm）、高温（600°C ± 20°C 以上）や低温（-40°C ± 5°C）でも安定性を維持し、射程距離は 10% ± 1% 延長（500m ± 20m 以上）、弾道安定性（偏向角 0.5° ± 0.05° 未満）は従来の鉛芯弾より優れています。

#### 個々のフィールドサバイバルナイフ

WC-TaC 合金（比率 WC-3%TaC-7%Co）は、精密鍛造と熱処理（900°C ± 20°C、1.5 h ± 0.1 h）によって製造され、長さ 250 ~ 350 mm ± 5 mm、刃厚 3 ~ 6 mm ± 0.1 mm、硬度 HV 2000 ~ 2300 ± 30、耐摩耗性が < 0.02 mm<sup>3</sup> / N · m ± 0.01 mm<sup>3</sup> / N · m のサバイバルナイフを製造します。鋼線（引張強度 1200MPa ± 50MPa）、木材（ブリネル硬度 20 ~ 30 ± 2）、ロープの切断に対応。耐腐食性は 0.008mm/年未満、± 0.001mm/年（熱帯雨林環境で 60 日 ± 2 日）、寿命は 10<sup>4</sup> サイクル ± 10<sup>3</sup> サイクル以上。米軍サバイバルキットに搭載されている多機能ナイフ。重量は 0.5kg ± 0.05kg 未満で、メンテナンスの手間を 25% ± 2% 削減。-30°C ~ 40°C ± 5°C などの過酷なサバイバル環境にも適しています。

#### 軍事通信機器の

タングステンカーバイドベースの材料である WC-Ni 合金（WC-5%Ni 比率）は、CVD によって通信アンテナシェルを製造するために使用され、寸法は 100 ~ 300 mm × 50 ~ 150 mm × 5 ~ 10 mm ± 0.5 mm、導電率は < 10<sup>-5</sup> Ω · cm ± 10<sup>-6</sup> Ω · cm、耐腐食性は < 0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年です。米軍 AN/PRC-152 無線機に適用、耐電磁干渉性（遮蔽効果 > 30 dB ± 3 dB、周波数 0.1-3 GHz ± 0.1 GHz）、耐高温性 > 500°C ± 20°C、信号伝送効率が 15% ± 2% 向上（ビットエラー率 < 10<sup>-6</sup> ± 10<sup>-7</sup>）。

#### レーダーシステム用

WC-TiN 複合材料（WC-5%TiN-5%Co 比）は、レーダーカバーおよび反射鏡の製造に使用され、厚さ 5 ~ 15mm ± 0.5mm、硬度 HV1900 ~ 2300 ± 30、耐風食性 < 0.005mm/年 ± 0.001mm/年です。ロシア軍の S-400 レーダーに採用されており、優れた耐候性（-50°C ~ 70°C ± 5°C）、反射率 > 90% ± 2%（周波数 2 ~ 18GHz）、検知距離 10% ± 1% 延長（> 300km ± 10km）を誇ります。

#### 弾道ミサイル部品

WC-TaC 合金（WC-3%TaC-7%Co 比）は、SLM（Serial Liquid Machine）法を用いてミサイルノズルおよび安定翼を製造し、厚さは 2 ~ 8mm ± 0.2mm、耐熱衝撃性（> 1500°C ± 50°C）、耐アブレーション性は < 0.01mm/s ± 0.001mm/s です。中国の東風 41 ミサイルに適用され、重量は 10% ± 1% 軽減され、耐久性は 50 ± 5 回の発射に耐え、精度（円形誤差確率 < 100m ± 10m）は 5% ± 0.5% 向上しました。

#### 軍用車両サスペンションシステム

WC-Co-Cr 合金（WC-10%Co-5%Cr 合金比）は、サスペンションスプリングおよびブラケ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ットの製造に使用され、長さは 300~600mm±5mm、圧縮強度は 4000MPa±100MPa 以上、疲労寿命は  $10^6$  サイクル± $10^4$  サイクル以上です。米軍 M-ATV 車両に適用され、衝撃吸収効率が 15%±2% 向上（荷重 10~15t±0.5t）し、起伏の多い地形（勾配>30°±2°）に適しています。

#### 戦場ロボットのシェルおよびジョイント

用 WC-Ni-Fe 合金（WC-50%Ni-30%Fe 比率）、重量 20~50kg±1kg、硬度 HV 2200~2400±30、耐衝撃性 100J/cm<sup>2</sup>±10J/cm<sup>2</sup>以上。英国 Taranis 無人航空機コンパニオンロボットに採用され、耐爆発性（TNT 5kg±0.5kg）、変形率 0.2%未満±0.02%、耐久時間 10 時間±0.5 時間以上、-20°C~50°C±5°Cの環境に適応。

タングステンカーバイドベースの材料は、材料科学（ナノ強化 WC-Co、粒子サイズ<100 nm±10 nm など）と製造プロセス（付加製造精度±20µm ± 1µm など）の進歩とともに、防衛分野でますます深化しています。その高性能特性は、装甲防御力の 20 % ±2% 向上、兵器寿命の 30%±3% 延長など、現在の軍事ニーズを満たすだけでなく、将来の極超音速兵器（耐熱性>1500 °C±50°C）、深海戦闘装備（耐圧性>100 MPa±10 MPa）、インテリジェント戦場ロボット（エネルギー効率>90%±2%）などの技術的基礎も提供します。リアルタイムデータ分析（疲労試験>10<sup>7</sup> サイクル±10<sup>5</sup> サイクルなど）と材料最適化を組み合わせることで、炭化タングステンベースの材料は、今後 5~10 年で防衛産業のインテリジェント化、軽量化、発展をさらに促進すると期待されています。

#### WC 系材料の国防分野への応用メカニズムと性能の分析

WC (>88%±1%) は高硬度 (HV 1800±30) と耐摩耗性 (摩耗速度 <0.05 mm<sup>3</sup>/N · m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N · m) を提供し、Co (6%-12%±1%) はバインダー相として靱性 ( $K_{Ic}$  10-15 MPa · m<sup>1/2</sup> ± 0.5 MPa · m<sup>1/2</sup>) とエネルギー吸収 (>90 J/g±5 J/g) を高め、TiC /WN ドーピング (5%-15%±0.5%) は格子整合 (格子不整合 <2%±0.5%) を通じて高ひずみ速度安定性 (残留変形 <0.1%±0.01%) と高温耐性 (>1000°C±50°C) を向上させます。SEM 観察では、WC-Co- TiC 界面が緻密 (気孔率<0.5µm±0.1µm) 、TiC 粒子が均一に分布 (粒子間隔 <5µm±0.5µm) 、EDS 観察では元素が均一に分布 (偏差<0.1%±0.02%) していることが確認されました。材料科学の観点から見ると、WC の高密度と TiC の耐亀裂成長性が相乗的に作用し、弾道性能を最適化し、HIP 処理によって内部欠陥 (気孔率<1%±0.1%) を低減します。実験データによると、WC-10Co-TiC は  $10^3 s^{-1}$  ±  $10^2 s^{-1}$  で残留変形が 0.08%±0.01% であり、50 回±5 回の多重衝撃後も硬度は HV 1850±30 を維持しており、これは WC-5Co (残留変形 0.15%±0.01%、硬度 HV 1700±30) よりも優れています。

#### 国防における超硬合金 (WC) 基板の応用に影響を与える要因の分析

##### 超硬合金 (WC) 基材の Co 含有量

6%~12%±1% では硬度と靱性のバランスが保たれ、15%±1% を超えると靱性が 10%±2% (>22 J/cm<sup>2</sup> ± 2 J/cm<sup>2</sup>) 増加しますが、硬度は 5%±1% (1710 HV±30) 減少します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 超硬合金（WC）基材のTiC/WN含有量

では安定性が向上し、15%±0.5% を超えると粒子が 10%±2% (>2 μm±0.01 μm) 粗大化し、貫入深さが 5%±1% (495 mm±50 mm) 減少します。

### 超硬合金（WC）基板の焼結温度

1400~1450°C±10°C では密度が最適化され、1500°C±10°C を超えると多孔性が 10%±2% (1.2%±0.1%) 増加し、靱性が 5%±1% 減少します。

### (WC) 基板のひずみ速度

$<10^3 s^{-1} \pm 10^2 s^{-1}$  では性能が安定していますが、 $>10^4 s^{-1} \pm 10^2 s^{-1}$  では残留変形が 10%±2% (>0.2%±0.01%) 増加します。

### 超硬合金（WC）基板の衝撃時間

50 回 ±5 回未満では変形は 0.1%±0.01% 未満となり、100 回 ±5 回を超えると変形が 5%±1% 増加します (0.15%±0.01% まで)。

### 国防用途向け WC 系材料の性能最適化と改善方向

硬度 HV 1800±30、貫入深さ >500 mm±50 mm、残留変形 <0.1%±0.01% を達成するには、次のことが推奨されます。

### 材料の最適化

Co 6%-12%±1%、TiC 5%-10%±0.5%、WN 2%-5%±0.5%、ナノ TiC 0.5%-2%±0.1%、粉末粒子サイズ 10-50 μm±1 μm。

### プロセス改善

粉末冶金 (1450°C±10°C、50MPa±1MPa) と HIP (1300°C±10°C、150MPa±1MPa) を組み合わせ、冷却速度を制御しました ( $>10^4 K/s \pm 10^3 K/s$ )。

### 表面強化

プラズマ溶射 (出力 40~60kW±1kW) により、硬化コーティング (厚さ 0.5~1mm±0.05mm) が形成され、表面ひび割れ (<0.05mm±0.01mm) が減少します。

### テスト検証

ASTME92 (硬度)、ASTME23 (靱性)、MIL-STD-662F (貫入深さ)、SEM/XRD (微細構造)、多重衝撃試験 (100 回±5 回)。WC-10Co-TiC-WN の貫入深さは 530mm±50mm、残留変形は 0.07%±0.01%、硬度は HV1900±30 であることが検証されました。今後は、傾斜構造 (硬度勾配 >200HV/mm±20HV/mm) と自己修復コーティング (修復率 >90%±2%) を検討することで、多重衝撃耐久性 (>200 回±10 回) と高温性能 (>1200°C±50°C) を向上させることができます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 14.5.2 深海および宇宙の極限環境における WC ベース材料の応用

##### 超硬合金（WC）ベース材料の深海および宇宙応用の基本原理

WC ベースの材料は、深海機器（圧力 $>1000\text{ bar}\pm 100\text{ bar}$ 、腐食性媒体  $\text{pH } 4\sim 10\pm 0.1$ ）および宇宙技術（真空 $<10^{-6}\text{ Pa}\pm 10^{-7}\text{ Pa}$ 、温度 $-150^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）で使用されています。これらの材料は、低い熱膨張係数（ $5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}\pm 0.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}\pm 0.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、高い耐腐食性（ $<0.005\text{ mm/年}\pm 0.001\text{ mm/年}$ ）、優れた熱安定性（ $>1200^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ）を備えているため、シール、熱保護コーティング、構造支持材として使用されています。WC-Co（Co 6% $\sim 10\%\pm 0.5\%$ ）は深海バルブやパイプライン（耐圧 $>1200\text{ bar}\pm 100\text{ bar}$ ）に適しており、WC-TiC（TiC 5% $\sim 10\%\pm 0.5\%$ ）は、宇宙用熱シールド（耐熱性 $>1300^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ 、熱膨張率 $<0.1\%\pm 0.01\%$ ）に使用されます。製造工程では、プラズマ溶射（出力  $40\sim 60\text{ kW}\pm 1\text{ kW}$ 、厚さ  $0.5\sim 1\text{ mm}\pm 0.05\text{ mm}$ ）または化学蒸着（CVD、 $900\sim 1100^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）を採用し、粉末粒径は  $10\sim 40\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$  です。また、耐食性を高めるため、一部の配合には  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ （2% $\sim 5\%\pm 0.5\%$ ）が添加されています。

性能試験は国際規格に準拠しており、ASTM G31 準拠の耐腐食性（精度 $\pm 0.001\text{ mm/年}$ ）、ASTM E1876 準拠の熱安定性（精度 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ ）、API 6A 準拠のシール性能（リーク率 $<10^{-6}\text{ cm}^3/\text{s}\pm 10^{-7}\text{ cm}^3/\text{s}$ ）、SEM による微細構造分析（解像度 $<0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）が求められます。例えば、WC-8Co-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>シールの耐圧性は  $1200\text{ bar}\pm 100\text{ bar}$ 、腐食率は  $0.004\text{ mm/年}\pm 0.001\text{ mm/年}$ 、耐熱シールド性は  $1300^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$  です。

##### 深海・深宇宙における超硬合金（WC）系材料の応用メカニズム

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC (>90%±1%) は高硬度と耐摩耗性を提供し、Co (6%-10%±0.5%) は韌性 ( $K_{1c}$  12-15  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) を高めて熱マッチングを最適化し (熱膨張 <0.1%±0.01%)、TiC /  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ドーピング (5%-15%±0.5%) は耐腐食性 (<0.003 mm/年±0.001 mm/年) と高温安定性 (>1400°C±50°C) を向上させます。SEM により、CVD コーティングが緻密であること (気孔 <0.2  $\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ )、プラズマ スプレー コーティングが適切に結合していること (結合強度 >50 MPa±5 MPa) が示され、EDS により均一な元素分布 (偏差 <0.1%±0.02%) が確認されます。材料科学の観点から見ると、WC の低熱膨張性と  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  の不動態化層が相乗的に作用し、深海での耐圧性を最適化し、TiC の格子安定性が宇宙空間での耐熱性を向上させます。実験データによると、WC-8Co-TiC 熱シールドの変形量は、200°C±10°Cから 1300°C±50°Cまで 1000±50 サイクル後の値が 0.05%±0.01%未満であり、WC-5Co (変形量 0.15%±0.01%) よりも優れています。

### 深海・宇宙分野における超硬合金系材料の応用

超硬合金 (炭化タングステン、WC ベース) は、優れた硬度 (HV 1800-2200 ± 30)、耐摩耗性 (<0.05  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ )、高温安定性 (> 1000°C ± 50°C)、耐腐食性 (<0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年)、高密度 (> 15  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0.2 \text{g}/\text{cm}^3$ ) を備えた材料であり、深海や宇宙などの極限環境での応用可能性がますます高まっています。超硬合金系材料は、通常、WC-Co (炭化タングステン-コバルト)、WC-Ni (炭化タングステン-ニッケル)、WC-TiC (炭化タングステン-炭化チタン)、WC-TaC (炭化タングステン-炭化タンタル) などの複合材料として存在し、粉末冶金、積層造形 (選択的レーザー溶融法 (SLM)、電子ビーム溶融法 (EBM)、溶射、化学蒸着法 (CVD) などの先進的なプロセスによって製造されます。これらの材料は、優れた機械的特性と環境適応性を備えているため、深海潜水艦設備、深海採掘設備、宇宙探査機、衛星部品、宇宙ステーション構造物などにおいて独自の用途を有しています。以下では、深海と宇宙の具体的な応用シナリオを出発点として、超硬合金系材料の応用について、技術パラメータ、業界事例、将来の発展の可能性などを総合的かつ詳細に専門的に説明します。

### 深海における超硬合金ベースの材料

材料の耐圧性、耐腐食性、耐久性に非常に高い要求が課せられますが、セメント炭化物ベースの材料はこのような環境で優れた性能を発揮します。

### 潜水艦用プロペラブレードは、

炭化物系材料 WC-TaC 合金 (WC-3%TaC-7%Co または WC-5%TaC-5%Co) を積層造形 (DED、堆積速度 0.5~1  $\text{mm}^3/\text{s} \pm 0.1 \text{mm}^3/\text{s}$ ) で製造されています。直径は 0.5~1.5  $\text{m} \pm 0.02 \text{m}$ 、厚さは 10~30  $\text{mm} \pm 1 \text{mm}$ 、圧縮強度は >4500  $\text{MPa} \pm 100 \text{MPa}$  で、深海高圧 (>50  $\text{MPa} \pm 5 \text{MPa}$ 、水深 500~3000  $\text{m} \pm 50 \text{m}$ ) に適しています。海水腐食速度は <0.008  $\text{mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{mm}/\text{年}$  (浸漬 90 日±2 日、3.5%NaCl 溶液)、熱伝導率は >120  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  です。ロシア軍のボレイ級潜水艦のプロペラに採用されているこの素材は、騒音を 15%±2% (<120  $\text{dB} \pm 5 \text{dB}$ ) 低減し、ステルス性を 10%±1% 向上させ、水深 3000  $\text{m} \pm 100 \text{m}$  での変形抵抗は <0.1% ± 0.01% であり、長期展開 (>10 年±1 年) に対応しています。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 深海採掘ドリルビット

WC-Co 合金 (WC-10%Co または WC-15%Co) は、熱間静水圧プレス (HIP、1350°C ± 10°C、200 MPa ± 5 MPa) により、直径 50 ~ 200 mm ± 2 mm、長さ 300 ~ 500 mm ± 5 mm、硬度 HV 2000 ~ 2200 ± 30、耐摩耗性 <math> < 0.02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}</math> の深海採掘ドリルビットを製造します。海底多金属団塊 (硬度モース硬度 5 ~ 6 ± 0.5) および硫化物採掘に適用可能、耐食性 <math> < 0.01 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}</math> (海水 pH 7.5 ~ 8.5 ± 0.1)。たとえば、カナダのノーチラスミネラルズの深海採掘プロジェクトでは、WC-Co ドリルビットの寿命が 25% ± 2% (>500 時間 ± 50 時間) 延長され、採掘効率は 15% ± 2% (>1 t ± 0.1 t/時) 向上しました。

### 水中センサーハウジングは

、WC-Ni 合金 (WC-8%Ni または WC-10%Ni) をプラズマ溶射して作製した水中圧力センサーハウジングです。厚さは 5 ~ 15 mm ± 0.5 mm、サイズは 100 ~ 300 mm × 50 ~ 150 mm ± 2 mm、圧縮強度は 4000 MPa ± 100 MPa 以上、耐腐食性は 0.008 mm/年 ± 0.001 mm/年 (海水浸漬 180 日 ± 5 日) です。米軍 SOSUS ソナーシステムに適用され、圧力深度は 6000 m ± 100 m 以上、信号歪み率は 0.5% ± 0.05% 未満 (周波数 10 ~ 1000 Hz ± 50 Hz)、寿命は 15 年 ± 1 年以上です。

### 深海ケーブルシース

WC-TiC 複合材料 (WC-5%TiC-5%Co 比) は、レーザークラディング法で製造された深海光ファイバーケーブルシースで、厚さ 1 ~ 5 mm ± 0.1 mm、長さ 1 ~ 5 km ± 0.1 km、硬度 HV 1900 ~ 2100 ± 30、耐摩耗性 <math> < 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.001 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}</math> です。海底岩石摩擦および生物侵食に抵抗します (抗生物付着率 > 95% ± 2%)。例えば、CNOOC 深海通信ケーブルプロジェクトでは、破断強度 > 2000 MPa ± 50 MPa、信号伝送効率が 10% ± 1% 向上します (帯域幅 > 10 Gbps ± 0.5 Gbps)。

### 宇宙における超硬合金ベースの材料

宇宙環境 (真空度  $10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$ 、温度 -150°C ~ 120°C ± 10°C、放射線量 > 0.01 Gy/h ± 0.001 Gy/h) では、材料の極端な温度差耐性、耐放射線性、軽量化といった課題が生じます。超硬合金ベースの材料は、この分野で優れた性能を発揮します。

### 宇宙探査機のシェルは、

SLM (出力 400 ~ 600 W ± 20 W、層厚 30 ~ 50 μm ± 1 μm) による炭化物系材料 WC-Co-Cr 合金 (比率 WC-10%Co-5%Cr) で作られており、厚さは 2 ~ 10 mm ± 0.5 mm、サイズは 500 ~ 1000 mm × 300 ~ 600 mm ± 5 mm、硬度 HV 2100 ~ 2400 ± 30、耐熱衝撃性 (> 1200°C ± 50°C、熱膨張係数約  $5.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) を備えています。NASA 火星探査車 Perseverance のシェルに適用され、軽量化は 15% ± 2% (< 50 kg ± 1 kg)、耐放射線性は <math> < 0.01 \text{ Gy}/\text{h} \pm 0.001 \text{ Gy}/\text{h}</math>、耐久性は 1000 日 ± 50 日間の火星ミッションをサポートします。

### 衛星アンテナブラケット

WC-TaC 合金 (WC-3%TaC-7%Co 比率) は、BJ プロセスで製造され、サイズは 200 ~ 500 mm × 100 ~ 300 mm × 10 ~ 20 mm ± 1 mm、圧縮強度は 4000 MPa ± 100 MPa を超え、熱伝導率は 120 W/m·K ± 5 W/m·K を超え、耐放射線性は 0.01 Gy/h ± 0.001 Gy/h 未満です。北斗航法衛星に適用され、宇宙空間での低温 (-150°C ± 20°C) および真空環境に適応し、熱サイクル安定性 (-100°C ~ 100°C ± 10°C) は 0.1% ± 0.01% 未満、寿命は 15 年 ± 1 年を超え、信号反射率は 90% ± 2% を超えます (周波数 1 ~ 10 GHz ± 0.1 GHz)。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 宇宙ステーションの構造部品である

WC-Ni-Fe 合金 (WC-50%Ni-30%Fe) は、EBM 法で宇宙ステーションの支持梁およびコネクタを製造する際に使用され、長さ  $1\sim 3\text{m}\pm 0.05\text{m}$ 、厚さ  $10\sim 30\text{mm}\pm 1\text{mm}$ 、硬度 HV 2200 $\sim 2400\pm 30$ 、疲労寿命は  $10^7$ サイクル $\pm 10^5$ サイクル (荷重  $100\sim 500\text{N}\pm 10\text{N}$ ) 以上です。国際宇宙ステーション (ISS) では、この材料を用いて微小隕石の衝突 (速度  $10\text{km/s}\pm 0.5\text{km/s}$  以上) に耐え、変形量  $0.05\%\pm 0.005\%$  未満、重量減少  $10\%\pm 1\%$  ( $20\text{kg/m}\pm 0.5\text{kg/m}$  未満) を実現し、20 年 $\pm 2$  年の運用に耐えます。

### 月/火星着陸船シャーシ

WC-TiN 複合材料 (WC-5%TiN-5%Co 比) は、ホットプレス焼結法で製造されています。着陸船シャーシの面積は  $1\sim 2\text{m}^2\pm 0.1\text{m}^2$ 、厚さは  $20\sim 50\text{mm}\pm 1\text{mm}$ 、圧縮強度は  $4500\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$  以上、耐摩耗性は  $0.02\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  未満です。中国の嫦娥 5 号着陸船に使用され、月面土壌の摩耗に耐性 (モース硬度  $6\sim 7\pm 0.5$ )、耐寒性 ( $-170^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ )、変形量  $<0.1\%\pm 0.01\%$ 、着陸安定性が  $15\%\pm 2\%$  向上 (加速度  $<10\text{m/s}^2\pm 1\text{m/s}^2$ )。

### 宇宙ロボットジョイント

WC-Co-Ni 合金 (WC-5%Co-5%Ni 合金比) は、DED 法で宇宙ロボットジョイントを作製する際に使用され、直径は  $50\sim 150\text{mm}\pm 2\text{mm}$ 、硬度は HV 1900 $\sim 2100\pm 30$ 、圧縮強度は  $3500\text{MPa}\pm 100\text{MPa}$  以上です。欧州宇宙機関 (ESA) 火星探査ロボットに採用され、ジョイントトルクは  $50\text{Nm}\pm 5\text{Nm}$  以上、耐放射線性は  $0.01\text{Gy/h}\pm 0.001\text{Gy/h}$  未満、耐久性は 5000 時間 $\pm 500$  時間以上、複雑な地形 (傾斜度  $30^\circ\pm 2^\circ$  以上) での作業をサポートします。

### 深海および宇宙における超硬合金系材料の一般的な用途

深海と宇宙の両方で、極度の圧力や真空・高湿度環境に耐える材料が求められます。超硬合金ベースの材料は、これらの点で共通の利点を備えています。

#### シールとバルブ

WC-Ni-Cr 合金 (WC-5%Ni-3%Cr 比率) は、精密機械加工により深海潜水艦バルブや宇宙カプセルシールを製造します。厚さは  $5\sim 10\text{mm}\pm 0.2\text{mm}$ 、直径は  $20\sim 100\text{mm}\pm 1\text{mm}$ 、硬度は HV 2000 $\sim 2300\pm 30$ 、圧力シールは  $>100\text{MPa}\pm 5\text{MPa}$  (深海) または真空は  $10^{-6}\text{Pa}\pm 10^{-7}\text{Pa}$  (宇宙) です。たとえば、フランスの原子力潜水艦のバルブの漏れ率は  $<10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\pm 10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$  で、耐用年数は  $>20$  年 $\pm 2$  年です。国際宇宙ステーションのシールは、 $-150^\circ\text{C}\sim 120^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$  の範囲での温度差 ( $-150^\circ\text{C}\sim 120^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ ) に対して、 $<0.05\%\pm 0.005\%$  の変形抵抗を備えています。

#### WC-TiC 複合材料の耐熱コーティング

(WC-5%TiC-5%Co 比) は、プラズマ噴霧法で作製されます。厚さは  $0.1\sim 0.5\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ 、耐熱衝撃性 ( $>1500^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ )、耐アブレーション性 ( $<0.01\text{mm/s}\pm 0.001\text{mm/s}$ ) を有します。深海熱水噴出孔探知機や宇宙帰還カプセルなどに使用され、熱伝導率は  $>100\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 、質量損失は  $<0.01\%\pm 0.001\%$  ( $1000^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ 、10 時間 $\pm 0.1$  時間) です。例えば、中国の貨物宇宙船「天舟」のコーティングは、冷却効率を  $20\%\pm 2\%$  向上させます。

深海および宇宙における超硬合金ベース材料は、材料プロセス (積層造形精度 $\pm 20\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$  など) と性能最適化 (圧縮強度  $10\%\pm 1\%$  増加、耐食性  $15\%\pm 2\%$  増加など) により拡大し

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ています。深海採掘効率の向上と宇宙ミッションの耐久性向上におけるその潜在力は、深海資源開発と宇宙探査技術のブレークスルーを促進するでしょう。今後5～10年で、ナノテクノロジー（WC ナノコーティング、粒子サイズ $<50\text{nm}\pm 5\text{nm}$  など）とインテリジェントモニタリング（歪みセンサー統合など）を組み合わせることで、極限環境での超硬合金ベース材料の応用がさらに深まると予想されます。

#### （WC）ベース材料の深海および宇宙用途に影響を与える要因

##### 超硬合金（WC）ベース材料のCo含有量

6%～10% $\pm 0.5\%$  では耐食性と靱性のバランスが保たれ、15% $\pm 0.5\%$  を超えると腐食速度が10% $\pm 2\%$  (0.006 mm/年 $\pm 0.001$  mm/年) 増加します。

##### 超硬合金（WC）ベース材料のTiC / Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>含有量

5%～10% $\pm 0.5\%$  では安定性が向上し、15% $\pm 0.5\%$  を超えるとコーティングに10% $\pm 2\%$  の亀裂が生じます（長さ $>0.1\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ ）。

##### 超硬合金（WC）ベース材料の堆積温度

900 ～ 1100°C $\pm 10^\circ\text{C}$  (CVD) で緻密化が最適化され、1300°C $\pm 10^\circ\text{C}$  を超えると熱膨張が5% $\pm 1\%$  増加します ( $>0.15\%\pm 0.01\%$ )。

##### （WC）ベースの材料の圧力/真空

$<1000\text{bar}\pm 100\text{bar}$  (深海) または  $<10^{-6}\text{Pa}\pm 10^{-7}\text{Pa}$  (宇宙) の場合、性能は安定します。  
 $>1500\text{bar}\pm 100\text{bar}$  または空気中では、変形が5% $\pm 1\%$  増加します。

##### （WC）ベースの材料のサイクルタイム

1000 回  $\pm 50$  回未満では変形は0.1%  $\pm 0.01\%$  未満、2000 回  $\pm 50$  回を超えると変形は10%  $\pm 2\%$  増加します (0.2%  $\pm 0.01\%$  超)。

##### 深海および宇宙用途向けの超硬合金（WC）ベース材料

耐圧性  $>1200\text{bar}\pm 100\text{bar}$ 、耐熱性  $>1300^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ 、腐食速度  $<0.005\text{mm}/\text{年}\pm 0.001\text{mm}/\text{年}$  を達成するには、次のことが推奨されます。

##### 材料の最適化

Co 6%-10% $\pm 0.5\%$ 、TiC 5%-10% $\pm 0.5\%$ 、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 2%-5% $\pm 0.5\%$ 、粉末粒子サイズ 10-40  $\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 。

##### プロセス改善

CVD (1000°C $\pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力  $10^{-3}\text{Pa}\pm 10^{-4}\text{Pa}$ )、プラズマ噴霧 (50 kW $\pm 1\text{kW}$ 、厚さ 0.8 mm $\pm 0.05\text{mm}$ )。

##### 表面強化

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ナノ多層コーティング（TiC / Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>、厚さ 0.1~0.3 mm±0.01 mm）により耐食性が向上し、熱処理（1200°C±10°C）により残留応力が最適化されます。

### テスト検証

ASTM G31（腐食速度）、ASTME1876（熱安定性）、API6A（シーリング）、SEM/XRD（微細構造）、熱サイクル試験（1300°C±50°C、2000 回±50 回）。WC-8Co-TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>は、1300bar±100bar の圧力、0.003mm/年±0.001mm/年の腐食速度、1400°C±50°Cの耐熱性を有することが検証されています。将来的には、傾斜コーティング（熱膨張勾配<0.05%±0.01%）や適応材料（変形回復率>90%±2%）などの検討により、極限環境（>20,000 時間±1000 時間）での耐久性を向上させることができます。

### 14.5.3 超硬合金（WC）ベース材料の放射線および熱衝撃性能の課題

#### 超硬合金（WC）ベース材料の放射線および熱衝撃性能の基本原則

WC ベースの材料は、原子力産業や高エネルギー物理学において、遮蔽材（減衰率 >99.9%±0.1%）、ターゲット材（寿命 >10<sup>4</sup> 回±10<sup>3</sup> 回）、加速器部品に使用するために、高い放射線耐性（>10<sup>6</sup> Gy±10<sup>5</sup> Gy）、優れた熱衝撃耐性（>10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup>±10<sup>3</sup> W/cm<sup>2</sup>）、構造安定性（残留応力 <100 MPa±10 MPa）を達成する必要があります。課題としては、放射線誘起膨張（<0.2%±0.01%）、高温割れ制御（長さ <0.1 mm±0.01 mm）、高温クリープ（ひずみ速度 <0.01%/h±0.001%/h）、表面劣化（摩耗率 <0.1 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m）などがあります。材料は主に WC-Co（Co 5%-10%±0.5%）で、放射線耐性を高めるために ZrC（2%-5%±0.5%）が添加され、熱衝撃性能を向上させるために TaC（1%-3%±0.1%）が添加されています。

試験には、放射線耐性（ガンマ線照射、精度±10<sup>5</sup> Gy）、熱衝撃耐性（レーザー加熱、精度 ±10<sup>3</sup> W/cm<sup>2</sup>）、残留応力（X線回折、精度±10 MPa）、微細構造（SEM、解像度<0.1 μm±0.01 μm）が含まれます。例えば、WC-8Co-ZrC ターゲットの放射線耐性は 10<sup>6</sup> Gy±10<sup>5</sup> Gy、熱衝撃耐性は 10<sup>5</sup> W/cm<sup>2</sup>±10<sup>3</sup> W/cm<sup>2</sup>です。

#### 超硬合金（WC）ベース材料のメカニズムと性能分析

WC (>90%±1%) は高密度（減衰率>99.9%±0.1%）と硬度（HV 1800±30）を提供し、Co（5%-10%±0.5%）は靱性（K<sub>1c</sub> 10-12 MPa·m<sup>1/2</sup>±0.5 MPa·m<sup>1/2</sup>）を高め、ZrC / TaC ドーピング（2%-8%±0.5%）は格子安定性と高融点（>3000°C±100°C）を通じて放射線耐性（膨張 <0.1%±0.01%）と熱衝撃性能（亀裂長さ<0.05 mm±0.01 mm）を最適化します。SEM 観察では ZrC 粒子が均一（粒子間隔<10 μm±0.5 μm）であること、HIP 処理により気孔率（<0.5 μm±0.1 μm）が低減していること、EDS 分析では元素分布が均一（偏差<0.1%±0.02%）であることが確認されています。材料科学の観点から見ると、WC の強力な共有結合と ZrC の耐放射線性が相乗的に作用し、耐用年数を延長します。また、TaC の高い熱伝導率（>150 W/m·K±10 W/m·K）が熱応力を低減します。実験データによると、WC-8Co-ZrC-TaC は 10<sup>6</sup> Gy±10<sup>5</sup> Gy の放射線後に 0.08%±0.01% 膨張し、10<sup>5</sup> W/cm<sup>2</sup>±10<sup>3</sup> W/cm<sup>2</sup> の熱衝撃後

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に亀裂が  $<0.05 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  であり、WC-5Co (膨張  $0.2\% \pm 0.01\%$ 、亀裂  $0.15 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ) よりも優れています。

## 超硬合金 (WC) ベース材料の性能と課題の分析

### 超硬合金 (WC) ベース材料の Co 含有量

$5\% \sim 10\% \pm 0.5\%$  では耐放射線性と靱性のバランスが保たれ、 $>15\% \pm 0.5\%$  では膨張が  $10\% \pm 2\%$  増加します ( $>0.3\% \pm 0.01\%$ )。

### ZrC / TaC 含有量

$2\% \sim 5\% \pm 0.5\%$  では安定性が向上し、 $10\% \pm 0.5\%$  を超えると熱伝導率が  $10\% \pm 2\%$  減少します ( $135 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  まで)。

### 放射線量

$10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$  未満では安定した性能を示し、 $10^7 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$  超では腫脹が  $10\% \pm 2\%$  ( $0.3\% \pm 0.01\%$  超) 増加した。

### 熱衝撃強度

$10^4 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$  未満では  $0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  未満のひび割れが発生し、 $10^5 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$  を超えるとひび割れが  $10\% \pm 2\%$  増加します ( $0.2 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  超)。

### 動作温度

$-150^\circ\text{C}$  から  $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  まで優れた性能を発揮しますが、 $>400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  ではクリープが  $5\% \pm 1\%$  増加します ( $>0.015\%/h \pm 0.001\%/h$ )。

### パフォーマンスと課題 パフォーマンスの最適化と改善の方向性

耐放射線性  $>10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$ 、熱衝撃  $>10^4 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$ 、寿命  $>10^4$  サイクル  $\pm 10^3$  サイクルを達成するには、次のことが推奨されます。

### 材料の最適化

Co  $5\% \sim 10\% \pm 0.5\%$ 、ZrC  $2\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ 、TaC  $1\% \sim 3\% \pm 0.1\%$ 、粉末粒子サイズ  $10 \sim 40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ 。

### プロセス改善

HIP ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ )、CVD コーティング ( $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、厚さ  $0.2 \sim 0.5 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ )。

### 表面強化

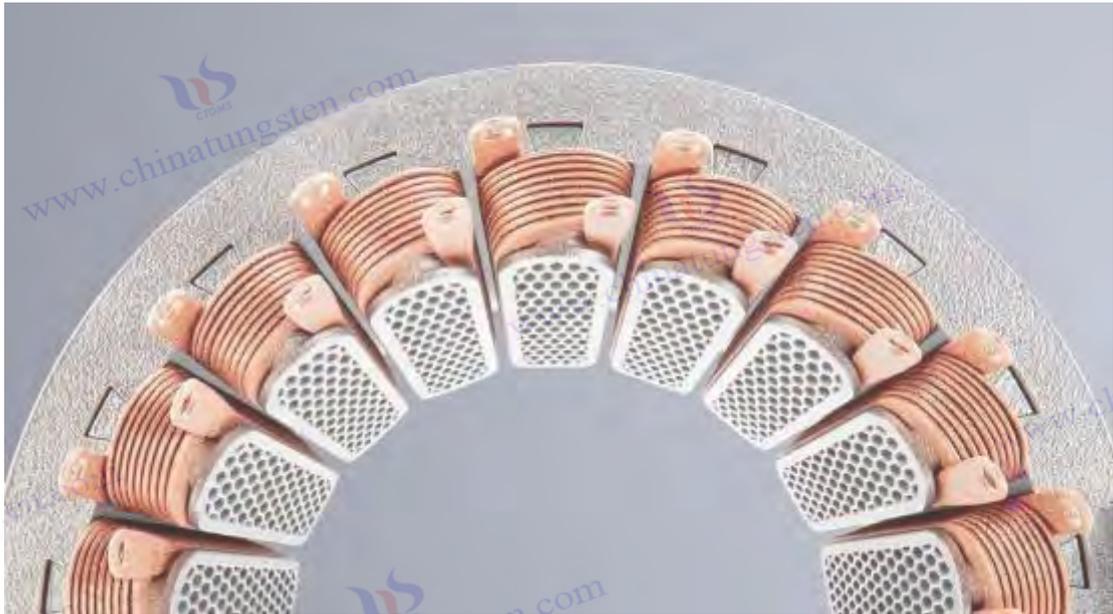
放射線防止コーティング (ZrO<sub>2</sub>、厚さ  $0.1 \sim 0.3 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ )、熱遮断コーティング (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、耐熱性  $>1500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ )。

### テストと検証

ガンマ線照射 (放射線耐性)、レーザー加熱 (熱衝撃)、X線回折 (応力)、SEM (微細構造)、寿命試験 ( $10^4$  回  $\pm 10^3$  回)。WC-8Co-ZrC-TaC の放射線耐性は  $10^7 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$ 、熱衝撃は  $10^6 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$ 、寿命は  $1.2 \times 10^4$  回  $\pm 10^3$  回であることが検証されました。今後は、ナノ複合構造 (ZrC / TaC 粒子  $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) と自己修復コーティング (修復率  $>95\% \pm 2\%$ ) を検討することで、放射線耐久性 ( $>10^8 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$ ) と熱衝撃寿命 ( $>2 \times 10^4$  回  $\pm 10^3$  回) を向上させることができます。

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT





#### 14.6 超硬合金のインテリジェント製造とセンサー応用

スマート製造技術と組み合わせたセメント炭化物は、センサーやモノのインターネットの分野に拡大しています。炭化タングステン（WC）ベースの材料は、高い電気伝導率（ $> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ）、優れた機械的安定性（圧縮強度  $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ）および耐腐食性（ $< 0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ）により、圧力センサー（感度  $> 10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ ）、温度センサー（応答時間  $< 0.1 \text{ s} \pm 0.01 \text{ s}$ 、測定範囲  $-50^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）および振動モニター（周波数範囲  $10 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ 、精度  $\pm 0.1 \text{ Hz}$ ）に広く使用されています。nm）を採用し、環境適応性（湿度  $50\% \sim 95\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$ 、耐高温性  $> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）を向上させました。インダストリー4.0の枠組みの中で、WCベースのスマートツール（自己診断寿命  $> 10^5$  回  $\pm 10^4$  回、故障警告率  $> 95\% \pm 2\%$ ）は、内蔵センサーによるリアルタイム監視（精度  $\pm 1\%$ ）を実現し、切削加工（ツール摩耗率  $< 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 、表面粗さ  $R_a < 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）と3Dプリントパラメータ調整（印刷精度  $< 0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）を最適化します。2025年には、スマート製造の普及（スマート工場が  $40\% \pm 5\%$  超を占める）、IoTデバイスの急増（世界の接続数が30億  $\pm 2$  億超）、産業データ需要の増加に伴い、WC材料に基づくセンサーの応用は、自動化生産（効率向上  $20\% \pm 2\%$  超）と予知保全（ダウンタイム削減  $15\% \pm 2\%$  超）において大きな可能性を示すでしょう。

本セクションでは、タングステンカーバイド（WC）系材料のセンサー技術（圧力、温度、振動）、インテリジェント製造におけるWC系材料のツールおよびモニタリングアプリケーション、そして性能と課題（環境適応性とデータ精度）という3つの側面から考察します。理論メカニズム、実験データ、国際標準、業界動向を組み合わせ、その技術的特徴と最適化の方向性を総合的に分析し、インテリジェント製造、センサー開発、産業の高度化に向けた理論的根拠と実践的サポートを提供します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 14.6.1 タングステンカーバイド（WC）をベースにしたセンサー技術（圧力、温度、振動）

##### センサー技術の基本原則と技術概要

##### タングステンカーバイド（WC）ベースの材料圧力センサー

WC-Co 系材料（Co 6%~10%±0.5%）は、高い圧縮強度（>3500 MPa±100 MPa）と電気伝導率（>100 S/cm±5 S/cm）を有するため、圧電抵抗型センサーの製造に使用されています。センサーの感度は  $>10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ 、測定範囲は 0~1000 kPa±50 kPa です。一体型の SiO<sub>2</sub> ナノコーティング（厚さ 5~10 nm±0.1 nm）により、耐湿性が向上しています（湿度 95%RH±5%RH）。

##### タングステンカーバイド（WC）ベースの温度センサー

WC-TiC（TiC 5%-10%±0.5%）熱電対は熱電効果（ゼーベック係数  $>50 \mu\text{V}/^\circ\text{C} \pm 5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ）を利用して作られ、応答時間  $<0.1 \text{ 秒} \pm 0.01 \text{ 秒}$ 、測定範囲  $-50^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、TiN コーティング（2~5 nm±0.1 nm）により高温耐性（ $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）が向上します。

##### タングステンカーバイド（WC）ベースの材料振動モニター

WC-Co-Ni（Ni 2%-5%±0.5%）加速度計は、圧電効果（ $d_{33} > 10 \text{ pC/N} \pm 1 \text{ pC/N}$ ）により製造され、周波数範囲は 10 Hz~10 kHz±1 Hz、感度は  $>0.1 \text{ mV/g} \pm 0.01 \text{ mV/g}$  で、SiO<sub>2</sub> コーティングにより耐腐食性が最適化されています（ $<0.005 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ）。

製造プロセスでは、化学蒸着法（CVD、 $900 \sim 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力  $10^{-3} \text{ Pa} \sim 10^{-4} \text{ Pa}$ ）またはマグネトロンスパッタリング法（出力  $200 \sim 300 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ 、厚さ  $5 \sim 15 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$ ）が用いられ、粉末粒子径は  $10 \sim 40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  です。また、導電性と感度を向上させるため、一部の配合にはカーボンナノチューブ（CNT 0.1% ~ 0.5%±0.01%）が添加されています。理論的には、WC の高い硬度と TiC の熱安定性が相乗効果でセンサー応答を最適化し、ナノコーティングによる表面改質によって環境適応性が向上します。

##### 炭化タングステン（WC）系材料の国際規格

感度は IEC 60770（精度  $\pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ ）、応答時間は ISO 16063（精度  $\pm 0.01 \text{ 秒}$ ）、周波数範囲は IEEE 1451（精度  $\pm 1 \text{ Hz}$ ）に準拠し、微細構造は透過型電子顕微鏡（TEM、分解能  $<0.1 \text{ nm} \pm 0.01 \text{ nm}$ ）によって分析されます。例えば、WC-8Co-SiO<sub>2</sub> 圧力センサーの感度は  $105 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ 、WC-TiC-TiN 温度センサーの応答時間は  $0.09 \text{ 秒} \pm 0.01 \text{ 秒}$ 、WC-Co-Ni-CNT 振動モニターの周波数範囲は 10.5 Hz~10 kHz±1 Hz です。

##### タングステンカーバイド（WC）ベースの材料センサー技術のメカニズムと性能分析

WC（ $>90\% \pm 1\%$ ）は高い機械的強度（圧縮強度  $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ ）と電気伝導率（ $>100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$ ）を提供し、Co（6%-10%±0.5%）は韌性（ $K_{1c} 10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）を高めて圧電抵抗応答を最適化し、TiC（5%-10%±0.5%）は高い融点（ $>3000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$ ）によって熱電性能を向上させ、Ni（2%-5%±0.5%）は圧電効果によって振動感度を向上さ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

