

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

(IX)

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（中国初の一流タングステン製品ウェブサイト）を起点に設立され、タングステン、モリブデン、希土類元素産業に特化した中国の先駆的な e コマース企業です。

CTIA GROUP は、タングステンおよびモリブデン分野での約 30 年にわたる豊富な経験を活かし、親会社の優れた設計・製造能力、優れたサービス、世界的なビジネス評判を継承し、タングステン化学薬品、タングステン金属、超硬合金、高密度合金、モリブデン、モリブデン合金の分野で包括的なアプリケーションソリューションプロバイダーになりました。

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

パート 3: 超硬合金の性能最適化

第 9 章 超硬合金の多機能化

超硬合金の多機能性は、導電性、磁性、耐摩耗性、耐腐食性、自己潤滑性、インテリジェント応答機能を調整することで、航空宇宙（寿命 $>10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間）、電子製造（抵抗率 $<12\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）、インテリジェント機器（応答時間 $<1\text{ms} \pm 0.1\text{ms}$ ）の複雑なニーズを満たすことができます。従来の超硬合金は、高硬度（HV1800 ± 30 ）と耐摩耗性（摩耗率 $<0.06\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）で知られていますが、導電性（ $\sim 10\text{MS/m} \pm 0.1\text{MS/m}$ ）、磁性（飽和磁化強度 $<10\text{emu/g} \pm 0.5\text{emu/g}$ ）および適応性が不十分であり、多機能シナリオでの応用が制限されています。相乗的な性能向上を達成するには、**微細構造**（粒径 $0.52\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ ）、**組成制御**（TiC 5%10% $\pm 0.1\%$ 、Ni 8%12% $\pm 0.1\%$ ）、**表面工学**（テクスチャ深さ $110\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ）から最適化を開始する必要があります。

超硬合金の多機能化の道筋を、（1）導電性と（2）磁気調節、（3）耐摩耗性および耐腐食性の導電性複合材料性能、（4）自己潤滑性および非付着性、および（5）バイオニックおよびインテリジェント超硬合金の側面から論じた。導電性と磁気調節は、Co 含有量（10% $\pm 1\%$ ）と Ni 置換によって最適化されます。耐摩耗性および耐腐食性の導電性複合材料性能は、WCTiCNi システム（硬度 $> \text{HV } 1600 \pm 30$ 、腐食速度 $<0.01\text{mm}/\text{年} \pm 0.001\text{mm}/\text{年}$ ）に焦点を当てています。自己潤滑性と非付着性は、MoS₂（5% $\pm 0.1\%$ ）と表面テクスチャ（摩擦係数 $<0.2 \pm 0.01$ ）を導入します。バイオニックおよびインテリジェント超硬合金は、傾斜構造（多孔度 5%20% $\pm 1\%$ ）と応答材料（変形率 $<0.1\% \pm 0.01\%$ ）を利用し、インテリジェントなアプリケーションを期待しています。この章は第 8 章（Cr₃C₂ コーティング硬度 $> \text{HV } 1500 \pm 30$ ）と関連しており、第 10 章（グリーン製造）の基礎となります。

9.1 超硬合金の電気伝導性と磁気特性の制御

超硬合金の電気伝導率（導電率 約 $10\text{MS/m} \pm 0.1\text{MS/m}$ ）と磁気特性（飽和磁化 $<10\text{emu/g} \pm 0.5\text{emu/g}$ ）は、**電子接点**（抵抗率 $<12\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）、**磁気試験**（感度 $>95\% \pm 2\%$ ）、および品質管理への応用に直接影響します。WC（ $100\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 5\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）の高い抵抗率は、Co または Ni 結合相（導電率 $>15\text{MS/m} \pm 0.2\text{MS/m}$ ）によって最適化する必要があります。一方、Co の強磁性（保磁力 $100\text{Oe} \pm 10\text{Oe}$ ）は非破壊検査の基礎となります。規制では、導電性、磁性、および機械的特性（ $K_{1c} 1015\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）のバランスが求められます。本セクションでは、導電率と磁気検出、そして超硬合金の品質管理の観点から、電気理論（Drude モデル）、磁気分析（VSM、精度 $\pm 0.1\text{emu/g}$ ）、そしてエンジニアリング事例を組み合わせ、制御メカニズムと応用について考察します。例えば、WC10Co（Co 10% $\pm 1\%$ ）の導電率は $10.5\text{MS/m} \pm 0.1\text{MS/m}$ 、磁化率は $8\text{emu/g} \pm 0.5\text{emu/g}$ であり、電子接点および品質検出の要件を満たしています。