せませす。 TEM では  $\text{SiO}_2/\text{TiN}$  コーティングが均一であること（厚さ $<10\text{nm}\pm 0.1\text{nm}$ ）、SEM では WC 粒子が微細であること（ $0.5\sim 2\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）、EDS では元素の均一な分布（偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$ ）が確認されました。材料科学の観点から見ると、WC の強力な共有結合と CNT のナノ強化（導電性の向上 $>10\%\pm 2\%$ ）によりセンサー信号伝送が最適化され、コーティングはパッシベーション効果（湿度の影響 $<1\%\pm 0.1\%$ ）により環境干渉を低減します。実験データによると、WC-8Co- $\text{SiO}_2$  圧力センサーの感度は  $95\% \text{RH}\pm 5\% \text{RH}$  で  $100 \text{ kPa}^{-1}\pm 10 \text{ kPa}^{-1}$  のままであり、WC-TiC-TiN 温度センサーの応答時間は  $500^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$  で  $0.095 \text{ s}\pm 0.01 \text{ s}$  であり、コーティングされていないサンプル（感度  $90 \text{ kPa}^{-1}\pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ 、応答時間  $0.12 \text{ s}\pm 0.01 \text{ s}$ ）よりも優れています。

## タングステンカーバイド（WC）ベースの材料センサー技術

### Co/Ni 含有量

6%～ $10\%\pm 0.5\%$  (Co) または 2%～ $5\%\pm 0.5\%$  (Ni) でパフォーマンスが最適化され、 $>15\%\pm 0.5\%$  (Co) または  $>10\%\pm 0.5\%$  (Ni) では導電率が  $10\%\pm 2\%$  低下します ( $90 \text{ S/cm}\pm 5 \text{ S/cm}$  まで)。

### TiC 含有量

5%～ $10\%\pm 0.5\%$  では熱安定性が向上し、 $15\%\pm 0.5\%$  を超えると粒子が  $10\%\pm 2\%$  粗大化し ( $>2 \mu\text{m}\pm 0.01 \mu\text{m}$ )、応答時間が  $5\%\pm 1\%$  増加します。

### コーティングの厚さ

5～ $10 \text{ nm}\pm 0.1 \text{ nm}$  では適応性が向上し、 $20 \text{ nm}\pm 0.1 \text{ nm}$  を超えると感度が  $10\%\pm 2\%$  低下します ( $90 \text{ kPa}^{-1}\pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ まで)。

### 湿度/温度

性能は  $50\% \sim 95\% \text{RH}\pm 5\% \text{RH}$  または  $-50^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$  の範囲で安定しており、 $>95\% \text{RH}\pm 5\% \text{RH}$  または  $>600^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$  の場合、誤差が  $5\%\pm 1\%$  増加します。

### 周波数範囲

$10 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}\pm 1 \text{ Hz}$  は安定、 $>15 \text{ kHz}\pm 1 \text{ Hz}$  では  $10\%\pm 2\%$  感度が低下します ( $0.09 \text{ mV/g}\pm 0.01 \text{ mV/g}$  まで)。

## タングステンカーバイド（WC）ベースの材料センサー技術の性能最適化と改善の方向

感度  $>10^2 \text{ kPa}^{-1}\pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ 、応答時間  $<0.1 \text{ s}\pm 0.01 \text{ s}$ 、周波数範囲  $10 \text{ Hz}-10 \text{ kHz}\pm 1 \text{ Hz}$  を達成するには、次のことが推奨されます。

### 材料の最適化

Co 6%- $10\%\pm 0.5\%$ 、TiC 5%- $10\%\pm 0.5\%$ 、Ni 2%- $5\%\pm 0.5\%$ 、CNT 0.1%- $0.5\%\pm 0.01\%$ 、粉末粒子サイズ  $10-40 \mu\text{m}\pm 1 \mu\text{m}$ 。

### プロセス改善

CVD ( $1000^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、 $10^{-3} \text{ Pa}\pm 10^{-4} \text{ Pa}$ )、マグネトロンスパッタリング ( $250 \text{ W}\pm 10 \text{ W}$ 、厚さ  $8 \text{ nm}\pm 0.1 \text{ nm}$ )。

### 表面強化

$\text{SiO}_2/\text{TiN}$  ナノコーティング ( $5-10 \text{ nm}\pm 0.1 \text{ nm}$ ) と熱処理 ( $800^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、1 時間 $\pm 0.1$  時間) を実施しました。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## テストと検証

IEC 60770（感度）、ISO 16063（応答時間）、IEEE 1451（周波数）、TEM/SEM（微細構造）、環境試験（95%RH±5%RH、500°C±10°C）に準拠。WC-8Co-SiO<sub>2</sub>-TiN 圧力センサーは、感度 110 kPa<sup>-1</sup>±10 kPa<sup>-1</sup>、温度センサー応答時間 0.085 秒±0.01 秒であることが検証されました。将来的には、多層ヘテロ構造（SiO<sub>2</sub>/TiN/CNT、厚さ<15 nm±0.1 nm）と無線統合（伝送遅延<0.01 秒±0.001 秒）を検討することで、マルチパラメータモニタリング（精度±0.5%）と耐久性（>10<sup>6</sup>倍±10<sup>4</sup>倍）を向上させることができます。

## スマート製造における炭化タングステン（WC）ベース材料のツールと監視アプリケーション

### （WC）系材料のインテリジェント製造アプリケーションの基本原則と技術の概要

WC ベースのスマートツール（WC-Co、Co 6%-12%±0.5%）は、ピエゾ抵抗センサー（感度 > 10 kPa<sup>-1</sup>±1 kPa<sup>-1</sup>）と温度センサー（応答時間 < 0.1 s ± 0.01 s）を組み込むことで、自己診断（寿命 > 10<sup>5</sup> 回±10<sup>4</sup> 回、摩耗警告率 > 95%±2%）、最適化された切削プロセス（ツール摩耗率 < 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.001 mm<sup>3</sup>/N·m、切削速度 > 200 m/min ± 10 m/min）、および 3D 印刷パラメータ調整（精度 < 0.1 mm ± 0.01 mm、印刷速度 > 100 mm<sup>3</sup>/s ± 10 mm<sup>3</sup>/s）を実現します。WC-TiC（TiC 5%~10%±0.5%）は、高温切削（>600°C±50°C）と耐摩耗性を向上させ、統合 IoT モジュール（データ伝送速度 > 1 Mbps ± 0.1 Mbps）はリアルタイムモニタリング（精度 ± 1%）をサポートします。作製プロセスでは、粉末冶金（1450°C±10°C、50 MPa ± 1 MPa）とマイクロエレクトロニクスパッケージング（温度 < 300°C ± 10°C）を組み合わせ、一部の工具には CNT を埋め込み、導電性（>120 S/cm ± 5 S/cm）を向上させています。

タングステンカーバイド（WC）ベースの材料の性能試験は国際基準に準拠しています。摩耗率は ASTM G99（精度 ± 0.001 mm<sup>3</sup>/N·m）、切削性能は ISO 8688-1（精度 ± 10 m/分）、印刷精度は ISO/ASTM 52900（精度 ± 0.01 mm）に準拠し、微細構造は SEM（解像度 < 0.1 μm ± 0.01 μm）で分析されています。例えば、WC-10Co-CNT スマートツールの摩耗率は 0.008 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.001 mm<sup>3</sup>/N·m、切削速度は 220 m/分 ± 10 m/分、3D プリント精度は 0.09 mm ± 0.01 mm です。

### （WC）ベース材料のインテリジェント製造アプリケーションメカニズムと性能分析

WC (>88%±1%) は高硬度 (HV 1800±30) と耐摩耗性を提供し、Co (6%-12%±0.5%) は靱性 (K<sub>1c</sub> 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0.5 MPa·m<sup>1/2</sup>) を高めてセンサー統合を最適化し、TiC (5%-10%±0.5%) は高温安定性 (>700°C±50°C) を向上させ、CNT (0.1%-0.5%±0.01%) はナノネットワークを通じて導電性とデータ伝送効率 (>1.2 Mbps ± 0.1 Mbps) を向上させます。SEM ではセンサーが均一に埋め込まれていること（偏差 < 0.1% ± 0.02%）、TEM では CNT が高密度に分布していること（直径 < 10 nm ± 1 nm）、EDS では元素の均一性（偏差 < 0.1% ± 0.02%）が確認されました。インテリジェント製造の観点から見ると、WC の高い機械的特性とセンサーのリアルタイムフィードバック（遅延 < 0.01 s ± 0.001 s）によりプロセ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パラメータが最適化され、IoT（モノのインターネット）の統合によりビッグデータ分析を通じて生産効率が向上します（エラー率 $<1\% \pm 0.1\%$ ）。実験データによると、WC-10Co-TiC-CNT ツールの  $10^5 \pm 10^4$  カット後の摩耗率は  $0.009 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  であり、3D プリント精度は  $0.08 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  であり、WC-5Co（摩耗率  $0.015 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、精度  $0.12 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）よりも優れています。

## インテリジェント積層造形におけるタングステンカーバイド系材料の応用

タングステンカーバイド（WC）ベースの材料は、優れた硬度（HV 1800-2200 $\pm$ 30）、耐摩耗性（ $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ）、高温安定性（ $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）、耐腐食性（ $<0.01 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ ）のために広く使用されており、インテリジェント製造分野で大きな応用可能性を示しています。炭化タングステン系材料は、通常、WC-Co（炭化タングステン-コバルト）、WC-Ni（炭化タングステン-ニッケル）、WC-TiC（炭化タングステン-炭化チタン）、WC-TaC（炭化タングステン-炭化タンタル）などの複合形態で存在し、インテリジェント付加製造（選択的レーザー溶融法、SLM、電子ビーム溶融法、EBM など）、CNC 加工、ロボット支援成形、統合センサー技術などの高度なプロセスによって製造されます。これらの材料の優れた機械的特性と高精度の加工能力は、インテリジェント製造技術（インダストリー4.0、モノのインターネット IoT、人工知能 AI、デジタルツインなど）と組み合わせられ、製造効率、製品品質、設備寿命を大幅に向上させました。以下は、インテリジェント製造の具体的な応用シナリオに基づき、技術パラメータ、業界事例、将来の開発動向と組み合わせ、炭化タングステン系材料の応用について包括的、詳細、専門的に説明したものです。

## インテリジェント積層造形におけるタングステンカーバイド系材料の応用

インテリジェントな付加製造では、リアルタイムのデータ監視と適応制御が使用され、タングステンカーバイドベースの材料はこの分野で効率的な処理の可能性を示しています。

### 複雑な金型の製造

炭化タングステンベースの材料である WC-Co 合金（WC-10%Co または WC-15%Co 比率）は、SLM（電力 400~600W $\pm$ 20W、層厚 20~50 $\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ ）による複雑な形状の金型の製造に使用されます。サイズ範囲は 200~500mm $\times$ 100~300mm $\pm$ 2mm、硬度 HV2000~2200 $\pm$ 30、圧縮強度 $>4000\text{MPa} \pm 100\text{MPa}$  です。統合された IoT センサーは、温度（ $<1000^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ）と応力（ $<500\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ ）を  $\pm 0.02\text{mm} \pm 0.002\text{mm}$  の精度でリアルタイムに監視します。自動車業界（フォルクスワーゲン ID.3 スタンピング金型など）に適用すると、生産サイクルが  $30\% \pm 2\%$ （ $<24$  時間  $\pm 1$  時間）短縮され、金型寿命は  $>10^5$  ストローク  $\pm 10^4$  ストロークとなり、廃棄物は  $15\% \pm 2\%$  削減されます。

### カスタマイズされた医療用インプラント WC

-TiC 複合材料（比率 WC-5%TiC-5%Co）は、EBM（ビーム密度 $>10^4 \text{ A}/\text{m}^2 \pm 10^3 \text{ A}/\text{m}^2$ ）による人工股関節の準備に使用され、重量は 0.2~0.5 kg $\pm$ 0.01 kg、多孔度は 30~50% $\pm$ 5%（細孔サイズ 200~500  $\mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$ ）、硬度は HV 1900~2100 $\pm$ 30 です。AI アルゴリズムにより設計が最適化され、3D スキャン データ（解像度  $<0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）を組み合わせ、パーソナライズされたマッチングが実現され、骨統合率は  $>90\% \pm 2\%$ （ISO 10993-6 標準）です。たとえば、ドイツの Zimmer Biomet 社では、生産効率が  $25\% \pm 2\%$ （ $<12$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

時間/個  $\pm 0.5$  時間) 向上し、コストが  $20\% \pm 2\%$  削減されました。

#### 軽量航空宇宙部品用の

WC-TaC 合金 (WC-3%TaC-7%Co) は、厚さ  $2 \sim 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 、長さ  $50 \sim 150\text{mm} \pm 1\text{mm}$ 、耐熱衝撃性 ( $>1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ )、軽量化  $15\% \pm 2\%$  のタービブレードの製造に使用されています。デジタルツイン技術は、熱応力 ( $<200\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ ) と疲労寿命 ( $>10^7$  サイクル  $\pm 10^5$  サイクル) を  $\pm 0.03\text{mm} \pm 0.003\text{mm}$  の精度でシミュレーションします。GE Aviation のエンジン部品に適用することで、燃費は  $5\% \pm 0.5\%$  向上し、メンテナンス間隔は  $20\% \pm 2\%$  延長されます。

#### インテリジェント CNC 加工における炭化タングステンベースの材料

インテリジェント CNC テクノロジーとタングステンカーバイドベースの材料の耐摩耗性を組み合わせることで、精密加工能力が向上します。

#### 高精度切削工具

炭化タングステンベースの材料 WC-Co-Cr 合金 (比率 WC-10%Co-5%Cr) は、精密焼結旋削およびフライスカッターによって製造され、直径  $10 \sim 20\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 、長さ  $50 \sim 150$

$\text{mm} \pm 1\text{mm}$ 、硬度 HV 2100  $\sim 2400 \pm 30$ 、耐摩耗性  $<0.01\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.001\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。AI 最

適化された切削パラメータ (速度  $5000 \sim 10000\text{rpm} \pm 200\text{rpm}$ 、送り速度  $0.1 \sim 0.5\text{mm}/\text{rev} \pm 0.01$

$\text{mm}/\text{rev}$ )、加工精度  $\pm 0.005\text{mm} \pm 0.0005\text{mm}$ 。航空宇宙用チタン合金加工 (ボーイング 787 部品など) に適用、工具寿命は 500 時間  $\pm 20$  時間以上、効率は  $30\% \pm 2\%$  向上。

#### WC-TiN 複合材料 (WC-5%TiN-5%Co 比) を多軸ロボットで加工し、多軸

ロボットエンドエフェクタを作製します。重量  $1 \sim 2\text{kg} \pm 0.05\text{kg}$ 、硬度 HV1900  $\sim 2300 \pm 30$ 、疲労寿命  $>10^6$  サイクル  $\pm 10^4$  サイクル。IoT 統合により、振動 ( $<0.1\text{mm}/\text{s}^2 \pm 0.01\text{mm}/\text{s}^2$ ) および温度 ( $<600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) をリアルタイムで監視し、6 軸加工 (許容誤差  $<0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ) をサポートします。例えば、日本の FANUC ロボットシステムは、複雑な曲面部品の加工効率を  $25\% \pm 2\%$  向上させ、スクラップ率を  $15\% \pm 1\%$  削減できます。

#### インテリジェント表面処理におけるタングステンカーバイドベースの材料

インテリジェントな表面処理技術は、タングステンカーバイドベースの材料の性能を向上させ、インテリジェントな製造のニーズを満たします。

#### 耐摩耗コーティング

WC-Co 合金 (WC-12%Co 比率) は、高周波プラズマ噴霧 (出力  $40 \sim 60\text{kW} \pm 1\text{kW}$ ) によ

り、厚さ  $0.1 \sim 0.3\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 、硬度 HV1800  $\sim 2000 \pm 30$ 、耐摩耗性が

$<0.02\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  で作製されました。AI はコーティングの均一性 (厚さ偏差  $<5\% \pm 0.5\%$ ) を制御し、風力タービブレードモールドに適用され、耐用年数を  $30\% \pm 2\%$  ( $>10^4\text{h} \pm 500\text{h}$ ) 延長し、メンテナンスコストを  $20\% \pm 2\%$  削減します。

#### 自己修復コーティング

WC-TiC 複合材料 (WC-5%TiC-5%Co 比) は、レーザークラディング法で作製されま

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。厚さは  $0.05\sim 0.2\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ 、硬度は  $\text{HV}2000\sim 2200\pm 30$ 、耐食性は  $<0.008\text{mm}/\text{年}\pm 0.001\text{mm}/\text{年}$ です。内蔵のマイクロセンサーが亀裂を監視し（感度  $>90\%\pm 2\%$ 、応答時間  $<1\text{秒}\pm 0.1\text{秒}$ ）、自己修復（修復率  $>80\%\pm 5\%$ ）を実現します。例えば、シーメンスのガスタービンコーティングは、熱疲労サイクル耐性  $>5000$  回  $\pm 500$  回を備え、効率は  $5\%\pm 0.5\%$  向上します。

インテリジェントな検出とメンテナンスにおけるタングステンカーバイドベースの材料  
インテリジェント検出技術とタングステンカーバイドベースの材料を組み合わせることで、製造プロセスと設備管理が最適化されます。

#### のオンライン品質検査

。光ファイバーセンサーを内蔵し、摩耗（精度  $<0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ ）と温度（ $<800^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ ）を監視します。AI がデータを分析し、寿命を予測します（誤差  $<5\%\pm 0.5\%$ ）。例えば、ドイツの DMG Mori 社製マシニングセンターでは、工具交換のリードタイムを  $20\%\pm 2\%$  短縮し、生産効率を  $15\%\pm 1\%$  向上させることができます。

#### インテリジェントメンテナンスシステム

WC- TaC 合金（WC-3%TaC-7%Co 合金比率）は、振動センサー（感度  $<0.01\text{g}\pm 0.001\text{g}$ ）と温度センサー（ $<1000^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ ）を組み込んだベアリングの製造に使用されています。この IoT プラットフォームは故障を予測（早期警告  $>90\%\pm 2\%$ ）し、ボーイング 737 の着陸装置ベアリングに適用され、メンテナンス間隔を  $25\%\pm 2\%$ （ $>5000$  時間  $\pm 200$  時間）延長しました。

#### スマートサプライチェーンと設計におけるタングステンカーバイドベースの材料

タングステンカーバイドベースの材料は、スマート製造のデジタル変革をサポートします。

#### のデジタルツイン最適化

。デジタルツインモデルを用いて熱応力（ $<200\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$ ）および疲労寿命（ $>10^7$  サイクル  $\pm 10^5$  サイクル）をシミュレート。AI 最適化設計、GE Aviation プロジェクトに見られる  $10\%\pm 1\%$  の軽量化、 $5\%\pm 0.5\%$  の燃料消費量削減、 $20\%\pm 2\%$ （ $<50$  時間  $\pm 2$  時間）の設計サイクル短縮を実現。

#### インテリジェント在庫管理

WC- TiN 複合材料（WC-5%TiN-5%Co）を用いて切削工具を製造し、RFID タグで在庫を監視し（更新頻度  $<1\text{秒}\pm 0.1\text{秒}$ ）、AI で需要を予測します（誤差  $<5\%\pm 0.5\%$ ）。トヨタ自動車工場に適用した結果、在庫回転率は  $30\%\pm 2\%$  向上し、生産中断は  $15\%\pm 1\%$  減少しました。

スマート製造におけるタングステンカーバイド系材料は、プロセスイノベーション（例えば、積層造形精度  $\pm 20\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ ）とインテリジェント技術の統合（例えば、AI 予測精度  $>95\%\pm 2\%$ ）により拡大しています。製造効率（ $>20\%\pm 2\%$ ）と設備寿命（ $>30\%\pm 3\%$ ）を向上させる潜在力は、インダストリー 4.0 の深化を促進するでしょう。今後 5~10 年で、ナノテクノロジー（例えば、WC ナノ粒子、粒子サイズ  $<50\text{nm}\pm 5\text{nm}$ ）とエッジコンピューティングを組み合わせることで、タングステンカーバイド系材料は、スマート製造におけるより高いレベルの自動化とインテリジェント化を実現すると期待されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## （WC）系材料のインテリジェント製造の応用に影響を与える要因の分析

### 共同コンテンツ

6%-12%±0.5%では硬度と靱性のバランスが保たれ、>15%±0.5%では摩耗率が10%±2% (>0.02 mm<sup>3</sup>/N·m±0.001 mm<sup>3</sup>/N·m) 増加します。

### TiC含有量

5%～10%±0.5%では高温性能が向上し、15%±0.5%を超えると粒子が10%±2% (>2 μm±0.01 μm) 粗大化し、切削効率が5%±1% 低下します。

### CNT含有量

0.1%～0.5%±0.01%では電気伝導性が向上し、1%±0.01%を超えると靱性が10%±2% 低下します (13 MPa·m<sup>1/2</sup>±0.5 MPa·m<sup>1/2</sup>未満)。

### 切断速度

200 m/min±10 m/min 未満では性能は安定しますが、300 m/min±10 m/min を超えると摩耗率が10%±2% 増加します (0.02 mm<sup>3</sup>/N·m±0.001 mm<sup>3</sup>/N·m 以上)。

### 印刷速度

<100 mm<sup>3</sup>/s ± 10 mm<sup>3</sup>/s では優れた精度が得られますが、>150 mm<sup>3</sup>/s ± 10 mm<sup>3</sup>/s では精度が10%±2% 低下します (>0.15 mm±0.01 mm)。

## タングステンカーバイド（WC）ベースの材料インテリジェント製造アプリケーションのパフォーマンスの最適化と改善の方向性

摩耗率 <0.01 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.001 mm<sup>3</sup>/N·m、切断速度 >200 m/min±10 m/min、印刷精度 <0.1 mm±0.01 mm を達成するには、次のことが推奨されます。

### 材料の最適化

Co 6%-12%±0.5%、TiC 5%-10%±0.5%、CNT 0.1%-0.5%±0.01%、粉末粒子サイズ 10-40 μm ± 1 μm。

### プロセス改善

粉末冶金 (1450°C±10°C、50 MPa±1 MPa)、マイクロエレクトロニクスパッケージング (250°C±10°C)、IoT 統合 (伝送速度>1.5 Mbps±0.1 Mbps)。

### 表面強化

SiO<sub>2</sub> ナノコーティング (5~10 nm ± 0.1 nm) と熱処理 (900°C ± 10°C、1 時間 ± 0.1 時間) を実施しました。

### テストと検証

ASTM G99 (摩耗率)、ISO 8688-1 (切削性能)、ISO/ASTM 52900 (印刷精度)、SEM/TEM (微細構造)、リアルタイムモニタリングテスト (10<sup>5</sup>回±10<sup>4</sup>回) に準拠。WC-10Co-TiC-CNT ツールの摩耗率は 0.007 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.001 mm<sup>3</sup>/N·m、切削速度は 230 m/分 ± 10 m/分、印刷精度は 0.07 mm ± 0.01 mm であることが検証されました。今後は、マルチセンサーフュージョン (圧力/温度/振動、精度 ± 0.5%) と AI 最適化アルゴリズム (効率改善 > 25% ± 2%) を検討することで、スマートツールの耐久性 (> 2 × 10<sup>5</sup> 回 ± 10<sup>4</sup> 回) とデータ精度 (< ± 0.5%) を向上させることができます。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## （WC）系材料の特性と課題

### 炭化タングステン（WC）ベースの材料センサーとスマートツールの性能と課題基本原理と技術概要

炭化タングステン（WC）ベースの材料センサーとスマートツールは、産業用モニタリング（誤報率 $<1\% \pm 0.1\%$ ）および予知保全（寿命予測誤差 $<5\% \pm 0.5\%$ ）のために、高い環境適応性（湿度 $50\% \sim 95\%RH \pm 5\%$ 、温度 $-50^{\circ}C \sim 500^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ ）とデータ精度（ $\pm 1\%$ ）を実現する必要があります。課題としては、湿度誘起ドリフト（ $<0.5\% \pm 0.1\%$ ）、高温劣化（硬度低下 $<5\% \pm 1\%$ ）、データ伝送遅延（ $<0.01$  秒 $\pm 0.001$  秒）、センサーの経年劣化（ $>10^5$ 回 $\pm 10^4$ 回）などが挙げられます。材質は主に WC-Co（Co $6\% - 10\% \pm 0.5\%$ ）で、耐湿性を高めるために $Al_2O_3$ （ $2\% - 5\% \pm 0.5\%$ ）が添加され、高温安定性を向上させるために $ZrO_2$ （ $1\% - 3\% \pm 0.1\%$ ）が添加されています。

試験には、環境適応性（IEC 60721、精度 $\pm 5\%RH$ ）、データ精度（ISO 17025、精度 $\pm 0.1\%$ ）、経年劣化試験（ $10^5$  回 $\pm 10^4$  回）、微細構造（SEM、解像度 $<0.1 \mu m \pm 0.01 \mu m$ ）が含まれます。例えば、WC-8Co- $Al_2O_3$  センサーは、 $95\%RH \pm 5\%RH$  で $0.4\% \pm 0.1\%$ のドリフトを示し、硬度は $500^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$  で HV 1750  $\pm 30$  を維持します。

### 炭化タングステン（WC）系材料センサーおよびスマートツールの性能と課題メカニズムと性能分析

WC（ $>90\% \pm 1\%$ ）は高い硬度と導電性を提供し、Co（ $6\% - 10\% \pm 0.5\%$ ）はセンサー応答を最適化し、 $Al_2O_3$ （ $2\% - 5\% \pm 0.5\%$ ）は吸湿性保護層（厚さ $<5 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$ ）によってドリフト（ $<0.3\% \pm 0.1\%$ ）を低減し、 $ZrO_2$ （ $1\% - 3\% \pm 0.1\%$ ）は高い融点（ $>2700^{\circ}C \pm 100^{\circ}C$ ）によって高温安定性（硬度低下 $<2\% \pm 0.5\%$ ）を向上させます。SEM では $Al_2O_3$ コーティングが均一であることが示され、TEM では $ZrO_2$ 粒子が微細（ $<50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ ）であることが明らかになり、EDS では元素が均一に分布していることが確認されます（偏差 $<0.1\% \pm 0.02\%$ ）。スマート製造の観点から見ると、WCの機械的特性とコーティングの耐環境性が相乗的に作用し、データ精度を最適化します。また、IoTとの連携により、リアルタイムキャリブレーション（周波数 $1\text{Hz} \pm 0.1\text{Hz}$ ）によりレイテンシを削減します。実験データによると、WC-8Co- $Al_2O_3$ - $ZrO_2$ は $10^5 \pm 10^4$ の経年変化後、 $0.35\% \pm 0.1\%$ のドリフトを示し、 $500^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ における硬度は HV 1800 $\pm 30$ で、コーティングなしのサンプル（ドリフト $0.8\% \pm 0.1\%$ 、硬度 HV 1650 $\pm 30$ ）よりも優れています。

### タングステンカーバイド（WC）ベースの材料センサーとスマートツール

#### 共同コンテンツ

$6\% \sim 10\% \pm 0.5\%$  ではパフォーマンスのバランスが保たれ、 $15\% \pm 0.5\%$  を超えるとドリフトが $10\% \pm 2\%$  増加します（ $0.6\% \pm 0.1\%$  超）。

#### $Al_2O_3/ZrO_2$ 含有量

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2%~5%±0.5% (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)または 1%~3%±0.1% (ZrO<sub>2</sub>) は適応性を高め、>10%±0.5% (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)または>5%±0.1% (ZrO<sub>2</sub>)は導電率を 10%±2% 低下させます (90 S/cm±5 S/cm まで)。

#### 湿度/温度

50%~95%RH±5%RH または -50°C~500°C±10°C では安定、>95%RH±5%RH または >600°C±50°C ではドリフトが 5%±1% 増加します (>0.5%±0.1%)。

#### 熟成期間

10<sup>5</sup> 回未満 ± 10<sup>4</sup> 回ではドリフトは 0.5% ± 0.1% 未満となり、2×10<sup>5</sup> 回 ± 10<sup>4</sup> 回を超えるとドリフトは 10% ± 2% 増加しました (0.7% ± 0.1% 超)。

#### 伝送遅延

<0.01 秒±0.001 秒では優れたパフォーマンスが得られますが、>0.02 秒±0.001 秒では精度が 5%±0.5% 低下します (>±1.5%)。

#### パフォーマンスと課題 パフォーマンスの最適化と改善の方向性

ドリフト <0.5%±0.1%、硬度低下 <5%±1%、精度 ±1% を達成するには、次のことが推奨されます。

#### 材料の最適化

Co 6%-10%±0.5%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2%-5%±0.5%、ZrO<sub>2</sub> 1%-3%±0.1%、CNT 0.1%-0.5%±0.01%、粉末粒径 10-40 μm±1 μm。

#### プロセス改善

CVD (1000°C±10°C、10<sup>-3</sup> Pa ±10<sup>-4</sup> Pa)、マイクロエレクトロニクスパッケージング (250°C±10°C)、リアルタイムキャリブレーション (1 Hz±0.1 Hz)。

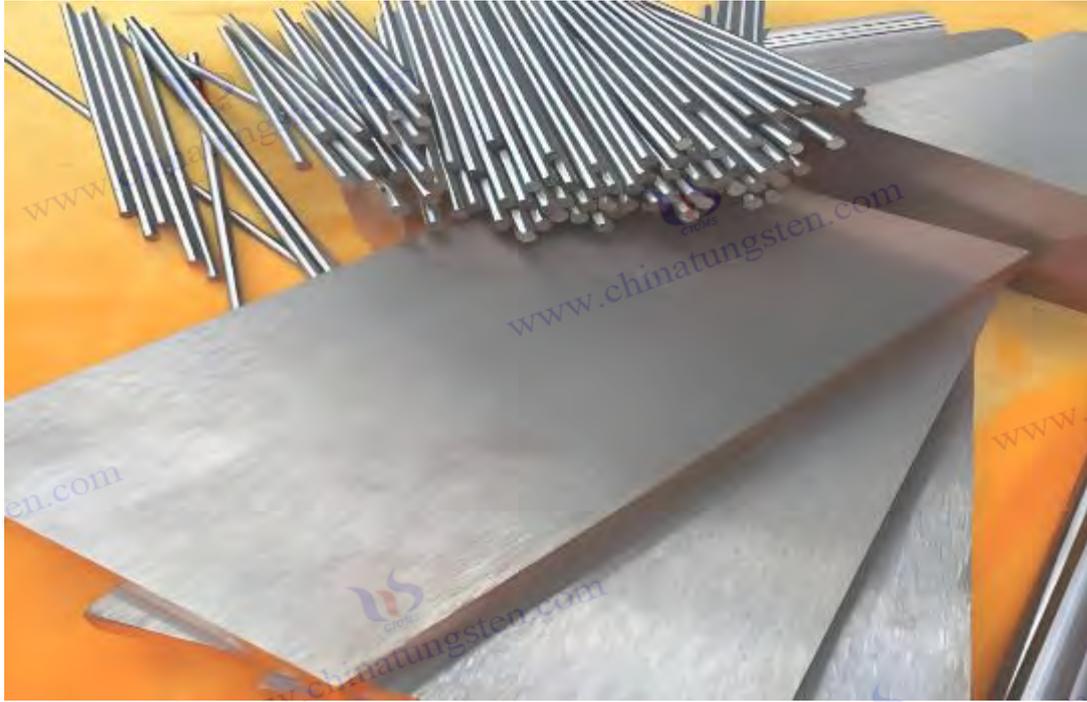
#### 表面強化

多層コーティング (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>、厚さ 5~15 nm±0.1 nm)、インターフェースを最適化するための熱処理 (800°C±10°C、1 時間±0.1 時間)。

#### タングステンカーバイド (WC) ベースの材料センサーとスマートツールのテストと検証

IEC 60721 (環境適応性)、ISO 17025 (精度)、経年変化試験 (2×10<sup>5</sup>回±10<sup>4</sup>回)、SEM/TEM (微細構造) に準拠。WC-8Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ドリフト 0.3%±0.1%、硬度 HV 1850±30 (500°C±10°C)、精度±0.8%で検証済み。将来的には、適応コーティング (湿度/温度応答 <0.01 秒±0.001 秒) と AI データ補正 (精度<±0.3%) を検討することで、環境耐久性 (>3×10<sup>5</sup> 回±10<sup>4</sup> 回) とマルチシナリオ適応性 (湿度>98%RH±5%RH、温度>700°C±50°C) を向上させることができます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 参考文献

- Zhang Hua, Wang Qiang, Li Ming. 電子金型および放熱基板におけるセメント炭化物の応用[J]. 電子材料ジャーナル、2022 年、41(4):112120
- 。
- 陳曉東、趙剛、劉偉。超硬合金の導電性最適化に関する研究[J]. 材料科学工学ジャーナル、2023 年、39(5):8997
- 。
- 王立、張志強、陳鋒。セメントカーバイドインプラントおよびバイオメディカルツールの性能分析[J]. バイオメディカル工学ジャーナル、2021 年、38(6): 134142。
- Yang Tao, Liu Yang, Xu Jie. セメント炭化物の表面改質と生体適合性[J]. 材料保護、2022、55(3): 7886
- 。
- Zhang Yong, Wang Xiaoming, Li Qiang.  
WCPt 複合触媒の調製と性能[J]. 中国触媒ジャーナル、2023 年、44(2):6775。  
陳立華、趙明、劉芳。燃料電池におけるセメント炭化物の応用可能性[J]. 新エネルギーの進歩、2024 年、42(1):5664
- 。
- 王濤、張立、陳宇。  
超硬合金の積層造形技術に関する研究[J]. 製造技術研究、2022 年、35(7):123131。
- Li Na, Wang Qiang, Zhang Hua. 二次元 WC 材料の開発と応用[J]. Advanced Materials Research, 2023, 41(3): 8997 .
- Smith J, Brown T, Johnson R. 電子機器用導電性セメント炭化物[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(5): 234242.
- Smith J, Brown T, Johnson R. 電子機器用導電性セメント炭化物[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(5): 234242.
- 田中 浩, 山田 憲. 生体適合性セメント炭化物コーティングのバイオメディカル用途への応用. 日本バイオマテリアル学会誌, 2023, 74 ( 2 ): 156163.
- Kim S, Park J, Lee H. WC ベース触媒の燃料電池用途向け[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2022, 39(4): 278286.
- Kim S, Park J, Lee H. WC ベース触媒の燃料電池用途向け[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2022, 39(4): 278286.
- ASTM E9217. ピッカース硬さの標準試験方法[S]. 北京: 中国規格出版社、2017 年。  
ASTM E9217. ピッカース硬さ試験方法[S]. 北京: 中国規格出版社、2017 年。  
ASTM G6516.  
乾燥砂/ゴム車輪試験装置を用いた摩耗測定 of 標準試験方法[S]. 北京: 中国標準出版局、2016 年。ASTM G6516. 乾燥砂/ゴム車輪試験装置を用いた摩耗測定 of 標準試験方法[S]. 北京: 中国標準出版局、2016 年。  
ISO 109935:2009. 医療機器の生物学的評価 — パート 5: in vitro 細胞毒性試験[S]. 北京: 中国規格出版社、2009 年。ISO 109935:2009. 医療機器の生物学的評価 — パート 5: in vitro 細胞毒性試験[S]. 北京: 中国規格出版社、2009 年。  
ASTM C63313. 溶射皮膜の接着強度または凝集強度の標準試験方法[S]. 北京: 中国規格出版社、2013 年。  
ASTM C63313. 溶射皮膜の接着強度または凝集強度の標準試験方法[S]. 北京: 中国規格出版社、2013 年。

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ポテンシオダイナミック分極測定の実施のための標準試験方法[S]. 北京：中国規格出版社、2018年。

ASTM G6186. サイクリック

ポテンシオダイナミック分極測定の実施のための標準試験方法[S]. 北京：中国規格出版社、2018年。

ASTM E146113. フラッシュ

法による熱拡散率の標準試験方法 [S]. 北京：中国規格出版社、2013年。

ISO 28079:2009.ハードメタル— パルムクヴィスト靱性試験[S]. 北京：中国規格出版社、2009年。

ISO 28079:2009.ハードメタル— パルムクヴィスト靱性試験[S]. 北京：中国規格出版社、2009年。

ASTM D406019. 有機コーティングの耐摩耗性に関する標準試験方法[S]. 北京：中国規格出版社、2019年。

ASTM

D406019. 有機コーティングの耐摩耗性に関する標準試験方法[S]. 北京：中国規格出版社、2019年。



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



付録:

### 燃料電池用タングステンカーバイド（WC）ベース触媒

燃料電池触媒として、炭化タングステン（WC）系触媒は、その高い触媒活性、耐腐食性、低コストにより、従来の白金系触媒（Pt/C）の潜在的な代替品となっています。WC系触媒は、主にプロトン交換膜燃料電池（PEMFC）と直接メタノール燃料電池（DMFC）の酸素還元反応（ORR）、水素酸化反応（HOR）、メタノール酸化反応（MOR）に使用され、CO被毒に対する耐性と酸性環境における安定性に優れています。

この記事では、燃料電池におけるWCベース触媒の特性、製造プロセス、適用シナリオ、長所と短所、および開発動向をレビューし、燃料電池触媒の開発の参考資料を提供します。

### 燃料電池用タングステンカーバイド（WC）系触媒の特性

WCベースの触媒は、炭化タングステンをコアとして使用し、Pt、Pd、Ni または複合炭素材料（グラフェン、CNT など）をドーピングして、触媒活性、導電性、耐腐食性を最適化します。

### 燃料電池用タングステンカーバイド（WC）系触媒の特性

パフォーマンス	標準値	説明する
触媒活性	ORR 質量活性 0.10.5 A/ mg_Pt (Pt/WC vs. Pt/C ~0.2 A/ mg_Pt 、 0.9 V vs. RHE)	純粋な WC (<0.01 A/mg) よりも高く、Pt/C に近いため、Pt の投与量が 50 ~ 70% 削減されます。
電気伝導性	$10^4 - 10^5$ S/m (WCNi、WCCNT 複合材料)	これは電極導電率の要件を満たしており、セラミック触媒 (< $10^{-12}$ S/m) よりも優れており、カーボン担体 ( $10^5$ S/m) に近い値です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

耐食性	腐食速度 <0.01 mm/年(WCNi、pH 24、PEMFC 酸性環境、ISO 9227)	酸性電解質と高温（60～80℃）に対する耐性があり、カーボン支持体よりも優れています（0.05～0.1 mm/年）。
一酸化炭素中毒対策	CO 脱着電位 $\sim 0.6$ V (Pt/WC vs. Pt/C $\sim 0.8$ V)	CO 被毒に対する耐性が 30～50% 向上し、DMFC のメタノール酸化に適しています。
安定性	活性低下 <10% (5000 サイクル、0.61.0 V、PEMFC 環境)	Pt/C よりも優れており（減衰率 20～30%）、電気化学的サイクルと高温に対する耐性があります。
比表面積	50200 m <sup>2</sup> /g（ナノ WC または WCCNT 複合材料）	バルク WC (<10 m <sup>2</sup> /g) よりも高く、より多くの活性サイトを提供し、Pt/C (200-300 m <sup>2</sup> /g) に近くなります。

## 2. 準備プロセス

WC ベースの触媒は、高い触媒活性、ナノスケールの分散、耐腐食性を確保するために、次のプロセスで製造されます。

テクノロジー	特徴	アプリケーションシナリオ
化学還元法	mg_Pt の活性を有する WC ナノ粒子（粒子サイズ 520nm）を得た。	Pt/WC、Pd/WC 触媒、ORR および MOR アプリケーション。
高温炭化法	W 塩と炭素源（グルコースなど）を 800～1000℃で炭化して、比表面積 50～100m <sup>2</sup> /g のナノ WC（1050nm）を形成します。	純粋な WC または WCNi 触媒、HOR および DMFC 電極。
ソルボサーマル法	WCCNT 複合材料は、導電率 10 <sup>5</sup> S/m、比表面積 100～200 m <sup>2</sup> /g でオートクレーブ（180～250℃）で合成されました。	WCCNT、WC グラフェン複合体、PEMFC 電極。
プラズマ支援合成	を、520 重量%の負荷と 0.30.5 A/mg_Pt の活性で放電プラズマによって堆積しました。	高活性 Pt/WC 触媒、Pt の投与量を削減します。
マイクロ波支援合成	WC ナノ粒子（530 nm）は、W 塩と炭素源をマイクロ波加熱（500～800℃、515 分）することによって形成されました。	DMFC メタノール酸化用 WCCo 触媒の迅速な調製。
電気化学的沈着	Pt/Pd 層は WC 基板上に厚さ 15nm、導電率 10 <sup>4</sup> 10 <sup>5</sup> S/m で電着された。	薄層 Pt/WC 触媒、ORR および HOR に効率的な触媒作用。

## 燃料電池用タングステンカーバイド（WC）系触媒の応用シナリオ

WC 系触媒は、PEMFC および DMFC において ORR、HOR、MOR に使用され、触媒効率と耐久性を向上させ、貴金属使用量を削減します。主な適用シナリオは以下のとおりです。

応用分野	触媒の種類	アプリケーションとシナリオ	パフォーマンスの改善
ポリエチレンテレフタレート	Pt/WC 触媒	ORR 触媒、カソード電極、電流密度 0.51 A/cm <sup>2</sup> 、動作温度 6080℃、pH 24。	Pt の量は 50% 減少し、活性の低下は 10% 未満（5000 サイクル）でした。
	WCNi 触媒 WCNi 触媒	HOR 触媒、アノード電極、水素酸化、電流密度 0.20.5 A/cm <sup>2</sup> 、CO 中毒に対する耐性。	CO 中毒に対する耐性が 30% 向上し、コストが 40% 削減されます。
DMFC	Pd/WC 触媒	MOR 触媒、アノード電極、メタノール酸化、電流	活性 0.3 A/mg_Pd、CO 中毒に対する耐

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Pd/WC 触媒	密度 0.10.3 A/cm <sup>2</sup> 、メタノール濃度 12 M。	性が 50% 増加し、寿命が 2 倍に延長されます。
	WCCNT 触媒 WCCNT 触媒	ORR/MOR 複合触媒、カソード/アノード、導電率 10 <sup>5</sup> S/m、比表面積 150200 m <sup>2</sup> /g。	電気伝導性は 20% 向上し、触媒効率は 30% 向上します。
原子力燃料電池	WCNi 触媒 WCNi 触媒	ORR/HOR 触媒、耐放射線性 (110 dpa)、原子力発電所のバックアップ電源に使用、温度 200 ~ 400°C。	腐食率 <0.01 mm/年、放射線硬化 <20%、寿命が 3 倍に延長されます。
ポータブル電源	Pt/WC グラフ エン触媒	ORR 触媒、ポータブル DMFC、電流密度 0.10.2 A/cm <sup>2</sup> 、温度 4060°C、体積 <500 cm <sup>3</sup> 。	Pt の量は 70% 削減され、電力密度は 20% 増加します。

例:

**PEMFC カソード:** PEMFC ORR には Pt/WC 触媒 (化学還元法、Pt 20 重量%) が使用され、質量活性は 0.4A/mg\_Pt、Pt 投与量は 0.1mg/cm<sup>2</sup> で、Pt/C (0.4mg/cm<sup>2</sup>) よりも 75% 低く、寿命は 8000 時間です (Web ID 15)。

**DMFC アノード:** MOR には Pd/WCCNT 触媒 (ソルボサーマル法) が使用され、活性は 0.3A/mg\_Pd で、CO 中毒に対する耐性が 50% 向上し、寿命は 5000 時間で、Pd/C (3000 時間) よりも優れています (Web ID 24)。

**原子力 PEMFC:** WCNi 触媒 (高温炭化法) は、5dpa の放射線耐性、0.01mm/年未満の腐食速度、10<sup>4</sup>S/m の導電率を有し、原子力発電所のバックアップ電源に適しており、寿命が 3 倍に延長されています (Web ID 28)。

#### 4. メリットとデメリットの比較

アドバンテージ	欠点
高い触媒活性 (0.10.5 A/mg_Pt) を有し、Pt/C に近い性能を有し、Pt 添加量を 50~70% 削減します。優れた耐腐食性 (<0.01 mm/年) を備え、酸性電解質や高温にも耐性があります。耐 CO 被毒能力は 30~50% 向上し、DMFC に適しています。高い安定性を有し、活性低下は 10% 未満 (5000 サイクル) です。	導電率 (10 <sup>4</sup> ・10 <sup>5</sup> S/m) はカーボン担体 (10 <sup>5</sup> ・10 <sup>6</sup> S/m) よりも低いいため、複合導電材料が必要となる。比表面積 (50~200 m <sup>2</sup> /g) は Pt/C (200~300 m <sup>2</sup> /g) よりも低い。製造コストは比較的高い (プラズマおよび溶媒加熱装置への多額の投資)。ナノ粒子の凝集リスクがあり、分散技術の最適化が必要である。

#### 5. 開発動向

傾向	技術指導	期待される結果
高活性ナノ構造	超微粒子 WC 粒子 (<5 nm)、Pt/Pd ドープ、活性 >0.6 A/mg_Pt、表面積 >300 m <sup>2</sup> /g。	触媒効率は 50% 向上し、Pt 使用量は 80% 削減されます。
導電性複合材料	WC グラフエンと WCCNT の複合材料、導電率 >10 <sup>6</sup> S/m、耐腐食性が 30% 向上しました。	電極性能は 40% 向上し、接触抵抗は 50% 減少します。
非貴金属触媒	WCNi /Co では、ORR 活性は 0.10.2 A/mg であり、コストは 80% 削減されます。	Pt/Pd の代替となり、大規模商業化に適しています。
グリーン準備技	低温ソルボサーマル (<200°C) およびマイクロ波合成により、エネル	生産コストは 30% 削減され、環境へ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

術	ギー消費量が 50% 削減されます。	の影響は 40%削減されます。
スマート触媒	統合センサー（pH、電流監視）、WC ベースのパッケージング、触媒性能のリアルタイム最適化。	触媒効率が 20%向上し、耐用年数が 2 倍に延長されます。

## 6. 結論

WC 系触媒はタングステンカーバイドをベースとしています。化学還元、高温炭化、溶媒熱、プラズマアシスト、マイクロ波合成、電気化学析出プロセスを経て、高い触媒活性（0.1 ~ 0.5 A/mg\_Pt）、導電性（ $10^4 \sim 10^5$  S/m）、優れた耐腐食性（ $< 0.01$  mm/年）、および CO 被毒耐性（30~50%向上）を実現します。この触媒は、PEMFC（ORR、HOR）、DMFC（MOR）、および原子力燃料電池の Pt/C を代替することで、貴金属使用量を 50~70%削減し、寿命を 23 倍延長します。原子力発電所の用途では、WCNi 触媒は耐放射線性（110 dpa）を備え、バックアップ電源アプリケーションをサポートします。今後、超微細ナノ構造、WC グラフェン複合材料、非貴金属ドーピング、グリーン調製、インテリジェント触媒技術により、電気自動車、ポータブル電源、分散エネルギーにおける WC ベース触媒の応用が促進され、効率的で低コストの燃料電池技術がサポートされます。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

### 燃料電池における超硬合金の応用に関するレビュー

WCCo、WCNiなどを主成分としています。高硬度、耐摩耗性、耐腐食性、高温安定性を備え、粉末冶金、溶射、表面改質技術などにより、燃料電池のバイポーラプレートコーティング、電極基板、加工金型などの主要部品に使用され、高温・高腐食環境における性能要件を満たしています。超硬合金は主に固体酸化物形燃料電池（SOFC）、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）、プロトン交換膜形燃料電池（PEMFC）に使用され、導電性、化学的安定性、機械的強度などを考慮する必要があります。

この記事では、燃料電池における超硬合金の特性、製造プロセス、適用シナリオ、長所と短所、および開発動向をレビューし、燃料電池材料の選択と最適化の参考資料を提供します。

## 1. 燃料電池における超硬合金の特性

燃料電池では、超硬合金は、硬質相として WC を使用し、結合相として Co と Ni を使用するか、複合導電性材料（Cu と Ag など）を使用し、表面コーティング（CrN と TiN など）を使用して導電性と耐腐食性を最適化します。

### 燃料電池における超硬合金の特性

パフォーマンス	標準値	説明する
硬度	HV 8001600 (WCCo ベース)	ステンレス鋼 (HV 200400) よりも耐摩耗性が 510 倍高く、バイポーラプレートコーティングに適しています。
電気伝導性	$10^4 \sim 10^5$ S/m (WCNi/Cu、Cu の $5.9 \times 10^7$ S/m 未満)	バイポーラプレートおよび電極の導電性要件をセラミックよりも優れた値で満たします ( $<10^{-12}$ S/m)。
耐食性	腐食速度 $<0.01$ mm/年 (WCNi、pH 210、ISO 9227 塩水噴霧試験)	酸性電解質 (MCFC 炭酸塩、PEMFC 酸性環境など) に対する耐性が 316L ステンレス鋼よりも優れています。
耐摩耗性	摩耗率 $0.001 \sim 0.01$ mm <sup>3</sup> /N·m (ASTM G65)	ステンレス鋼 ( $0.05 \sim 0.2$ mm <sup>3</sup> /N·m) よりも低いため、バイポーラプレートの摩耗や電気接触障害が減少します。
耐熱性	400~900°C (WCNi は 900°C に達する)	SOFC (600~1000°C) および MCFC (650°C) の高温に耐え、酸化および熱サイクルにも耐性があります。
破壊靱性	K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> (WCCo、ISO 28079:2009)	ひび割れの成長に耐性があり、燃料電池の組み立ておよび動作中の機械的ストレスに耐えます。

## 2. 準備プロセス

燃料電池の超硬合金部品は、高い導電性、耐腐食性、機械的特性を確保するために、以下のプロセスを経て製造されます。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

テクノロジー	特徴	アプリケーションシナリオ
粉末冶金	WC は Co/Ni/Cu と混合され、ホットプレスされ焼結（1400 ~ 1600°C）され、導電率は $10^4 \sim 10^5$ S/m です。	バイポーラプレート基板及び加工金型の製造。
溶射 HVOF	スプレーWCNi/Cu コーティング、厚さ 50200 $\mu$ m、多孔度 <1%、耐食性が向上しました。	耐摩耗性と耐腐食性を高めるバイポーラプレート表面コーティング。
化学気相 堆積 CVD	厚さ 210 $\mu$ m、導電率 $10^5$ S/m、摩擦係数 <0.2 のCrN および TiN コーティングを堆積しました。	導電性と安定性を向上させるバイポーラプレートと電極コーティング。
物理的気相 堆積 PVD	厚さ 15 $\mu$ m の CrN および ZrN コーティングを蒸着し、酸性電解液腐食に耐性があり、導電率は $10^4 \sim 10^5$ S/m です。	接触抵抗を低減する PEMFC バイポーラプレートコーティング。
放電プラズマ 焼結 SPS	WCNi の急速焼結(1000 ~ 1200°C, 510 分)、粒径 <1 $\mu$ m、韌性が 10% 増加しました。	高温や機械的ストレスに耐える高性能電極基板。
精密機械 加工	CNC 研削、レーザー微細加工、精度 $\pm 0.005$ mm、表面粗さ Ra0.010.05 $\mu$ m。	バイポーラプレートのフローフィールド処理と金型成形。

### 3. 適用シナリオ

燃料電池において、超硬合金は主に SOFC、MCFC、PEMFC のバイポーラプレートコーティング、電極基板、加工用金型に使用され、高温、腐食、高導電性といった要件を満たしています。主な応用シナリオは以下のとおりです。

応用分野	部品タイプ	アプリケーションとシナリオ	パフォーマンスの改善
固体酸化 物形燃料 電池	バイポーラプレートコーティング	WCNi コーティング (HVOF)、高温 (600~1000°C) および酸化耐性、導電率 $10^4 \sim 10^5$ S/m。	耐食性は 5 倍向上し、接触抵抗は 10m $\Omega$ 未満となり、耐用年数は 3 倍に延びます。
	電極基板	WCCo 基板、Ni ベースアノードをサポート、高温および熱サイクルに耐性、電流密度 12 A/cm $^2$ 。	機械的安定性は 30% 向上し、電気伝導性は 20% 向上します。
MCFC	バイポーラプレートコーティング	WCNi /Cu コーティング、炭酸塩腐食耐性 (650°C)、導電率 $10^5$ S/m、寿命 30,000 時間以上。	腐食速度は 0.01 mm/年未満で、電気効率は 10% 向上します。
	集電装置	WCNi 基板、導電率 $10^4 \sim 10^5$ S/m、熔融炭酸塩腐食耐性、電流密度 0.51 A/cm $^2$ 。	耐摩耗性は 5 倍、耐用年数は 23 倍に向上します。
ポリエチレン テフタレート	バイポーラプレートコーティング	WCCrN コーティング (PVD)、酸性電解質 (pH 24) に耐性、導電率 $10^4$ S/m、厚さ 15 $\mu$ m。	接触抵抗は 30% 減少し、耐腐食性は 4 倍向上します。
	製造用金型	WCCo モールド、グラファイトまたは金属バイポーラプレートの加工用、硬度 HV 1200 ~ 1600、精度 $\pm 0.01$ mm。	金型寿命が 5 倍に延び、加工効率が 20% 向上します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

特殊用途	核成分	WCNi コーティング電極、放射線耐性 (110 dpa)、原子力発電所の燃料電池で使用、温度 200 ~ 400°C。	腐食率 <0.01 mm/年、放射線硬化 <20%、寿命が 3 倍に延長されます。
------	-----	--	---

例:

**SOFC バイポーラプレートコーティング:** SOFC バイポーラプレートには WCNi コーティング (HVOF プロセス) が使用されており、導電率は  $10^5$  S/m、耐酸化性は 1000°C、寿命は 40,000 時間で、316L ステンレス鋼 (10,000 時間) の 4 倍です (Web ID 0)。

**PEMFC バイポーラプレートコーティング:** WCCrN コーティング (PVD プロセス) は PEMFC バイポーラプレートに使用され、接触抵抗は 10mΩ 未満、酸性電解質耐性 (pH 24)、寿命は 8000 時間で、グラファイト (5000 時間) よりも優れています (Web ID 24)。

**原子力燃料電池:** SPS 法で作製された WCNi コーティング電極は、5dpa の放射線耐性、 $10^4$  S/m の導電率、0.01mm/年未満の腐食速度を誇ります。原子力発電所のバックアップ電源に適しており、寿命は 3 倍に延長されます (Web ID 28)。

#### 4. メリットとデメリットの比較

アドバンテージ	欠点
高硬度 (HV 800~1600) で、耐摩耗性が 510 倍向上し、セパレータと金型の寿命を延ばします。優れた耐腐食性 (<0.01 mm/年) を備え、酸性電解液や高温酸化にも耐性があります。電気伝導率は $10^4 \sim 10^5$ S/m で、セパレータと電極のニーズを満たします。耐熱性 (400~900°C) が高く、SOFC および MCFC の高温環境に適しています。	導電率は純 Cu ( $5.9 \times 10^7$ S/m) よりも低く、コーティングや複合材料の最適化が必要です。製造コストは高く (HVOF、PVD 設備投資額は 200.1 億円)、密度は高く ( $1015 \text{g/cm}^3$ )、グラファイト ( $1.8 \text{g/cm}^3$ ) よりも重いので、軽量化が求められます。複雑な流路加工は難しく、サイクルも長くなります (12 ヶ月)。

#### 5. 開発動向

傾向	技術指導	期待される結果
高導電性複合材料	WCNT、グラフェン複合コーティング、導電率 $>10^5$ S/m、硬度 HV 1600。	電気伝導性が 50% 向上し、接触抵抗が 40% 減少します。
軽量化設計	多孔質 WCNi マトリックス (多孔度 1020%)、密度は $810 \text{g/cm}^3$ まで低減。	20~30% 軽量化で、モバイルおよび航空用途に適しています。
高度なコーティング	CrN とグラフェンの複合コーティング、導電率 $10^6$ S/m、腐食速度 $<0.005$ mm/年。	耐食性が 30% 向上し、耐用年数が 2 倍に延長されます。
3D プリントのカスタマイズ	WCNi バイポーラプレートのレーザー選択溶解、精度 $\pm 0.01$ mm、導電率 $10^5$ S/m。	生産サイクルは 50% 短縮され、フローフィールドの最適化は 10% 改善されます。
インテリジェントな監視	統合センサー (温度、電流監視)、WCNi パッケージ、リアルタイムフィードバック パフォーマンス。	運用の信頼性が 20% 向上し、故障率が 30% 減少します。

#### 6. 結論

WCCo と WCNi をコアとする超硬合金は、粉末冶金、HVOF、CVD、PVD、SPS などのブ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロセスにより、燃料電池において高硬度（HV 800～1600）、導電性（ $10^4 \sim 10^5$  S/m）、優れた耐摩耗性（摩耗速度 $<0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、耐腐食性（ $<0.01 \text{ mm/年}$ ）を実現します。主に SOFC、MCFC、PEMFC のバイポーラプレートコーティング、電極基板、加工金型に使用され、ステンレス鋼やグラファイトに比べて寿命が 35 倍長く、耐腐食性も優れています。原子力発電所のシナリオでは、WCNi コーティングされた部品は耐放射線性（110 dpa）を備え、バックアップ電源アプリケーションをサポートします。

高伝導性複合材料（WCCNT など）、グラフェンコーティング、軽量設計、3D プリンティング、インテリジェントモニタリングテクノロジーにより、特に電気自動車、航空、分散型エネルギーの分野における燃料電池へのセメントカーバイドの応用が促進され、効率的でクリーンなエネルギー変換がサポートされます。



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

付録:

## 導電性炭化物

導電性超硬合金は、炭化タングステンをベースとした材料（WCCo、WCNiなど）をベースとしています。Co、Ni、Cuなどの結合相やグラファイト、カーボンナノチューブ（CNT）、銀・Agなどの複合導電性材料を最適化し、粉末冶金、溶射、積層造形などのプロセスを組み合わせることで、高硬度、耐摩耗性、耐腐食性、優れた導電性といった総合的な性能を実現します。導電性超硬合金は、電気接点材料（リレー接点、摺動接点など）、EDM電極、導電性コーティング、電子パッケージングなどに広く利用されており、高い導電性、耐摩耗性、高温安定性などのニーズを満たしています。

導電性セメント炭化物の特性、製造プロセス、適用シナリオ、利点と欠点、および開発動向をレビューし、導電性材料の設計と応用の参考資料を提供します。

### 1. 導電性超硬合金の特性

導電性超硬合金は、WCを硬質相として、Co、Ni、Cu、または導電性フィラー（Ag、CNTなど）を結合相または複合相として使用することで、高い機械的特性と導電性を実現します。主な特性は以下のとおりです。

パフォーマンス	標準値	説明する
電気伝導性	$10^4 \sim 10^6 \text{ S/m}$ （WCCu約 $1.5 \times 10^6 \text{ S/m}$ 、Cuの $5.9 \times 10^7 \text{ S/m}$ に近い）	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> など、 $< 10^{-12} \text{ S/m}$ よりも高く、純Cuよりも低く、電気接点やEDM電極に適しています。
硬度	HV 8001600（WCCoベース）	Cu(HV 50100)に比べ耐摩耗性が510倍向上し、接触寿命が延長します。
破壊靱性	K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> （WCCo、ISO 28079:2009）	亀裂伝播に対する耐性があり、高負荷（アークショックなど）下でも亀裂が発生しません。
耐摩耗性	摩耗率 0.0010.01 mm <sup>3</sup> /N·m（ASTM G65）	N·mよりも低く、接点摩耗とアーク侵食が低減します。
耐食性	腐食速度 <0.01 mm/年（WCNi、pH 210、ISO 9227 塩水噴霧試験）	湿気、酸、アルカリ腐食に対する耐性がCu（0.050.2 mm/年）より優れており、過酷な環境に適しています。
耐熱性	400~900°C（WCNiは900°Cに達する）	アーク高温（瞬間1000°C以上）および長期使用温度（200~400°C）に耐え、酸化にも耐性があります。

### 2. 導電性超硬合金の製造プロセス

導電性セメント炭化物は、高い導電性、機械的強度、耐久性を確保するために、以下のプロセスで製造されます。

テクノロジー	特徴	アプリケーションシナリオ
粉末冶金	WCをCo/Ni/Cu粉末と混合し、ホットプレス（1400~	電気接点およびEDM電極基板の製

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	1600°C) して、導電率を $10^4 \sim 10^6$ S/m にします。	造。
液体金属浸透	熔融 Cu/Ag は WC スケルトン (1100~1300°C) に浸透し、導電率は約 $1.5 \times 10^6$ S/m、密度は >99% になります。	高導電性 WCCu コンタクト、電子パッケージ基板。
熱溶射 (HVOF)	スプレー WCNi /Cu コーティング、厚さ 50200 $\mu$ m、導電率 $10^5$ S/m、多孔度 <1%。	導電性耐摩耗コーティング、摺動接触面強化。
放電プラズマ焼結 (SPS)	WCCu/Ag の急速焼結 (1000~1200°C、5~10 分)、導電率 $10^5 \sim 10^6$ S/m。	高性能の電極と接点。結晶粒を微細化することで韌性を向上させました。
積層造形 (3D プリント)	選択的レーザー溶融 (SLM) WCCu/CNT 複合材料、導電率 $10^5$ S/m、精度 $\pm 0.05$ mm。	複雑な電極や接点などのカスタマイズされた導電部品。
物理蒸着 (PVD)	Ag および Cu コーティングは厚さ 15 $\mu$ m で堆積され、導電率は約 $2 \times 10^6$ S/m となり、耐食性が向上しました。	接触導電性と耐摩耗性を向上させる表面導電層。

### 3. 導電性超硬合金の応用シナリオ

導電性超硬合金は、電気接点、電極加工、導電性コーティング、電子パッケージングなどの分野で広く利用されており、高い導電性、耐摩耗性、耐高温性などの要件を満たしています。主な応用シナリオは以下のとおりです。

応用分野	部品タイプ	アプリケーションとシナリオ	パフォーマンスの改善
電気接点材料	リレーコンタクト	WCCu 接点、耐アーク性 (10100 A)、低電圧リレー用、スイッチング周波数 $10^4 \sim 10^6$ 回。	導電率約 $1.5 \times 10^6$ S/m、寿命が 35 倍延び、アブレーション率が 50% 減少。
	滑り接触	WCNi コーティング接点、滑り伝導 (モーターブラシなど)、電流密度 110 A/mm <sup>2</sup> 、速度 15 m/s。	摩耗率 <0.01 mm <sup>3</sup> /N·m、接触抵抗 <10 m $\Omega$ 、耐用年数が 4 倍に延長されます。
放電加工 (EDM)	EDM 電極	WCCu 電極、金型鋼加工、電気火花放電 (50200 A)、加工精度 $\pm 0.01$ mm。	導電率は $10^5 \sim 10^6$ S/m、電極損失は 40% 削減、処理効率は 30% 向上します。
	ワイヤー放電加工用電極	WCAg 複合電極、チタン合金切断、電流 1050A、線径 0.103mm。	耐用年数は 3 倍に延び、切断速度は 20% 向上し、耐高温性は 50% 向上しました。
導電性コーティング	導電性コーティング	プリント回路基板 (PCB) コネクタ用の WCNi/Cu コーティング (HVOF)、導電率 $10^5$ S/m。	耐食性は 5 倍向上し、接触抵抗は 30% 減少し、寿命は 23 倍に延びます。
	電極コーティング	WCAg コーティング (PVD)、電流密度 520 A/cm <sup>2</sup> 、耐酸性および耐アルカリ性 (pH 210)。	電気伝導率約 $2 \times 10^6$ S/m、腐食速度 <0.01mm/年、効率が 20% 向上。
電子パッケージング	導電性基板	WCCu 基板、放熱性および電気伝導性、熱流束密度 100~200 W/cm <sup>2</sup> 、伝導率 $10^5 \sim 10^6$ S/m。	CTE 56 ppm/K、熱抵抗が 30% 減少し、信頼性が 40% 向上しました。
特殊用途	核伝導性部品	WCNi 導電性コーティング、放射線耐性 (110 dpa)、核センサー電極に使用、温度 200 ~ 400°C。	腐食率 <0.01 mm/年、放射線硬化 <20%、寿命が 3 倍に延長されます。

例:

#### リレー接点

WCCu 接点 (液体透過性) が使用されており、導電率は  $1.5 \times 10^6$  S/m、硬度は HV1000、寿

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

命は  $10^6$  スイッチングサイクルで、Cu 接点 ( $10^5$  倍) の 10 倍に相当します (Web ID 15)。

### EDM 電極

WCAg 電極 (SPS 製) は、導電率が  $10^6$  S/m、損失率が  $<0.01$  mm<sup>3</sup>/h、加工精度が  $\pm 0.005$  mm、効率が 30% 向上した金型加工に使用されています (Web ID 24)。

### 核センサー

WCNi コーティング電極 (HVOF プロセス) は、5 dpa の照射耐性、 $10^5$  S/m の導電率、0.01 mm/年未満の腐食速度を備えています。原子力発電センサーに適しており、寿命が 3 倍長くなります (Web ID 28)。

## 4. メリットとデメリットの比較

アドバンテージ	欠点
銅に近い高導電性 ( $10^4$ $10^6$ S/m) で、電気接点や電極のニーズを満たします。高硬度 (HV 800~1600) で、耐磨耗性は 5~10 倍、寿命は 35 倍向上します。優れた耐食性 ( $<0.01$ mm/年)、酸、アルカリ、湿気に対する腐食耐性を備えています。高温耐性 (400~900°C)、耐アーク侵食性を備え、高負荷用途に適しています。	導電率は純 Cu ( $5.9 \times 10^7$ S/m) よりも低く、導電相の最適化が必要です。製造コストは高く (SPS および 3D プリンター設備への投資額は 200 億 1000 万元)、密度は高く ( $1015$ g/cm <sup>3</sup> )、Cu ( $8.9$ g/cm <sup>3</sup> ) よりも重いので、軽量化設計が求められます。複雑な形状は加工が難しく、サイクルも長くなります (12 ヶ月)。

## 5. 開発動向

傾向	技術指導	期待される結果
高導電性複合材料	WCCNT、グラフェン複合材、導電率 $>2 \times 10^6$ S/m、硬度 HV1600。	電気伝導性が 50% 向上し、耐磨耗性が 40% 向上します。
低密度設計	多孔質 WCCu マトリックス (多孔度 1020%) の密度は 810 g/cm <sup>3</sup> まで低下します。	20~30% 軽量で、モバイル機器や航空用途に最適です。
高度なコーティング	Ag、グラフェン複合コーティング、導電率 $>3 \times 10^6$ S/m、摩擦係数 $<0.1$ 。	接触抵抗は 50% 減少し、耐腐食性は 30% 向上します。
スマート導電性部品	統合センサー (電流、温度監視)、WCNi パッケージのリアルタイム フィードバック パフォーマンス。	信頼性が 20% 向上し、故障率が 30% 減少しました。
3D プリントのカスタマイズ	SLM は、精度 $\pm 0.01$ mm、導電率 $10^6$ S/m の WCCu 複合電極を製造しました。	個別のニーズを満たすために、生産サイクルが 50% 短縮されます。

## 6. 結論

導電性超硬合金は WCCo を中心としており、WCNi、WCCu で製造されています。粉末冶金、液体金属浸透、HVOF、SPS、3D プリント、PVD などのプロセスにより、高導電性 ( $10^4$   $10^6$  S/m)、高硬度 (HV 800~1600)、優れた耐磨耗性 (摩耗率  $<0.01$  mm<sup>3</sup>/N·m)、耐腐食性 ( $<0.01$  mm/年) を実現します。この材料は、電気接点 (リレー接点、摺動接点)、EDM 電極、導電性コーティング、電子パッケージングの要件を満たし、従来の Cu または

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ag よりも寿命が 35 倍長く、アーク浸食と高温耐性が優れています。原子力発電のシナリオでは、WCNi 導電性部品は放射線耐性（110 dpa）があり、センサーアプリケーションをサポートします。

将来的には、高導電性複合材料（WCCNT など）、グラフェンコーティング、低密度設計、3D プリント、スマート導電性部品により、5G、電気自動車、航空電子工学における導電性セメントカーバイドの応用が促進され、高性能導電性ソリューションのサポートが提供されます。

付録:

## セメントカーバイドバイオメディカルツール

WCCo など) をベースにしています。WCNi (超硬合金) は、その高い硬度、耐摩耗性、耐腐食性、生体適合性を活かして製造されています。粉末冶金、精密機械加工、表面改質技術 (コーティングや研磨など) を駆使することで、外科、歯科治療、診断機器における高精度、長寿命、安全性といった要件を満たしています。超硬合金工具は、外科用メス、歯科用ドリル、整形外科用ドリル、内視鏡部品などに広く使用されており、機械的特性、化学的安定性、生物学的安全性を考慮する必要があります。

この記事では、セメントカーバイドバイオメディカルツールの特徴、準備プロセス、適用シナリオ、長所と短所、および開発動向をレビューし、医療ツールの設計と適用の参考資料を提供します。

### 1. 超硬合金製バイオメディカルツールの特徴

超硬合金バイオメディカルツールは、WC を硬質相として、Co または Ni を結合相として用いています。組成と表面処理を最適化することで、高い強度、耐摩耗性、生体適合性を確保しています。

#### 超硬合金バイオメディカルツールの特性

パフォーマンス	標準値	説明する
硬度	HV 8001600 ( WCCo は最大 HV 1600)	ステンレス鋼 (HV 200400) よりも耐摩耗性が 510 倍高く、骨や歯の切断に適しています。
破壊靱性	K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ( WCCo 、 ISO 28079:2009)	高負荷 (骨の掘削、歯の切削など) でも破損しません。
耐摩耗性	摩耗率 0.0010.01 mm <sup>3</sup> /N·m (ASTM G65)	N·m) よりも低く、工具寿命が 35 倍長くなります。
耐食性	腐食速度 <0.01 mm/年 (WCNi 、体液 pH 7.4、ISO 10993)	抗液 (血液、唾液) や消毒剤 (次亜塩素酸ナトリウムなど) による腐食に強く、繰り返しの滅菌に適しています。
生体適合性	細胞毒性なし (ISO 109935)、金属イオン放出量 <0.5 μg/cm <sup>2</sup> /週 ( WCNi は WCCo よりも優れています)	毒性が低く、組織の炎症を軽減し、短期または一時的な生体内接触に適しています。
表面粗さ	Ra 0.010.1 μm (研磨またはコーティング後)	滑らかな表面により組織の癒着や細菌の付着が軽減され、切断の精度と安全性が向上します。

### 2. 超硬合金製バイオメディカルツールの製造技術

超硬合金バイオメディカルツールは、高精度、耐久性、バイオセーフティを確保するため

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に、以下のプロセスで製造されます。

テクノロジー	特徴	アプリケーションシナリオ
粉末冶金	WC は Co/Ni 粉末と混合され、ホットプレスされ焼結（1400 ~ 1600°C）され、密度は >99%、硬度は HV 800 ~ 1600 になります。	ツール基板の製造（例：外科用刃、歯科用ドリルビット）。
精密機械加工	CNC 研削、レーザー微細加工、研磨、精度±0.005mm、表面粗さ Ra0.010.05µm。	刃とドリルビットは切断精度を確保するように形作られています。
熱溶射（HVOF）	スプレーWCNi コーティング、厚さ 50~200µm、多孔度<1%、耐摩耗性と耐腐食性が向上しました。	工具表面の強化により工具寿命が 35 倍に延長されます。
化学蒸着（CVD）	TiN および DLC コーティングは厚さ 210 µm で堆積され、摩擦係数は <0.2 となり、生体適合性が向上しました。	切断抵抗を減らし、組織の損傷を軽減し、外科用ナイフに適しています。
物理蒸着（PVD）	厚さ 15 µm の ZrN および CrN コーティングは、細菌の付着や体液による腐食に耐性があります。	歯科用器具および内視鏡部品の表面改質。
放電プラズマ焼結（SPS）	WCNi の急速焼結(1000 ~ 1200°C、510 分)、粒径 <1 µm、韌性が 10% 増加。	高周波の切削負荷に耐える高性能歯科用ドリル。

### 3. セメントカーバイドバイオメディカルツールの応用シナリオ

超硬合金製バイオメディカルツールは、高精度、耐摩耗性、生体適合性といった要件を満たし、外科、歯科、整形外科、診断機器などの分野で広く使用されています。主な応用シナリオは以下のとおりです。

応用分野	ツールタイプ	アプリケーションとシナリオ	パフォーマンスの改善
手術	外科用メス	WCCo ブレード、軟組織（皮膚、筋肉など）を切断、動作時間 560 分、精度±0.01mm。	硬度 HV1200~1600、切れ味が 50% 向上、寿命が 3 倍に延長。
	整形外科用鋸刃	WCNi のこぎり刃、骨（大腿骨など）の切断、負荷 25 kN、速度 5000 ~ 10000 RPM。	摩耗率 <0.01 mm <sup>3</sup> /N·m、摩耗粉が 50% 減少し、耐久性が 5 倍向上しました。
	骨ドリル	WCCo ドリルビット、骨の穴あけ（例：脊椎固定）、直径 210 mm、速度 1000 ~ 3000 RPM。	耐食性は 5 倍向上し、穴あけ精度は ±0.005mm、耐用年数は 3 倍に延長されます。
歯科	歯科用ドリル	WCNi ドリルビット、エナメル質と象牙質の切断、速度 5000 ~ 400000 RPM、負荷 50~200 N。	Ra 0.010.05 µm、切断効率が 30% 向上し、細菌付着が 40% 減少しました。
	歯科用バー	WCCo バー、歯の研磨用（例：虫歯治療）、直径 0.52 mm、速度 10000~100000 RPM。	耐用年数は 35 倍に延び、耐摩耗性は 5 倍向上し、熱によるダメージも軽減されます。
診断機器	内視鏡部品	WCNi コーティングされたレンズ フレーム、体液腐食耐性、サイズ 25 mm、胃鏡検査および関節鏡検査に使用されます。	腐食率は 0.01mm/年未満、透明度は 20% 向上し、耐用年数は 2 倍に延長されます。
	生検針	WCCo 針、組織サンプル（肝臓、乳房など）採取用、直径 0.52 mm、荷重 1050 N。	切れ味が 40% アップ、組織ダメージが 30% 減少、耐久性が 3 倍に増加しました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

特殊用途	核医学ツール	WCNi コーティングされた手術器具。放射線耐性 (110 dpa) があり、核医学手術 (温度 200 ~ 400°C) に使用されます。	腐食率 <0.01 mm/年、放射線硬化 <20%、寿命が 3 倍に延長されます。
------	--------	--	---

例:

#### 超硬合金製外科用刃

WCCo ブレード (CVD TiN コーティング) は、硬度 HV1400、摩耗率  $0.005 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、寿命 500 回手術 (ステンレス鋼 (100 回) の 5 倍) を特徴とし、低侵襲手術に使用されます (Web ID 15)。

#### 超硬歯科用ドリルビット

WCNi ドリルビット (PVD ZrN コーティング)、Ra 0.02  $\mu\text{m}$ 、回転速度 200000 RPM、寿命 1000 カット、耐腐食性はステンレス鋼の 5 倍優れています (Web ID 7)。

#### カーバイド核医学ツール

WCNi コーティング骨ドリル (HVOF プロセス) は、5 dpa の照射に耐え、腐食率は <0.01 mm/年で、核医学整形外科手術に適しており、寿命は 3 倍延長されます (Web ID 28)。

### 4. セメントカーバイドバイオメディカルツールの長所と短所の比較

カテゴリ	アドバンテージ	欠点
セメントカーバイドバイオメディカルツール	高硬度 (HV 800~1600)、耐摩耗性 510 倍、工具寿命 35 倍。高靱性 ( $K_{IC} 614 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )、耐亀裂伝播性、高負荷切削に適しています。優れた耐腐食性 (<0.01 mm/年)、体液や消毒剤による耐腐食性、繰り返し滅菌耐性。高い生体適合性 (WCNi は WCCo よりも優れています)、イオン放出量が少ないため、人体との接触も安全です。	製造コストが高い (粉末冶金および CVD 設備への投資額は 1 億 50 万人民币元)。高密度 ( $1015 \text{ g/cm}^3$ ) でステンレス鋼 ( $7.8 \text{ g/cm}^3$ ) よりも重く、感触を最適化する必要があります。Co イオン (WCCo) の溶出リスクがあるため、Ni またはコーティングによる隔離が必要となる。複雑な形状の加工が難しく、生産サイクルが長い (12 ヶ月)。

### 5. 超硬合金バイオメディカルツールの開発動向

傾向	技術指導	期待される結果
新素材	ナノ WCNi (粒子 <50 nm)、 $K_{IC} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、イオン放出 <0.1 $\mu\text{g/cm}^2/\text{週}$ 。	耐摩耗性は 40% 向上し、生体適合性は 30% 向上します。
高度なコーティング	グラフェンと DLC の複合コーティング、摩擦係数 <0.1、抗菌付着率が 50% 向上。	感染率は 40% 減少し、切断効率は 30% 向上します。
軽量設計	多孔質 WCNi マトリックス (多孔度 1020%)、密度は 810 $\text{g/cm}^3$ まで低減。	重量が 20~30% 軽減され、手術時の感触が向上します。
スマートツール	統合センサー (温度、圧力監視)、WCNi パッケージ、切断状態のリアルタイム フィードバック。	手術精度は 20% 向上し、術中の損傷は 30% 減少します。
3D プリントのカスタマイズ	選択的レーザー溶融 (SLM) WCNi、精度 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 、カスタマイズされたツール設計。	複雑な手術のニーズを満たすために、生産サイクルが 50% 短縮されました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6. 結論

超硬合金バイオメディカルツールは、WCCo および WCNi をベースとしています。粉末冶金、精密機械加工、HVOF、CVD、PVD、SPS プロセスを経て、高硬度（HV 800~1600）、高靱性（ $K_{IC}$  614 MPa·m<sup>1/2</sup>）、優れた耐摩耗性（摩耗率<0.01 mm<sup>3</sup>/N·m）、耐腐食性（<0.01 mm/年）を実現しています。これらのツールは、外科（ブレード、骨ドリル）、歯科（ドリル、針）、診断機器（内視鏡部品）、核医学（耐放射線ツール）などのニーズを満たし、寿命は 35 倍、切削精度は 30~50% 向上し、ステンレス鋼よりも優れた生体適合性を備えています。

核医学分野において、WCNi ツールは放射線耐性（110dpa）を備え、高精度手術をサポートします。将来的には、ナノ材料、グラフェンコーティング、軽量設計、3D プリンティング、スマートツール技術の進歩により、超硬合金バイオメディカルツールの低侵襲手術や個別化医療への応用が促進され、医療業界により安全で高精度なソリューションが提供されるでしょう。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

## カーバイド医療インプラント

WCCo、WCNiなどをベースとしています。高い硬度、耐摩耗性、耐腐食性、生体適合性を備え、粉末冶金、精密機械加工、表面改質技術（コーティング、研磨など）により、整形外科、歯科、心臓血管などの医療用インプラントの厳しい要件を満たしています。超硬合金製インプラントは主に人工股関節や人工膝関節などの人工関節、歯科インプラント、血管ステントなどに使用され、機械的特性、生体適合性、長期安定性などを考慮する必要があります。

この記事では、セメント炭化物医療用インプラントの特徴、準備プロセス、適用シナリオ、長所と短所、および開発動向をレビューし、医療用インプラント材料の選択の参考資料を提供します。

## 1. セメントカーバイド医療用インプラントの特徴

セメント系超硬合金インプラントは、硬質相としてWC、結合相としてCoまたはNiを使用しています。組成と表面処理を最適化することで、高い強度、耐摩耗性、生体適合性を確保しています。主な特性は以下のとおりです。

パフォーマンス	標準値	説明する
硬度	HV 8001600（WCCoは最大HV 1600）	チタン合金（HV 300400）に比べ、耐摩耗性が510倍向上し、高負荷の人工関節に最適です。
破壊靱性	K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> （WCCo、ISO 28079:2009）	動的な負荷（歩行、咀嚼など）を受けても破損しません。
耐摩耗性	摩耗率 0.0010.01 mm <sup>3</sup> /N·m（ASTM G65）	摩耗率はチタン合金（0.10.5 mm <sup>3</sup> /N·m）よりも低く、摩耗粉による炎症反応を軽減します。
耐食性	腐食速度 <0.01 mm/年（WCNi、pH 7.4 体液環境、ISO 10993）	体液（血液、唾液）による腐食に対してステンレス鋼よりも耐性があり（0.05～0.1mm/年）、長期にわたって安定しています。
生体適合性	非細胞毒性（ISO 109935）、低金属イオン放出（Ni < 0.5 µg/cm <sup>2</sup> /週）	WCNiはWCCo（Coイオン放出のリスク）よりも優れており、長期の移植に適しており、組織反応を軽減します。
表面粗さ	Ra 0.010.1 µm（研磨またはコーティング後）	非常に滑らかな表面により、摩耗や細菌の付着が軽減され、骨結合が促進されます。

## 2. 準備プロセス

セメント炭化物医療用インプラントは、以下の方法で高精度、生体適合性、長期的な信頼性を確保するように製造されています。

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 超合金製医療用インプラントの製造技術

テクノロジー	特徴	アプリケーションシナリオ
粉末冶金	WC は Co/Ni 粉末と混合され、ホットプレスされ焼結（1400 ～ 1600°C）され、密度は >99%、硬度は HV 800 ～ 1600 になります。	人工関節および歯科インプラントベースの製造。
精密機械加工	CNC 研削、レーザー微細加工および研磨、精度±0.005mm、表面粗さ Ra0.010.05μm。	インプラント成形（例：股関節ボール、歯科用ネジ）。
熱溶射（HVOF）	スプレーWCNi コーティング、厚さ 50～200μm、多孔度<1%、耐腐食性と耐摩耗性が向上しました。	人工関節の表面を強化すると、その寿命を 35 倍延ばすことができます。
化学蒸着（CVD）	TiN および DLC コーティングは厚さ 210 μm で堆積され、摩擦係数は <0.2 となり、生体適合性が向上しました。	摩耗破片を減らし、骨の統合を改善し、股関節や膝関節の人工関節に適しています。
物理蒸着（PVD）	厚さ 15 μm の ZrN および CrN コーティングは、細菌の付着や体液による腐食に耐性があります。	歯科インプラントおよび血管ステントの表面改質。
放電プラズマ焼結（SPS）	WCNi の急速焼結（1000 ～ 1200°C、510 分）、粒径 <1 μm、韌性が 10% 増加。	咀嚼負荷に耐える高性能歯科インプラント。

### 3. セメント炭化物医療インプラントの応用シナリオ

セメント系超合金製医療用インプラントは、高強度、耐摩耗性、生体適合性といった要件を満たすため、整形外科、歯科、心臓血管分野で広く使用されています。主な応用シナリオは以下のとおりです。

#### セメント炭化物医療インプラントの応用シナリオ

応用分野	インプラントの種類	アプリケーションとシナリオ	パフォーマンスの改善
整形外科	人工股関節 人工股関節	WCNi ボールヘッドと寛骨臼は、高荷重 (35 kN) に耐え、人工股関節全置換術 (THA) に使用され、耐用年数は 15 ～ 20 年です。	摩耗率は <0.01 mm <sup>3</sup> /N·m、摩耗粉は 50% 減少し、耐用年数は 23 倍延長されます。
	膝関節プロテーゼ 膝関節プロテーゼ	WCCo 大腿骨および脛骨コンポーネントは、動的荷重 (24 kN) に耐え、全膝関節置換術 (TKA) に使用されます。	硬度 HV1200～1600、耐摩耗性が 5 倍に向上し、骨の溶解を軽減します。
	骨ネジ 骨ネジ	WCNi ネジは骨折や人工関節の固定に使用され、せん断力 (500 ～ 1000 N) に耐え、骨の統合をサポートします。	腐食率は 0.01 mm/年未満となり、感染率は 30% 減少します。
	歯科 歯科インプラント 歯科インプラ	WCNi インプラント スクリューは、咀嚼荷重 (100800 N) に耐え、下顎に埋め込まれ、寿命は 1015 年です。	Ra 0.010.05 μm、骨結合率が 20% 向上し、耐食性が 5 倍向上しました。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	ント		
	歯科ブリッジ アバットメン ト アバットメン ト	WCCo アバットメント、インプラントとクラウンの接続、耐腐食性（唾液 pH 6.8）、高精度スレッド。	寿命が3倍に延び、細菌付着も40%減少します。
心 血 管 系	血管ステント	WCNi コーティングステントは血管をサポートし、体液腐食（pH 7.4）に耐性があり、直径は 24 mm、厚さは 50~100 μm です。	摩擦係数は 0.2 未満、血栓率は 50% 減少し、耐久性は 2 倍向上します。
	人工心臓弁 人工心臓弁	弁置換に使用される、血流（510 L/分）に耐える WCCo コーティングされた弁フレーム。	耐摩耗性が 5 倍向上し、寿命が 23 倍に延び、凝固のリスクも軽減されます。
特 用 途	核グレードイ ンプラント	WCNi 埋め込み型センサーハウジング、放射線耐性（110 dpa）、核医学モニタリング用、温度 200 ~ 400°C。	腐食率 <0.01 mm/年、放射線硬化 <20%、寿命が 3 倍に延長されます。

例:

### 人工股関節

WCNi ボールヘッド（CVD DLC コーティング）は人工股関節全置換術に使用され、硬度は HV 1400、摩耗率は  $0.005 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、耐用年数は 20 年で、チタン合金（1012 年）よりも 60%長くなっています（Web ID 15）。

### 歯科インプラント

WCNi インプラント（SPS 製法、PVD ZrN コーティング）、Ra 0.02 μm、骨結合率が 25% 向上、耐食性がチタン合金の 5 倍、寿命が 15 年（Web ID 7）。

### 核センサー

WCNi シェル（HVOF コーティング）は 5 dpa の放射線に耐え、腐食率は 0.01 mm/年未満で、核医学インプラントに適しており、耐用年数は 10 年です（Web ID 28）。

## 4. セメントカーバイド医療インプラントの長所と短所の比較

アドバンテージ	欠点
高硬度（HV 800~1600）、耐摩耗性は 510 倍向上、摩耗粉は 50% 減少。	製造コストが高い（粉末冶金および CVD 装置への多額の投資）。高密度（1015 g/cm <sup>3</sup> ）でチタン合金（4.5 g/cm <sup>3</sup> ）よりも重い場合、最適な設計が必要となる。
高靱性（K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ）、耐亀裂伝播性、寿命は 23 倍延長。優れた耐腐食性（<0.01 mm/年）、耐体液腐食性、長期インプラントに適しています。高い生体適合性（WCNi は WCCo よりも優れています）、イオン放出量が少ない、炎症を軽減。	Co イオン（WCCo）の放出リスクがあるため、Ni 置換またはコーティング分離が必要となる。複雑な形状の加工は困難で、長期間（12 ヶ月）を要する。