9.1.1 超硬合金の電気伝導率（約 10 MS/m）

9.1.1.1 超硬合金の導電性原理と技術の概要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超硬合金の電気伝導率（目標値：約 $10 \text{ MS/m} \pm 0.1 \text{ MS/m}$ ）は、結合相 Co の電気伝導率（ $15 \text{ MS/m} \pm 0.2 \text{ MS/m}$ ）によって支配され、WC の半導体特性（抵抗率： $100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）が全体的な性能を制限します。電気伝導率 σ は、Drude モデルに従います。

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

ここで、 n は自由電子密度（約 $10^{28} \text{ m}^{-3} \pm 10^{27} \text{ m}^{-3}$ ）、 e は電子電荷（ $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）、 τ は緩和時間（ $10^{-14} \text{ s} \pm 10^{-15} \text{ s}$ ）、 m は電子質量（ $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ）です。Co の高い n 値は σ を増加させ、WC 粒子（ $0.52 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は界面散乱（散乱率 $10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$ ）を増加させ、導電性を低下させます。最適化の目標は、電子接点の要件を満たすために抵抗率を $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 未満にすることです。（電気伝導率（ σ ）のドルーデモデルは、電界の作用下にある金属内の電荷キャリア（自由電子など）の運動挙動を記述するために使用される古典的な理論です。このモデルは、1900 年にポール・ドルーデによって提唱され、金属内の電子は自由粒子として結晶格子内をランダムに移動し、印加電界下で方向性を持ってドリフトすると仮定しています。）

試験は 4 プローブ法（電流 $1 \text{ mA} \pm 0.01 \text{ mA}$ 、精度 $\pm 0.01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）を採用し、サンプルサイズは $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ です。例えば、WC10Co（Co $10\% \pm 1\%$ ）の抵抗率は $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ で、WC6Co の $15 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ よりも優れています。導電性の向上は、ジュール熱（ $< 0.1 \text{ W/cm}^2 \pm 0.01 \text{ W/cm}^2$ ）を低減するだけでなく、信号伝送効率（ $> 99\% \pm 1\%$ ）も向上させます。本セクションでは、メカニズム、試験、最適化を通して分析します。（4 プローブ法は、材料の電気伝導率または抵抗率を測定するための正確な技術であり、特に半導体、薄膜、導電性材料の特性評価に適しています。この方法では、4 つのプローブ（通常は金属針または電極）を使用して接触抵抗と幾何学的要因の影響を低減し、測定精度を向上させます。）

9.1.1.2 超硬合金の電気伝導性のメカニズム解析

炭化タングステン（WC）を硬質相とし、コバルト（Co、Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金は、高硬度、高耐摩耗性、優れた導電性を有する複合材料です。その導電性のメカニズムは、主に材料組成、微細構造、電子輸送特性によって左右されます。本稿では、古典理論と現代研究に基づき、超硬合金の導電性メカニズムを簡潔に分析します。

（1）結合相の寄与

導電性におけるコバルトの支配的役割：高導電性相であるコバルトは、約 $6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ の抵抗率を有し、連続的なネットワーク（体積率 $10\% \pm 1\%$ ）を形成することで電流伝導を支配します。コバルト中の自由電子は電界の作用下で方向性を持って移動し、これが超硬合金の導電性の主な源となります。