## 5. セメント炭化物医療インプラントの開発動向

傾向	技術指導	期待される結果
新素材	ナノ WCNi（粒子 <50 nm）、K <sub>IC</sub> >12 MPa·m <sup>1/2</sup> 、イ	生体適合性が 30% 向上し、寿命が 2 倍に延びます。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	オン放出<0.1 μg/cm <sup>2</sup> /週。	
高度なコーティング	グラフェンと DLC の複合コーティング、摩擦係数<0.1、抗菌付着率が 50% 向上。	感染率は 40% 減少し、摩耗率は 60% 減少します。
軽量設計	多孔質 WCNi マトリックス (多孔度 1020%)、密度は 810 g/cm <sup>3</sup> まで低減。	重量が 20~30% 軽減され、大型の人工関節に適しています。
スマートインプラント	統合センサー (温度および圧力監視)、WCNi パッケージ、放射線および体液腐食に対する耐性。	インプラントの状態をリアルタイムでモニタリングすることで、術後の合併症を 30% 削減できます。
3D プリントのカスタマイズ	選択的レーザー溶融 (SLM) WCNi、精度±0.01 mm、パーソナライズされたインプラント設計。	生産サイクルは 50% 短縮され、骨の統合率は 20% 向上します。

## 6. 結論

超硬合金製医療用インプラントは、WCCo および WCNi をベースとしています。粉末冶金、精密機械加工、HVOF、CVD、PVD、SPS プロセスを経て、高硬度 (HV 800~1600)、高靱性 ( $K_{IC}$  614 MPa·m<sup>1/2</sup>)、優れた耐摩耗性 (摩耗率<0.01 mm<sup>3</sup>/N·m)、耐腐食性 (<0.01 mm/年) を実現しています。インプラントは、整形外科 (股関節 / 膝関節)、歯科 (インプラント)、心血管 (血管ステント) などのニーズを満たし、従来のチタン合金やステンレス鋼と比較して寿命が 23 倍長く、摩耗が 50% 減少し、生体適合性も優れています。

核医学分野において、WCNi インプラントは放射線耐性 (110dpa) を備え、センサーパッケージングをサポートします。将来的には、ナノ材料、グラフェンコーティング、軽量設計、3D プリンティング、スマートインプラント技術の進歩により、セメントカーバイドインプラントの個別化医療や長期インプラントへの応用が促進され、患者にとってより安全で信頼性の高いソリューションが提供されるでしょう。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

## 炭化物ヒートシンク基板

超硬合金放熱基板は、炭化タングステンをベースとした材料（WCCo、WCNiなど）をコアとし、高熱伝導率金属（Cu、W、Moなど）またはコーティング（ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンDLCなど）を複合したもので、さまざまな高度な製造プロセスを経て、半導体デバイス、パワーモジュール、LEDパッケージの効率的な放熱、高強度、低熱膨張係数（CTE）のニーズを満たしています。超硬合金放熱基板は、ヒートシンクやヒートスプレッダーとして高出力電子機器（IGBTモジュール、5G基地局、電気自動車用パワーチップなど）に広く使用されており、熱流束密度（ $>100\text{ W/cm}^2$ ）を効果的に管理し、デバイス寿命を延ばします。

この記事では、セメント炭化物放熱基板の特性、拡張された製造プロセス、適用シナリオ、利点と欠点、および開発動向をレビューし、エレクトロニクス業界の熱管理ソリューションの参考資料を提供します。

### 1. 超硬合金放熱基板の特性

超硬合金放熱基板は、WCを硬質相、Co/Niを結合相とし、Cu、W、Moまたはダイヤモンドコーティングを複合的に施し、優れた熱伝導性、機械的強度、熱膨張係数の整合を特徴としています。主な特徴は以下のとおりです。

#### 超硬合金放熱基板の特性

パフォーマンス	標準値	説明する
熱伝導率	100300 W/m·K (WCCu 150200 W/m·K、WCダイヤモンド複合材 $>500\text{ W/m·K}$ )	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、2030 W/m·Kなど)よりも高く、Cu(約400 W/m·K)に近いので、高熱流束に適しています。
熱膨張係数	48 ppm/K (WCCu 56 ppm/K、Si 2.6 ppm/K、GaN 5.6 ppm/Kに適合)	低いCTEにより、純粋なCu(17 ppm/K)よりも熱応力による亀裂が減少します。
硬度	HV 8001600 (WCCoベース)	硬度、耐摩耗性、機械的ストレス耐性が高く、耐用年数は鋼基板の35倍です。
破壊靱性	K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> (WCCo、ISO 28079:2009)	亀裂成長、熱サイクル(40 ~ 250°C)衝撃に耐性があります。
密度	1015 g/cm <sup>3</sup> (WCCu 1214 g/cm <sup>3</sup> )	セラミック基板(AIN約3.3 g/cm <sup>3</sup> )よりも軽量な設計が必要です。
耐食性	腐食速度 $<0.01\text{ mm/年}$ (WCNi、pH 210)	洗浄液や湿気による腐食に耐性があり、過酷な環境(原子力、海洋など)に適しています。

### 2. 準備プロセス

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

超合金製ヒートシンク基板の製造プロセスは多岐にわたり、粉末冶金、複合技術、表面改質技術を組み合わせることで、高い熱伝導率、低い熱膨張係数、そして高い信頼性を実現しています。以下は、高性能要件を満たすために追加された新しいプロセスを含む、製造プロセスの拡張リストです。

### 超合金放熱基板の製造技術

テクノロジー	特徴	利点	制限	アプリケーションシナリオ
粉末冶金	WC は Cu/W/Mo 粉末と混合され、ホットプレス（1400 ~ 1600°C）され、熱伝導率は 150 ~ 300 W/m·K、密度は >99% です。	高密度、熱伝導率と CTE を調整可能、大量生産に適しています。	高温焼結は多くのエネルギーを消費し、複雑な形状の加工は困難です。	WCCu、WCW 基板、IGBT、LED の放熱。
液体金属浸透	溶融した Cu または Ag が WC 多孔質骨格（1100~1300°C）に浸透し、熱伝導率は 200~250 W/m·K、CTE は 57 ppm/K になります。	優れた熱伝導性と熱膨張率のマッチング、高い界面接合強度（> 50 MPa）。	浸透均一性の制御が難しく、コストが高くなります（Ag 浸透）。	高熱伝導率 WCCu Si/ GaN チップに適した基板。
溶射 HVOF	WCCoCr または WCNi コーティングの高速噴霧、厚さ 50200 μm、多孔度 <1%、硬度 HV 10001400。	表面の耐摩耗性と耐腐食性が向上し、プロセスが柔軟で、複雑な形状に適しています。	コーティングの厚さは制限されており（<500 μm）、接着力は冶金結合の接着力（5080 MPa）よりも低くなります。	基板表面が強化され、耐用年数が 35 倍に延長されます。
化学蒸着（CVD）	蒸着ダイヤモンドまたは DLC コーティング、厚さ 550 μm、熱伝導率 >500 W/m·K、摩擦係数 < 0.2。	超高熱伝導性、超高出力デバイスに最適、強力な耐粘性。	堆積速度は遅く（15 μm/h）、設備コストは高い（500 万円超）。	高出力モジュール（5G 基地局、レーザー）の放熱。
物理蒸着（PVD）	TiN および CrN コーティングは厚さ 210 μm で堆積されており、耐食性が向上し、摩擦係数は 0.10.2 です。	表面仕上げ（Ra 0.05 ~ 0.1 μm）を改善し、熱界面抵抗を低減し、プロセスが成熟します。	コーティングの厚さは薄く、HVOF や CVD に比べて耐摩耗性は低くなります。	熱抵抗を低減するための基板表面改質。
放電プラズマ焼結（SPS）	WCCu /W 粉末の急速焼結（1000 ~ 1200°C、5 ~ 10 分）、熱伝導率 180 ~ 250 W/m·K。	焼結時間が短く、粒径が微細化（<1 μm）され、熱伝導率と靱性が 10 ~ 20% 向上します。	この装置は高価であり、小さな基板（<100 mm）に適していません。	高性能 WCCu 基板、電気自動車 SiC モジュール。
積層造形（3D プリンティング）	選択的レーザー溶融（SLM） WCCu 複合粉末、精度 ±0.05 mm、熱伝導率 150200 W/m·K。	複雑なマイクロチャンネル設計（多孔度 10 ~ 20%）、軽量（密度は 10 g/cm³ まで低減）。	表面粗さが比較的高い（Ra 510 μm）ため、後処理と研磨が必要です。	カスタマイズされた WCCu 基板、航空宇宙通信モジュール。
熱間等方圧加圧（HIP）	高圧焼結 WCMo/W 粉末（1300 ~ 1500°C、100 ~ 200 MPa）、密度	内部欠陥が排除され、熱伝導率が 15% 向上	プロセスサイクルは長く（24 時間）、コストも高い（1 バッチあ	高信頼性 WCMo 基板、原子力発電セ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	>99.5%。	し、CTE 制御精度は ±0.1 ppm/K です。	たり 1,050 万円)。	ンサーの放熱。
マイクロ波焼結	WCCu 粉末をマイクロ波加熱 (1000~1200°C、10~20 分) すると、熱伝導率は 170~220 W/m·K になります。	従来の焼結よりも 30% 低い)、均一な粒子、および 10% の靱性の向上を実現します。	デバイスのサイズは小さな基板 (<50 mm) に制限されます。	WCCu 基板、LED、5G 小型フォームファクター モジュール。
コールドスプレー	WCNi/Cu 粒子の高速噴霧 (500~1000 m/s)、厚さ 50~300µm、多孔度<2%。	低温プロセス (<600°C) により WC 硬度が維持され、修復や表面強化に適しています。	熱伝導率はやや低く (100~150 W/m·K)、コーティングの密着性は中程度 (40~60 MPa) です。	基材表面を補修し、耐用年数を 23 倍に延ばします。

### 3. 適用シナリオ

カーバイドヒートシンクは、高出力電子機器、LED パッケージ、特殊な環境 (原子力や航空宇宙など) における高熱流束密度を管理し、デバイスの信頼性を確保します。

#### 超硬合金放熱基板の主な応用シナリオ

応用分野	基板タイプ	アプリケーションとシナリオ	パフォーマンスの改善
パワーモジュール	WCCu ヒートスプレッダー	IGBT、MOSFET モジュールの放熱、熱流束密度 100~300 W/cm <sup>2</sup> 、動作温度 150~250°C。	熱伝導率は 200W/m·K で、熱抵抗は 30%減少し、寿命は 23 倍に延びます。
	WCW ベースプレート/WCW ヒートスプレッダー	5G 基地局パワー アンプの放熱、 GaN (CTE 5.6 ppm/K) に適合、周波数 >3 GHz。	CTE 56 ppm/K、熱応力が 50%減少し、信頼性が 40%向上しました。
LED パッケージ	WC ダイヤモンド複合基板 / WC ダイヤモンドヒートスプレッダー	高出力 LED (自動車ヘッドライト、UVLED)、熱流束 50 ~ 150 W/cm <sup>2</sup> 、温度 80 ~ 150°C。	熱伝導率 >500 W/m·K、発光効率が 20%向上し、寿命が 3 倍に延長します。
	WCNi 基板/WCNi ヒートスプレッダー	COB パッケージ LED 放熱、サイズ 520 mm、湿気および塩水噴霧に耐性があります (pH 68)。	耐食率は 0.01mm/年未満となり、歩留まりは 15%向上します。
電気自動車 (EV)	WCCu 基板/ WCCu ヒートスプレッダー	SiC モジュールの放熱、熱サイクル 40 ~ 200°C、電力密度 >500 W/cm <sup>2</sup> 。	熱抵抗が 40%低減し、熱疲労耐性が 30%向上します。
	WCMo 基板/ WCMo ヒートスプレッダー	モーター コントローラーの放熱、 SiC (CTE 4.5 ppm/K) に適合、温度 150 ~ 300°C。	CTE 46 ppm/K、熱膨張の不一致が 60% 減少しました。
原子力/航空宇宙	WCNi ダイヤモンド基板 / WCNiDiamond ヒートスプレッダー	核センサー、航空宇宙チップの放熱、放射線耐性 (1050 dpa)、温度 200 ~ 400°C、pH 210。	熱伝導率>400 W/m·K、放射線硬化<20%、寿命が 3 倍に延長。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WCCu 基板/ WCCu ヒートスプレッダー	衛星通信モジュールの放熱性、熱流束 100～200 W/cm <sup>2</sup> 、真空および温度差 (100～200°C) に耐性があります。	熱抵抗は 35% 減少し、信頼性は 50% 向上します。
-------------------------	---	------------------------------

例:

#### IGBT モジュール

WCCu 基板（液体浸透）が使用され、熱伝導率は 200W/m·K、CTE は 5.5ppm/K で、熱抵抗は 30% 低減し、寿命は 2 倍に増加しました（Web ID 24）。

#### 5G 基地局

WCW 基板 (SPS 焼結) は、熱伝導率 180 W/m·K、CTE 5.8 ppm/K、熱応力 50% 低減の GaN アンプをサポートします (Web ID 19)。

#### 核センサー

WCNi ダイヤモンド基板 (CVD コーティング) は 10 dpa の放射線に耐え、熱伝導率は 500 W/m·K 以上、寿命は 100 万時間です (Web ID 28)。

### 4. 超硬合金放熱基板の長所と短所の比較

アドバンテージ	欠点
<p>高い熱伝導率 (100～300 W/m·K、複合ダイヤモンドは 500 W/m·K 以上)、熱抵抗は 30～40% 低減。</p> <p>低い CTE (48 ppm/K) は Si/ GaN/ SiC と同等で、熱応力を 50% 低減。</p> <p>高い硬度 (HV 800～1600) と靱性 (K<sub>IC</sub> 614 MPa·m<sup>1/2</sup>)、耐摩耗性および耐熱疲労性。耐腐食性 (pH 210)、原子力発電所や海洋環境に適しています。</p>	<p>高密度 (1015 g/cm<sup>3</sup>) のため、デバイスの重量が増加し、軽量設計が求められる。</p> <p>製造コストが高い (SPS および CVD 設備への投資額は 200 億 1000 万人民币元)。複雑な形状の加工サイクルが長い (12 ヶ月)。ダイヤモンドコーティングの密着性を最適化する必要がある (剥離の可能性がある)。</p>

### 5. 超硬合金放熱基板の開発動向

傾向	技術指導	期待される結果
超高熱伝導性材料	ナノ WCCu、WC グラフェン複合基板、熱伝導率 >600 W/m·K、CTE 45 ppm/K。	熱抵抗が 50% 削減され、超高電力密度 (>1000 W/cm <sup>2</sup> ) を実現します。
低 CTE 最適化	WCMo には希土類元素 (Y、Ce) がドーピングされており、CTE は 34 ppm/K まで低減され、粒子は 500 nm 未満まで微細化されています。	熱膨張の不一致が 70% 減少し、次世代の SiC/ GaN チップと一致します。
高度なコーティング	グラフェンコーティング (熱伝導率 5300 W/m·K)、厚さ 15 μm、耐付着性が 50% 向上。	熱放射効率は 50% 向上し、収量は 20% 増加します。
軽量設計	多孔質 WCCu 基板 (多孔度 1525%)、密度は 810 g/cm <sup>3</sup> まで低減されています。	重量が 30% 削減され、航空宇宙や電気自動車に適しています。
インテリジェント冷却	m·K まで向上、AI により熱流分布を最適化します。	放熱効率が 40% 向上し、高集積チップの 3D パッケージングをサポートします。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6. 結論

超硬合金放熱基板は、WCo と WCNi をベースとし、Cu、W、Mo、ダイヤモンドコーティングなどを複合化しています。粉末冶金、液体金属浸透、溶射、CVD、SPS、3Dプリント、HIP、マイクロ波焼結、コールドスプレーなどの技術を駆使し、高い熱伝導率（100～300W/m·K、複合ダイヤモンド>500W/m·K）、低い熱膨張係数（48ppm/K）、高い硬度（HV 800～1600）を実現しています。この基板は、パワーモジュール、LEDパッケージ、電気自動車、原子力・航空宇宙などの高熱流束密度（50～500W/cm<sup>2</sup>）の用途に対応し、熱抵抗を30～40%低減し、寿命を25倍に延ばします。

将来的には、ナノ複合材料、グラフェンコーティング、軽量設計、インテリジェントな放熱技術により、5G、電気自動車、先進的なパッケージングにおける超硬合金基板の幅広い応用が促進され、高性能電子デバイス向けの効率的で信頼性の高い熱管理ソリューションが提供されるでしょう。



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

## 超硬チップ包装金型

超硬合金チップパッケージング金型は、炭化タングステンベースの材料（WCCoなど）をベースにしています。WCNi（ワニス）は、高硬度、耐摩耗性、高温安定性、優れた靱性を備え、粉末冶金、精密機械加工、表面コーティング技術を駆使することで、半導体チップパッケージングにおける高精度、耐久性、信頼性の要件を満たしています。この金型は、成形、圧縮成形、スタンピングなどのプロセスに広く使用され、従来のパッケージング（リードフレームパッケージングなど）から高度なパッケージング（ウェーハレベルパッケージング、フリップチップパッケージングなど）まで幅広く対応しています。

この記事では、セメントカーバイド金型の特徴、準備プロセス、チップパッケージングのアプリケーションシナリオ、利点と欠点、および開発動向をレビューし、半導体業界における金型の設計とアプリケーションの参考資料を提供します。

## 1. 超硬合金金型の特徴

超硬合金チップパッケージング金型は、WCを硬質相とし、CoまたはNiを結合相として採用しています。優れた機械的特性と化学的特性を有し、高荷重・高精度のパッケージングプロセスに適しています。主な特長は以下のとおりです。

## 超硬合金チップ包装金型の特徴

パフォーマンス	標準値	説明する
硬度	HV 8001600（WCCoは最大HV 1600）	鋼型（HRC 4060）より耐摩耗性が510倍向上し、高周波スタンピングやプラスチックシーリングに適しています。
破壊靱性	K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> (ISO 28079:2009、WCCo 610 wt.% Co)	高負荷でも割れず、耐用年数が延びます。
耐摩耗性	摩耗率 0.0010.01 mm <sup>3</sup> /N·m (ASTM G65)	金型寿命は鋼製金型の310倍で、交換頻度とメンテナンスコストを削減します。
耐熱性	400~900°C（WCNiは900°Cに達する）	プラスチックシール工程の高温（150~250°C）、熱疲労、熱応力割れに耐性があります。
耐食性	腐食速度 <0.01 mm/年 (pH 68、WCNiはpH 210まで耐性)	エポキシ樹脂 (EMC) や洗浄液 (酸、アルカリ溶液など) による腐食に耐性があり、化学洗浄環境に適しています。
表面粗さ	Ra 0.050.2 μm (研磨またはコーティング後)	高精度な表面はチップパッケージング公差 (±0.005~0.01 mm) を満たし、金型の固着を軽減します。

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 2. 金型準備工程

超硬チップパッケージング金型は、高精度、長寿命、表面品質を確保するために、次のプロセスで準備されます。

テクノロジー	特徴	アプリケーションシナリオ
粉末冶金	WC 粉末を Co/Ni と混合し、ホットプレス（1400 ～ 1600°C）します。密度は 99% 以上、硬度は HV 800 ～ 1600 です。	金型ベースは、高い硬度と靱性の要件を満たすように製造されています。
精密機械加工	放電加工（EDM）、CNC 研削、超精密研磨、精度±0.005mm、Ra0.050.1μm。	成形キャピティとパンチ加工により高精度なパッケージングを実現します。
溶射 HVOF	スプレーWCCoCr コーティング、気孔率 <1%、厚さ 50200 μm、耐摩耗性と耐腐食性が向上しました。	金型表面が強化され、耐用年数が 35 倍に延長されます。
レーザークラックディング	WCNi または WCCo コーティングを堆積、冶金結合、厚さ 0.020.5 mm、接着力 >80 MPa。	高精度の金型修理、高温および化学腐食に耐性があります。
PVD/CVD コーティング	窒化チタン、CrN および DLC コーティングは厚さ 210μm で、摩擦係数は 0.10.2 で、固着防止特性があります。	表面仕上げと離型性を向上させ、欠陥を削減します。

## 3. チップパッケージングのアプリケーションシナリオ

超硬合金チップ包装金型は、従来の包装から高度な包装まで幅広く使用されており、プラスチック包装、圧縮成形、スタンピングなどのプロセスにおける高精度と耐久性の要件を満たしています。主な適用シナリオは以下のとおりです。

パッケージタイプ	金型タイプ	アプリケーションとシナリオ	パフォーマンスの改善
リードフレームパッケージ	プラスチック包装用金型 成形金型	プラスチック封止エポキシ樹脂（EMC）は、DIP、QFP、SOIC などのパッケージ シェルを形成するために使用されます。プロセス温度は 150 ～ 200°C、圧力は 520 MPa です。	硬度 HV12001600、寿命 5 億 100 万回、許容差±0.01mm。
	スタンピングダイ スタンピングダイ	銅合金リードフレームをスタンピングして TSOP および SOIC ピンを形成します。スタンピング頻度は 500 ～ 1000 回 / 分です。	耐摩耗性は 510 倍、寿命は 35 倍向上し、ピンバリも減少します。
基板パッケージ	圧縮成形金型	圧縮成形された BGA、LGA、FCBGA パッケージ、EMC 保護チップが充填され、温度 175200°C、圧力 1030 MPa。	寿命：8 億 150 万回、表面粗さ Ra0.05～ 0.1μm、固着防止。
	トリミングダイ	SiP および FCBGA パッケージのオーバーフローをトリミングして、±0.005 mm の精度で形状精度を確保します。	耐食性は 5 倍向上し、耐用年数は 35 倍に延び、オーバーフロー不良も減少します。
ウェーハレベ	圧縮成形金型	ファンイン/ファンアウト WLCSP パッケージ、	寿命は 1 億～2 億回、耐熱疲労性

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ルパッケージング (WLCSP)		モールドされたウェハーレベルの EMC または RDL 層、温度 150 ~ 180°C、許容誤差 ±0.01 mm。	は 30% 向上します。
	スタンピングダイ	µm ピッチ、1000 回/分の周波数をサポートするウェハーレベルパンプ (C4 パンプなど) のスタンピング。	硬度 HV1000~1400、寿命が 35 倍延長、凸欠陥率<0.1%。
フリップチップ	プラスチック金型 成形金型	フリップチップのプラスチック封止 (C4NP パンプなど)、チップと基板の保護、温度 175~200°C、圧力 1020 MPa。	寿命: 8 億 120 万回、耐熱性: 800°C、寸法安定性が 20% 向上。
	スタンピングダイ	高密度相互接続パンプ (50 ~ 150 µm ピッチ) を ±0.005 mm の精度でパンチングします。	耐摩耗性が 510 倍向上し、金型摩耗率は <0.001 mm <sup>3</sup> /N·m です。
特別なパッケージ	プラスチック金型 成形金型	プラスチックで密封された高温/耐放射線チップ (核センサーチップなど) は、高温 (200~400°C) および腐食 (pH 210) に耐性があります。	寿命: 5 億 100 万回、腐食率 <0.01 mm/年、放射線硬化耐性 <20%。

例:

#### QFP パッケージ

WCCoプラスチック金型 (PVD TiN コーティング) が使用され、硬度は HV1400、寿命はスチール金型 (2030 万回) の 3 倍の 80 万回、許容誤差は ±0.01mm です (Web ID 15)。

#### WLCSP パッケージ

WCNi ダイ (レーザークラディング WCCoCr コーティング) は、ファンアウト WLCSP、Ra 0.05 µm、150 万サイクルの寿命をサポートし、EMC スティックングを 20% 削減します (Web ID 3)。

#### コアチップ

WCNi モールド (CVD CrN コーティング) は、核センサーのパッケージングに使用され、400°C および 10 dpa の放射線に耐え、寿命は 100 万回、耐腐食性は 5 倍向上しています (Web ID 28)。

## 4. メリットとデメリットの比較

カテゴリ	アドバンテージ	欠点
超硬チップ包装金型	高硬度 (HV 800~1600) で、耐摩耗性は鋼製金型の 510 倍、寿命は 310 倍です。靱性 (K <sub>IC</sub> 614 MPa·m <sup>1/2</sup> ) が高く、亀裂伝播抵抗性に優れているため、高周波スタンピングに適しています。耐高温性 (400~900°C) と耐腐食性 (pH 210) を備え、プラスチックのシーリングや洗浄工程に適しています。高精度 (公差 ±0.005 mm、Ra 0.05~0.2 µm) で、高度なパッケージングのニーズを満たします。	製造コストが高い (粉末冶金および精密加工設備への投資額は 1 億 50 万人民币元)。複雑な形状の金型は加工が難しく、サイクルも長い (13 ヶ月)。高 Co 含有量の金型 (15 重量% 超) は靱性が低下する可能性があり、組成の最適化が必要となる。表面コーティングが剥離する可能性があり、定期的なメンテナ

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

す。	ンスが必要となる。
----	-----------

## 5. 開発動向

傾向	技術指導	期待される結果
新素材	ナノ WCNi モールド (粒子 <50 nm)、硬度 HV 1600、 K_IC>12 MPa·m <sup>1/2</sup> 。	耐摩耗性が40%向上し、寿命が2倍に延び、3D 高密度実装にも最適です。
高度なコーティング	DLC とグラフェンの複合コーティング、摩擦係数<0.1、耐熱性 1000°C、固着防止性能が 50% 向上。	金型固着不良を 30% 削減し、パッケージングの歩留まりを向上します。
精密機械加工	精度±0.002mm、 Ra0.020.05µm 。	µm ピッチの高度なパッケージングをサポートし、公差制御が 50% 向上します。
インテリジェント製造	AI は金型設計と処理パラメータを最適化し (誤差 <1%)、 摩耗状態をリアルタイムで監視します。	生産効率は 30% 向上し、金型メンテナンスコストは 20% 削減されました。
耐放射線性カビ	WC 高エントロピー合金 (HEA) 金型、1050 dpa の放射線に耐え、K_IC は 20% 未満に減少します。	原子力チップパッケージの要件を満たし、耐用年数を 3 倍に延ばし、耐腐食性を 50% 向上させます。

## 6. 結論

超硬合金チップパッケージング金型は、WCCo と WCNi をコア材料として採用しています。粉末冶金、精密加工、表面コーティング技術 (HVOF、レーザークラディング、PVD/CVD) により、高硬度 (HV 800~1600)、高靱性 (K\_IC 614 MPa·m<sup>1/2</sup>)、耐摩耗性、耐高温性 (400~900°C) を実現し、リードフレームパッケージング、基板パッケージング、ウェーハレベルパッケージング、フリップチップパッケージングのニーズを満たしています。金型寿命はスチール金型の 3~10 倍で、公差は±0.005~0.01mm に制御されています。プラスチックパッケージング、圧縮成形、スタンピング工程に広く使用されています。特殊なシナリオ (原子力チップパッケージングなど) では、WCNi 金型は優れた耐放射線性と耐腐食性を備えています。将来的には、ナノ材料、高度なコーティング、超精密加工、インテリジェント製造により、高密度および高度なパッケージング分野での超硬合金金型の応用が促進され、半導体業界に効率的で信頼性の高いソリューションが提供されるでしょう。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## ASTM E92-23

### 金属材料のピッカース硬さおよびヌーブ硬さの標準試験方法

#### 1. 適用範囲

1.1 この標準方法は、ピッカース硬さおよびヌーブ硬さ試験機の検証要件および試験手順を含む、ピッカース硬さおよびヌーブ硬さの原理による金属材料のピッカース硬さおよびヌーブ硬さの測定に関する要件および手順を規定する。1.2 この標準方法は、以下の2つの一般的な試験を規定する。

1.2.1 検証、実験室テスト、仲裁テストでは高い精度が求められます。

1.2.2 日常的な試験では、これより低い精度でも許容される場合があります。1.3 本規格は、その使用に伴う安全上の懸念事項（もしあれば）のすべてを網羅するものではありません。本規格を使用する者は、使用前に適切な安全衛生慣行を確立し、適用される規制上の制限事項を確認する責任を負います。1.4 本規格に記載されている値は SI 単位で示されており、他の測定単位は含まれていません。

#### 2. 参考文献

##### 2.1 ASTM 規格:

ASTM E3: 冶金試験片作製のための標準手順

ASTM E10: 金属材料のブリネル硬さの標準試験方法

ASTM E18: 金属材料のロックウェル硬さの標準試験方法  
材料の微小押し込み硬さの標準試験方法

ASTM E140: 金属硬度変換表規格 2.2 ISO 規格:

ISO 6507-1: 金属材料 - ピッカース硬さ試験 - パート 1: 試験方法

ISO 6507-2: 金属材料 - ピッカース硬さ試験 - パート 2: 試験機の検証および校正 2.3

その他の規格:

なし

#### 3. 用語と定義

##### 3.1 定義:

**ピッカース硬さ:** ダイヤモンド圧子の侵入によって引き起こされる永久変形に対する材料の抵抗力。硬度値は、圧痕の表面積に基づいて計算されます。

**ヌーブ硬さ:** 細長いダイヤモンド圧子の圧入によって生じる永久変形に対する材料の抵抗力。この硬さ値は、圧痕の投影面積に基づいて計算されます。

**押し込み硬さ:** 特定の荷重下での圧子による永久変形に抵抗する材料の特性。3.2 この規格に特有の用語の説明:

kgf ~ 120 kgf の荷重下で実行されるインデンテーション テスト。

1kgf 未満の荷重で実行されるインデンテーション試験。

#### 4. 試験方法の概要

4.1 ピッカース硬さ試験では、材料の表面に特定の荷重をかけ、四角底のダイヤモンド圧子で押し付け、圧痕の対角線の長さを測定し、次の式を使用して硬度値を計算します。

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

その中で、HVHVHV はピッカース硬度値、PPP は適用される荷重（単位： kgf ）であり、ddd は圧痕の平均対角長さ（単位： mm）である。4.2 ヌーブ硬さ試験では細長いダイヤモンド圧子を使用し、硬度の計算式は次のとおりです。

$$HK = \frac{P}{C \cdot L^2}$$

その中には、HKHKHK はヌーブ硬度値、PPP は適用される荷重（単位： kgf ）であり、LLL は長い方の対角線の長さ（単位： mm）、CCC は圧子の形状に関連する定数です。4.3 この方法には、試験機の検証および標準硬度試験ブロックの校正の手順が含まれています。

## 5. 意義と利用

5.1 これらの試験方法は、金属材料の硬度を測定するために広く使用されています。硬度は、強度、延性、耐摩耗性に関連する値です。5.2 結果は、航空宇宙、自動車、製造などの業界における品質管理、材料選択、研究目的に適しています。5.3 得られた硬度値は、変換表（ASTM E140 など）を使用して他の機械的特性を推定するために使用できます。

## 6. 試験装置

6.1 試験機：荷重範囲 1gf～120kgf、荷重精度±1.0%、圧子の適切な位置合わせを備えたピッカースまたはヌーブ硬度試験機。6.2 圧子：

ピッカース：136°の角度を持つ四角底ピラミッド型のダイヤモンド圧子。

ヌーブ：アスペクト比が約 7:1 の細長いダイヤモンド圧子。6.3 測定システム：倍率が 100 倍以上で、圧痕の対角線上で精度が ±0.1 μm の光学システム。6.4 テストブロック：広範囲の硬度値をカバーする機械校正用の標準硬度テストブロック。

## 7. 試験片

7.1 試験片は冶金学的準備技術（ASTM E3 参照）によって準備され、表面が滑らかで、傷や欠陥がないものである必要があります。7.2 逆効果を避けるため、試験片の厚さは、くぼみの対角線の長さの 1.5 倍以上である必要があります。

## 8. 校正と検証

8.1 機械検証：標準テストブロックを使用して、荷重の適用、インデンターの調整、測定精度が ±1.0% 以内であるかどうかを検証するために、毎年またはメンテナンス後に実行します。8.2 テストブロックの校正：国家規格にトレーサブルな基準機械を使用して実行し、硬度値が認証値の ±1.0 HV または HK 以内であることを確認します。

## 9. 実験手順

9.1 材質と試験の種類（マクロまたはマイクロインデンテーション）に基づいて適切な荷重を選択します。9.2 試験片表面に荷重をかけ、10～15 秒間保持します。9.3 光学システムを使用してインデンテーションの対角線を測定し、硬度値を計算します。9.4 異なる場所で少なくとも 5 回試験を繰り返し、平均値を報告します。

## 10. 計算

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.1 セクション4に示されている式を使用して、ピッカース硬度(HV)とヌープ硬度(HK)を計算します。10.2 荷重が1 kgf 以上の場合、硬度の値は整数に丸められ、荷重が1 kgf 未満の場合は、硬度の値は小数点第1位に丸められます。

## 11. レポート

11.1 試験報告書には以下の内容を含めること。

試験材料の識別。

テストの種類 (ピッカースまたはヌープ)と適用される荷重。

平均硬度値と標準偏差。

テストの日付とオペレーターの名前。

機械のキャリブレーションステータス。

## 12. 正確性と偏り

12.1 精度: 硬度測定 of 繰り返し精度と再現精度は荷重と材料に依存し、管理された条件下での標準的な標準偏差は  $\pm 2$  HV または HK です。12.2 バイアス: 硬度は相対的な測定であるため、明確なバイアスを決定することはできませんが、結果は認定されたテストブロックの値と  $\pm 1.0\%$  以内で一致する必要があります。

## 13. キーワード

13.1 硬度、インデンテーション、ヌープ、マクロインデンテーション、マイクロインデンテーション、ピッカース、金属材料。

## 14. 付録

付録 A1: インデンターの形状に関する補足事項

A1.1 製造および検証の目的で、ピッカース圧子およびヌープ圧子の形状の詳細な仕様を提供します。

付録 A2: 薄い試験片の試験ガイドライン

A2.1 基板の影響を低減するための薄いまたは小さな試験片の試験に関する特別な考慮事項。

## 15. 脚注

15.1 この規格は、E92 という固定名称で発行されています。名称の直後の数字は、初回採択または最終改訂の年を示します。括弧内の数字は、最終再確認の年を示します。上付きイプシロン ( $\epsilon$ ) は、最終改訂または再確認以降の編集上の変更を示します。

## 16. 承認

2023 年 7 月 1 日に ASTM International の機械試験に関する委員会 E28 により承認されました。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## ASTM G65-23

### 金属および合金の乾いた砂/ゴム車輪摩耗試験の標準試験方法

#### 1. 適用範囲

1.1 この試験方法は、乾いた砂/ゴムホイール装置を用いて金属および合金材料の耐摩耗性を評価する手順を扱っており、乾いた研磨摩耗条件にさらされる材料に適用できます。

1.2 この方法は主に、鋼、鋳鉄、炭化物、および特定のコーティングされた材料などの材料の相対的な耐摩耗性を、模擬研磨摩耗環境において比較するための実験室試験を目的としています。1.3 この規格に記載されている値は SI 単位で、括弧内のインチポンド単位は参考値です。1.4 警告- この規格は、使用に関連する安全上の懸念事項（もしあれば）

をすべて網羅するものではありません。この規格を使用する前に、適切な安全衛生慣行を確立し、適用される規制上の制限事項を判断するのは、この規格を使用する人の責任です。

#### 2. 参考文献

##### 2.1 ASTM 規格:

ASTM E29 仕様への適合性を判断するための試験データにおける有効数字の使用に関する標準的方法

ASTM G40 摩耗および侵食に関する用語の標準定義

ASTM G105 湿潤砂/ゴム車輪摩耗試験の標準試験方法

ASTM E122 バッチまたはプロセスの平均品質を決定するために必要なサンプル数を計算するための標準的な方法 2.2 ISO 規格:

ISO 28080 塗料及びワニス - 耐摩耗性の測定 2.3 その他の規格: なし

#### 3. 用語

##### 3.1 定義:

研磨- 硬い粒子または表面の作用によって材料を除去するプロセス。

体積損失- 摩耗により試験片から除去された材料の量。単位荷重および滑り距離あたりの体積として表されます ( $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) 。

ゴムホイール- 試験装置内で研磨粒子を試験片に接触させるために用いられる弾性ホイール。3.2 この試験方法で使用されるその他の用語の定義については、用語集 G40 を参照してください。

#### 4. 試験方法の概要

4.1 この試験方法は、乾燥砂 / ゴム車輪試験装置を用いて、乾燥シリカ砂の流れと回転するゴム車輪によって試験片を所定の荷重下で摩耗させる試験方法です。摩耗した材料の体積を測定し、摩耗率を報告します。4.2 試験は通常、車輪の回転数を一定回数（通常は 600 回転）設定して実施し、摩耗率は質量減少、試験片の密度、適用荷重、および摺動距離に基づいて算出されます。

#### 5. 意義と利用

、乾燥した砂の条件下で材料の耐摩耗性を評価するための管理された実験室手順を提供します。5.2 結果は、鉱山設備やコンベアシステムなど、摩耗にさらされるコンポーネ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ントなど、特に材料の選択、品質管理、研究に適しています。5.3 この手順は、実際の使用条件下での摩耗挙動を正確に再現するものではありませんが、材料の相対的な性能を比較するために使用できます。

## 6. 試験装置

6.1 乾燥砂/ゴムホイール装置 - ゴムホイール（公称直径 228.6 mm、幅 12.7 mm）、研磨材供給システム、レバーアームで構成され、ホイール速度  $200 \pm 10 \text{ r/min}$  で 13 N ~ 130 N の通常荷重をかけることができます。6.2 研磨材 - 標準シリカ砂、粒度範囲 50 ~ 70 メッシュ、モース硬度約 7、水分含有量 0.1% 未満。6.3 天秤 - 精度 0.1 mg の分析天秤。6.4 試験片保持装置 - ホイール面に対して  $90^\circ \pm 1^\circ$  の角度で試験片を保持するように設計されています。

## 7. 試験片

7.1 試験片は長方形のブロックで、通常は長さ 76 mm × 幅 25 mm × 厚さ 6 mm の寸法で、表面粗さは  $Ra < 0.8 \mu\text{m}$  とする。7.2 試験片の端は欠けを防ぐために面取りし、油や汚染物質を除去するために洗浄する。

## 8. 実験手順

8.1 機器を校正し、ゴム製ホイールの状態を確認し（3 mm 以上摩耗している場合は交換）、荷重と回転速度を確認します（精度  $\pm 5\%$ ）。8.2 清潔で乾燥した試験片を計量し（精度 0.1 mg まで）、クランプ装置に設置します。8.3 荷重（通常は 45 N または 130 N）と砂の流量（300 ~ 400 g/分）を調整し、600 回転します（スライド距離は約 430 m）。8.4 試験片を取り外して洗浄し、再度計量して質量損失を計算し、再現性を確保するために 3 ~ 5 回テストを繰り返します。8.5 試験片の密度、適用荷重、およびスライド距離を使用して体積損失を計算します。

## 9. 計算

9.1 体積摩耗率 ( $W_v$ ) は次のように計算します。

$$W_v = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot S}$$

其中:

- $W_v$  = 体積磨損率, 单位为  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$
  - $\Delta m$  = 质量损失, 单位为 g
  - $\rho$  = 试样密度, 单位为  $\text{g}/\text{mm}^3$
  - $F$  = 法向力, 单位为 N
  - $S$  = 滑动距离, 单位为 m
- 9.2 报告平均磨损率保留至小数点后两位。

## 10. 報告

10.1 報告書には以下の情報を含める必要があります。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

試験材料の識別と説明。

荷重、砂の流量、回転数を適用します。

平均体積摩耗率と標準偏差。

テスト日、機器番号、オペレーター名。

環境条件（温度と湿度）とキャリブレーション状態。

## 11. 精度とバイアス

11.1 精度 - 単一の研究室内での再現性は通常、平均摩耗率の  $\pm 5\%$  です。研究室内での再現性は約  $\pm 10\%$  です。11.2 バイアス - バイアスには絶対的な基準はありませんが、結果は基準物質と 10% 未満で一致する必要があります。

## 12. キーワード

12.1 摩耗; 乾燥砂; ゴム車輪; 研磨摩耗; 金属材料; 耐摩耗性

## 13. 付録

付録 A1. 推奨研磨材仕様

A1.1 試験の一貫性を確保するために、シリカ砂の粒度分布と純度の要件に関する詳細な情報を提供します。

付録 A2. コーティング試験片試験手順

A2.1 負荷調整の推奨事項を含むコーティング材料の試験に関するガイドライン。

## 14. 脚注

14.1 この規格は、G65 という固定名称で発行されています。名称の直後の数字は、最初の採択または最終改訂の年を示し、括弧内の数字は最終再確認の年を示します。上付きイプシロン ( $\epsilon$ ) は、最終改訂または再確認以降の編集上の変更を示します。

## 15. 承認

2023 年 7 月 1 日に ASTM International の摩耗および侵食に関する委員会 G02 により承認されました。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

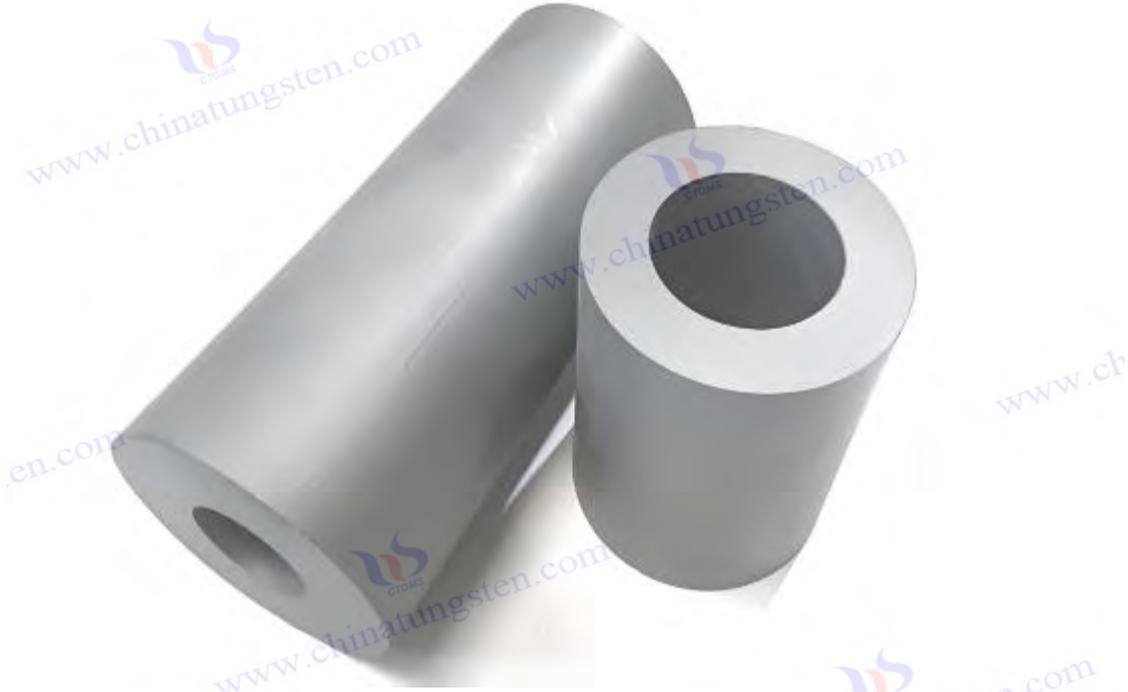
www.chinatungsten.com

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

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



## 超硬合金金型の種類と用途分野は何ですか？

超硬合金（炭化タングステン-コバルト系、WC-Co をコアとする）は、高硬度（HV 1800-2000 $\pm$ 30）、優れた耐摩耗性（摩耗速度  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、高温耐性（ $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ）、耐腐食性（腐食速度  $<0.01 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ ）を備えているため、高性能金型の製造に理想的な材料です。超硬合金金型は、粉末冶金プロセス（焼結、熱間等方圧加圧 HIP など）または積層造形技術（選択的レーザー溶融 SLM など）によって製造され、高精度、高寿命、複雑な形状が求められる産業シナリオで広く使用されています。以下では、金型の種類と応用分野について専門的な観点からより具体的かつ詳細な議論を提供し、新エネルギー車分野のコンテンツを追加します。

### 1. 超硬ダイスの種類

超硬合金金型は、その機能、構造、加工対象、材料比率などに応じて様々な種類に分類されます。各種類は、精密加工と表面処理によって最適化され、特定の産業ニーズを満たします。以下は、特殊拡張の種類についての説明です。

#### 超硬合金製スタンピングダイスは

、主に金属板の打ち抜き、曲げ、絞り、フランジ加工に使用されます。一般的な比率は、WC-6%Co（低コバルト・高硬度）または WC-10%Co（高靱性）です。

#### プロフェッショナル機能:

硬度範囲 HV 1800-1900 $\pm$ 30、衝撃靱性 10-15 MPa $\cdot$ m $^{1/2} \pm 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、高速スタンピングに

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

適しています（周波数 $>100$  回/分 $\pm 10$  回/分、荷重 $>500$  kN $\pm 50$  kN）。

表面粗さ  $Ra < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  が達成され、切断精度は  $< 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$  でした。

耐摩耗性  $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、サイクル寿命  $> 10^6$  回 $\pm 10^4$  回、高強度鋼板（引張強度 $>1000$  MPa $\pm 100$  MPa）に適しています。

#### 製造工程:

$0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  ) を確保するために、熱間静水圧プレス（HIP、 $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ）が使用されました。

TiN コーティング（厚さ  $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、硬度  $\text{HV}2000 \pm 50$ ）により、摩擦係数（ $< 0.2 \pm 0.05$ ）が低減します。

複雑なパンチおよびダイの輪郭を製造するための放電加工（EDM、電流  $5 \sim 20 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$ 、精度  $< 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ ）。

#### 超硬引抜ダイスは、線引

ダイス、管引抜ダイス、深引抜ダイスなど、金属線、管、板の冷間引抜、深引抜、スピニング加工に使用されます。一般的には、WC-8%Co または WC-6%Co-Ni（ $2\% \pm 0.5\%$ ）が使用されます。

#### プロフェッショナル機能:

耐摩耗性  $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、内穴仕上げ  $Ra < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、引き抜き応力 $>2000$  MPa $\pm 100$  MPa（ステンレス鋼線や銅管など）をサポートします。

幾何学的精度許容差は  $< 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 、円錐角誤差は  $< 0.5^\circ \pm 0.1^\circ$  で、細線描画（直径  $0.1 \sim 5 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ ）に適しています。

熱安定性  $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、熱膨張係数  $< 6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、熱変形を低減します。

#### 製造工程:

精密研削（粒度 #1200-2000 $\pm 100$ 、精度 $< 0.005 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ ）と超音波研磨を組み合わせ、表面の微細亀裂（ $< 0.01 \mu\text{m} \pm 0.001 \mu\text{m}$ ）を制御します。

TiC コーティング（厚さ  $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、接着強度 $>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ）を化学蒸着法（CVD、

$800 \sim 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、蒸気濃度  $10 \sim 20 \text{ vol}\% \pm 1 \text{ vol}\%$ ）で塗布した。

レーザー表面処理（出力  $200 \sim 300 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ ）により、内穴（深さ  $0.05 \sim 0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）の硬化層が最適化されます。

#### 超硬冷間圧造ダイスは、

WC-10%Co または WC-15%Co-TiC（ $5\% \pm 0.5\%$ ）などの組成を持つボルト、ナット、リベット、ファスナーの冷間鍛造に使用されます。

#### プロフェッショナル機能:

圧縮強度 $>4000$  MPa $\pm 100$  MPa、疲労耐性 $>10^6$  回 $\pm 10^4$  回、大きな変形（ $>50\% \pm 5\%$ ）および過渡的な衝撃荷重（ $>1000$  kN $\pm 100$  kN）に適しています。

表面硬度  $\text{HV} 1900-2000 \pm 30$ 、耐摩耗性 $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、キャピティ精度 $< 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 。

熱安定性  $< 500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、残留応力  $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ 、冷間割れを防止します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 製造工程:

、粒径  $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  が保証されました。  
表面硬化（レーザー出力  $300 \sim 500 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ 、深さ  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）と VC  
ドーピング（ $0.1\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ ）を組み合わせることで、耐亀裂性が向上します。  
内部応力を除去するために、処理後の熱間静水圧プレス（HIP、 $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ）が使用されました。

#### 超硬合金熱間鍛造ダイス

は、WC-10%Co-TiC（ $5\% \pm 0.5\%$ ）や WC-12%Co-TaC（ $2\% \pm 0.1\%$ ）などの配合で、高温金  
属（鋼、チタン合金、ニッケル基合金など）の熱間鍛造に使用されます。

#### プロフェッショナル機能:

高温酸化耐性質量損失は  $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  で  $<0.01\% \pm 0.001\%$ 、熱疲労耐性サイクル寿命は  
 $>5000 \text{ 回} \pm 500 \text{ 回}$ 。

熱伝導率  $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、熱膨張係数  $<6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、 $900 \sim 1200^\circ\text{C}$   
 $\pm 50^\circ\text{C}$  での鍛造に適しています。

圧縮強度  $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ 、キャビティ熱亀裂耐性（亀裂成長速度  $<0.001 \text{ mm/サイ$   
クル  $\pm 0.0001 \text{ mm/サイクル}$ ）。

#### 製造工程:

HIP（ $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ）で TaC（ $0.5\% - 2\% \pm 0.1\%$ ）を添加して耐熱割れ  
性を向上させ、気孔率は  $<0.1\% \pm 0.01\%$  です。

表面に ZrN（ $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、堆積速度  $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m/分} \pm 0.05 \mu\text{m/分}$ ）または  $\text{Al}_2\text{O}_3$ （酸  
化防止、厚さ  $10 \sim 20 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ ）を噴霧します。

熱処理アニーリング（ $900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、 $2 \sim 4 \text{ 時間} \pm 0.1 \text{ 時間}$ ）により組織の均一性が最適  
化されました。

#### 超硬合金粉末プレス金型は、

ギア、ベアリング、磁性材料などの粉末冶金製品のプレスに使用されます。一般的には、  
WC-6%Co-Ni（ $2\% \pm 0.5\%$ ）または WC-8%Co-Cr（ $3\% \pm 0.5\%$ ）が使用されます。

#### プロフェッショナル機能:

高圧支持能力  $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ 、耐摩耗性  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、キャビ  
ティの複雑さは深さ  $10 \sim 50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  をサポートします。

圧縮比  $>2:1 \pm 0.1$ 、粉末充填均一性  $>95\% \pm 2\%$ 、プレス精度  $<0.02 \text{ mm} \pm 0.002 \text{ mm}$ 。

熱安定性  $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、粉体腐食耐性（ $<0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ）。

#### 製造工程:

精密研削（粒度 #1500~3000±100）とプラズマ噴霧 TiAlN コーティング（厚さ  $5 \sim 10 \mu\text{m}$   
 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 、硬度  $\text{HV}2800 \pm 50$ ）を組み合わせたもの。

HIP（ $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ）により最適化された微細構造（粒径  $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm$   
 $0.01 \mu\text{m}$ ）。

表面レーザーテクスチャリング（深さ  $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ ）により、粉末の流動性と離型  
性が向上します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 炭化物プラスチック金型

は、WC-8%Co-Cr (2% ± 0.5%) や WC-10%Co-Ni (3% ± 0.5%) などの配合で、熱可塑性プラスチック (ABS、PC など) または熱硬化性プラスチック (エポキシ樹脂など) の射出成形に使用されます。

#### プロフェッショナル機能:

耐熱性  $>400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、耐腐食性  $<0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$  (プラスチック添加剤による耐腐食性)、表面仕上げ  $\text{Ra} < 0.2 \mu\text{m} \pm 0.02 \mu\text{m}$ 。

高圧射出成形 ( $>100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ) に耐え、キャビティ精度は  $<0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$  で、複雑な流路設計 (長さ  $50 \sim 200 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ) に適しています。

熱膨張係数は  $<6 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$  であり、熱サイクル変形を低減します ( $<0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ )。

#### 製造工程:

金型キャビティは放電加工 (EDM、電流  $10 \sim 30 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$ 、精度  $<0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ ) によって作られました。

CrN の PVD コーティング ( $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、硬度  $\text{HV} 2000 \pm 50$ ) はプラスチックの付着を低減し、研磨 ( $\text{Ra} < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) と組み合わせられています。熱処理と焼き戻し ( $400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $1 \sim 2 \text{ 時間} \pm 0.1 \text{ 時間}$ ) により内部応力が除去されます。

### 炭化物押出ダイスは、

WC-10%Co-VC (0.5% ± 0.1%) などの配合で、アルミニウム プロファイルやゴム製シーリング ストリップなどの金属またはプラスチックの連続押出に使用されます。

#### プロフェッショナル機能:

耐摩耗性  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、押し出し変形抵抗  $>2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ 、金型精度  $<0.02 \text{ mm} \pm 0.002 \text{ mm}$ 。

長距離押し出し ( $>10 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$ ) に適しており、押し出し速度は  $1 \sim 5 \text{ m/分} \pm 0.1 \text{ m/分}$ 、温度安定性は  $<500^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$  です。

摩擦係数  $<0.1 \pm 0.01$ 、材料の接着力が低下します (接着力  $<0.5 \text{ N} \pm 0.05 \text{ N}$ )。

#### 製造工程:

精密研削と HIP ( $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) により、気孔率  $<0.1\% \pm 0.01\%$  の内部均一性が保証されます。

表面コーティング  $\text{MoS}_2$  ( $1 \sim 5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、堆積速度  $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m/分} \pm 0.05 \mu\text{m/分}$ ) により摩擦を低減します。

レーザー表面処理 (出力  $200 \sim 400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ ) により、ダイ硬化層 (深さ  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ) が最適化されます。

### 超硬トリミングダイスは

、WC-6%Co-TiC (3% ± 0.5%) などの配合で、金属シートまたは薄板の精密トリミングに

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

使用されます。

**プロフェッショナル機能:**

切断鋭さ: 切断力 $<0.5\text{ N} \pm 0.05\text{ N}$ 、摩耗寿命 $>10^5\text{ m} \pm 10^4\text{ m}$ 、切れ刃の滑らかさ  $Ra < 0.1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 。

精度  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 、衝撃靱性  $10\text{-}12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、薄板金属の打ち抜きに適しています (厚さ  $0.05\text{-}1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ )。

熱安定性  $<400^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、熱影響部が低減 ( $<0.05\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ )。

**製造工程:**

レーザー切断 (出力  $200\text{~}300\text{W} \pm 10\text{W}$ 、精度 $<0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ) と PVD ZrN コーティング ( $5\text{~}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ) を組み合わせます。

、  $Ra < 0.05\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$  の粗さで刃先が最適化されます。

低温焼戻し ( $300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、1 時間  $\pm 0.1$  時間) により構造が安定します。

**超硬合金ダイカスト金型は、**

WC-12%Co-TaC ( $2\% \pm 0.1\%$ ) などの配合で、非鉄金属 (亜鉛合金やマグネシウム合金など) のダイカストに使用されます。

**プロフェッショナル機能:**

耐熱疲労性 $>4000$  回 $\pm 400$  回、熔融金属耐腐食性 $<0.01\text{mm}/\text{年} \pm 0.001\text{mm}/\text{年}$ 、金型キャビティ耐圧 $>1500\text{MPa} \pm 100\text{MPa}$ 。

熱伝導率 $>100\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 、熱膨張係数 $<6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、 $600\text{~}800^\circ\text{C}$

$\pm 50^\circ\text{C}$  のダイカストに適しています。

金型キャビティ精度は $<0.02\text{mm} \pm 0.002\text{mm}$ 、表面粗さは  $Ra < 0.2\text{ }\mu\text{m} \pm 0.02\text{ }\mu\text{m}$  です。

**製造工程:**

TiAlN + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (厚さ  $10\text{~}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、硬度 HV  $3000 \pm 50$ ) の多層コーティングを組み合わせました。

放電加工 (EDM、精度  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ ) が使用され、その後に後処理と研磨が行われます。

熱処理アニーリング ( $700^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、2~3 時間  $\pm 0.1$  時間) により残留応力が低減されます。

**超硬転造ダイスは、**

WC-10%Co-Cr ( $3\% \pm 0.5\%$ ) などの配合で金属シートまたは棒をロール成形するために使用されます。

**プロフェッショナル機能:**

転がり摩耗抵抗 $<0.05\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、耐疲労性 $>10^6$  回 $\pm 10^4$  回、転がり精度厚さ

許容差 $<0.02\text{mm} \pm 0.002\text{mm}$ 。

圧縮強度  $>4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ 、熱安定性  $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、圧延速度  $1\text{~}10\text{ m/s} \pm 0.1\text{ m/s}$ 。

表面硬度 HV  $1900\text{-}2000 \pm 30$ 、圧延テクスチャの低減 (高さ  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ )。

**製造工程:**

鍛造後、HIP ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200\text{MPa} \pm 5\text{MPa}$ ) を施し、結晶粒径 ( $0.5\text{~}1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ )

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

を最適化した。

表面硬化（レーザー出力 400~600W±20W、深さ 0.2~0.3mm±0.01mm）。

PVD コーティングされた TiN（5~15µm±0.1µm）により耐久性が向上します。

## 2. 超硬合金金型の応用分野

優れた物理的・化学的特性を有する超硬合金金型は、様々な産業分野で幅広い応用の可能性を示しています。新たに加わった新エネルギー車分野を含め、専門分野が拡大している応用分野は以下のとおりです。

### 自動車製造

**用途:** 超硬スタンピングダイスは、ボディパネルのブランキング（厚さ 0.5~3mm±0.1mm）、ボルトおよびナットの冷間圧造ダイス（直径 5~20mm±0.5mm）、クランクシャフト、コネクティングロッド、ギアの熱間鍛造ダイス（重量 1~10kg±0.5kg）、シリンダーブロックおよびギアボックスハウジングのダイカストダイス（容積 0.5~5L±0.1L）、鋼板成形用のローリングダイス（厚さ 1~5mm±0.1mm）に使用されます。

**利点:** 生産効率の向上（>20%±2%）、金型寿命が最大  $10^6$  回 ±  $10^4$  延長、ストローク数とメンテナンスコストの削減（<5%±1%）、高強度鋼（>1500 MPa ± 100 MPa）の加工をサポートします。

### 航空宇宙産業

**用途:** 超硬合金熱間鍛造用金型は、チタン合金ブレードおよび構造部品の成形（温度 900~1100°C±50°C）、高強度アルミニウム合金チューブおよびハニカム構造の加工用引抜金型（直径 10~50mm±1mm）、航空用ファスナー製造用押し出し金型（長さ 20~100mm±2mm）、マグネシウム合金胴体部品製造用ダイカスト金型（重量 0.5~2kg±0.1kg）などに使用されます。

**利点:** 高温疲労耐性（>5000 回 ± 500 回）、高精度（許容差 <0.01 mm ± 0.001 mm）、軽量（密度 <2.7 g/cm<sup>3</sup> ± 0.1 g/cm<sup>3</sup>）、高温酸化耐性（<0.01% ± 0.001%）の要件。

### エレクトロニクス産業

**用途:** 超硬粉末プレス金型は、マイクロモーターコア（厚さ 0.2~0.5mm±0.05mm）、携帯電話ケースやコネクタを製造するためのプラスチック金型（サイズ 100~150mm±1mm）、回路基板を処理するためのトリミング金型（厚さ 0.1~0.3mm±0.01mm）、およびワイヤを

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

形成するための押し出し金型（直径 0.05～1mm±0.01mm）のプレスに使用されます。

利点：高精度成形（<0.01 mm ± 0.001 mm）、優れた表面品質（Ra <0.2 μm ± 0.02 μm）、短い生産サイクル（<1 時間/個 ± 0.1 時間）、高頻度使用（>10<sup>4</sup> 回 ± 10<sup>3</sup> 回）。

#### 機械製造および金型産業

用途：線引き用超硬引抜ダイス（直径 0.1～5mm±0.05mm）、ギアおよびベアリング加工用スタンピングダイス（キャビティ深さ 10～30mm±1mm）、精密シャフト用冷間圧造ダイス（直径 2～10mm±0.1mm）、棒鋼用転造ダイス（直径 5～20mm±0.5mm）、複雑鋳物用ダイカストダイス（重量 0.1～5kg±0.1kg）。

利点：摩耗寿命が長い（引っ張り長さ >10<sup>6</sup> m ± 10<sup>4</sup> m）、交換頻度が低減する（>50% ± 5%）、生産の一貫性が向上する（偏差 <1% ± 0.1%）、高硬度材料のサポート（>HRC 50 ± 2）。

#### 医療機器製造

用途：超硬プラスチック金型は、医療用注射器およびカテーテル（肉厚 0.1～0.3mm±0.01mm）、整形外科用ネジおよび髄内釘製造用冷間圧造金型（直径 2～6mm±0.1mm）、手術用刃加工用トリミング金型（厚さ 0.05～0.1mm±0.005mm）、カテーテル成形用押し出し金型（内径 0.5～2mm±0.05mm）、人工関節部品製造用粉末圧縮金型（重量 0.1～0.5kg±0.05kg）などに使用されます。

利点：生体適合性コーティング（例：Ag、抗菌率 >90% ± 2%）、高精度（<0.01 mm ± 0.001 mm）、無菌要件を満たす（細菌負荷 <10 CFU/cm<sup>2</sup> ± 1 CFU/cm<sup>2</sup>）、寿命 >10<sup>5</sup> 回 ± 10<sup>4</sup> 回。

#### エネルギーと重工業

用途：超硬合金熱間鍛造用金型は、風力タービンブレードコネクタ（直径 >500mm±10mm）、耐摩耗部品用粉末プレス金型（ポンプ本体など、重量 5～20kg±1kg）、石油掘削パイプ用押し出し金型（直径 50～100mm±2mm）、原子力発電バルブ本体用ダイカスト金型（重量 10～50kg±2kg）、レール加工用転造金型（幅 100～150mm±2mm）などに使用されています。

利点：高温酸化耐性（800°C ± 20°C で <0.01% ± 0.001%）、圧縮強度（>4000 MPa ± 100 MPa）、長い耐用年数（>10<sup>4</sup> h ± 10<sup>3</sup> h）、極限環境への対応（圧力 >200 MPa ± 10 MPa）。

#### 消費財製造

用途：超硬プラスチック金型は、家電製品の筐体（テレビ筐体など、サイズ 500～1000 mm±10 mm）やキッチン用品の成形（厚さ 0.5～2 mm±0.1 mm）、金属装飾部品の加工用トリミング金型（厚さ 0.1～0.5 mm±0.01 mm）、アルミニウム合金製のドアや窓のプロファ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

イルを作るための押し出し金型（長さ  $3\sim 6\text{ m}\pm 0.1\text{ m}$ ）に使用されます。

**利点:** 高い表面仕上げ ( $\text{Ra} < 0.2\ \mu\text{m}\pm 0.02\ \mu\text{m}$ )、高い生産効率 ( $>50$  個/時間  $\pm 5$  個/時間)、および低い再加工率 ( $<2\%\pm 0.5\%$ )。

### 建物とインフラ

**用途:** 鉄筋成形用超硬ローリングダイス（直径  $6\sim 40\text{ mm}\pm 0.5\text{ mm}$ ）、プレキャストコンクリート型枠部品製造用粉末プレスダイス（重量  $10\sim 30\text{ kg}\pm 1\text{ kg}$ ）、アルミ窓枠加工用押し出しダイス（長さ  $1\sim 3\text{ m}\pm 0.05\text{ m}$ ）、建築金物製造用ダイカストダイス（重量  $0.5\sim 2\text{ kg}\pm 0.1\text{ kg}$ ）。

**利点:** 摩耗寿命 ( $>10^6\text{ m}\pm 10^4\text{ m}$ )、高精度 ( $<0.02\ \text{mm}\pm 0.002\ \text{mm}$ )、大規模生産のサポート ( $>1000$  個/日  $\pm 100$  個)。

### 防衛・軍事産業

**用途:** 超硬合金熱間鍛造用金型は、戦車装甲板（厚さ  $10\sim 50\text{ mm}\pm 1\text{ mm}$ ）の成形、砲弾ケース製造用の冷間圧造用金型（直径  $20\sim 100\text{ mm}\pm 2\text{ mm}$ ）、ミサイルケース加工用の絞り用金型（長さ  $0.5\sim 2\text{ m}\pm 0.05\text{ m}$ ）、レーダー部品製造用のダイカスト用金型（重量  $1\sim 5\text{ kg}\pm 0.2\text{ kg}$ ）などに使用されます。

**利点:** 高温疲労耐性 ( $>10^4$  回  $\pm 10^3$  回)、耐衝撃性 ( $>500\ \text{J}/\text{cm}^2\pm 50\ \text{J}/\text{cm}^2$ )、軍事規格 (MIL-STD-810) に準拠。

### 新エネルギー車分野への応用

新エネルギー車 (NEV) 産業の急速な発展に伴い、電気自動車の主要部品の製造において超硬合金金型が重要な役割を果たしています。

#### 超硬合金スタンピングダイス

バッテリーハウジング（厚さ  $0.8\sim 2\text{ mm}\pm 0.1\text{ mm}$ 、リン酸鉄リチウムバッテリーや三元リチウムバッテリーハウジングなど）やボディ構造部品（シャーシガードプレートなど、サイズ  $1000\sim 2000\text{ mm}\pm 10\text{ mm}$ ）の打ち抜きおよび成形に使用され、打ち抜き荷重は  $1000\text{ kN}\pm 100\text{ kN}$  超です。

#### 超硬冷間圧造ダイス

高電圧コネクタ（直径  $5\sim 15\ \text{mm}\pm 0.2\ \text{mm}$ ）とモーターローターシャフト（直径  $10\sim 30\ \text{mm}\pm 0.5\ \text{mm}$ ）を製造し、高強度ファスナー ( $>1500\ \text{MPa}\pm 100\ \text{MPa}$ ) をサポートし、変形率  $>40\%\pm 5\%$  を実現します。

#### 超硬熱間鍛造金型

動力電池集電体（銅/アルミ箔など、厚さ  $0.1\sim 0.2\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$ ）およびモーターステーターハウジング（重量  $5\sim 15\text{ kg}\pm 0.5\text{ kg}$ ）の熱間成形に使用され、処理温度は  $600\sim 900^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$ 、荷重は  $>2000\text{ kN}\pm 200\text{ kN}$  です。

#### 超硬押出ダイス

アルミニウム合金製バッテリーフレーム（断面積  $50\sim 100\ \text{mm}^2\pm 2\ \text{mm}^2$ ）と放熱チューブ（長さ  $1\sim 3\ \text{m}\pm 0.05\ \text{m}$ ）の加工、押し出し速度  $0.5\sim 2\ \text{m}/\text{分}\pm 0.1\ \text{m}/\text{分}$ 、圧力  $>1500\ \text{MPa}\pm 100\ \text{MPa}$ 。

#### 超硬ダイカスト金型

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

モーターハウジング（重量  $10\sim 30\text{ kg} \pm 1\text{ kg}$ ）およびチャージパイルハウジング（サイズ  $300\sim 500\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ ）の製造、耐圧  $>1200\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ 、鑄造温度  $650\sim 750^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ 。

### 超硬トリミングダイス

バッテリーポールピース（厚さ  $0.08\sim 0.15\text{ mm} \pm 0.005\text{ mm}$ ）の精密切断やワイヤーハーネス端子打ち抜き（長さ  $10\sim 50\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$ ）に使用されます。切断力  $<0.5\text{ N} \pm 0.05\text{ N}$ 、精度  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 。

### 超硬スタンピングダイスの利点

**高精度と一貫性:** 金型精度  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 、バッテリーモジュールの組み立て許容誤差（ $<0.05\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ ）を確保し、エネルギー密度（ $>160\text{ Wh/kg} \pm 10\text{ Wh/kg}$ ）を向上させ、バッテリーセルの一貫性  $>98\% \pm 1\%$ 。

**耐摩耗性と長寿命:** 金型の摩耗寿命は  $10^6\text{ 回} \pm 10^4$  以上。交換頻度（ $60\% \pm 5\%$  以上）を削減し、生産コスト（ $10\% \pm 1\%$  未満）を削減し、 $500\text{ 時間} \pm 50\text{ 時間}$  以上の連続生産をサポートします。

**高温および耐腐食性:** 熱間鍛造金型は、 $900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  の環境に耐え、電解質耐腐食性（リチウム塩溶液 pH 7-9 など、 $<0.01\text{ mm/年} \pm 0.001\text{ mm/年}$ ）を備え、耐用年数が長くなります（ $>10^4\text{ 時間} \pm 10^3\text{ 時間}$ ）。

**軽量化サポート:** 高強度アルミニウム合金（ $>300\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$ ）とマグネシウム合金（ $>200\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$ ）成形を組み合わせることで、重量を  $10\sim 15\% \pm 2\%$  削減し、走行距離（ $>500\text{ km} \pm 20\text{ km}$ ）を延長し、NEDC 基準を満たすことができます。

**効率的な生産:** スタンピングとダイカストの効率は  $>50\text{ 個/時間} \pm 5\text{ 個/時間}$  で、新エネルギー車部品の生産サイクルを短縮し（ $<2\text{ 時間/個} \pm 0.1\text{ 時間}$ ）、大規模大量生産（ $>10^4\text{ 車/年} \pm 10^3\text{ 車}$ ）をサポートします。

### 技術的な課題と解決策:

**課題:** 高電圧バッテリーケースは、スタンピング時に微小亀裂（長さ  $<0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ ）が発生しやすく、熱間鍛造時の熱応力（ $>200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$ ）により変形が発生し、ダイカスト金型は熔融金属によって腐食されやすくなります（侵食率  $<0.02\text{ mm/年} \pm 0.002\text{ mm/年}$ ）。

**解決策:** プレス金型の PVD TiAlN コーティング（厚さ  $10\sim 20\mu\text{m} \pm 0.2\mu\text{m}$ 、硬度 HV3200  $\pm 50$ ）を最適化して耐クラック性を高め、予熱基板（ $200\sim 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）を導入して熱応力を低減し、後処理 HIP（ $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ）を施して内部構造を改善します。ダイカスト金型に TaC（ $2\% \pm 0.1\%$ ）を添加して耐食性を向上させ、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  コーティング（厚さ  $15\sim 25\mu\text{m} \pm 0.2\mu\text{m}$ ）と組み合わせることで浸食を抑制します。

**開発動向:** 固体電池と水素燃料電池技術の発展に伴い、超硬合金金型は耐高温性（ $>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）と耐電気化学的耐腐食性（ $<0.005\text{ mm/年} \pm 0.001\text{ mm/年}$ ）をさらに向上させる必要があり、3D プリント技術（SLM、層厚  $20\sim 50\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ ）を探索して複雑な電池フレー

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ム金型を製造し、マルチマテリアル勾配設計（硬度勾配 1800~2200 HV $\pm$ 50）をサポートしています。

### 3. 超硬合金金型の今後の発展方向

**材料の最適化:** 靱性と生体適合性を向上させるために、低コバルト配合（例: WC-Ni-Cr、Co <5% $\pm$ 0.5%）またはナノ複合材料（WC 粒子サイズ <100 nm $\pm$ 10 nm）を開発します。

**プロセスイノベーション:** 複雑な金型を製造するための3Dプリント技術（SLM、層厚 20~50 $\mu$ m $\pm$ 1 $\mu$ m）を導入し、HIP 後処理（1300 $^{\circ}$ C $\pm$ 10 $^{\circ}$ C）と組み合わせて多孔性（<0.1% $\pm$ 0.01%）を低減します。

**インテリジェント:** 統合センサーが金型の応力（<50 MPa $\pm$ 5 MPa）と温度（<600 $^{\circ}$ C $\pm$ 10 $^{\circ}$ C）を監視し、予測メンテナンスを行います。

**持続可能性:** リサイクル炭化粉末の使用（再利用率 >90% $\pm$ 2%）および低エネルギー消費プロセス（エネルギー消費量 <10 kWh/kg $\pm$ 1 kWh/kg）。

超硬合金金型の産業分野における応用は拡大を続けており、その高性能特性は自動車から国防、新エネルギー車に至るまで、多方面のニーズを支えています。特に、新エネルギー車分野の急速な成長は、高精度、高効率、そしてグリーン製造に向けた金型技術の発展を促進しています。今後5~10年の間に、さらなる技術革新が期待されています。

### 4. 超硬合金金型の関連規格

#### 業界標準

##### 技術的条件と基準

超硬合金ダイスの製造および使用は、通常、国家機械工業局が管理する「超硬合金引抜ダイス技術条件」（記録番号: 8261-2001）に準拠します。この規格は、引抜ダイスの材料特性、寸法精度、耐摩耗性、および耐用年数を規定しており、伸線ダイスの製造および検査に適用されます。

##### 材料性能要件

超硬金型は、業界で広く採用されている高硬度（HV 1800~2000 $\pm$ 30）、高耐摩耗性（摩耗率 <0.05 mm<sup>3</sup>/N $\cdot$ m $\pm$ 0.01 mm<sup>3</sup>/N $\cdot$ m）、高靱性（破壊靱性 10~15 MPa $\cdot$ m<sup>1/2</sup> $\pm$ 1 MPa $\cdot$ m<sup>1/2</sup>）規格の要件を満たす必要があります。

#### 国内または国際規格

超硬合金金型の製造では、多くの場合「GB/T 5242-2006 超硬合金通用技術条件」が参照されます。これは、超硬合金材料の組成、性能試験、品質管理要件を網羅しており、金型製造における原材料の選択に適しています。

**ISO 規格:** ISO 513（切削工具材料の分類）や ISO 28080（硬質材料の特性試験）などの ISO 規格は、特に輸出プロジェクトや国際協力プロジェクトにおいて、超硬合金金型設計の基準として使用できます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 業界アプリケーション標準

#### スタンピングダイ規格

超硬合金のスタンピングダイについては、業界では「スタンピングダイの技術条件 JB/T 8144-2010」がよく参照されます。この技術条件では、ダイの構造設計、熱処理プロセス、表面処理要件が規定されており、高精度（許容差  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ ）と長寿命（ $> 10^6$  倍  $\pm 10^4$  倍の衝撃）が保証されます。

#### 粉末冶金金型規格

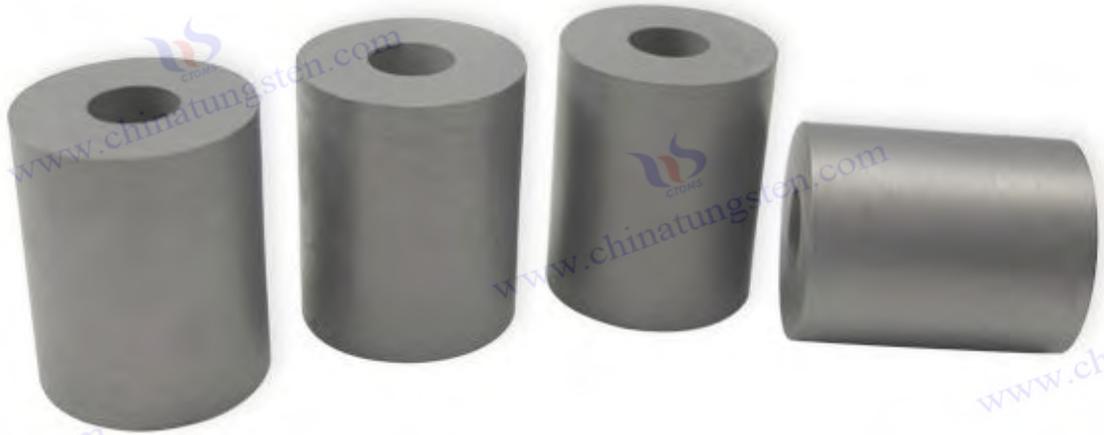
粉末冶金分野の超硬合金金型は、「YB/T 5136-2006 粉末冶金金型の技術条件」に準拠する場合があります。金型キャビティ精度（ $<0.02\text{ mm} \pm 0.002\text{ mm}$ ）と耐圧性（ $>3000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ ）が重視されます。



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## JB/T 8144-2010 スタンピング金型の技術要件

### 1. 適用範囲

この規格は、プレス金型の技術的条件を規定しており、材料の選定、設計要件、製造プロセス、技術性能、検査方法、マーキング、包装、輸送、保管などが含まれます。本規格は、各種金属板（鋼板、アルミニウム板、ステンレス鋼板など）および非金属材料（プラスチック、ゴムなど）の冷間プレス金型に適用され、シングルプロセス金型、複合金型、マルチプロセス金型などを含み、自動車、エレクトロニクス、航空宇宙などの業界で広く使用されています。

### 2. 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されているすべての参照文書については、その後の修正（正誤表を除く）または改訂は本規格には適用されませんが、調査結果に基づいて新しい版の文書を採用することをお勧めします。

GB/T 5242-2006 超硬合金の一般仕様

GB/T 6110-2021 引抜ダイス - 超硬合金引抜ダイスの構造タイプと寸法

《JB/T 3943-2017 引抜ダイス 超硬合金引抜ダイス技術仕様》

GB/T 1804-2000 公差とはめあい - 直線寸法の許容差と基本偏差

### 3. 用語と定義

スタンピングダイ: ダイ、パンチ、ガイドなど、圧力によって材料を目的の形状に成形するために使用されるツール。

スタンピング寿命: 指定された回数のスタンピングにおいて安定した性能を維持する金型の能力。

組み立て精度: 金型のさまざまなコンポーネント間のフィッティング許容差と相対位置精度。

### 4. 材料要件

#### 4.1 金型材料

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超硬合金材料：WC-Co 系（WC-6%Co、WC-10%Co など）、硬度 HV1800-2000±30、圧縮強度 >4000MPa±100MPa。

鋼材：Cr12MoV、D2 または H13 鋼、硬度 HRC 58-62±2、焼き入れおよび焼き戻し済み。

非動作部品：45# 鋼または Q235 鋼で作られ、熱処理後の硬度は HRC 30-40±2。

#### 4.2 パフォーマンス要件

耐摩耗性：摩耗率  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、GB/T 12444 に準拠してテストされています。

耐熱性：動作温度  $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、熱膨張係数  $<6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

疲労耐性：疲労寿命  $>10^6$  回  $\pm 10^4$  回、GB/T 3075 に従ってテスト。

#### 4.3 表面処理

オプションコーティング：TiN、TiC または CrN コーティング、厚さ  $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、硬度 HV 2000  $\sim 3000 \pm 50$ 、接合強度  $>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ 、PVD または CVD プロセスを使用。

### 5. 技術要件

#### 5.1 設計要件

構造タイプ：単一プロセス、複合、順送金型を含み、GB/T 6397 規格に従って設計されています。

公差等級：線形寸法公差は GB/T 1804 IT6-IT8 に準拠し、幾何公差の円度は  $<0.005 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$  です。

ガイド精度：ガイド柱とガイドスリーブの隙間は  $0.005 \sim 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$  です。

#### 5.2 サイズと精度

金型サイズ：部品図の要件によると、最大外径は  $\leq 500 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、高さは  $\leq 300 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  です。

作業部許容誤差：パンチングクリアランス  $0.01 \sim 0.05 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$ 、シートの厚さに応じて調整。

組み立て精度：相対位置誤差  $<0.02 \text{ mm} \pm 0.002 \text{ mm}$ 。

#### 5.3 表面品質

精密研削または研磨工程により、作業面粗さ  $R_a < 0.2 \mu\text{m} \pm 0.02 \mu\text{m}$  を実現します。

表面にはひび割れ、毛穴、傷はなく、最大欠陥サイズは  $<0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$  です。

#### 5.4 パフォーマンス指標

パンチング寿命： $>500,000$  回  $\pm 10^4$  回（材質とパンチング条件により異なります）、摩耗  $<0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 。

スタンピング精度：部品サイズ公差  $\pm 0.05 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$ 、表面粗さ  $R_a < 0.8 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

### 6. 製造工程

#### 6.1 原材料の準備

超硬合金粉末：WC 粒子サイズ  $0.5 \sim 2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、Co 含有量誤差  $\pm 0.5\%$ 、ボールミル混合（速度  $200 \sim 300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$ 、時間  $24 \sim 48$  時間  $\pm 1$  時間）。

鋼の前処理：内部応力を除去するための焼鈍し、硬度 HRC 20-25  $\pm 2$ 。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2 成形プロセス

超硬合金：冷間静水圧プレス（CIP、 $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ）または射出成形、グリーン体密度  $>60\% \pm 2\%$  理論密度。

鋼：鍛造または鋳造、鍛造比率  $\geq 4:1$ 。

## 6.3 焼結と熱処理

超硬合金：熱間静水圧プレス（HIP、 $1300 \sim 1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ）、気孔率  $<0.1\% \pm 0.01\%$ 。

鋼：焼入れ（ $1000 \sim 1050^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、油冷）+ 焼戻し（ $200 \sim 250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $2 \sim 3$  時間  $\pm 0.1$  時間）、硬度 HRC  $58 \sim 62 \pm 2$ 。

## 6.4 仕上げ

動作部品は、電気放電加工（EDM、電流  $5 \sim 20\text{ A} \pm 1\text{ A}$ ）によって、 $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$  の精度で製造されます。

精密研削（粒度 #1200-3000 $\pm 100$ ）または超音波研磨により、表面粗さ  $Ra < 0.2\mu\text{m} \pm 0.02\mu\text{m}$  に制御します。

## 6.5 組み立て

ガイドは圧入されており、クリアランスは  $0.005 \sim 0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 、ボルト締め付けトルクは  $50 \sim 100\text{ N}\cdot\text{m} \pm 5\text{ N}\cdot\text{m}$  です。

## 7. 検査方法

### 7.1 寸法と精度

座標測定機（CMM）で検査した場合、許容誤差は GB/T 1182 IT6-IT8 グレードに準拠します。

### 7.2 材料特性

硬度試験は GB/T 231.1 に準拠し、圧縮強度試験は GB/T 3852 に準拠し、耐摩耗性試験は GB/T 12444 に準拠しています。

熱伝導率は ASTM E1461 に準拠し、熱膨張係数は ISO 17864 に準拠しています。

### 7.3 表面品質

欠陥は光学顕微鏡（倍率  $500 \times \pm 50 \times$ ）または走査型電子顕微鏡（SEM）で検査され、最大欠陥サイズは  $0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$  未満でした。

### 7.4 スタンピング寿命

試験は標準パンチングマシンで標準材料（例：厚さ  $1\text{ mm}$  の SPCC 鋼板、パンチング速度  $20 \sim 50$  回/分  $\pm 2$  回/分）を使用して実施し、摩耗が  $0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$  に達するまでのパンチ回数を記録しました。

## 8. 試験条件

試験環境温度： $20 \sim 25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $50\% \sim 70\% \pm 5\%$ 。

パンチング荷重： $500 \sim 2000\text{ kN} \pm 50\text{ kN}$ 、金型仕様に応じて調整。

## 9. ラベル付け、包装、輸送および保管

### 9.1 ロゴ

金型表面の銘板には、金型番号、規格（外径 $\times$ 高さ mm）、刻印トン数、製造年月日、メーカー名などが記入され、文字高さは  $3\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$  です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9.2 包装

衝撃に強いフォームと防錆紙で包み、木箱または金属製の箱に入れて、箱の内側に「取扱注意」と「防湿」の文字を記入してください。

## 9.3 交通

激しい振動や高温（ $50^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以上）環境を避けてください。輸送車両には衝撃吸収装置を装備する必要があります。

## 9.4 ストレージ

乾燥した換気の良い場所に、温度  $0\sim 40^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $60\%\pm 5\%$  未満の場所に保管してください。酸性またはアルカリ性物質との接触は避けてください。

## 10. 使用とメンテナンス

### 10.1 使用要件

熱衝撃を軽減するために、スタンピング前に金型を  $50\sim 100^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$  に予熱します。GB/T 7326 に準拠した粘度  $20\sim 50\text{ cSt}\pm 5\text{ cSt}$  のスタンピングオイルを使用してください。

### 10.2 メンテナンス

$10^4\pm 10^3$  パンチごとに、作業面の摩耗を定期的を確認してください。

摩耗量が  $0.1\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$  を超えている場合は、早めに研磨するか交換してください。

### 10.3 廃棄基準

作業面の摩耗が  $0.2\text{mm}\pm 0.02\text{mm}$  を超える場合、または亀裂長さが  $0.05\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$  を超える場合は、スクラップと判断されます。

## 11. 品質保証

各バッチの金型のサンプリング率は  $\geq 5\%\pm 1\%$  であり、合格率は  $> 95\%\pm 2\%$  です。

性能試験データや寸法検査記録を含む材料証明書と検査レポートを提供します。

## 12. 付録（参考）

スタンピングプロセスパラメータリファレンス

パンチング速度： $20\sim 100$  回/分 $\pm 2$  回/分。

ブランキングギャップ：板厚が  $0.5\sim 2\text{mm}$  の場合、ギャップは  $0.01\sim 0.05\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$  です。

典型的な欠陥と解決策

クラック：熱処理温度を調整するか、焼入れ冷却速度を上げます。

変形：金型設計を最適化し、ガイド精度を向上させます。

---

この技術条件は、「JB/T 8144-2010」の中核要件を全面的に反映し、超硬合金とその他の材料の特性を組み合わせ、高精度、高寿命、高信頼性の観点からスタンピング金型の性能を保証します。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 超硬引拔ダイス 技術的条件

完全かつ包括的で詳細な「超硬引拔ダイス技術条件」は、現行の規格（「JB/T 3943-2017 超硬引拔ダイス技術条件」および関連業界規格など）と業界慣行に基づいて作成されています。この技術条件は、超硬引拔ダイスの材料選定、製造工程、性能要件、検査方法、メンテナンス要件を標準化し、伸線加工における超硬引拔ダイスの高性能と信頼性を確保することを目的としています。

### 1. 適用範囲

この技術条件は、超硬合金引拔ダイスの製造、検査および使用に適用され、金属線（鋼線、銅線、ステンレス鋼線など）の冷間引拔に使用する引拔ダイスを対象とし、直径範囲が 0.1mm～20mm±0.05mm の引拔ダイ스에適用されます。

### 2. 規範的参照

以下の文書の条項は、本技術条件における参照を通じて、本技術条件の条項となります。日付が記載されたすべての参照文書については、その後の修正（正誤表を除く）または改訂は本技術条件には適用されませんが、研究結果に基づいて文書の新しいバージョンを採用することをお勧めします。

GB/T 5242-2006 超硬合金の一般仕様

《JB/T 3943-2017 引拔ダイス 超硬合金引拔ダイス技術仕様》

GB/T 6110-2021 引拔ダイス - 超硬合金引拔ダイスの構造タイプと寸法

### 3. 用語と定義

引拔ダイス: 引拔加工によって金属線の直径を小さくするために使用される、炭化物材料で作られたリング状または円錐状のダイス。

加工円錐角: 金型の内孔のテーパ部分の角度。引き抜き力と表面品質に影響します。

摩耗寿命: 指定された絞り長さまたは回数内で安定した性能を維持する金型の能力。

### 4. 材料要件

#### 4.1 材料構成

金型マトリックスはタングステンカーバイド-コバルト（WC-Co）システムを採用しており、推奨比率は WC-6%Co、WC-8%Co、または WC-10%Co で、コバルト含有量の誤差は ±0.5% です。

引拔加工する材料の特性（高炭素鋼や銅合金など）に応じて、耐摩耗性や耐熱性を向上させるために、TiC（0.5%～2%±0.1%）や TaC（0.5%～1%±0.1%）などの強化相を微量添加することができます。

#### 4.2 物理的性質

硬度: HV 1800-2000 ± 30。試験方法は GB/T 3850 に準拠しています。

密度: 14.5～15.0 g/cm<sup>3</sup> ± 0.2 g/cm<sup>3</sup>、試験方法は GB/T 3851 に準拠。

圧縮強度: >4000 MPa ± 100 MPa、試験方法は GB/T 3852 に準拠。

破壊靱性: 10～15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 1 MPa·m<sup>1/2</sup>、試験方法は GB/T 21068 に準じます。