ニッケル置換

ニッケル（ $8\% \sim 12\% \pm 0.1\%$ 、抵抗率約 $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）を添加することでコバルトを置き換えることができ、抵抗率をさらに $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 未満まで下げることがで

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

きます。ニッケルのフェルミ準位（約 $7\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$ ）はコバルトのフェルミ準位と似ており、導電性も同等ですが、耐食性はコバルトよりも優れています（腐食電流密度 $\text{icorr} < 10^{-6}\text{A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{A/cm}^2$ ）。そのため、過酷な環境下での用途に適しています。

バインダー相含有量の影響

結合相の割合が増加すると（例：6%から 15%）、電子移動経路の数が増加するため導電性が大幅に増加します。逆に、結合相が減少すると、導電性は減少します。

（2）ハードフェーズの制限

炭化タングステンの電気伝導率が低い

WC は共有結合特性（WC 結合エネルギーは約 $700\text{kJ/mol} \pm 10\text{kJ/mol}$ ）、低い電子移動度（ $< 10\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 1\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ）、高い抵抗率（約 $100\mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）を持ち、全体的な導電性への寄与は限られています。

パーティクルエフェクト

WC 粒子はバインダー相に分散され、電子の自由な移動を妨げ、WC 含有量の増加とともに導電性が低下します。

（3）微細構造の影響

粒径と粒界密度

粒径は約 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ であり、粒界密度（ $> 10^{14}\text{m}^{-2} \pm 10^{13}\text{m}^{-2}$ ）が増加します。その結果、界面散乱が強化され、抵抗率が約 $10\% \pm 2\%$ 増加します。微細粒子は硬度を高めますが、導電性には寄与しません。

結合相分布の均一性

Co または Ni の分布の均一性（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）は導電性にとって非常に重要です。偏析（ $> 0.5\% \pm 0.1\%$ ）は、局所的に約 $20\% \pm 3\%$ の抵抗率増加を引き起こし、全体的な性能に影響を与える可能性があります。

ネットワークの継続性

SEM 分析により、WC-10%Ni 合金の Co/Ni ネットワークは高い連続性（ $> 95\% \pm 2\%$ ）を示し、EDS により Ni 分布が均一（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）であることが確認され、導電性が大幅に向上しました。

多孔性と欠陥

材料の多孔性や微小亀裂により、電子散乱が増加し、導電性が低下します。

（4）温度の影響

低温では、電子-フォノン散乱が減少し、導電性が安定したままになります。

高温（ $> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ）では、熱振動が強くなり、散乱が促進され、平均衝突時間 τ が約 $10\% \pm 2\%$ 減少し、その結果、抵抗率がわずかに増加（ $< 5\% \pm 1\%$ ）し、導電性の低下として現れます。

（5）実験的検証

4プローブ法

抵抗率を測定し、それを微細構造分析（SEM、EDS など）と組み合わせることで、結合相

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

比、粒径、分布の均一性が導電性に与える影響を検証します。

標準値

WC-10%Co 硬质合金电导率约为 $1 \times 10^9 \text{ S/m}$, 随 Co 含量增加可达 $2 \times 10^9 \text{ S/m}$; WC-10%Ni 合金的抵抗率は $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 未満に最適化できます。

超硬合金の電気伝導性は、主に結合相（Co や Ni など）の自由電子によって支配され、WC 含有量、微細構造（粒径、分布の均一性、連続ネットワーク）、温度などの要因によって調整されます。結合相比の最適化、分布の均一性の向上、欠陥の低減、粒径の調整は、電気伝導性を効果的に向上させます。Ni の導入は耐食性と導電性をさらに最適化し、EDM や導電性コーティングなどの用途における超硬合金の新たな可能性をもたらします。このメカニズム解析は、材料設計と性能最適化のための理論的指針を提供します。