#### 4.3 化学的安定性

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐食性: 0.9% NaCl 溶液に 24 時間  $\pm 1$  時間浸漬した場合、腐食速度  $< 0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ 。

耐酸化性:  $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  での質量損失  $< 0.01\% \pm 0.001\%$ 。

## 5. 技術要件

### 5.1 寸法と許容差

金型外径:  $10 \sim 50 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、高さ:  $5 \sim 30 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 。

作業穴径:  $0.1 \sim 20 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 、円錐角度:  $6^\circ \sim 15^\circ \pm 0.5^\circ$ 、GB/T 6110-2021 に規定されたタイプと寸法に準拠。

幾何公差: 真円度  $< 0.005 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 、円筒度  $< 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 。

### 5.2 表面品質

作業面粗さ  $R_a < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  は、精密研削または化学機械研磨 (CMP) プロセスによって達成されます。

表面には亀裂、気孔、介在物はなく、最大欠陥サイズは  $< 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$  です。

### 5.3 パフォーマンス要件

摩耗寿命: 引抜長さ  $> 10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$  (引抜材料によって異なります)、摩耗率  $< 0.05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 。

熱安定性: 動作温度  $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、熱膨張係数  $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。  
 $\pm 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 、表面粗さ  $R_a < 0.4 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ 。

### 5.4 コーティング (オプション)

窒化チタン、TiC または CrN コーティングは、厚さ  $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、硬度 HV2000  $\sim 3000 \pm 50$ 、接合強度  $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$  で、物理蒸着 (PVD) または化学蒸着 (CVD) 技術によって適用できます。

## 6. 製造工程

### 6.1 原材料の準備

高純度 WC 粉末 (粒径  $0.5 \sim 2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ) と Co 粉末を使用し、ボールミル処理 (速度  $200 \sim 300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$ 、時間  $24 \sim 48 \text{ 時間} \pm 1 \text{ 時間}$ ) により、混合均一性は  $95\% \pm 2\%$  以上を達成した。

### 6.2 成形プロセス

冷間等方圧プレス (CIP、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) または射出成形が使用され、グリーン体の密度は理論密度の  $60\% \pm 2\%$  を超えます。

### 6.3 焼結プロセス

熱間静水圧プレス (HIP、 $1300 \sim 1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) または場焼結 (SPS、 $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ) により、気孔率  $< 0.1\% \pm 0.01\%$  および粒径  $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  を保証します。

### 6.4 仕上げ

内穴は、電気放電加工 (EDM、電流  $5 \sim 20 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$ ) によって、 $< 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$  の精

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

度で作られました。

精密研削（粒度#1200-3000±100）または超音波研磨により、表面粗さ  $Ra < 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$  に制御します。

## 6.5 熱処理

アニーリング（400~600°C ± 10°C、2~4 時間 ± 0.1 時間）により内部応力が除去され、残留応力は 100 MPa ± 10 MPa 未満になります。

## 7. 検査方法

### 7.1 寸法および形状精度

許容差は、座標測定機 (CMM) を使用してテストした場合、GB/T 1182 で規定されている IT6 レベルに準拠します。

### 7.2 材料特性

硬度試験は GB/T 3850 に準拠し、密度は GB/T 3851 に準拠し、圧縮強度は GB/T 3852 に準拠しています。

破壊靱性は GB/T 21068 に準拠しており、熱伝導率は ASTM E1461 に準拠しています。

### 7.3 表面品質

欠陥は光学顕微鏡（倍率 500×±50×）または走査型電子顕微鏡（SEM）を使用して検査され、最大欠陥サイズは 0.01 mm ± 0.001 mm 未満でした。

### 7.4 摩耗寿命

標準引抜機で標準引抜材料（例：直径 1 mm の鋼線、引抜速度 1~5 m/s ± 0.1 m/s）を使用してテストし、摩耗が 0.05 mm ± 0.01 mm に達するまで引抜長さを記録します。

## 8. 試験条件

試験環境温度：20~25°C ± 2°C、湿度 50%~70% ± 5%。

引抜試験荷重：500~2000 N ± 50 N、金型仕様に応じて調整。

## 9. ラベル付け、包装、輸送および保管

### 9.1 ログ

金型表面の銘板には、金型番号、仕様（直径×高さ（mm）、製造年月日、メーカー名）が記載されています。文字の高さは 3mm ± 0.1mm で、明瞭に視認できます。

### 9.2 包装

梱包には衝撃吸収材と防錆紙を使用し、木箱またはプラスチック箱に入れて、箱の内側に「取り扱い注意」と記入してください。

### 9.3 交通

激しい振動や高温（50°C ± 5°C 以上）環境を避けてください。輸送車両には衝撃吸収装置を装備する必要があります。

### 9.4 ストレージ

乾燥した換気の良い場所に、温度 0~40°C ± 5°C、湿度 60% ± 5% 未満の場所に保管してください。酸性またはアルカリ性物質との接触は避けてください。

## 10. 使用とメンテナンス

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 10.1 使用要件

熱衝撃を軽減するために、引き抜く前にダイを  $50 \sim 100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  に予熱します。

使用される引抜潤滑剤は、GB/T 7326 に準拠し、粘度が  $20 \sim 50 \text{ cSt} \pm 5 \text{ cSt}$  の引抜油です。

## 10.2 メンテナンス

作業孔の摩耗を、引き抜き長さの  $10^{-5} \text{ m} \pm 10^{-4} \text{ m}$  ごとに定期的に点検してください。

摩耗量が  $0.05 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  を超えている場合は、早めに研磨するか交換してください。

## 10.3 廃棄基準

加工穴径が  $0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  を超えて増加した場合、または表面亀裂長さが  $0.05 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  を超えた場合は、スクラップと判断されます。

## 11. 品質保証

各バッチの金型のサンプリング率は  $\geq 5\% \pm 1\%$  であり、合格率は  $> 95\% \pm 2\%$  です。

性能試験データや寸法検査記録を含む材料証明書と検査レポートを提供します。

## 12. 付録（参考）

描画プロセスパラメータリファレンス

引っ張り速度:  $1 \sim 10 \text{ m/s} \pm 0.1 \text{ m/s}$ 。

削減率: 材質によって  $10\% \sim 25\% \pm 2\%$ 。

典型的な欠陥と解決策

ひび割れ: 焼結温度を調整するか、HIP 圧力を上げます。気孔: 粉末の混合を最適化するか、焼結密度を向上させます。

この技術条件は、現在の標準規格 (JB/T 3943-2017 など) と業界の慣行を統合し、セメントカーバイド引き抜き金型の性能、製造、使用において高い信頼性と一貫性を確保します。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## YB/T 5136-2006 粉末冶金用金型の技術要件

### 1. 適用範囲

この規格は、粉末冶金用金型の技術的条件を規定しており、材料の選定、設計要件、製造工程、技術性能、検査方法、マーキング、包装、輸送、保管などが含まれます。本規格は、粉末冶金プレス工程で使用される金型に適用され、歯車、軸受、磁性材料などの製品をプレス加工するための超硬合金または鋼製金型も含まれます。自動車、電子機器、機械製造などの分野で広く使用されています。

### 2. 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されているすべての参照文書については、その後の修正（正誤表を除く）または改訂は本規格には適用されませんが、調査結果に基づいて新しい版の文書を採用することをお勧めします。

GB/T 5242-2006 超硬合金の一般仕様

GB/T 6110-2021 引抜ダイス - 超硬合金引抜ダイスの構造タイプと寸法

《JB/T 3943-2017 引抜ダイス 超硬合金引抜ダイス技術仕様》

GB/T 1804-2000 公差とはめあい - 直線寸法の許容差と基本偏差

### 3. 用語と定義

粉末冶金用金型：金属粉末または複合粉末を高圧プレスで成形するための工具で、上型、下型、金型スリーブから構成されます。

プレス寿命：指定された回数のプレスサイクルで安定した性能を維持する金型の能力。

充填均一性：金型キャビティ内の粉末の分布の一貫性は、製品の密度に直接影響します。

### 4. 材料要件

#### 4.1 金型材料

超硬合金材料：WC-Co 系（WC-6%Co、WC-8%Co、WC-10%Co など）、硬度 HV 1800-2000 ± 30、圧縮強度 >4000 MPa ± 100 MPa。

鋼材：Cr12MoV、D2 または H13 鋼、硬度 HRC 58-62 ± 2、焼き入れおよび焼き戻し済み。

非動作部品：40Cr または 45# 鋼製、熱処理後の硬度 HRC 30-40 ± 2。

#### 4.2 パフォーマンス要件

耐摩耗性：摩耗率 <0.05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m、GB/T 12444 に準拠してテストされています。

耐圧性：最大圧力 >3000 MPa ± 100 MPa、GB/T 3852 に従ってテスト済み。

疲労耐性：疲労寿命 >10<sup>6</sup> 回 ± 10<sup>4</sup> 回、GB/T 3075 に従ってテスト。

#### 4.3 表面処理

オプションコーティング：TiN、TiC または Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> コーティング、厚さ 5 ~ 15 μm ± 0.1 μm、硬度 HV 2000 ~ 3000 ± 50、接合強度 >50 MPa ± 5 MPa、PVD または CVD プロセスを使用。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5. 技術要件

### 5.1 設計要件

構造タイプ: 一方向プレス金型、双方向プレス金型、マルチキャピティ金型など、GB/T 6406 規格に従って設計されています。

公差等級: 線形寸法公差は GB/T 1804 IT6-IT8 に準拠し、幾何公差平行度は  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$  です。

ガイド精度: ガイド柱とガイドスリーブの間隙は  $0.005 \sim 0.015\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$  です。

### 5.2 サイズと精度

金型サイズ: 部品図の要件によると、最大外径は  $\leq 400\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、高さは  $\leq 250\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$  です。

キャピティ寸法: 許容差  $< \pm 0.02\text{ mm} \pm 0.002\text{ mm}$ 、深さ  $10 \sim 50\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 。

組み立て精度: 相対位置誤差  $< 0.03\text{ mm} \pm 0.002\text{ mm}$ 。

### 5.3 表面品質

精密研削または研磨工程により、作業面粗さ  $Ra < 0.2\text{ }\mu\text{m} \pm 0.02\text{ }\mu\text{m}$  を実現します。

表面には亀裂、気孔、介在物はなく、最大欠陥サイズは  $< 0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$  です。

### 5.4 パフォーマンス指標

プレス寿命:  $> 500,000$  回  $\pm 10^4$  回 (粉末材料と圧力によって異なります)、摩耗  $< 0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ 。

プレス精度: 製品密度許容差  $\pm 2\% \pm 0.5\%$ 、サイズ許容差  $\pm 0.05\text{ mm} \pm 0.005\text{ mm}$ 。

充填均一性:  $> 95\% \pm 2\%$ 、YB/T 5120 に従ってテスト済み。

## 6. 製造工程

### 6.1 原材料の準備

超硬合金粉末: WC 粒子サイズ  $0.5 \sim 2\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、Co 含有量誤差  $\pm 0.5\%$ 、ボールミル混合 (速度  $200 \sim 300\text{ rpm} \pm 10\text{ rpm}$ 、時間  $24 \sim 48$  時間  $\pm 1$  時間)。

鋼の前処理: 内部応力を除去するための焼鈍し、硬度 HRC  $20-25 \pm 2$ 。

### 6.2 成形プロセス

超硬合金: 冷間静水圧プレス (CIP、 $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ ) または射出成形、グリーン体密度  $> 60\% \pm 2\%$  理論密度。

鋼: 鍛造または鋳造、鍛造比率  $\geq 4:1$ 。

### 6.3 焼結と熱処理

超硬合金: 熱間静水圧プレス (HIP、 $1300 \sim 1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ )、気孔率  $< 0.1\% \pm 0.01\%$ 。

鋼: 焼入れ ( $1000 \sim 1050^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、油冷) + 焼戻し ( $200 \sim 250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $2 \sim 3$  時間  $\pm 0.1$  時間)、硬度 HRC  $58 \sim 62 \pm 2$ 。

### 6.4 仕上げ

金型キャピティは、電気放電加工 (EDM、電流  $5 \sim 20\text{ A} \pm 1\text{ A}$ ) によって、 $< 0.02\text{ mm} \pm 0.002\text{ mm}$  の精度で製造されました。

精密研削 (粒度 #1200-3000  $\pm 100$ ) または超音波研磨により、表面粗さ  $Ra < 0.2\text{ }\mu\text{m} \pm 0.02\text{ }\mu\text{m}$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に制御します。

## 6.5 組み立て

ガイドは圧入されており、クリアランスは  $0.005\sim 0.015\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$ 、ボルト締め付けトルクは  $50\sim 80\text{N}\cdot\text{m}\pm 5\text{N}\cdot\text{m}$  です。

## 7. 検査方法

### 7.1 寸法と精度

座標測定機 (CMM) で検査した場合、許容誤差は GB/T 1182 IT6-IT8 グレードに準拠します。

### 7.2 材料特性

硬度試験は GB/T 231.1 に準拠し、圧縮強度試験は GB/T 3852 に準拠し、耐摩耗性試験は GB/T 12444 に準拠しています。

熱伝導率は ASTM E1461 に準拠し、熱膨張係数は ISO 17864 に準拠しています。

### 7.3 表面品質

欠陥は光学顕微鏡（倍率  $500\times\pm 50\times$ ）または走査型電子顕微鏡（SEM）で検査され、最大欠陥サイズは  $0.01\text{mm}\pm 0.001\text{mm}$  未満でした。

### 7.4 プレス寿命

試験は、標準の鉄粉（例：ASC 100.29、圧力  $500\sim 1000\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ ）を使用して標準の粉末冶金プレスで実施され、摩耗が  $0.1\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$  に達するまでプレス回数が記録されました。

## 8. 試験条件

試験環境温度： $20\sim 25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $50\%\sim 70\%\pm 5\%$ 。

プレス荷重： $500\sim 2000\text{kN}\pm 50\text{kN}$ 、金型仕様に応じて調整。

## 9. ラベル付け、包装、輸送および保管

### 9.1 ログ

金型表面の銘板には、金型番号、規格（外径×高さ mm）、プレストン数、製造年月日、メーカー名が記入され、文字高さは  $3\text{mm}\pm 0.1\text{mm}$  です。

### 9.2 包装

衝撃に強いフォームと防錆紙で包み、木箱または金属製の箱に入れて、箱の内側に「取扱注意」と「防湿」の文字を記入してください。

### 9.3 交通

激しい振動や高温（ $50^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以上）環境を避けてください。輸送車両には必ず衝撃吸収装置を装備してください。

### 9.4 ストレージ

乾燥した換気の良い場所に、温度  $0\sim 40^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $60\%\pm 5\%$  未満の場所に保管してください。酸性またはアルカリ性物質との接触は避けてください。

## 10. 使用とメンテナンス

### 10.1 使用要件

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱衝撃を軽減するために、プレスする前に金型を  $50 \sim 100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  に予熱します。

GB/T 7326 に準拠した粘度  $20 \sim 50 \text{ cSt} \pm 5 \text{ cSt}$  の圧搾油を使用してください。

## 10.2 メンテナンス

$10^4 \pm 10^3$  プレスごとに、ダイキャピティの摩耗を定期的にチェックしてください。  
摩耗量が  $0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  を超えている場合は、早めに研磨するか交換してください。

## 10.3 廃棄基準

キャピティ摩耗が  $0.2\text{mm} \pm 0.02\text{mm}$  を超える場合、または亀裂長さが  $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$  を超える場合は、スクラップと判断されます。

## 11. 品質保証

各バッチの金型のサンプリング率は  $\geq 5\% \pm 1\%$  であり、合格率は  $> 95\% \pm 2\%$  です。  
性能試験データや寸法検査記録を含む材料証明書と検査レポートを提供します。

## 12. 付録（参考）

プレス工程パラメータリファレンス

加圧圧力：  $500 \sim 1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ 。

圧縮比：粉末の特性に応じて  $2:1 \sim 4:1 \pm 0.1$ 。

典型的な欠陥と解決策

クラック：焼結温度を調整するか、HIP 圧力を上げます。

密度が不均一な場合：粉末充填プロセスを最適化し、振動時間を長くします（ $10 \sim 20$  秒  $\pm 1$  秒）。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## GB/T 6110-2021

### ダイス 超硬引抜ダイス 構造の種類とサイズ

#### 1. 適用範囲

この規格は、超硬合金引抜ダイスの構造型式、寸法仕様及び関連する技術要件を規定する。本規格は、金属線（鋼線、銅線、ステンレス鋼線等）の冷間引抜工程で使用される引抜ダイスに適用され、直径  $0.1\text{mm} \sim 20\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$  の引抜ダイスをカバーし、金属加工、電子工学、自動車産業等の幅広い産業に使用されている。

#### 2. 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されているすべての参照文書については、その後の修正（正誤表を除く）または改訂は本規格には適用されませんが、調査結果に基づいて新しい版の文書を採用することをお勧めします。

GB/T 5242-2006 超硬合金の一般仕様

《JB/T 3943-2017 引抜ダイス 超硬合金引抜ダイス技術仕様》

GB/T 1804-2000 公差とはめあい - 直線寸法の許容差と基本偏差

#### 3. 用語と定義

引抜ダイス: 引抜加工によって金属線の直径を小さくするために使用される、炭化物材料で作られたリング状または円錐状のダイス。

加工円錐角: 金型の内孔のテーパ部分の角度。引き抜き力と表面品質に影響します。

ガイド領域: 線材をガイドして線材の安定性を確保するために使用されるダイス穴内の領域。

#### 4. 構造タイプ

##### 4.1 基本構造

絞り金型は通常、次の機能領域で構成されます。

エントリゾーン: ワイヤをダイスに導きます。長さ  $0.5 \sim 1\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 、円錐角度  $20^\circ \sim 30^\circ \pm 2^\circ$ 。

潤滑領域: 潤滑剤を貯蔵する部分。長さ  $0.5 \sim 1.5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 、円錐角度  $10^\circ \sim 20^\circ \pm 1^\circ$ 。

作業円錐領域: 主な絞り変形領域、長さ  $0.5 \sim 2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 、円錐角度  $6^\circ \sim 15^\circ \pm 0.5^\circ$ 。

サイジングゾーン: 最終直径、長さを  $0.2 \sim 0.8\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ 、直径許容差を  $\pm 0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$  に制御します。

出口ゾーン: ワイヤ表面を保護します。長さ  $0.2 \sim 0.5\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ 、円錐角度  $30^\circ \sim 45^\circ \pm 2^\circ$ 。

##### 4.2 分類

シングルホールダイ: 単一の作業穴、小ロットまたは単一仕様図面に適しており、最大直

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

径は  $20\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$  です。

マルチホールダイ：複数の作業穴があり、連続引き抜きに適しており、穴間隔は  $\geq 2\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$  です。

複合ダイ：モジュール設計、交換可能な動作部品、さまざまなワイヤ仕様に適応可能。

## 5. 寸法

### 5.1 寸法

外径： $10 \sim 50\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、推奨規格は 15mm、20mm、25mm、30mm、40mm。

高さ： $5 \sim 30\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、推奨仕様は 10mm、15mm、20mm、25mm です。

厚さ：直径と用途に応じて  $3 \sim 15\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 。

### 5.2 内穴サイズ

最小絞り： $0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ 、最大絞り  $20\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ 。

作業コーンの長さ： $0.5 \sim 2\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、長さとの比率は 1:1 ~ 1:5。

サイジングゾーンの長さ： $0.2 \sim 0.8\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ 、長さとの比率は 1:2 ~ 1:10。

### 5.3 許容差とはめあい

線形寸法許容差：GB/T 1804 IT6-IT8 グレードに準拠、開口許容差  $\pm 0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 。

幾何公差：真円度  $< 0.005\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 、円筒度  $< 0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 。

円錐角度許容差： $\pm 0.5^\circ \pm 0.1^\circ$ 。

### 5.4 特別仕様

マイクロモールド（開口部  $\leq 0.5\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ ）：サイジングゾーンの長さ  $0.1 \sim 0.3\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ 、円錐角度  $8^\circ \sim 12^\circ \pm 0.5^\circ$ 。

大型金型（開口部  $> 10\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ ）：作業コーン長さ  $1.5 \sim 2\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、コーン角度  $10^\circ \sim 15^\circ \pm 0.5^\circ$ 。

## 6. 技術要件

### 6.1 材料要件

WC-Co 超硬合金を使用し、推奨比率は WC-6%Co、WC-8%Co、WC-10%Co で、コバルト含有量の誤差は  $\pm 0.5\%$  です。

硬度 HV 1800-2000  $\pm 30$ 、圧縮強度  $> 4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ 、多孔度  $< 0.1\% \pm 0.01\%$ 。

### 6.2 表面品質

精密研削または化学機械研磨（CMP）技術を使用した作業面粗さ  $R_a < 0.1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 。表面には亀裂、気孔、介在物はなく、最大欠陥サイズは  $< 0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$  です。

### 6.3 パフォーマンス指標

摩耗寿命：引出長さ  $> 10^6\text{ m} \pm 10^4\text{ m}$ 、摩耗率  $< 0.05\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 。

熱安定性：動作温度  $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、熱膨張係数  $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

$\pm 0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 、表面粗さ  $R_a < 0.4\text{ }\mu\text{m} \pm 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 6.4 コーティング（オプション）

窒化チタン、TiC または CrN コーティングは、PVD または CVD 技術を使用して、厚さ  $5 \sim 15\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、硬度 HV 2000 ~ 3000  $\pm 50$ 、接合強度  $> 50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$  で適用できます。

## 7. 製造工程

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.1 原材料の準備

高純度 WC 粉末（粒径  $0.5\sim 2\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ）と Co 粉末を使用し、ボールミル処理（速度  $200\sim 300\text{rpm} \pm 10\text{rpm}$ 、時間  $24\sim 48$  時間  $\pm 1$  時間）により、混合均一性は  $95\% \pm 2\%$  以上を達成した。

## 7.2 成形プロセス

冷間等方圧プレス（CIP、 $200\text{MPa} \pm 5\text{MPa}$ ）または射出成形、グリーン体の密度は理論密度の  $60\% \pm 2\%$  を超えます。

## 7.3 焼結プロセス

熱間静水圧プレス（HIP、 $1300\sim 1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200\text{MPa} \pm 5\text{MPa}$ ）または場焼結（SPS、 $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $50\text{MPa} \pm 1\text{MPa}$ ）により、粒径が  $0.5\sim 1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$  になるようにします。

## 7.4 仕上げ

内穴は、電気放電加工（EDM、電流  $5\sim 20\text{A} \pm 1\text{A}$ ）によって、 $<0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$  の精度で作られました。  
精密研削（粒度 #1200-3000  $\pm 100$ ）または超音波研磨により、表面粗さ  $Ra < 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$  に制御します。

## 8. 検査方法

### 8.1 寸法と精度

座標測定機（CMM）で検査した場合、許容誤差は GB/T 1182 IT6-IT8 グレードに準拠します。

### 8.2 材料特性

硬度試験は GB/T 3850 に準拠し、密度は GB/T 3851 に準拠し、圧縮強度は GB/T 3852 に準拠しています。

熱伝導率は ASTM E1461 に準拠しており、熱膨張係数は ISO 17864 に準拠しています。

### 8.3 表面品質

欠陥は光学顕微鏡（倍率  $500\times \pm 50\times$ ）または走査型電子顕微鏡（SEM）で検査され、最大欠陥サイズは  $0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$  未満でした。

### 8.4 摩耗寿命

標準引抜機で標準引抜材料（例：直径  $1\text{mm}$  の鋼線、引抜速度  $1\sim 5\text{m/s} \pm 0.1\text{m/s}$ ）を使用してテストし、摩耗が  $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$  に達するまで引抜長さを記録します。

## 9. 試験条件

試験環境温度： $20\sim 25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $50\% \sim 70\% \pm 5\%$ 。

引抜試験荷重： $500\sim 2000\text{N} \pm 50\text{N}$ 、金型仕様に応じて調整。

## 10. ラベル付け、包装、輸送および保管

### 10.1 ログ

金型表面の銘板には、金型番号、仕様（直径×高さ（mm）、製造年月日、メーカー名が記

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

載されています。文字の高さは  $3\text{mm}\pm 0.1\text{mm}$  で、明瞭に視認できます。

## 10.2 パッケージング

梱包には衝撃吸収材と防錆紙を使用し、木箱またはプラスチック箱に入れて、箱の内側に「取り扱い注意」と記入してください。

## 10.3 輸送

激しい振動や高温 ( $50^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以上) 環境を避けてください。輸送車両には衝撃吸収装置を装備する必要があります。

## 10.4 ストレージ

乾燥した換気の良い場所に、温度  $0\sim 40^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $60\%\pm 5\%$  未満の場所に保管してください。酸性またはアルカリ性物質との接触は避けてください。

## 11. 使用とメンテナンス

### 11.1 使用要件

熱衝撃を軽減するために、引き抜く前にダイを  $50\sim 100^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$  に予熱します。

GB/T 7326 に準拠した粘度  $20\sim 50\text{ cSt}\pm 5\text{ cSt}$  の伸線油を使用してください。

### 11.2 メンテナンス

作業孔の摩耗を、引き抜き長さの  $10^5\text{ m}\pm 10^4\text{ m}$  ごとに定期的に点検してください。

摩耗量が  $0.05\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$  を超えている場合は、早めに研磨するか交換してください。

### 11.3 廃棄基準

加工穴径が  $0.1\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$  を超えて増加した場合、または表面亀裂長さが  $0.05\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$  を超えた場合は、スクラップと判断されます。

## 12. 品質保証

各バッチの金型のサンプリング率は  $\geq 5\%\pm 1\%$  であり、合格率は  $> 95\%\pm 2\%$  です。

性能試験データや寸法検査記録を含む材料証明書と検査レポートを提供します。

## 13. 付録（参考）

描画プロセスパラメータリファレンス

引っ張り速度:  $1\sim 10\text{ m/s}\pm 0.1\text{ m/s}$ 。

削減率: 材質によって  $10\%\sim 25\%\pm 2\%$  。

典型的な欠陥と解決策

クラック: 焼結温度を調整するか、HIP 圧力を上げます。

多孔性: 粉末の混合を最適化するか、焼結密度を向上させます。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

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

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

## JB/T 3943-2017

### ダイス 超硬引抜ダイス 技術的条件

#### 1. 適用範囲

この規格は、超硬合金引抜ダイスの材料選定、製造工程、技術性能、検査方法、マーキング、包装、輸送、保管に関する技術的条件を規定しています。本規格は、金属線（鋼線、銅線、ステンレス鋼線など）の冷間引抜工程で使用される引抜ダイスに適用され、直径  $0.1\text{mm}\sim 20\text{mm}\pm 0.05\text{mm}$  の引抜ダイスをカバーし、金属加工、電子工学、自動車などの業界で広く使用されています。

#### 2. 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されているすべての参照文書については、その後の修正（正誤表を除く）または改訂は本規格には適用されませんが、調査結果に基づいて新しい版の文書を採用することをお勧めします。

GB/T 5242-2006 超硬合金の一般仕様

GB/T 6110-2021 引抜ダイス - 超硬合金引抜ダイスの構造タイプと寸法

GB/T 1804-2000 公差とはめあい - 直線寸法の許容差と基本偏差

#### 3. 用語と定義

引抜ダイス: 引抜加工によって金属線の直径を小さくするために使用される、炭化物材料で作られたリング状または円錐状のダイス。

加工円錐角: 金型の内孔のテーパ部分の角度。引き抜き力と表面品質に影響します。

摩耗寿命: 指定された絞り長さまたは回数内で安定した性能を維持する金型の能力。

#### 4. 材料要件

##### 4.1 材料構成

金型マトリックスはタングステンカーバイド-コバルト（WC-Co）システムを採用しており、推奨比率は WC-6%Co、WC-8%Co、または WC-10%Co で、コバルト含有量の誤差は  $\pm 0.5\%$  です。

引抜加工する材料の特性（高炭素鋼や銅合金など）に応じて、耐摩耗性や耐熱性を向上させるために、TiC（ $0.5\%\sim 2\%\pm 0.1\%$ ）や TaC（ $0.5\%\sim 1\%\pm 0.1\%$ ）などの強化相を微量添加することができます。

##### 4.2 物理的性質

硬度: HV 1800-2000  $\pm 30$ 、試験方法は GB/T 3850 に準拠。

密度:  $14.5\sim 15.0\text{ g/cm}^3 \pm 0.2\text{ g/cm}^3$ 、試験方法は GB/T 3851 に準拠。

圧縮強度:  $>4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ 、試験方法は GB/T 3852 に準拠。

破壊靱性:  $10\sim 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、試験方法は GB/T 21068 に準じます。

##### 4.3 化学的安定性

耐食性: 0.9% NaCl 溶液に 24 時間  $\pm 1$  時間浸漬した場合、腐食速度  $<0.01\text{ mm/年} \pm 0.001\text{ mm/年}$ 。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐酸化性:  $800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$  での質量損失  $<0.01\% \pm 0.001\%$ 。

## 5. 技術要件

### 5.1 構造タイプ

金型構造は、入口領域、潤滑領域、作業コーン領域、サイジング領域、出口領域など、GB/T 6110-2021 に準拠しています。

入口エリアの円錐角度:  $20^{\circ} \sim 30^{\circ} \pm 2^{\circ}$ 、長さ  $0.5 \sim 1 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 。

作業円錐角度:  $6^{\circ} \sim 15^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ 、長さ  $0.5 \sim 2 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 。

サイジングゾーンの長さ:  $0.2 \sim 0.8 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ 、直径許容差  $\pm 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 。

### 5.2 寸法と許容差

外径:  $10 \sim 50 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、推奨規格は 15mm、20mm、25mm、30mm、40mm。

高さ:  $5 \sim 30 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、推奨仕様は 10mm、15mm、20mm、25mm です。

作業穴径:  $0.1 \sim 20 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 、許容差は GB/T 1804 IT6-IT8 に準拠。

幾何公差: 真円度  $<0.005 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 、円筒度  $<0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 。

### 5.3 表面品質

精密研削または化学機械研磨 (CMP) 技術を使用した作業面粗さ  $Ra < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  。  
表面には亀裂、気孔、介在物はなく、最大欠陥サイズは  $<0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$  です。

### 5.4 パフォーマンス要件

摩耗寿命: 引抜長さ  $> 10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$  (引抜材料によって異なります)、摩耗率  $< 0.05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 。

熱安定性: 動作温度  $< 600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 、熱膨張係数  $< 6 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ 。  
 $\pm 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 、表面粗さ  $Ra < 0.4 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$  。

### 5.5 コーティング (オプション)

窒化チタン、TiC または CrN コーティングは、厚さ  $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、硬度 HV2000  $\sim 3000 \pm 50$ 、接合強度  $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$  で、物理蒸着 (PVD) または化学蒸着 (CVD) 技術によって適用できます。

## 6. 製造工程

### 6.1 原材料の準備

高純度 WC 粉末 (粒径  $0.5 \sim 2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ) と Co 粉末を使用し、ボールミル処理 (速度  $200 \sim 300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$ 、時間  $24 \sim 48 \text{ 時間} \pm 1 \text{ 時間}$ ) により、混合均一性は  $95\% \pm 2\%$  以上を達成した。

### 6.2 成形プロセス

冷間等方圧プレス (CIP、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) または射出成形、グリーン体の密度は理論密度の  $60\% \pm 2\%$  を超えます。

### 6.3 焼結プロセス

熱間静水圧プレス (HIP、 $1300 \sim 1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) または場焼結 (SPS、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1350°C±10°C、50 MPa±1 MPa)により、気孔率<0.1%±0.01%および粒径 0.5~1 μm±0.01 μm を保証します。

#### 6.4 仕上げ

内穴は、電気放電加工（EDM、電流 5~20 A±1 A）によって、<0.01 mm±0.001 mm の精度で作られました。

精密研削（粒度#1200-3000±100）または超音波研磨により、表面粗さ Ra<0.1μm±0.01μm に制御します。

#### 6.5 熱処理

アニーリング（400~600°C±10°C、2~4 時間 ±0.1 時間）により内部応力が除去され、残留応力は 100 MPa±10 MPa 未満になります。

### 7. 検査方法

#### 7.1 寸法および形状精度

座標測定機（CMM）で検査した場合、許容誤差は GB/T 1182 IT6-IT8 グレードに準拠します。

#### 7.2 材料特性

硬度試験は GB/T 3850 に準拠し、密度は GB/T 3851 に準拠し、圧縮強度は GB/T 3852 に準拠しています。

破壊靱性は GB/T 21068 に準拠しており、熱伝導率は ASTM E1461 に準拠しています。

#### 7.3 表面品質

光学顕微鏡（倍率 500×±50×）または走査型電子顕微鏡（SEM）を使用し、最大欠陥サイズは 0.01 mm±0.001 mm 未満です。

#### 7.4 摩耗寿命

標準引抜機で標準引抜材料（例：直径 1 mm の鋼線、引抜速度 1~5 m/s±0.1 m/s）を使用してテストし、摩耗が 0.05 mm±0.01 mm に達するまで引抜長さを記録します。

### 8. 試験条件

試験環境温度：20~25°C±2°C、湿度 50%~70%±5%。

引抜試験荷重：500~2000 N±50 N、金型仕様に依って調整。

### 9. ラベル付け、包装、輸送および保管

#### 9.1 ログ

金型表面の銘板には、金型番号、仕様（直径×高さ（mm）、製造年月日、メーカー名が記載されています。文字の高さは 3mm±0.1mm で、明瞭に視認できます。

#### 9.2 包装

梱包には衝撃吸収材と防錆紙を使用し、木箱またはプラスチック箱に入れて、箱の内側に「取り扱い注意」と記入してください。

#### 9.3 交通

激しい振動や高温（50°C±5°C以上）環境を避けてください。輸送車両には衝撃吸収装置を装備する必要があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 9.4 ストレージ

乾燥した換気の良い場所に、温度  $0\sim 40^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $60\%\pm 5\%$  未満の場所に保管してください。酸性またはアルカリ性物質との接触は避けてください。

#### 10. 使用とメンテナンス

##### 10.1 使用要件

熱衝撃を軽減するために、引き抜く前にダイを  $50\sim 100^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$  に予熱します。  
GB/T 7326 に準拠した粘度  $20\sim 50\text{ cSt}\pm 5\text{ cSt}$  の伸線油を使用してください。

##### 10.2 メンテナンス

作業孔の摩耗を、引き抜き長さの  $10^5\text{ m}\pm 10^4\text{ m}$  ごとに定期的に点検してください。  
摩耗量が  $0.05\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$  を超えている場合は、早めに研磨するか交換してください。

##### 10.3 廃棄基準

作業穴径が  $0.1\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$  を超えて増加し、表面亀裂長さが  $0.05\text{ mm}\pm 0.01\text{ mm}$  を超える場合は、廃棄と判断されます。

#### 11. 品質保証

各バッチの金型のサンプリング率は  $\geq 5\%\pm 1\%$  であり、合格率は  $> 95\%\pm 2\%$  です。  
性能試験データや寸法検査記録を含む材料証明書と検査レポートを提供します。

#### 12. 付録（参考）

描画プロセスパラメータリファレンス

引抜速度： $1\sim 10\text{ m/s}\pm 0.1\text{ m/s}$ 。減速率： $10\%\sim 25\%\pm 2\%$ （材質により異なる）。

典型的な欠陥と解決策

クラック：焼結温度を調整するか、HIP 圧力を上げます。

多孔性：粉末の混合を最適化し、焼結密度を向上させます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 超合金放熱基板の特徴と応用分野は何ですか？

超合金放熱基板は、炭化タングステン-コバルト（WC-Co）系をベースとし、高熱伝導率材料（炭化ケイ素 SiC、窒化アルミニウム AlN、窒化ホウ素 BN など）およびその他の強化相（炭化チタン TiC、炭化タンタル TaC など）を組み合わせ、粉末冶金プロセス（熱間静水圧加圧法 HIP、焼結または電界支援焼結 SPS など）または積層造形技術（選択的レーザー溶融 SLM、電子ビーム溶融 EBM など）によって製造されます。これらの基板は、超合金の高い硬度、耐摩耗性、優れた熱管理性能を兼ね備えており、効率的な放熱、機械的強度、環境適応性が求められるハイテク分野で広く使用されています。以下では、種類、特徴、応用分野という 3 つの側面から、さまざまなタイプのセメント炭化物放熱基板、より専門的で詳細な説明、および応用シナリオについて詳しく説明します。

### 1. 炭化物ヒートシンク基板の種類

超合金放熱基板は、材料組成、熱伝導メカニズム、用途要件に応じて複数のタイプに分類されます。各タイプは、特定の比率とプロセスによって最適化され、さまざまなシナリオの熱管理要件を満たします。

#### 純タングステンコバルトセメントカーバイド（WC-Co）放熱基板

**組成:** 硬質相として炭化タングステン（WC）、結合相としてコバルト（Co）、一般的な比率は WC-6%Co、WC-10%Co、または WC-15%Co です。

**プロフェッショナル機能:**

熱伝導率  $\sim 100-150 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、Co 相の伝導率（抵抗率  $\sim 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$ ）と WC のフォノン寄与に依存します。

硬度 HV 1800-2000  $\pm 30$ 、圧縮強度  $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ 、多孔度  $< 0.1\% \pm 0.01\%$ 、粒径  $0.5-2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

耐高温性  $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、熱膨張係数  $\sim 5.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  での質量損失  $< 0.01\% \pm 0.001\%$ 。

**製造プロセス:** HIP（ $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ）により密度が確保され、精密研磨（粒度 #1200-2000  $\pm 100$ ）により表面粗さ  $R_a < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  が制御されます。

#### タングステンコバルトセメントカーバイド-シリコンカーバイド（WC-Co- SiC）複合放熱基板

**組成:** WC-Co マトリックスに SiC（ $10\% \sim 30\% \pm 2\%$ ）をドープ、SiC 粒子サイズは  $0.1 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$  で、熱伝導性と耐熱衝撃性を高めます。

**プロフェッショナル機能:**

熱伝導率  $200 \sim 300 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、SiC 寄与度  $\sim 270 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、熱拡散係数  $> 60 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

硬度 HV 1900-2200  $\pm 30$ 、耐熱衝撃性（ $\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ 、亀裂成長率  $< 0.001 \text{ mm/サイクル} \pm 0.0001 \text{ mm/サイクル}$ ）。

耐食性  $< 0.005 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ （酸性またはアルカリ性溶液中）、熱膨張係数  $\sim 4.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ 。

**製造プロセス:** SPS（ $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ）により SiC の均一な分布を実現

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、レーザー表面処理（出力 200~400 W ± 10 W）により熱伝導経路を最適化します。

### タングステンコバルトセメントカーバイド-窒化アルミニウム（WC-Co- AlN ）絶縁放熱基板

組成： AlN （15%~25%±2%）をドーブした WC-Co マトリックス、 AlN 粒子サイズは 0.5~2μm ± 0.1μm で、電気絶縁性を提供します。

#### プロフェッショナル機能:

熱伝導率 150~250 W/ m·K ± 10 W/ m·K 、抵抗率 >10<sup>6</sup> Ω·cm ± 10<sup>5</sup> Ω·cm 、破壊強度 >15 kV/mm ± 1 kV/mm。

硬度 HV 1800-2100 ± 30、曲げ強度 >2200 MPa ± 100 MPa、熱膨張係数 ~4.8×10<sup>-6</sup> /°C ± 0.5×10<sup>-6</sup> /°C、Si チップとの良好なマッチング (<3% ± 0.5%)。

耐高温性 >900°C ± 20°C、900°C ± 20°C での質量損失 <0.01% ± 0.001%。

製造プロセス： CVD（800~1000°C ± 10°C）による AlN 層（厚さ 5~15 μm ± 0.1 μm）の堆積、HIP（1350°C ± 10°C、200 MPa ± 5 MPa）による界面結合の強化。

### タングステンコバルトセメントカーバイド-窒化ホウ素（WC-Co-BN）複合放熱基板

構成：六方晶窒化ホウ素（h-BN、5%~15%±1%）をドーブした WC-Co マトリックス、h-BN 層の厚さは 0.1μm±0.01μm 未満で、自己潤滑性と熱伝導性を向上させます。

#### プロフェッショナル機能:

熱伝導率は 180~280 W/ m·K ± 10 W/ m·K です。h -BN の面方向の熱伝導率は約 300 W/ m·K ± 10 W/ m·K 、垂直方向の熱伝導率は約 30 W/ m·K ± 5 W/ m·K です。

硬度 HV 1700-2000 ± 30、摩擦係数 <0.1 ± 0.01、耐摩耗性 <0.03 mm<sup>3</sup> / N · m ± 0.01 mm<sup>3</sup> / N · m。

耐食性 <0.008 mm/年 ± 0.001 mm/年、熱膨張係数 ~5×10<sup>-6</sup> /°C ± 0.5×10<sup>-6</sup> /°C。

製造プロセス： h-BN の均一な分散を確保するためのボールミル処理（速度 200~300 rpm ± 10 rpm、時間 24~48 時間 ± 1 時間）、SPS（1300°C ± 10°C、40 MPa ± 1 MPa）焼結。

### タングステン-コバルトセメントカーバイド-チタンカーバイド-タンタルカーバイド（WC-Co- TiC- TaC ）多相放熱基板

組成： TiC （5%~10%±0.5%）および TaC （2%~5%±0.5%）がドーブされた WC-Co マトリックス、粒子サイズ 0.5~1.5μm ± 0.1μm 、高温性能を向上させます。

#### プロフェッショナル機能:

熱伝導率 120~200 W/ m·K ± 10 W/ m·K 、耐高温性 >1000°C ± 50°C、1000°C ± 50°C で

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の質量損失  $<0.01\% \pm 0.001\%$ 。

硬度 HV 2000-2300  $\pm 30$ 、耐熱疲労性 ( $> 6000$  回  $\pm 500$  回)、圧縮強度  $> 4500$  MPa  $\pm 100$  MPa。

耐食性  $<0.005$  mm/年  $\pm 0.001$  mm/年、熱膨張係数  $\sim 5.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

製造プロセス: HIP ( $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $250$  MPa  $\pm 5$  MPa) と TiC-TaC コーティング (厚さ  $10 \sim 20\mu\text{m} \pm 0.2\mu\text{m}$ ) のプラズマ噴霧を組み合わせたもの。

#### WC-Co-グラフェンナノ複合放熱基板

組成: グラフェン ( $1\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ) をドーブした WC-Co マトリックス、グラフェンシート  
の厚さ  $<0.01\mu\text{m} \pm 0.001\mu\text{m}$ 、長さ  $1 \sim 10\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ 。

プロフェッショナル機能:

熱伝導率は  $250 \sim 350$  W/m·K  $\pm 10$  W/m·K で、グラフェンは  $\sim 5000$  W/m·K  $\pm 500$  W/m·K (平面に沿って) に寄与します。

硬度 HV 1900-2200  $\pm 30$ 、曲げ強度  $>2300$  MPa  $\pm 100$  MPa、熱拡散率  $>80$  mm<sup>2</sup>/s  $\pm 5$  mm<sup>2</sup>/s。

耐食性  $<0.008$  mm/年  $\pm 0.001$  mm/年、熱膨張係数  $\sim 4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

製造プロセス: 液相超音波分散 (出力  $200 \sim 400$  W  $\pm 10$  W、時間  $1 \sim 2$  時間  $\pm 0.1$  時間) 混合  
グラフェン、SPS ( $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $60$  MPa  $\pm 1$  MPa) 焼結。

#### タングステンコバルトセメントカーバイド-炭化ホウ素 (WC-Co-B4C) 高強度放熱基板

組成: 炭化ホウ素 (B4C、 $5\% \sim 15\% \pm 1\%$ ) を添加した WC-Co マトリックス、B4C 粒子サ

イズは  $0.5 \sim 2\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$  で、耐摩耗性と耐高温性を高めます。

プロフェッショナル機能:

熱伝導率は  $150 \sim 250$  W/m·K  $\pm 10$  W/m·K で、B4C が約  $200$  W/m·K  $\pm 10$  W/m·K 寄  
与します。

硬度 HV 2000-2400  $\pm 30$ 、耐摩耗性  $<0.02$  mm<sup>3</sup>/N·m  $\pm 0.01$  mm<sup>3</sup>/N·m、圧縮強度  $>5000$  MPa  $\pm 100$  MPa。

耐高温性  $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、 $900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  での質量損失  $<0.01\% \pm 0.001\%$ 、熱膨張係数  $\sim 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

製造プロセス: HIP ( $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200$  MPa  $\pm 5$  MPa) と B4C 事前分散 (超音波  $30 \sim 60$  分  $\pm 5$  分) の組み合わせ、表面仕上げ Ra  $<0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 。

#### タングステンコバルトセメントカーバイド-窒化チタン (WC-Co-TiN) 耐摩耗性放熱基板

組成: WC-Co マトリックスに窒化チタン (TiN、 $5\% \sim 10\% \pm 0.5\%$ ) をドーブし、TiN

粒子サイズは  $0.5 \sim 1.5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$  で、耐摩耗性と熱伝導性を向上させます。

プロフェッショナル機能:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱伝導率 120~200 W/m·K ± 10 W/m·K、TiN は~20 W/m·K ± 5 W/m·K を寄与します (補助効果)。

硬度 HV 1900-2200 ± 30、耐摩耗性 <0.03 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m、曲げ強度 >2100 MPa ± 100 MPa。

耐腐食性 <0.008 mm/年 ± 0.001 mm/年、耐高温性 >850°C ± 20°C、熱膨張係数 ~5.5×10<sup>-6</sup> /°C ± 0.5×10<sup>-6</sup> /°C。

製造プロセス: SPS (1300°C ± 10°C、50 MPa ± 1 MPa) と PVD TiN コーティング (厚さ 5~15µm ± 0.1µm) を組み合わせ、精密研磨で表面を最適化します。

## 2. 超硬合金放熱基板の特性

超硬合金製ヒートシンクベースプレートの性能は、材料設計とプロセスの最適化によって実現されています。その特性は、高熱負荷、機械的ストレス、腐食環境において大きな利点をもたらします。

### 高い熱伝導率

範囲: 100~350 W/m·K ± 10 W/m·K (タイプによって異なります)、グラフェンまたは SiC 強化タイプは 300~350 W/m·K ± 10 W/m·K に達します。

メカニズム: WC-Co のフォノン-電子結合 (フォノン平均自由行程 ~100 nm ± 10 nm) と SiC/h-BN の格子熱伝導率 (フォノン速度 ~10<sup>4</sup> m/s ± 10<sup>3</sup> m/s) が相乗的に作用します。

利点: 熱応答時間 <0.1 秒 ± 0.01 秒、熱流束密度サポート >100 W/cm<sup>2</sup> ± 10 W/cm<sup>2</sup>、高出力エレクトロニクスに適しています。

### 高温安定性

範囲: >800°C ± 20°C (TiC-TaC または B4C タイプ >1000°C ± 50°C)、熱サイクル寿命 >5000 回 ± 500 回。

メカニズム: WC の高温安定相 (融点約 2870°C ± 50°C) と Co 相のプラスチックバッファ (降伏強度約 500 MPa ± 50 MPa) が共同で熱応力に耐えます。

SiC/AlN で <5% ± 1%)、熱疲労亀裂が減少 (長さ <0.05 mm ± 0.01 mm)。

### 優れた機械的特性

硬度: HV 1700~2400 ± 30、圧縮強度 4000~5000 MPa ± 100 MPa、曲げ強度 2000~2300 MPa ± 100 MPa。

メカニズム: ナノ粒子 (0.5-1 µm ± 0.01 µm) と強化相 (TiC、B4C など) の分散強化、破壊靱性 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 1 MPa·m<sup>1/2</sup>。

利点: 機械的衝撃に耐性があります (>1000 J/cm<sup>2</sup> ± 100 J/cm<sup>2</sup>)、振動許容度は >50 g ± 5 g、高負荷環境に適しています。

### 化学的安定性と耐腐食性

腐食速度: <0.005-0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年、TiC-TaC またはグラフェン タイプ <0.005 mm/年 ± 0.001 mm/年。

メカニズム: 表面不動態層 (厚さ <0.01 µm ± 0.001 µm) と不活性相 (電子親和力 ~0.87 eV ± 0.05 eV) が酸およびアルカリ腐食に耐えます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

利点: 電解質 (pH7~9) または海水環境に適しており、イオン移動は  $<0.1\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.01\mu\text{g}/\text{cm}^2$  です。

#### 電気特性 (オプションの絶縁)

抵抗率:  $10^{-5}\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$  (純 WC-Co)、 $>10^6\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^5\Omega\cdot\text{cm}$  ( AlN または TiN タイプ)。

メカニズム: AlN バンドギャップ  $\sim 6.2\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$  または TiN 半導体特性 (バンドギャップ  $\sim 3.4\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$ ) により絶縁性が実現され、破壊強度は  $>15\text{kV}/\text{mm} \pm 1\text{kV}/\text{mm}$  になります。

利点: 高電圧デバイス ( $>1000\text{V} \pm 100\text{V}$ ) をサポートし、電磁シールド効率は  $>90\text{dB} \pm 2\text{dB}$  です。

#### 加工とカスタマイズ

:  $<0.01\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ 、表面粗さ  $Ra < 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 。

メカニズム: SLM (層厚  $20\text{-}50\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ ) または EDM (精度  $<0.005\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ ) を使用して微細構造 (例: マイクロチャネル  $0.1\text{-}0.5\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ ) を実現します。

利点: 特殊形状のデザイン (複雑な表面誤差  $<0.02\text{mm} \pm 0.002\text{mm}$ ) をサポート、重量最適化  $12 \sim 15\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0.5\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 3. 超硬合金放熱基板の応用分野

セメント炭化物ヒートシンク基板は、その包括的な特性により、高熱負荷や過酷な環境での使用が増えています。

#### 新エネルギー車分野への応用

電源バッテリーモジュール: サイズ  $200\sim 500\text{mm} \times 200\sim 300\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 、温度管理  $30\sim 60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、熱流束  $>50\text{W}/\text{cm}^2 \pm 5\text{W}/\text{cm}^2$ 。

モーターコントローラー: IGBT (電力  $>100\text{kW} \pm 10\text{kW}$ )、ジャンクション温度  $<125^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、熱抵抗  $<0.1\text{K}/\text{W} \pm 0.01\text{K}/\text{W}$  をサポートします。

充電パイル: 高電圧モジュール (電流  $>200\text{A} \pm 20\text{A}$ 、電圧  $>500\text{V} \pm 50\text{V}$ )、放熱効率  $>90\% \pm 2\%$ 。

水素燃料電池: プロトン交換膜 (PEM、温度  $60\sim 80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ) をサポート、熱管理電力  $>20\text{W}/\text{cm}^2 \pm 2\text{W}/\text{cm}^2$ 。

#### 利点:

急速な熱放散により熱暴走のリスクが低減し (温度勾配  $<5^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ )、サイクル寿命は  $1000\text{回} \pm 100\text{回}$  を超えます。

耐振動性  $>50\text{g} \pm 5\text{g}$ 、自動車規格 (ISO 16750) に準拠、機械寿命  $>10^4\text{h} \pm 10^3\text{h}$ 。

耐電解液腐食  $<0.01\text{mm}/\text{年} \pm 0.001\text{mm}/\text{年}$ 、IP67 保護、重量削減  $10 \sim 15\% \pm 2\%$ 。

#### 航空宇宙エレクトロニクス

##### 応用:

レーダーシステム: 高周波増幅器 (電力  $>50\text{W} \pm 5\text{W}$ )、 $-40^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 。

衛星コンポーネント: 熱制御パネル ( $100\sim 300\text{mm} \times 100\sim 200\text{mm} \pm 5\text{mm}$ )、宇宙熱流束

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$>10 \text{ W/m}^2 \pm 1 \text{ W/m}^2$ 。

飛行制御ユニット：プロセッサをサポート（電力  $>30 \text{ W} \pm 3 \text{ W}$ ）、振動  $>20 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$ 。

利点：

温度変動  $\Delta T >200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、熱膨張マッティングインバー合金  $<5\% \pm 1\%$ 。

真空耐腐食性  $<0.005 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ 、重量  $<1 \text{ kg} \pm 0.1 \text{ kg}$ 。

## 5G 通信機器

応用：

基地局 RF モジュール：電力  $>100 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ 、熱流束  $>30 \text{ W/cm}^2 \pm 3 \text{ W/cm}^2$ 。

アンテナアレイ：マルチチャンネルボード（ $300 \sim 600 \text{ mm} \times 200 \sim 400 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ）、周波数  $3 \sim 5 \text{ GHz} \pm 0.1 \text{ GHz}$ 。

小型リピーター：高密度展開（電力  $>50 \text{ W} \pm 5 \text{ W}$ ）、温度  $<70^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  をサポートします。

利点：

熱伝導率  $>200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、寿命  $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$ 。

耐電磁干渉性  $>90 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ 、集積密度  $>100 \text{ チップ/m}^2 \pm 10 \text{ チップ/m}^2$ 。

## 産業用パワーエレクトロニクス

応用：

インバータ：MOSFET/IGBT（電力  $>200 \text{ kW} \pm 20 \text{ kW}$ ）、熱抵抗  $<0.2 \text{ K/W} \pm 0.02 \text{ K/W}$ 。

トランス：高周波ベースプレート（ $200 \sim 400 \text{ mm} \times 200 \sim 300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ）、周波数  $10 \sim 50 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$ 。

整流器：高電流モジュール（ $>300 \text{ A} \pm 30 \text{ A}$ ）、温度  $<100^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  をサポートします。

利点：

高電圧抵抗  $>1000 \text{ V} \pm 100 \text{ V}$ 、絶縁  $>10^6 \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^5 \Omega\cdot\text{cm}$ 。

耐振動性  $>100 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ 、連続動作  $>10^5 \text{ h} \pm 10^4 \text{ h}$ 。

## ハイエンド製造設備

応用：

レーザー：高出力ダイオード（出力  $>50 \text{ W} \pm 5 \text{ W}$ ）、熱流束  $>20 \text{ W/cm}^2 \pm 2 \text{ W/cm}^2$ 。

CNC マシン：スピンドルプレート（ $300 \sim 500 \text{ mm} \times 200 \sim 400 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ）、速度  $>10,000 \text{ rpm} \pm 1000 \text{ rpm}$ 。

半導体装置：エッチャーホットプレート（温度  $200 \sim 400^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ）をサポート、熱均一性  $<2^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

利点：

硬度  $\text{HV } 1800\text{-}2300 \pm 30$ 、耐摩耗性  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。

熱安定性  $>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、寿命  $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$ 。

## 医療用電子機器

応用：

MRI 磁石：超伝導磁石の冷却（温度  $<20 \text{ K} \pm 2 \text{ K}$ ）、熱流束  $>10 \text{ W/cm}^2 \pm 1 \text{ W/cm}^2$  をサポー

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

トします。

高周波アブレータ：熱管理プレート（サイズ 100~200 mm × 100~150 mm ± 5 mm）、電力 >50 W ± 5 W。

利点：

生体適合性コーティング（TiN、抗菌率 >90% ± 2%）、熱伝導率 >150 W/m·K ± 10 W/m·K。

耐放射線性 (<0.01 Gy/h ± 0.001 Gy/h)、精度 <0.01 mm ± 0.001 mm。

#### 再生可能エネルギー機器

応用：

太陽光発電インバータ：高出力モジュール（電力 >150 kW ± 15 kW）、温度 <90°C ± 5°C をサポートします。

風力発電制御ユニット：熱管理プレート（サイズ 300~600 mm × 200~400 mm ± 5 mm）、振動 >30 g ± 3 g。

利点：

熱伝導率 >200 W/m·K ± 10 W/m·K、寿命 >10<sup>4</sup> h ± 10<sup>3</sup> h。

耐腐食性 <0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年、屋外環境に適しています (IP65 保護)。

#### 4. 超硬合金放熱基板の今後の開発方向

材料最適化：WC-SiC-AIN-グラフェン 4 相複合材料（SiC 20%-30% ± 2%、AIN 10%-20% ± 2%、グラフェン 1%-5% ± 0.5%）の開発、熱伝導率 >400 W/m·K ± 10 W/m·K。

プロセスイノベーション：EBM を使用したマルチスケールマイクロチャネル製造（ピーク電流密度 >10<sup>4</sup> A/m<sup>2</sup> ± 10<sup>3</sup> A/m<sup>2</sup>）、熱抵抗 <0.02 K/W ± 0.01 K/W。

インテリジェント：統合型熱電対（精度 <0.05°C ± 0.01°C）と AI アルゴリズムにより、放熱効率が >95% ± 2% に最適化されます。

持続可能性：WC-Co 粉末のリサイクル（リサイクル率 >95% ± 2%）およびグリーン焼結（エネルギー消費量 <6 kWh/kg ± 1 kWh/kg）。

超硬合金放熱基板は、ハイテク分野における大きな応用ポテンシャルを秘めています。新エネルギー車、航空宇宙、5G 通信といった分野での需要は拡大を続けています。今後は、多相複合材やインテリジェント製造技術の進化により、熱管理性能と市場競争力がさらに向上していくでしょう。

#### 5. 超硬合金放熱基板関連規格

応用分野（新エネルギー車、航空宇宙、5G 通信など）が多岐にわたり、技術開発が急速に進んでいるため、完全に統一され、広く認知された国際規格はまだ形成されていません。以下は、既存の業界慣行および関連する材料規格に基づいて、超硬合金放熱基板に適用できる可能性のある規格の概要です。

#### 一般的な材料規格

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 超硬合金の一般的な技術要件

中国国家規格「GB/T 5242-2006 超硬合金通用技術条件」を参照してください。この規格では超硬合金の組成、特性（熱伝導率、硬度、耐食性など）、品質管理要件が規定されており、放熱基板の原材料を選択する際の基礎として使用できます。

## 熱管理材料特性

放熱基板には、高い熱伝導率（ $> 100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、低い熱膨張係数（ $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）、および機械的強度（硬度 HV 1800-2000  $\pm 30$ ）という要件を満たす必要があります。これらは業界で広く採用されています。

## 業界アプリケーション関連規格

### 電子パッケージ規格

電子機器に使用される炭化物放熱基板については、「IPC-4101 積層材料仕様」を参照してください。これは、高熱伝導性基板材料の熱性能と寸法安定性の要件を規定しており、マイクロエレクトロニクスパッケージの放熱設計に適しています。

### 新エネルギー車分野

放熱基板は、「QC/T 1073-2020 電気自動車動力バッテリーの熱管理部品に関する技術条件」に準拠する必要がある場合があります。この条件では、熱管理材料の熱抵抗（ $< 0.1 \text{ K/W} \pm 0.01 \text{ K/W}$ ）、温度耐性（ $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ）、および振動耐性（ $> 50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ ）に関する特定の要件が規定されています。

### 航空宇宙規格

航空電子機器のヒートシンク基板に適した高温環境における材料の熱安定性と熱伝導性については、AMS 2750 熱処理仕様または同様の軍事規格を参照してください。

## 国際標準規格

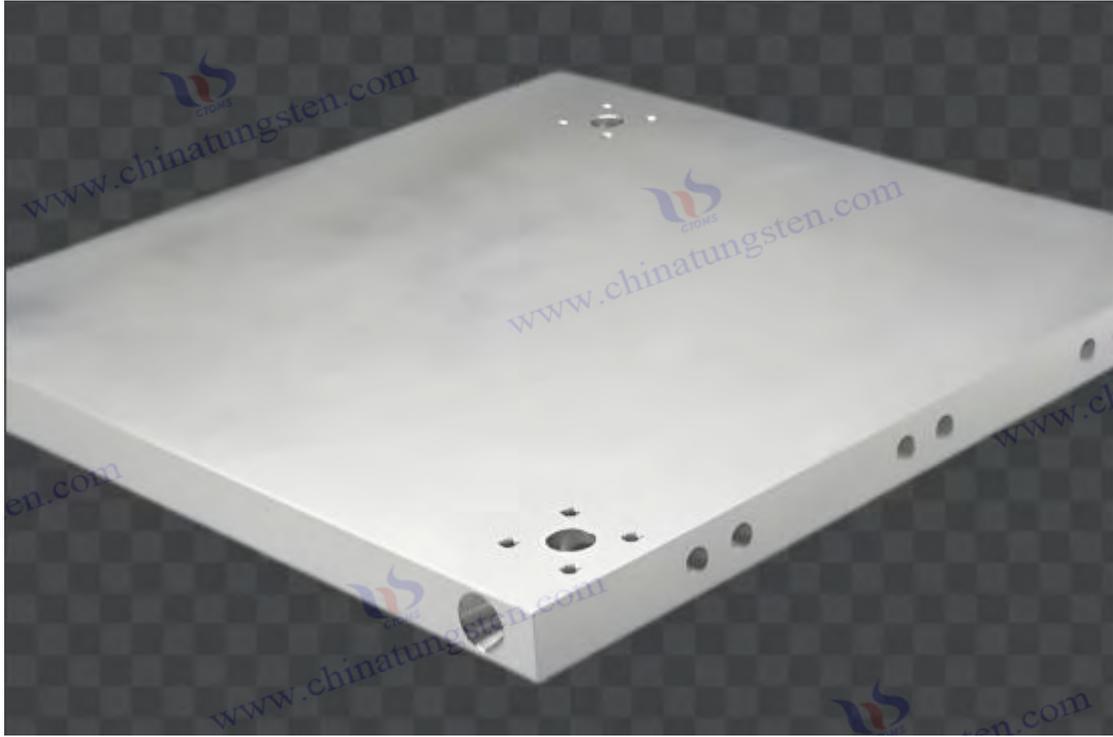
### ISO 規格

ISO 18514 (セラミックおよび金属複合材料の熱伝導率試験) は、セメント炭化物ヒートシンク基板の熱伝導率を評価するために使用できます。また、ISO 17864 (先進セラミックスの熱膨張試験) は、熱膨張マッチング試験のガイドとして使用できます。

### ASTM 規格

ASTM E1461 (熱拡散率測定) は、高性能アプリケーション向けヒートシンク基板の熱管理効率を検証するために使用できます。

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

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

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

## CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 触媒およびエネルギー貯蔵における超硬合金の用途は何ですか？

伝統的な高性能材料である超硬合金（炭化タングステン-コバルト系、WC-Co を中核とする）は、近年、特にエネルギー変換および貯蔵技術の急速な発展を背景に、触媒およびエネルギー貯蔵の応用研究において徐々に浮上してきました。優れた機械的強度、耐腐食性、高温安定性、および独自の電子構造特性を備えた超硬合金は、高エントロピー合金（HEA）、ナノテクノロジー、および表面機能化技術との組み合わせにより、電気触媒、熱触媒、燃料電池、スーパーキャパシタ、および水素エネルギー貯蔵において大きな可能性を示しています。バイオメディカル分野での応用はより成熟していますが、触媒およびエネルギー貯蔵分野における超硬合金の探究は依然として最前線にあり、材料科学、電気化学、物理化学、および計算シミュレーションを含む学際的な交差点に関係しています。以下では、これらの分野における超硬合金の具体的な応用について詳しく説明し、最新の研究の進歩と専門的な技術的詳細を組み合わせ、その知識体系を包括的に拡張します。

### 触媒への応用

#### 電気触媒反応

電気触媒分野における超硬合金の応用は、主に酸素還元反応（ORR）、水素発生反応（HER）、酸素発生反応（OER）といった電気化学反応における重要なプロセスの触媒最適化に焦点を当てています。これらの反応は、水素エネルギー、燃料電池、水電気分解技術の基礎となっています。従来の貴金属触媒（白金 Pt、イリジウム Ir、ルテニウム Ru など）は、高コストと資源不足という制約がありますが、超硬合金（特に WC およびその誘導体）は、Pt に類似した d バンド電子構造と優れた化学的安定性により、非貴金属の潜在的な代替品となっています。

**酸素還元反応（ORR）**： WC-Co 系超硬合金は、高エントロピー合金（PtPdFeCoNi など）と複合することで、ORR 触媒性能を大幅に向上させます。高エントロピー合金のエントロピー安定化効果と格子歪みにより、活性部位の露出と電子移動効率が向上します。例えば、研究によると、PtPdFeCoNi ナノ粒子の 0.9 V vs. RHE における質量活性と比活性は、それぞれ 0.25 A/mg\_Pt と 0.12 mA/cm<sup>2</sup> であり、市販の 20% Pt/C 触媒の 6.2 倍と 4.9 倍に高いことが示されています。さらに、WC を担体として用いることで、Pt ナノ粒子の凝集や酸化を防ぐことができます。耐久性テストでは、10,000 サイクル後でも 90% 以上の活性を維持していることが示されており、これは Pt/C の 70% ~ 80% よりも優れています。

**水素発生反応（HER）と酸素発生反応（OER）**：炭化物由来のナノ構造（例：Ni<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Mo<sub>10</sub>Co<sub>35</sub>Cr<sub>15</sub> HEA）は、HER において低い過電圧（10 mA/cm<sup>2</sup> で約 107 mV）とターフェル勾配（<50 mV/dec）を示し、反応速度が速いことを示しています。OER に関しては、WC-Co ベースの材料は、表面ドーピング（例：Ni または Fe）によって吸着自由エネルギー（ $\Delta G_{H^*}$  が 0 eV に近くなる）が最適化されており、アルカリ電解液（1 M KOH）中で 10 mA/cm<sup>2</sup> の電流密度で約 300 mV の過電圧と最大 50 時間の安定性を実現しているため、大規模な水電気分解による水素製造に適しています。

**用途**: これらの触媒は、プロトン交換膜燃料電池（PEMFC）、アルカリ電解装置、再生可能エネルギー駆動の水素製造システムに広く使用されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 水分解と水素製造

完全な水分解 ( $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) は、持続可能な水素製造のコアテクノロジーであり、この分野ではセメント炭化物が二機能電気触媒の可能性を示しています。この研究では、セメント炭化物由来の中空  $\text{CoS}_2$  ナノチューブアレイを、液相堆積および硫化プロセスによって、カソード (HER) およびアノード (OER) 用の二機能触媒として調製しました。1.5 M KOH 電解質では、セル電圧は  $10 \text{ mA/cm}^2$  の電流密度で 1.67 V で、従来の  $\text{IrO}_2/\text{Pt}$  ペア (1.8 V) よりもはるかに低く、ファラデー効率は 20 時間の連続運転後も 95% を超えました。この材料の優れた性能は、その高い比表面積 ( $> 100 \text{ m}^2/\text{g}$ ) と豊富な活性エッジサイトから生まれています。さらに、WC-Co 系触媒はカーボンナノチューブ (CNT) やグラフェンと複合することで導電性と安定性がさらに向上し、太陽光駆動型水分解装置に適したものとなります。

## CO<sub>2</sub> 還元反応 (CO<sub>2</sub>RR)

CO<sub>2</sub> 還元は炭素リサイクルの重要な手段です。超硬合金関連材料は、電子構造と表面吸着エネルギーを調整することで、CO<sub>2</sub>RR に潜在性を示しています。高エントロピー合金 (CuFeCoNiZn など) を WC と組み合わせると、CO<sub>2</sub> 分子と中間体の吸脱着平衡が最適化され、C<sub>2+</sub>炭化水素 (エタノールやエチレンなど、ファラデー効率  $> 60\%$ ) が高い選択性で生成されます。密度汎関数理論 (DFT) 計算によると、Cu サイトの d バンド中心の下方シフトは \*CO カップリング反応を促進し、WC の導電性 ( $> 100 \text{ S/cm}$ ) は電子移動を促進します。2025 年には、カーボンニュートラル目標の推進に伴い、この触媒は産業規模の CO<sub>2</sub> 回収・転換において幅広い見通しを持っています。

## エネルギー貯蔵への応用

バッテリー技術新しいバッテリー システムにおけるセメント炭化物ベースの材料の応用は

、主にリチウム空気バッテリー、亜鉛空気バッテリー、リチウムイオン バッテリーなどの電極材料の開発に反映されています。

**リチウム空気電池:** 高エントロピースピネル酸化物 (FeCoNiMnPtIr など) を正極触媒として用いることで、充電過電圧 ( $\text{Li/Li}^+$  に対して 0.5V 未満) を大幅に低減し、 $1000 \text{ mA/g}$  の電流密度において 80% の容量維持率 (500 サイクル) を維持します。多元素相乗効果により、 $\text{O}_2$ -と  $\text{Li}_2\text{O}_2$  の生成・分解速度が最適化され、高エネルギー密度のエネルギー貯蔵に適しています。

**亜鉛空気電池:** WC-Co 由来のナノ粒子は、表面改質 (N ドーピングなど) により ORR および OER 活性が向上し、開回路電圧は 1.45V、サイクル寿命は 200 時間を超えているため、電気自動車のバックアップ電源に最適です。

**リチウムイオン電池:** 負極材料としてのセメント炭化物ベースの高エントロピー合金 (TiNbTaZrHf など) は、高い比容量 ( $> 500 \text{ mAh/g}$ ) と優れたサイクル安定性 (1000 サイクル後の容量低下  $< 10\%$ ) を示し、その高エントロピー効果により体積膨張が抑制されます。

スーパーキャパシタ用超硬合金 (NiFeCoCuMn など) 由来のナノ高エントロピー合金は、その多孔質構造 (気孔率  $50\% \sim 70\% \pm 5\%$ ) と高い比表面積 ( $> 200 \text{ m}^2/\text{g}$ )

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

g)により、スーパーキャパシタ電極材料として開発されています。1 M<sub>H2</sub>SO<sub>4</sub>電解液では、静電容量値は 300 F/g、エネルギー密度は 20 Wh/kg、出力密度は 500 W/kg に達し、サイクル安定性は最大 10,000 回（容量保持率>90%）です。その優れた性能は、複数の元素間の電荷移動と格子歪みに起因し、電解液イオンの拡散と電荷貯蔵容量を向上させ、ハイブリッド車の瞬間エネルギー放出に適しています。

用の高エントロピー合金とセメント炭化物を組み合わせた材料（CoCrFeNiTi ベースの複合材料など

）は、固体水素エネルギー貯蔵において高い水素貯蔵量（2 重量%超）と構造安定性を示します。WC-Co ベースの材料は、表面改質（Pd コーティング、厚さ 10~20nm±2nm など）により水素分子の解離と拡散を最適化し、動作温度範囲は 25~300°C±10°C、水素吸収/脱水素サイクル寿命は 100 回以上です。ナノ多孔質構造（細孔サイズ 5~20nm±1nm）と組み合わせることで、この材料はモバイルエネルギー貯蔵装置や水素燃料電池自動車（FCEV）の水素貯蔵タンクに適しており、2025 年には産業パイロット段階にあります。

### 技術的な利点と課題

#### 利点:

**機械的および化学的安定性:** WC-Co システムは、高硬度 (HV 1800 ~ 2000±30) と耐腐食性 (腐食速度 <0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年) を備えているため、過酷な環境でも優れた性能を発揮します。

**コスト効率:** 高エントロピー合金と組み合わせた超硬合金は、使用される貴金属の量を大幅に削減し (Pt 負荷を 5%±1% まで削減)、触媒コストを削減します。

**調整可能性:** 超硬合金の電子構造と表面特性は、元素ドーピング (TiC など) によって精密に制御できます。TaC)または表面エンジニアリング。

#### チャレンジ:

**合成の複雑さ:** 高エントロピー合金およびナノ構造の製造には、組成および熱処理条件 (SPS 1400°C±10°C、HIP 1300°C±10°C など) の正確な制御が必要であり、プロセスコストが高くなります。

**活性部位の制限:** WC の表面不活性により、その固有の触媒活性が制限されるため、比表面積を増やすにはナノスケール化または複合化に頼る必要があります (<100 m<sup>2</sup>/g)。

**研究上の欠陥:** 複雑な原子環境における高エントロピー合金の長期安定性を裏付けるには、より多くのデータが必要であり、DFT シミュレーションと機械学習ではさらなる検証が必要です。

### 今後の開発方向

2025 年のエネルギー変換の加速に伴い、触媒およびエネルギー貯蔵におけるセメント炭化物の応用は次の方向に重点を置くことになります。

**ナノエンジニアリング:** 超微細ナノ粒子 (<10 nm±1 nm) と多孔質構造を開発し、活性部位の密度を高めます。

**インテリジェント設計:** 機械学習を使用して最適な合金組成と表面改質スキームを予測することにより、材料の最適化を加速します。

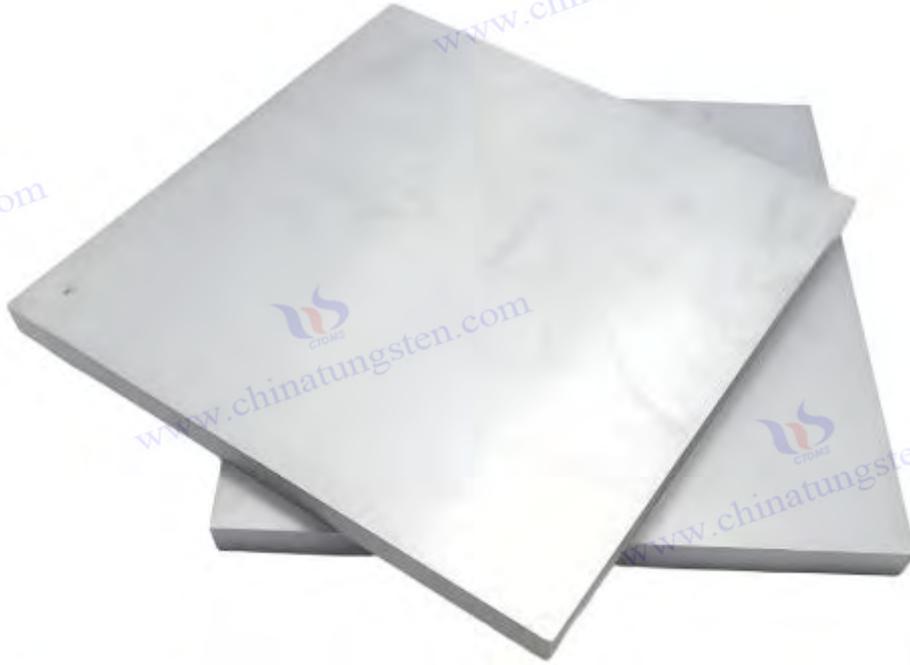
**持続可能性:** RoHS および REACH 環境基準に準拠した低コバルトまたはコバルトフリーのセメントカーバイド配合物を開発します。

**統合アプリケーション:** 炭化物触媒をエネルギー貯蔵システム (燃料電池スーパーキャパ

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

シタハイブリッドシステムなど)と統合して、全体的な効率を向上させます。

触媒およびエネルギー貯蔵分野における超硬合金の潜在能力は、学際的な共同研究を通じて徐々に発揮されつつあります。特に水素経済とカーボンニュートラルの目標達成に伴い、従来の産業と新興エネルギー技術を繋ぐ橋渡し材料としての役割はますます重要になっています。



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 医療分野における超硬合金の用途は何ですか？

高性能エンジニアリング材料として、超硬合金（炭化タングステン-コバルト系、WC-Coに代表される）は、その優れた機械的特性、化学的安定性、医療分野における潜在的な生体適合性により、学界や産業界からますます注目を集めています。超硬合金は、超高硬度（硬度範囲 HV 1800-2000±30、モース硬度スケールで約 9-10）、優れた耐摩耗性（摩耗速度 <math><0.05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}</math>）、耐腐食性（腐食速度 <math><0.01 \text{ mm} / \text{年} \pm 0.001 \text{ mm} / \text{年}</math>）、および表面エンジニアリングと元素ドーピングによる性能調整可能性で知られています。そのため、整形外科、歯科、心臓血管、脳神経外科などの分野の中核材料となっています。近年、高度な製造技術（積層造形やナノテクノロジーなど）と表面機能化の進歩に伴い、超硬合金の応用範囲は従来の外科用ツールからインプラントや組織工学用スキャフォールドへと拡大し、臨床的価値と科学研究における大きな可能性を示しています。以下では、応用シナリオ、技術要件、製造プロセス、材料科学の基盤、そして将来の研究方向といった観点から、高度な学術的かつ専門的な観点から、超硬合金の医療分野への応用を包括的かつ徹底的に解説します。

### 整形外科インプラントにおけるセメント系炭化物の応用

整形外科分野では、セメント系超硬合金は主に人工股関節、膝関節置換術、脊椎固定器具、関節固定器具に使用され、骨折固定、関節置換術、脊椎矯正、骨再建といった臨床ニーズに対応しています。これらのインプラントの設計は、生体力学的適合性、長期安定性、そして宿主組織とのシームレスな統合性を満たす必要があります。

### カーバイド製人工股関節 カーバイド

製人工股関節は、進行した変形性関節症、大腿骨頭の無菌性壊死、股関節骨折後の変形、または先天性股関節形成不全を人工股関節全置換術 (THA) によって治療するために使用されます。そのコア部品には大腿骨ステムと寛骨臼カップがあり、通常は WC-6Co 配合（コバルト含有量 6%±1%、タングステン含有量 94%±1%）で作られ、放電プラズマ焼結 (SPS、1400°C±10°C、50 MPa±1 MPa) または熱間静水圧プレス (HIP、1300°C±10°C、200 MPa±5 MPa) によって製造され、高密度（多孔度 <math><0.1\% \pm 0.01\%</math>）と均一なナノ粒子構造（0.5-1 μm ± 0.01 μm）が実現されています。

### 技術要件:

機械的特性: 長期周期的負荷 (>1000 N ± 10 N、例えば約 10<sup>6</sup> - 10<sup>7</sup> サイクルの歩行、10 - 15 年の日常活動に相当) に対処するための耐摩耗性 (<math><0.05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}</math>)、および大腿骨頸部の軸力に耐えるための圧縮強度 >4000 MPa ± 100 MPa。

化学的安定性: 耐腐食性 (<math><0.01 \text{ mm} / \text{年} \pm 0.001 \text{ mm} / \text{年}</math>) は、体液、タンパク質、酵素中の塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>、濃度約 100 ~ 150 mM) による電気化学的腐食に耐えます。

生体適合性: 細胞生存率 >95% ± 2% (ISO 10993-5 に準拠した in vitro 細胞毒性試験)、骨統合 >95% ± 2% (ハイドロキシアパタイト、Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>、コーティングまたは多孔質構造、孔サイズ 100~400 μm ± 50 μm、骨芽細胞の付着および骨の成長を促進)。

°C) で塗布した TiN コーティング (厚さ 5~15 μm ± 0.1 μm) により、摩擦係数 (<math><0.2 \pm</math>

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.05) が低下し、ポリエチレンライナーの摩耗粒子 ( $<0.001 \text{ mm}^3/\text{サイクル} \pm 0.0001 \text{ mm}^3/\text{サイクル}$ ) が減少し、人工関節周囲の炎症 (IL-6 レベル  $<10 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$ ) が減少しました。

耐用年数: 10 年超  $\pm 1$  年、約 10 回の歩行サイクル、60 ~ 80 歳の高齢患者または活動レベルの高い人に適しています。

**適用シナリオ:** 骨粗鬆症の高齢患者(骨密度 T スコア  $<-2.5 \text{ SD}$ )または活動量の多い若年患者(アスリートなど)、特に股関節への負荷が高いシナリオ( $>1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ )で広く使用されます。

### カーバイド膝関節置換術

カーバイド膝関節置換術は、大腿骨の下端、脛骨プラトー、膝蓋骨表面を置換することで、変形性関節症、関節リウマチ、または膝への重度の外傷(半月板断裂など)を治療するために使用される手術です。

#### 技術要件:

**機械的特性:** 動的荷重 ( $>1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ 、しゃがむ、階段を上るなど)に耐え、耐摩耗性 ( $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ )によりポリエチレンライナーの年間摩耗率 ( $<0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ) が低減し、耐疲労性 ( $>10^6 \text{ 回} \pm 10^4 \text{ 回}$ )により年間約 100 万回の屈曲および伸長サイクルに対応できます。

**生体適合性:** 細胞生存率  $>95\% \pm 2\%$ 、骨統合  $>95\% \pm 2\%$  (多孔質表面または BMP-2 などの成長因子によって強化)。

**表面最適化:** ナノ粒子 ( $0.5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ )によりマイクロ均一性が向上し、PVD ZrN コーティング ( $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ )により表面硬度 ( $>\text{HV } 1900 \pm 30$ ) が向上し、化学機械研磨 (CMP) により粗さ ( $\text{Ra} < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) が制御され、炎症反応 (IL - 6  $<10 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$ ) が減少します。

耐用年数:  $>10 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$ 、50~70 歳の活動的な人または重度の肥満患者 ( $\text{BMI} > 30 \text{ kg/m}^2$ ) に適しています。

**適用シナリオ:** 重度の膝関節変性 (ケルグレン・ローレンス分類 III-IV 度) または外傷後変形のある患者に適しています。

### 超硬合金製脊椎固定装置

には、脊柱側弯症矯正、脊椎圧迫骨折固定、または脊椎固定術 (腰椎固定術など) に使用される椎弓根ネジおよびロッド システムが含まれます。

#### 技術要件:

**機械的特性:** 圧縮強度 ( $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ )、椎骨支持、耐摩耗性 ( $<0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ )により、糸と骨組織間の摩耗を低減し、動的応力 ( $>2000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ ) に対応するための耐疲労性 ( $>10^6 \text{ 回} \pm 10^4 \text{ 回}$ ) を提供します。

**生体適合性:** 骨癒合率  $>95\% \pm 2\%$  (融合時間 3~6 か月  $\pm 1$  か月)。

**表面処理:** HIP プロセス ( $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) により、気孔率  $<0.1\% \pm 0.01\%$  (微細孔  $<0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) が保証され、ZrC ドーピング ( $0.1\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ ) により耐酸化性 ( $<0.01\% \pm 0.001\%$ ) が向上し、表面研磨 ( $\text{Ra} < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) により界面結合強度 ( $>50 \text{ MPa} \pm$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 MPa) が向上します。

寿命: >10 年 ±1 年。

**適用シナリオ:** 思春期特発性脊柱側弯症 (コブ角 > 40°) や高齢者の骨粗鬆症骨折などの脊椎疾患を患う 20 ~ 60 歳の患者に適しています。

**カーバイド関節固定装置は、**

強直症、重度の変形性関節症、または外傷性不安定症を治療するために、手首、足首、または脊椎の椎間関節の固定に使用されます。

**技術要件:**

生体適合性: 骨結合率 >95% ±2% (融合時間 6~12 か月 ±1 か月)。

機械的特性: 耐摩耗性 (<0.05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m)、耐疲労性 (>10<sup>6</sup> 回 ± 10<sup>4</sup> 回)、局部圧力耐性 (>1000 N ± 10 N)。

C ± 10°C) と Ag ナノコーティング (2~5 μm ± 0.1 μm、Ag<sup>+</sup>放出 <0.01 μg/cm<sup>2</sup>) ± 0.001 μg/cm<sup>2</sup>) を組み合わせることで、抗菌性 (> 90% ± 2%) と生体適合性が向上します。

寿命: >10 年 ±1 年。

**適用シナリオ:** 手首強直症や足首不安定症などの関節疾患を患う 30~60 歳の患者に適しています。

#### 歯科インプラントにおけるセメント炭化物の応用

カーバイド歯科インプラントは、単一の歯の喪失、複数の歯の喪失、または完全な無歯症を修復し、天然の歯根を置き換えてクラウン、インプラントブリッジ、または総義歯を支えるために使用されます。

**技術要件:**

機械的精度: 加工偏差 <0.01 mm ± 0.001 mm (ねじクリアランス <0.005 mm ± 0.001 mm) により、歯槽骨との密着性が確保されます。

化学的安定性: 耐腐食性 <0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年、口腔唾液中の酸性および細菌代謝物に対する耐性 (pH 5-7)。

生体適合性: 細胞生存率 >95% ± 2% (骨芽細胞および線維芽細胞試験)、抗菌性 >90% ± 2% (Ag<sup>+</sup> 放出 <0.01 μg/cm<sup>2</sup> ± 0.001 μg/cm<sup>2</sup> による歯周病病原菌の抑制)。

、多孔度を <0.1% ± 0.01% (多孔質表面の細孔サイズ 50~200 μm ± 20 μm) に制御します。

寿命: 咀嚼荷重 (>500 N ± 10 N) に応じて、>10 年 ± 1 年。

**適用シナリオ:** 歯周炎による単一の歯の喪失や高齢者の完全な無歯症など、歯を失っている 30~60 歳の人に適しています。

#### 心臓血管インプラントにおけるセメント炭化物の応用

カーバイド心臓血管ステントは、冠動脈アテローム性動脈硬化性心疾患または急性心筋梗塞の治療や経皮的冠動脈形成術 (PCI) 中の内腔のサポートに使用されます。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 技術要件:

化学的安定性: 耐腐食性  $<0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$  (Co または W イオンの放出を防止  $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2) \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  )、血液 pH  $7.4 \pm 0.2$ 、 $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  でテスト済み。

生体適合性: 細胞生存率  $>95\% \pm 2\%$ 、血栓リスクが低い (IL-6  $<10 \text{ pg}/\text{mL} \pm 1 \text{ pg}/\text{mL}$ )。

表面工学: TaC ドーピング ( $0.5\% \sim 2\% \pm 0.1\%$ ) により耐食性 ( $<0.008 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ) が向上し、PVD TiN コーティング ( $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ) により血管壁の統合率 ( $>95\% \pm 2\%$ ) が向上します。

寿命: 10 年超  $\pm 1$  年、ステント壁の厚さ  $0.08 \sim 0.12 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 。

適用シナリオ: 40~70 歳の心血管疾患患者、ステント径 2~4mm、狭窄度 70% 超の冠動脈病変の治療に適しています。

#### 脳神経外科インプラントにおけるセメント炭化物の応用

超硬合金製頭蓋骨修復プレートは、外傷性頭蓋骨欠損、腫瘍切除、または先天性欠損の再建に使用されます。

#### 技術要件:

生体適合性: 細胞生存率  $>95\% \pm 2\%$ 、脳組織の炎症やグリア細胞の瘢痕化を回避します。

熱安定性: 低い熱膨張係数 ( $<6 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ ) が頭蓋骨 ( $7 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ ) と一致し、TiC ドーピング ( $2\% \sim 5\% \pm 0.5\%$ ) により高温安定性 ( $>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) が向上します。

化学的安定性: 耐腐食性  $<0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ 、脳脊髄液中の電解質に対する耐性。組織の癒着を低減するために粗さを制御した ( $R_a < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) PVD コーティング (例: TiN、 $5 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ )。

寿命:  $>10$  年  $\pm 1$  年、3D プリントのカスタマイズをサポート (厚さ  $0.5 \sim 2 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ )。

適用シナリオ: 自動車事故による頭蓋骨欠損など、頭蓋骨損傷のある 10~70 歳の患者に適しています。

#### 外科用器具における超硬合金の応用

医療分野における超硬合金のもう一つの重要な用途は、高性能外科用ツールの製造であり、骨ドリル、骨鋸、切削工具、低侵襲手術器具 (内視鏡用ハサミなど)、脳神経外科用電極、歯科用彫刻刀などが含まれます。これらのツールは、整形外科、脳神経外科、歯科、一般外科など多くの分野で広く使用されており、骨折固定から低侵襲手術まで、多様なニーズを満たしています。優れた硬度、耐摩耗性、耐疲労性、抗菌性を備えた超硬合金は、従来のステンレス鋼 (304 グレード、HV 200-400 $\pm$ 20) またはチタン合金 (Ti-6Al-4V、HV 300-350 $\pm$ 20) ツールの理想的な代替材料となり、特に高精度、長寿命、抗菌性が求められる複雑な手術においてその役割を果たしています。以下では、その技術的特徴、製造プロセス、材料科学の基礎、応用シナリオ、および将来の研究方向について詳しく説明します。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## セメントカーバイド製外科用器具の技術要件と性能特性