9.1.1.3 超硬合金の導電性に影響を与える要因の分析

導電性は超硬合金の重要な電気特性であり、放電加工、導電性コーティング、電子機器、インテリジェント応答アプリケーションにおける性能に直接影響を及ぼします。この性能は、材料組成、微細構造、製造プロセス、表面状態などの複数の要因の組み合わせによって左右されます。これらの要因は、電子移動経路、散乱メカニズム、接触特性、材料全体の均一性などに影響を与え、超硬合金の電気特性を大きく調整します。以下では、主要な影響要因を詳細に分析し、実験データ、顕微鏡観察、エンジニアリングアプリケーション事例を組み合わせ、そのメカニズムと最適化戦略を深く探究することで、高性能分野における超硬合金の開発に理論的裏付けと実践的なガイダンスを提供します。

9.1.1.3.1 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - Co/Ni 含有量

(1) 影響メカニズム

Co または Ni は、超硬合金の結合相として、電気伝導性の主な寄与因子であり、その役割は、連続した導電ネットワークを形成し、自由電子密度を提供することです。Co / Ni 含有量が $10\% \pm 1\%$ の場合、抵抗率は約 $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ となり、優れた導電性を示します。これは、適切な量の結合相が WC 粒子を効果的に結合し、電子散乱経路を低減できるためです。SEM 分析によると、この含有量では、Co または Ni が均一に分布しており（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）、結合強度は $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ を超え、導電ネットワークの安定性を確保しています。ただし、含有量が $12\% \pm 1\%$ を超えると、破壊靱性（破壊靱性、 K_{1c} ）が約 $10\% \pm 2\%$ 低下します。これは主に、結合相比が高すぎるために粒界が弱くなり、電子散乱と局所抵抗が増加し、全体的な導電性が低下することが原因です。さらに、EDS 検査では、Co 含有量が多いと偏析（Ni:Co 比が $1:1 \pm 0.1$ から外れること）が発生し、導電性の不均一性が悪化する可能性があることが示されました。

(2) 最適化戦略

Co/Ni 含有量を $8\% \sim 12\%$ の範囲で制御することにより、高い電気伝導率（ ± 0.5 ）を維持しながら、機械的特性（硬度 $> \text{HV } 1400 \pm 30$ および $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ など）のバランスを

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

とることができます。実際のアプリケーションでは、Co の偏析により、WC12Co の抵抗率は $13\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ まで上昇し、局所的な導電性が約 $15\%\pm 2\%$ 低下しますが、WC10Ni の抵抗率は同じ条件下でわずか $11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ であり、特定の配合では Ni が優れた均一性と耐偏析能力を備えていることを示しています。最適化は、粉末混合の均一性を調整する（ボールミル処理時間を 40 時間 ± 1 時間に延長するなど）か、微量合金元素（Cr、 $< 1\%$ など）を導入して偏析を抑制し、導電ネットワークの連続性を高めることによって実現できます。

9.1.1.3.2 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - 粒径

(1) 影響メカニズム

粒径が導電性に及ぼす影響は、主に粒界密度と電子散乱によって実現されます。粒径が $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ の場合、粒界密度は高く ($> 10^{14}\text{m}^{-2}$)、抵抗率は低くなります (約 $11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$)。これは、微細粒子が結合相 (Co、Ni など) の連続ネットワークを促進し、効率的な電子移動経路を形成するためです。SEM 観察によると、細粒の超硬合金 (WC-6Co など) は粒界密度が高いため散乱が強くなりますが、結合相ネットワークの最適化によってその影響の一部を相殺できます。しかし、粒径が $2\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を超えると、粒界の数が大幅に減少し、電子散乱が減少しますが、WC 相の割合の増加と結合相ネットワークの中断により、抵抗率が約 $15\%\pm 3\%$ 増加し、導電性が低下します。XPS 分析では、粗大粒子の表面に酸化物層が多く存在する可能性があり (O 1s ピーク位置 $\sim 532\text{eV}\pm 0.1\text{eV}$)、接触抵抗がさらに増加することがわかりました。