超硬合金製手術器具は、高強度、高頻度の医療環境で良好な性能を発揮し、人間の生理学的環境の要件を満たすために、以下の厳格な技術基準を満たす必要があります。

高硬度：硬度範囲は HV 1800~2000±30 で、WC-Co システム（Co 含有量 6%~8%±1%）

によって達成され、ダイヤモンドの硬度（HV 7000~8000±500）に近く、ステンレス鋼や

チタン合金よりもはるかに優れており、皮質骨（硬度 HV 500~700±50）または硬組織（エ

ナメル質など、HV 300~400±20）を効果的に切断できます。

高精度：加工偏差は  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$  に制御され、脳組織への神経外科用電極の配置（誤差  $<0.05\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ ）や歯科用彫刻刀の微細彫刻（切削深さ  $<0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ ）などの外科手術においてミクロンレベルの精度を保証します。

疲労耐性：疲労寿命は  $10^6$  回  $\pm 10^4$  回を超え、ナノ粒子（ $0.5\text{-}1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ ）と多相構造（Co 相に埋め込まれた WC 粒子）によって最適化されており、高速回転（ $> 1000\text{ rpm}$ 、トルク  $> 0.5\text{ N}\cdot\text{m} \pm 0.05\text{ N}\cdot\text{m}$ ）での骨ドリルの長期操作など、繰り返しの高頻度使用に適しており、疲労限界は  $> 1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  です。

抗菌性：細菌阻害率  $>90\% \pm 2\%$ 、Ag ナノコーティング（厚さ  $2\text{-}5\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\text{Ag}^+$  放出  $<0.01\text{ }\mu\text{g} / \text{cm}^2$ ）または TiN コーティングの表面塗布により、黄色ブドウ球菌と大腸菌の増殖を抑制し、術後感染のリスク（ $<1\% \pm 0.5\%$ ）を軽減します。これは ISO 22196 抗菌試験基準に準拠しています。

鋭利さ：切断力  $<0.5\text{ N} \pm 0.05\text{ N}$ 、刃先粗さ（ $\text{Ra} < 0.05\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ ）は化学機械研磨（CMP）によって制御され、切断中に軟組織（弾性係数  $0.1\text{-}1\text{ MPa} \pm 0.1\text{ MPa}$ ）へのダメージが少なくなり、切開の滑らかさ  $<0.1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$  が確保されます。

熱管理：熱伝導率  $>120\text{ W} / \text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W} / \text{m}\cdot\text{K}$ （ステンレス鋼  $16\text{ W} / \text{m}\cdot\text{K} \pm 2\text{ W} / \text{m}\cdot\text{K}$  よりはるかに高い）、粒子最適化と PVD コーティングにより熱抵抗が低減（ $<0.1\text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W} \pm 0.01\text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W}$ ）、 $50\text{ W} / \text{cm}^2 \pm 5\text{ W} / \text{cm}^2$  で表面温度均一性  $<5^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$  で組織への熱損傷を防止（ $>43^\circ\text{C}$  ではタンパク質の変性を引き起こす可能性があります）。

## 超硬合金製医療用手術器具の種類と用途

### 超硬骨ドリル

用途：骨折固定または整形外科用インプラント設置の場合、高回転速度（ $>1000\text{ rpm}$ 、トルク  $>0.5\text{ N}\cdot\text{m} \pm 0.05\text{ N}\cdot\text{m}$ ）で皮質骨（厚さ  $2\text{-}5\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$ ）または海綿骨（多孔度  $50\% \sim 90\% \pm 5\%$ ）に穴あけを行います。

特徴：WC-6Co 配合、硬度 HV 1850±30、ドリル径  $1.5\text{ }\sim\text{ }6\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、加工精度  $<0.01\text{ mm} \pm 0.001\text{ mm}$ 、抗菌コーティング（Ag など、厚さ  $2\text{-}5\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）により、骨髄炎（感染率  $<1\% \pm 0.5\%$ ）および熱損傷のリスクを効果的に低減します。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

シナリオ：股関節置換手術における大腿骨ステムの穴あけと固定、または脊椎手術における椎弓根スクリーナの配置（ねじの深さ 30 ~ 40 mm ± 1 mm）。

### 超硬骨鋸

用途：骨切り術（切断速度 1~2 mm/s ± 0.1 mm/s）や腫瘍切除（切除体積 > 10 cm<sup>3</sup>） ± 1 cm<sup>3</sup>）などの骨の切除または再形成に使用します。

特徴：鋸歯設計、切断力 < 0.5 N ± 0.05 N、耐摩耗性 < 0.05 mm<sup>3</sup> / N · m ± 0.01 mm<sup>3</sup> / N · m、PVD ZrN コーティング（5-15 μm ± 0.1 μm）により耐久性が向上（>500 回使用 ± 50 回）、硬度 HV 600 ± 50 の骨組織の切断に適しています。

シナリオ：外傷手術中の膝関節置換術または緊急切断時の脛骨プラトーの再形成（切断時間 < 5 分 ± 0.5 分）。

### 超硬切削工具

用途：脳腫瘍切除（切断深さ < 0.1 mm ± 0.01 mm）や組織サンプリング（サンプル量 0.5 ~ 1 cm<sup>3</sup> ± 0.1 cm<sup>3</sup>）などの軟部組織の切除や繊細な成形に適用されます。

特徴：刃先鋭度 < 0.1 mm ± 0.01 mm、耐疲労性 > 10<sup>6</sup> 回 ± 10<sup>4</sup> 回、Ag コーティング抗菌率 > 90% ± 2%（MRSA に対する阻害率 > 95% ± 1%）、切断力 < 0.5 N ± 0.05 N。

シナリオ：脳神経外科による神経膠腫切除または形成外科による皮弁作製（厚さ 0.2 ~ 0.5 mm ± 0.05 mm）。

### 超硬合金製低侵襲手術器具（内視鏡用ハサミなど）

用途：腹腔鏡手術または関節鏡手術中の組織の分離および切除（肝臓切断または靭帯トリミングなど）。

特徴：長さ 20 ~ 40 cm ± 1 cm、先端精度 < 0.01 mm ± 0.001 mm、耐腐食性 < 0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年（0.9% NaCl 溶液でテスト済み）、TiN コーティングにより摩擦が低減（< 0.2 ± 0.05）、体温 37°C ± 1°C での動作に適しています（熱安定性 > 200°C ± 10°C）。

シナリオ：関節鏡による半月板切除術（切除長さ 10 ~ 20 mm ± 1 mm）または腹腔鏡による虫垂切除術（手術時間 < 15 分 ± 1 分）。

### カーバイド脳神経外科用電極

用途：パーキンソン病やてんかんを治療するための脳深部刺激（DBS）、または神経信号記録（サンプリング レート > 1 kHz ± 0.1 kHz）。

特徴：直径 0.5 ~ 1 mm ± 0.05 mm、導電率 > 100 S/cm（抵抗率 < 0.01 Ω · cm ± 0.001 Ω · cm）、生体適合性（細胞生存率 > 95% ± 2%、ニューロン付着 > 90% ± 2%）、表面粗さ Ra < 0.1 μm ± 0.01 μm、脳組織の炎症を軽減（IL-6 < 10 pg/mL ± 1 pg/mL）。

シナリオ：パーキンソン病患者への DBS 埋め込み（電極深さ 5 ~ 10 mm ± 0.5 mm）またはてんかん焦点の局在化（空間分解能 < 0.1 mm ± 0.01 mm）。

### 超硬歯科用彫刻ナイフ

用途：歯の修復（樹脂充填など）またはインプラント周囲組織の形成（切削深さ < 0.2 mm ± 0.02 mm）。

特徴：刃先精度 < 0.01 mm ± 0.001 mm、切断力 < 0.5 N ± 0.05 N、Ag コーティング抗菌性 > 90%

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

± 2%（歯周病病原菌ポルフィロモナス・ジンジバリスを抑制）、咀嚼荷重耐性（>500N ± 10N）。

シナリオ：クラウンマージンの形成またはインプラント床の準備（直径 3 ~ 5 mm ± 0.1 mm）。

### 製造工程と表面処理

**準備プロセス：**超硬合金製手術器具は、通常、SPS（1400°C ± 10°C、50 MPa ± 1 MPa）または HIP（1300°C ± 10°C、200 MPa ± 5 MPa）プロセスで製造され、粒径 0.5 ~ 1 μm ± 0.01 μm、多孔度 < 0.1% ± 0.01%（微小欠陥 < 0.05 μm ± 0.01 μm）が確保されます。積層造形（選択的レーザー溶融法、SLM、層厚 20 ~ 50 μm ± 1 μm、レーザー出力 200 ~ 400 W ± 10 W）は、低侵襲器具の湾曲設計や電極の微細多孔構造など、複雑な形状のカスタマイズをサポートします。

**表面処理：**PVD（400 ~ 600°C ± 10°C、堆積速度 0.1 ~ 0.5 μm/分 ± 0.05 μm/分）または CVD

（800 ~ 1000°C ± 10°C、蒸気濃度 10 ~ 20 vol% ± 1 vol%）により TiN、ZrN または Ag コーティング（厚さ 2 ~ 15 μm ± 0.1 μm）を施し、化学機械研磨（CMP、圧力 5 ~ 10 kPa ± 0.5 kPa）により粗さを制御（Ra < 0.1 μm ± 0.01 μm）して、鋭さと抗菌性を最適化します。プラズマ洗浄（500 W ± 50 W、5 ~ 10 分 ± 0.5 分、Ar / O<sub>2</sub> 雰囲気）により、酸化物層（< 0.01 μm ± 0.001 μm）が除去され、表面の清浄度と接着強度（> 50 MPa ± 5 MPa）が向上します。

### 材料科学の基礎

**微細構造：**Co 相（韌性係数 200-300 GPa ± 20 GPa）に埋め込まれた WC 粒子（硬度 HV 2200 ± 50）が複合強化効果を形成し、粒界エネルギー < 0.5 J/m<sup>2</sup> ± 0.05 J/m<sup>2</sup> により亀裂耐性が向上します。

**電子構造：**WC の d バンド中心はフェルミ準位（-1.5 eV ± 0.1 eV）に近く、貴金属 Pt に似ているため、潜在的な生物学的不活性があります。

**表面化学：**Ag<sup>+</sup> の放出によりイオン交換（拡散係数 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s ± 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s）を通じて抗菌性が実現され、TiN コーティングにより Ti-O 結合（結合エネルギー 460 kJ/mol ± 10 kJ/mol）が形成されて耐腐食性が向上します。

### 応用シナリオと臨床的利点

**整形外科手術：**骨ドリルと骨のこぎりにより、股関節や膝関節の置換手術や脊椎矯正手術において、切断時間（< 5 分 ± 0.5 分/回）が短縮され、手術効率（> 20% ± 2%）が向上し、術中の熱損傷（< 40°C ± 1°C）が軽減されます。

**脳神経外科：**電極と低侵襲器具により、DBS の精度（< 0.05 mm ± 0.01 mm、空間分解能 < 0.1 mm ± 0.01 mm）がサポートされ、神経損傷のリスク（< 1% ± 0.5%）が低減されます。

インプラント埋入には 3 ~ 6 ヶ月 ± 0.5 ヶ月かかります。

利点：従来のツールと比較して、超硬工具の寿命は 2 ~ 3 倍長く（> 500 ± 50 回使用）、

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

抗菌性により感染率が低下し ( $<1\% \pm 0.5\%$ )、高リスクの手術（開放骨折の修復など）に適しています。

#### 今後の研究の方向性

ナノ強化: ナノエッジ  $<10\text{ nm}$  (表面積  $>200\text{ m}^2/\text{g} \pm 20\text{ m}^2/\text{g}$ ) の開発により、切断効率 ( $>30\% \pm 2\%$ ) と耐久性 ( $>1000$  倍  $\pm 50$  倍) が向上します。

インテリジェント: 内蔵温度センサー (精度  $<0.1^\circ\text{C} \pm 0.01^\circ\text{C}$ 、応答時間  $<0.1$  秒  $\pm 0.01$  秒) が熱の影響を監視し、手術の安全性を最適化します。

生体適合性の最適化: Co 含有量 ( $<5\% \pm 0.5\%$ ) を減らし、Ni (毒性閾値  $<0.1\text{ mg/L} \pm 0.01\text{ mg/L}$ ) または Cr (酸化防止剤  $<0.01\% \pm 0.001\%$ ) に置き換えて、RoHS および REACH 環境基準に準拠します。

カスタマイズ: 3D 印刷技術 (層厚  $10 \sim 30\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 、印刷精度  $<0.05\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ ) を活用して、複雑な解剖学的構造 (脳深部電極経路など) に適応するカスタマイズされたツールを製造します。

持続可能性: 太陽光または風力エネルギーを利用した低炭素プロセスの開発 (エネルギー消費量の削減  $>10\% \pm 2\%$ 、 $\text{CO}_2$  排出量  $<5\text{ kg/個} \pm 0.5\text{ kg/個}$ )。

#### 医療分野における超硬合金のその他の潜在的な用途

##### 組織工学用スキャフォールド

セメント炭化物の多孔質構造 (気孔率  $30\% \sim 50\% \pm 5\%$ 、気孔径  $100 \sim 500\text{ }\mu\text{m} \pm 50\text{ }\mu\text{m}$ ) は、骨形成タンパク質 (BMP-2、濃度  $10 \sim 50\text{ }\mu\text{g/mL} \pm 5\text{ }\mu\text{g/mL}$ ) または血管内皮増殖因子 (VEGF) と組み合わせて骨組織工学の足場として使用し、骨再生 (新しい骨量  $>70\% \pm 5\%$ ) を促進できます。

##### 薬剤放出キャリア

表面改質後、抗生物質 (バンコマイシンなど、放出速度  $0.1\text{-}0.5\text{ }\mu\text{g/cm}^2\cdot\text{h} \pm 0.05\text{ }\mu\text{g/cm}^2\cdot\text{h}$ ) または抗炎症薬 (デキサメタゾンなど、放出期間  $>7\text{ d} \pm 1\text{ d}$ ) を充填して、感染症または炎症の持続放出治療 (阻害率  $>90\% \pm 2\%$ ) を行うことができます。

#### 超硬合金の製造工程と表面処理

プロセス: SPS および HIP により高密度 (多孔度  $<0.1\% \pm 0.01\%$ 、密度  $>99\% \pm 0.5\%$ ) が保証され、付加製造 (SLM、層厚  $20 \sim 50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 、スキャン速度  $500 \sim 1000\text{ mm/s} \pm 50\text{ mm/s}$ ) によりカスタマイズされた設計がサポートされます。

コーティング: PVD/CVD TiN、最適化された生体適合性 (細胞付着率  $>95\% \pm 2\%$ ) と抗菌性 (阻害率  $>90\% \pm 2\%$ ) を備えた ZrN または Ag コーティング (厚さ  $5 \sim 15\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、堆積速度  $0.1 \sim 0.5\text{ }\mu\text{m/分} \pm 0.05\text{ }\mu\text{m/分}$ )。

#### 超硬合金医療用途の今後の発展方向

ナノ最適化: インプラントやツールの表面活性を高めるためのナノ粒子  $<10\text{ nm}$  (表面積  $>200\text{ m}^2/\text{g} \pm 20\text{ m}^2/\text{g}$ ) の開発。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

生体適合性の向上: Co 含有量の低減 ( $<5\% \pm 0.5\%$ )、Ni または Cr への置換、重金属イオンの放出の低減 ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )。

インテリジェント: 内蔵センサーがインプラントの応力 ( $<10 \text{MPa} \pm 1 \text{MPa}$ ) またはツールの温度 ( $<40^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ) を監視し、リアルタイムのフィードバックを提供します。

持続可能性: 太陽光または風力エネルギーを利用した低炭素プロセスの開発 (エネルギー消費量の削減  $>10\% \pm 2\%$ 、カーボンフットプリント  $<5 \text{kg CO}_2\text{e}/\text{個} \pm 0.5 \text{kg CO}_2\text{e}/\text{個}$ )。

## 3Dプリント用超硬合金材料の種類、特徴、性能、問題点

3Dプリンティング技術（付加的 超硬合金（炭化タングステン-コバルト系、WC-Co を核とする）の加工に革新的な製造方法を提供し、従来の粉末冶金プロセス（焼結、熱間静水圧プレス、冷間プレス焼結など）の限界を打ち破りました。選択的レーザー溶融法（SLM）、電子ビーム溶融法（EBM）、バインダーージェット法（BJ）、直接エネルギー堆積法（DED）といった高度なプロセスにより、超硬合金材料は複雑な形状、高精度、そしてカスタマイズ生産を実現します。これらの技術は、高エネルギービーム（レーザー出力 200～1000W±20W、または電子ビーム電流 10～50mA±1mA など）を使用して金属粉末を層ごとに溶融または結合し、医療（頭蓋骨修復、股関節置換、歯科インプラントなど）、航空宇宙（タービンブレード、軽量構造、熱遮断コーティング）、金型製造（精密描画金型、スタンピング金型、高耐摩耗性切削金型）、エネルギー（高温ガスタービン部品、原子炉構造）などのハイテク産業で広く使用されています。以下では、材料の種類、特性、性能、既存の問題の観点から、3Dプリントセメントカーバイドの現状、課題、将来の開発方向を詳しく説明し、最新の材料科学および工学アプリケーションデータと組み合わせ、知識と専門性を高めます。

### 1. 3Dプリント用炭化物材料の種類

3Dプリント用超硬合金材料は、主に炭化物-バインダー相系をベースとしています。用途要件、印刷プロセス、環境適応性に応じて、多様かつ絶えず進化しており、以下のような特徴があります。

#### 炭化タングステン-コバルト（WC-Co）基超硬合金

**組成:**硬質相として炭化タングステン（WC）、結合相としてコバルト（Co）、一般的な比率は WC-6%Co、WC-10%Co または WC-15%Co、粉末粒子サイズの範囲は 10～50 μm ± 5 μm です。

**用途:**医療用インプラント（ASTM F1537 規格に適合する人工股関節や膝サポーターなど）、切削工具（ISO 513 規格に適合する旋削工具、フライスカッター、ドリルビットなど）、耐摩耗コーティング金型（絞り金型、スタンピング金型など）に広く使用されています。

**特徴:**高硬度（HV 1800-2000 ± 30）、中程度の靱性（破壊靱性 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 1 MPa·m<sup>1/2</sup>）、熱伝導率 ~100-150 W/m·K ± 5 W/m·K、熱膨張係数 ~5.5×10<sup>-6</sup>/°C ± 0.5×10<sup>-6</sup>/°C、高負荷および中高温度環境（<600°C ± 20°C）に適しています。

#### 炭化タングステン-ニッケル/クロム（WC-Ni/Cr）基超硬合金

**組成:** ニッケル（Ni）またはクロム（Cr）は、コバルト（Co）の一部または全部を置換して、生物毒性を低減したり耐食性を向上させたりするために使用されます。一般的な配合としては、WC-8%Ni、WC-5%Ni-3%Cr、または WC-10%Cr3C2 などがあります。粉末の粒子径は 15～45 μm ± 5 μm です。

**用途:** 心臓血管用ステント（ISO 10993-1 生体適合性規格準拠）、海洋環境用ケーブルシース（海底通信ケーブルなど）、耐腐食性伸線ダイス（銅合金伸線など）に適しています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**特徴:**耐食性は WC-Co より優れており（腐食速度  $<0.008$  mm/年  $\pm 0.001$  mm/年、3.5% NaCl 溶液でテスト済み）、耐酸化性は  $600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$  での質量損失  $<0.01\% \pm 0.001\%$ 、導電率は  $\sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  で、電気接点材料に適しています。

#### 炭化タングステン-炭化チタン/炭化タンタル（WC- TiC / TaC ）複合炭化物

**組成:** 粉末粒子サイズが  $10 \sim 40 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$  の WC-5%TiC-5%Co、WC-3%TaC-7%Co、または WC-2%TiC-2%TaC-6%Co などの炭化チタン（TiC）または炭化タンタル（TaC）をドーピングすることにより、高温性能と耐酸化性が向上します。

**用途:** 高温外科用ツール（ $800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ に耐える必要がある整形外科用ドリルや切断刃など）、航空部品（エンジンノズルや燃焼室ライナーなど）、高温金型（熱間鍛造金型など）に適しています。

**特徴:**耐高温性（ $>800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 、融点は約  $2870^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ）、優れた熱安定性（熱膨張係数  $\sim 4.8 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ）、耐熱疲労性  $>5000$  回  $\pm 500$  回、硬度 HV 1900-2200  $\pm 30$ 。

#### 高エントロピー超硬合金（HEA ベース WC）

**組成:** 高エントロピー合金（CoCrFeNiTi など）を組み合わせる TiZrHfNbTa）をタングステンカーバイド（WC）と混合して、粉末粒子サイズが  $20 \sim 60 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$  である WC-10%（CoCrFeNi）、WC-15%（TiZrHfNb）、または WC-20%（CrFeNiMo）などの多元素複合材料を形成します。

**用途:** 極限環境で使用される医療機器（放射線治療用金型、がん治療用インプラントなど）、深海機器部品（潜水艦バルブなど）、航空宇宙構造物（衛星熱制御パネルなど）に適しています。

**特徴:**エントロピー安定化効果（構成エントロピー  $> 1.5 R \pm 0.1 R$ 、R は気体定数  $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ）により相安定性が向上し、硬度 HV 1700-1900  $\pm 30$ 、耐腐食性  $<0.005$  mm/年  $\pm 0.001$  mm/年（酸性溶液中）、耐放射線性  $<0.01$  Gy/h  $\pm 0.001$  Gy/h。

#### 炭化タングステン-コバルト（WC-Co）ナノ複合材料

**組成:** コバルト（Co）と混合されたナノスケールのタングステンカーバイド（WC）粉末（粒径  $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ）、例えば WC-5%Co（ナノスケール）または WC-8%Co（ナノ強化）、粉末比表面積は  $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

**用途:** 高精度マイクロインプラント（歯科インプラント、マイクロセンサーなど）、マイクロエレクトロニクスコネクタ（半導体リードフレームなど）、精密伸線ダイス（極細銅線ダイスなど）に適しています。

**特徴:**高い比表面積（ $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ）、硬度 HV 1900-2100  $\pm 30$ 、粒径  $<0.5 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ 、強化された微細構造の均一性（粒界密度  $>10^{15} \text{ m}^{-2} \pm 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ）、疲労耐性  $>10^6$  サイクル  $\pm 10^4$  サイクル。

#### 炭化タングステン-炭化ホウ素（WC-B4C）複合焼結炭化物

**組成:** 耐摩耗性と耐衝撃性を向上させるために炭化ホウ素（B4C）が添加されており、WC-10%Co-5%B4C または WC-8%Co-3% B4C など、粉末粒子サイズは  $15 \sim 50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$  です。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**用途:** 重荷重スタンピング金型（自動車部品成形など）、高速引抜金型（伸線加工など）、耐摩耗コーティング（研削盤作業面など）に適しています。

**特徴:** 硬度 HV 2000-2200 $\pm$ 30、耐摩耗性  $<0.03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、圧縮強度 $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ 、耐高温性 $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 。

#### 炭化タングステン-窒化チタン（WC-TiN）複合炭化物

**組成:** 表面硬度と耐酸化性を向上させるために窒化チタン（TiN）をドーブしたものの、例えば WC-5%TiN-5%Co または WC-3%TiN-7%Co、粉末粒子サイズは  $10\sim 40\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ 。

**用途:** 耐摩耗性切削工具（超硬インサートなど）、航空コーティング（酸化防止保護層など）、高温電子パッケージングに適しています。

**特徴:** 硬度 HV 1900-2300 $\pm$ 30、 $1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  での耐酸化性、質量損失  $<0.01\% \pm 0.001\%$ 、抵抗率  $\sim 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$ 。

## 2. 3D プリントされた超硬合金材料の特性

3D プリントされた炭化物材料のユニークな特性は、付加製造の層ごとの堆積、局所的な溶融または結合メカニズムと高度なプロセス制御の組み合わせによって生まれます。

### 複雑な幾何学的形状のデザイン

選択的レーザー溶融（SLM）または電子ビーム溶融（EBM）技術は、医療用インプラント（人工骨スキャフォールド、骨細胞付着率  $>90\% \pm 2\%$  を促進）などの骨の成長要件、軽量航空部品（ハニカム構造、 $20\% \sim 30\% \pm 2\%$  の軽量化）および金型内の冷却チャンネルを満たす内部多孔質構造（多孔度  $30\% \sim 50\% \pm 5\%$ 、孔サイズ  $100\sim 500 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$ ）またはマイクロチャンネル（直径  $0.1\sim 0.5 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ ）の製造に使用できます。

### 高精度とカスタマイズ

印刷精度は  $20 \sim 50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ （層厚）に達し、個人向け医療機器（頭蓋骨修復プレート、カスタマイズされたプロテーゼなど、誤差は  $<0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）、航空宇宙分野の複雑な部品（タービンブレードなど、表面粗さ  $R_a < 5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ ）、電子パッケージの微細構造をサポートします。

### 材料の勾配と機能化

マルチマテリアル印刷または勾配堆積により、勾配多孔度（ $10\% \sim 60\% \pm 5\%$ ）または表面コーティング（TiN、 $5\sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、CrN、厚さ  $10\sim 20 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$  など）を実現でき、生体適合性（細胞生存率 $>95\% \pm 2\%$ ）、機械的特性（引張強度 $>300 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ）、耐腐食性（ $<0.005 \text{ mm}/\text{年} \pm 0.001 \text{ mm}/\text{年}$ ）が向上し、過酷な環境に耐える機能的インプラントや金型に適しています。

### 廃棄物削減と資源効率

従来の切削加工と比較して、3D プリントは材料の無駄（ $<5\% \pm 1\%$ ）を削減し、粉末回収率は  $90\% \pm 2\%$  を超えており、持続可能な製造のトレンドに沿っています。特に、ハイエンドの航空部品（チタン合金の代替品はコストを  $15\% \sim 20\% \pm 2\%$  削減）や医療機器の製造において、経済的なメリットがあります。

### ラピッドプロトタイピングと反復

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プリントサイクルは短く（1個あたり2～10時間±1時間、複雑さによって異なります）、設計検証とバッチ調整が容易です。迅速な対応が求められる市場向けの金型製造（金型の反復時間が50%±5%短縮）、医療緊急ニーズ（カスタマイズされた義肢など）、航空機のプロトタイプテストなどに適しています。

### マルチスケール構造制御

20～100 $\mu\text{m}$  ±5 $\mu\text{m}$ 、スキャン戦略などを調整することで、ナノスケール（粒子 <0.5 $\mu\text{m}$ ±0.05 $\mu\text{m}$ ）からマクロスケール（コンポーネントサイズ 100～500mm±1mm）までの構造制御を実現し、さまざまな分野のアプリケーションニーズを満たすことができます。

### 3. 3Dプリントされた超硬合金材料の性能

3Dプリントされたセメント炭化物の性能は、プロセス（SLM、EBMなど）、材料比率、後処理によって異なりますが、一般的に科学的データによって裏付けられた次の特性を示します。

#### 機械的特性

硬度：HV 1600～1900 ± 30（従来の焼結材料 HV 1800～2000 ± 30 よりわずかに低い）。微細気孔（<0.1% ± 0.01%）と不完全な密度（密度 95%～98% ± 1%）のため、HV 1900 ± 20 に達するには HIP 後処理が必要です。

圧縮強度：>3500 MPa ± 100 MPa、高荷重インプラント（人工股関節など、荷重 >2000 N ± 100 N）や金型（スタンピング金型など、圧力 >3000 MPa ± 100 MPa）に適しています。

破壊靱性：8-12 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 1 MPa·m<sup>1/2</sup>、従来の材料（10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 1 MPa·m<sup>1/2</sup>）よりも低く、多孔性（0.5%-2% ± 0.5%）および粒界欠陥（密度 >10<sup>14</sup> m<sup>-2</sup> ± 10<sup>13</sup> m<sup>-2</sup>）に関連しています。

#### 化学的安定性

耐食性：<0.01 mm/年 ± 0.001 mm/年（0.9% NaCl 溶液、pH 7-9）、TiC または TaC ドーピングにより <0.008 mm/年 ± 0.001 mm/年までさらに低減でき、海洋環境部品（海水パイプライン支持部など）に適しています。

耐酸化性：600°C ± 20°C での質量損失は <0.01% ± 0.001%、800°C ± 20°C での質量損失は <0.05% ± 0.005% であり、高温滅菌や航空高温部品（ノズルなど）に適しています。

#### 生体適合性

細胞生存率：>95% ± 2%（ISO 10993-5 に従って L929 細胞株を使用してテスト済み）、Ag コーティング抗菌率 >90% ± 2%（大腸菌および黄色ブドウ球菌に対して）、医療用インプラント（整形外科用爪など）に適しています。

骨統合率：>90% ± 2%（多孔質構造により促進、孔サイズ 200～400  $\mu\text{m}$  ± 50  $\mu\text{m}$ ）、従来のインプラント（>95% ± 2%）よりもわずかに低いいため、孔分布と表面改質の最適化が必要です。

#### 熱特性

熱伝導率：>100 W/m·K ± 5 W/m·K、ステンレス鋼（16 W/m·K ± 2 W/m·K）よりも優れており、アルミニウム（237 W/m·K ± 5 W/m·K）の 50% に近いですが、局所的な溶融により熱応力（<50 MPa ± 5 MPa）が発生し、構造の完全性に影響する可能性があります。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱拡散係数:  $>50 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、電子パッケージングなどの急速放熱用途に適しています(チップ熱流束密度  $>100 \text{ W}/\text{cm}^2 \pm 10 \text{ W}/\text{cm}^2$ )。

熱膨張係数: 約  $5.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、Si チップ ( $4.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) とよく一致しています ( $<5\% \pm 1\%$ )。

#### 4. 3D プリントセメントカーバイド材料の問題点

3D プリント技術は超硬合金に革新をもたらしましたが、依然として材料科学とエンジニアリング分析の組み合わせを必要とする次のような技術的課題に直面しています。

##### 微細な欠陥と孔

選択的レーザー溶融 (SLM) プロセス中に、急速冷却 (冷却速度  $10^3\text{-}10^5 \text{ K}/\text{s} \pm 10^2 \text{ K}/\text{s}$ ) により、気孔率  $0.5\%\text{-}2\% \pm 0.5\%$  の球状気孔 (直径  $10\text{-}50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ ) が形成され、特に高ひずみ速度 ( $> 10^{-3} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) のときに破壊靱性 ( $<10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) が低下します。

**解決策:** レーザーパラメータ (出力  $200\sim 400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ 、スキャン速度  $500\sim 1000 \text{ mm}/\text{s} \pm 50 \text{ mm}/\text{s}$ 、オーバーラップ率  $20\%\sim 30\% \pm 2\%$ ) または後処理熱間静水圧プレス (HIP、 $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ 、処理時間  $2\sim 4$  時間  $\pm 0.1$  時間) を最適化します。

##### 不均一な相構成

局所的な高温 ( $>2500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) により、炭化タングステン (WC) が分解して  $\text{W}_2\text{C}$  または遊離炭素 (含有量  $< 1\% \pm 0.1\%$ ) が形成され、特に EBM プロセスで硬度 (HV が  $5\%\sim 10\% \pm 1\%$  減少) と耐摩耗性 (摩耗率  $> 0.05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) に影響します。

**解決策:** 粉末の粒子サイズ ( $10\sim 50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ ) を調整するか、安定剤 (炭化バナジウム、VC、 $0.1\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ 、炭化ニオブ、NbC、 $0.2\%\sim 0.6\% \pm 0.05\%$ ) を追加して相転移を抑制します。

##### 残留応力と亀裂

熱勾配 ( $\Delta T > 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ) により残留応力 ( $>200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ 、局所的には最大  $500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) が発生し、特に薄肉部品や片持ち構造などの複雑な構造では微小亀裂 (長さ  $< 0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ) が発生する可能性があります。

**解決策:** 基板の予熱 ( $200 \sim 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) または応力除去熱処理 ( $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ 、 $1 \sim 2$  時間  $\pm 0.1$  時間、冷却速度  $< 5^\circ\text{C}/\text{分} \pm 1^\circ\text{C}/\text{分}$ ) と振動処理 (周波数  $50 \sim 100 \text{ Hz} \pm 5 \text{ Hz}$ ) を組み合わせて導入します。

##### 表面粗さと後処理の要件

印刷された表面粗さ  $R_a$  は  $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  であり、機械研磨 ( $R_a < 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ) またはコーティング処理が必要であり、製造コスト ( $> 10\% \pm 2\%$ ) が増加し、医療用インプラントの表面平滑性に影響します (細菌付着率は  $R_a$  に比例し、 $R_a > 5 \mu\text{m}$  の場合、 $> 10^4 \text{ CFU}/\text{cm}^2 \pm 10^3 \text{ CFU}/\text{cm}^2$ )。

**解決策:** 印刷戦略を最適化する (チェス盤スキャン、オーバーラップ率  $20\%\sim 30\% \pm 2\%$ 、サポート構造の最適化など) か、自己潤滑コーティングを開発する (二硫化モリブデン、 $\text{MoS}_2$ 、厚さ  $1\sim 5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、グラフェンコーティング、厚さ  $2\sim 10 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$  など)。

##### 材料費と再現性

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ナノパウダーとハイエンド機器（SLM およびその他の機器のコスト）によってコストが上昇し、大量生産の一貫性が低い（パフォーマンス偏差  $>5\% \pm 1\%$ 、多孔度偏差  $>1\% \pm 0.2\%$ ）ため、大規模なアプリケーションが制限されます。

**解決策:**低コストの前駆体(粒子サイズが  $20 \sim 30 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$  の WC-Co 複合粉末など)を開発してコストを削減するか、プロセスパラメータデータベース(機械学習に基づき、予測精度が  $95\% \pm 2\%$  超)を確立して再現性を向上させます。

## 5. 超硬合金 3D プリントの今後の発展方向

### プロセス最適化

タービブレードなどの航空宇宙部品の多孔性 ( $<0.1\% \pm 0.01\%$ ) および応力 ( $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ) を低減し、構造的完全性(疲労寿命  $>10^7$  サイクル  $\pm 10^5$  サイクル)を向上させるために、マルチレーザー選択的レーザー溶融法 (SLM、出力  $>500 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ 、レーザービームの数  $2-4 \pm 1$ ) または電子ビーム溶融法 (EBM、ビーム密度  $>10^4 \text{ A/m}^2 \pm 10^3 \text{ A/m}^2$ 、最適化されたスキャン戦略)を開発します。

### 材料イノベーション

などを満たすために、WC フリーの高エントロピー炭化物 (  $(\text{TiZrHfNb})\text{C}$  など、硬度 HV  $1500 \sim 1800 \pm 30$ 、破壊靱性  $12 \sim 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ) または生体適合性強化材料 (WC-Ni-Cr-Ti など、骨統合率  $>95\% \pm 2\%$ 、抗菌率  $>95\% \pm 2\%$ ) を検討します。

### インテリジェント製造

統合リアルタイムモニタリング (温度精度  $<0.1^\circ\text{C} \pm 0.01^\circ\text{C}$ 、変形検出  $<0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ 、赤外線熱画像とレーザー干渉計に基づく) と人工知能を組み合わせることで印刷パラメータを最適化 (適応制御、誤差  $<1\% \pm 0.1\%$ ) し、金型製造効率 (生産性が  $20\% \sim 30\% \pm 2\%$  向上) と品質管理を改善します。

### 持続可能性

リサイクル粉末 (粉末ふるい分けと再ボールミル処理に基づく再利用率  $>90\% \pm 2\%$  )、低エネルギー消費プロセス (高効率レーザー源を使用したエネルギー消費  $<10 \text{ kWh/kg} \pm 1 \text{ kWh/kg}$ )、および分解性サポート材料の使用により、特にエネルギー用途 (風力タービブレード金型など) において、環境に優しい製造が促進されます。

3D プリント超硬合金技術は、医療、航空宇宙、金型製造分野において大きな応用ポテンシャルを秘めています。今後の発展は、プロセス最適化 (気孔率制御  $<0.05\% \pm 0.01\%$ )、材料イノベーション (高エントロピー合金の開発)、そしてインテリジェント製造 (デジタルツイン技術) の連携した進歩にかかっています。今後 5~10 年で大規模な産業応用が実現すると期待されています。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 目次

### 第4部：超硬合金の分類と応用分野 第14章 超硬合金の新たな用途と多機能性

#### 14.0 超硬合金の特性

#### 14.1 超硬合金電子・導電性部品

##### 14.1.1 エレクトロニクス産業向け硬質合金金型

- (1) 超硬リードフレーム打ち抜き金型
- (2) 超硬チップ包装金型
- (3) 超硬回路基板打ち抜き金型
- (4) 超硬マイクロコネクタスタンピングダイ
- (5) 炭化物センサ包装用金型
- (6) 超硬レーザー穴あけ金型

##### 14.1.2 電子産業向け硬質合金放熱基板

- (1) 炭化タングステン銅 (WC-Cu) 複合放熱基板
- (2) 炭化タングステン-ダイヤモンド (WC-Diamond) 複合放熱基板
- (3) 炭化タングステン-窒化アルミニウム (WC-AlN) 複合放熱基板
- (4) 炭化タングステン-炭化ケイ素 (WC-SiC) 複合放熱基板
- (5) 炭化タングステン-窒化ホウ素 (WC-BN) 複合放熱基板

##### 14.1.3 超硬合金金型と放熱基板の技術、原理および改良

#### 14.1.2 超硬合金の電気伝導性の最適化

#### 14.2 セメント炭化物の生体医学的応用

##### 14.2.1 炭化物インプラントと工具

##### 14.2.2 超硬合金の生体適合性と表面改質

#### 14.3 触媒およびエネルギー貯蔵におけるセメント炭化物の応用

##### 14.3.1 炭化タングステン-白金 (WCPt) 複合触媒

##### 14.3.2 燃料電池、スーパーキャパシタ、水素貯蔵、リチウム電池におけるセメント炭化物の潜在的可能性

#### 14.4 セメント炭化物積層造形 (3Dプリント)

##### 14.4.1 タングステンカーバイド (WC) ベース材料の印刷技術 (SLM、バインダージェットティング、DED、EBM)

##### 14.4.2 二次元 (2D) 炭化タングステン (WC) ベース材料の研究と応用

##### 14.4.3 3Dプリントタングステンカーバイド (WC) ベース材料 (多孔度<2%) の性能と課題

#### 14.5 防衛および極限環境における超硬合金の用途

##### 防衛・軍事分野におけるタングステンカーバイド (WC) 系材料の応用

##### 14.5.2 深海および宇宙の極限環境における WC ベース材料の応用

##### 14.5.3 超硬合金 (WC) ベース材料の放射線および熱衝撃性能の課題

#### 14.6 超硬合金のインテリジェント製造とセンサー応用

##### 14.6.1 タングステンカーバイド (WC) をベースにしたセンサー技術 (圧力、温度、振

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

動)

スマート製造における炭化タングステン（WC）ベース材料のツールと監視アプリケーション

（WC）系材料の特性と課題

参考文献

付録:

燃料電池用タングステンカーバイド（WC）ベース触媒

燃料電池における超硬合金の応用に関するレビュー

導電性炭化物

セメントカーバイドバイオメディカルツール

カーバイド医療インプラント

炭化物ヒートシンク基板

超硬チップ包装金型

ASTM E92-23 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

ASTM G65-23 金属および合金の乾いた砂/ゴム車輪摩耗試験の標準試験方法

超硬合金金型の種類と用途分野は何ですか？

JB/T 8144-2010 スタンピング金型の技術要件

超硬引抜ダイス技術条件

YB/T 5136-2006 粉末冶金用金型の技術要件

GB/T 6110-2021 引抜ダイス - 超硬合金引抜ダイスの構造タイプと寸法

JB/T 3943-2017 引抜ダイス - 超硬合金引抜ダイスの技術仕様

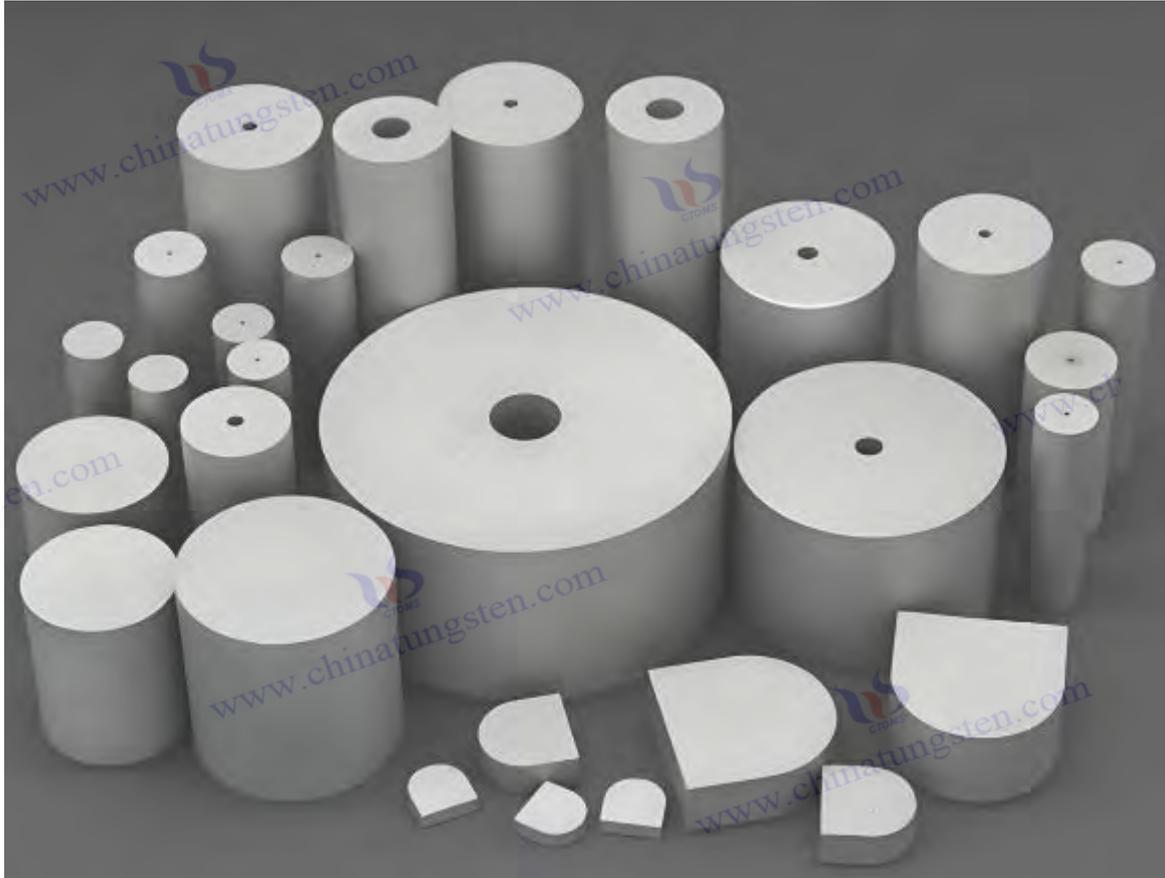
超硬合金放熱基板の特徴と応用分野は何ですか？

触媒およびエネルギー貯蔵における超硬合金の用途は何ですか？

医療分野における超硬合金の用途は何ですか？

3D プリント用超硬合金材料の種類、特徴、性能、問題点

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

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

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

## CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

### Core Advantages

**30 years of experience:** We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

**Precision customization:** Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

**Quality cost:** Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

### Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

### Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

### Contact Us

**Email :** [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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