(2) 顕微鏡分析の結果

、細粒超硬合金 (WC-6Co、粒径 $0.5\mu\text{m}$ など) は粒界密度が高い ($> 10^{14}\text{m}^{-2}$) ため散乱が増強されますが、結合相の分布を最適化することで (Co $10\%\pm 1\%$ など)、抵抗率を安定に保つことができます。粗粒超硬合金 (WC-10Co、 $> 2\mu\text{m}$ など) は、WC 相 (抵抗率 $\sim 50\mu\Omega\cdot\text{cm}$) が優勢であるため、全体的な導電性が低下します。EDS 検出により、結合相が不均一に分布していることが示され (偏差 $> 0.5\%\pm 0.1\%$)、これが電子移動障壁を悪化させています。

(3) プロセスの最適化

焼結パラメータ ($1400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力 $50\text{MPa}\pm 1\text{MPa}$ など) を制御するか、粒度抑制剤 (VC $0.5\%\sim 1\%$ または $\text{Cr}_3\text{C}_2< 1\%$) を添加することにより、導電率 ($< 12\mu\Omega\cdot\text{cm}$) と硬度 ($> \text{HV } 1400\pm 30$) を考慮しながら、粒径を $0.5\sim 1\mu\text{m}$ の範囲で安定させることができます。ナノ粒子技術 ($< 0.3\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$) は導電性をさらに向上させることができますが、生産コストとのバランスを取る必要があります。

9.1.1.3.3 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - 焼結温度

(1) 影響メカニズム

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

焼結温度は、結合相の分布、微細構造の均一性、および導電ネットワークの形成に直接影響します。 $1450^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ では、CoまたはNiが溶融して均一に分布し（偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$ ）、結合相ネットワークの連続性を確保し、安定した導電性（抵抗率 $\sim 11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）を維持します。しかし、温度が $1500^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ を超えると、CoまたはNiが明らかな偏析を起こし、偏差が約 $20\%\pm 3\%$ 増加し、局所抵抗率が上昇し（ $> 13\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）、全体の導電性が約 $10\%\pm 2\%$ 低下します。これは、結合相が高温で粒界に移動し、導電ネットワークの均一性が破壊されるためです。

（2）熱力学分析

高温焼結（ $> 1500^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）により、Coが溶融し、粒界に濃縮されます。EDS分析によると、偏析帯のCo含有量は $15\%\pm 1\%$ にも達し、抵抗率は $15\%\sim 20\%$ 高くなり、熱膨張係数（ $> 6\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）も微小亀裂（ $< 0.1\mu\text{m}$ ）を誘発する可能性があります。 1450°C の一定温度で、段階加熱（ 1200°C で予熱）を行うことで、熱応力（ $< 50\text{MPa}$ ）を低減し、導電性を最適化できます。

（3）プロセス改善：

傾斜焼結または急速冷却技術（例えば、冷却速度 $10^{\circ}\text{C}/\text{分}\pm 1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ）を用いることで、高温偏析を効果的に低減し、NiTiの安定性（分解温度 $> 1500^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）を維持できます。Ar保護雰囲気と組み合わせることで、酸化を防止し（O 1s ピーク位置 $< 0.5\%$ ）、導電率の安定性（偏差 $< 5\%\pm 1\%$ ）を向上させることができます。

9.1.1.3.4 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - 添加剤

（1）

添加剤の導入は、超硬合金の電気特性を大きく変化させます。例えば、TiC（抵抗率約 $50\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 2\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）を $5\%\pm 0.1\%$ 添加すると、抵抗率は約 $5\%\pm 1\%$ 増加します。これは、TiCの導電性が低く、その共有結合特性により電子の移動が制限されるためです。SEM観察では、TiC粒子（粒径約 $1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ ）がWCマトリックス中に分散しており、散乱サイトが増加していることが示されています。

（2）

TaCやVC（抵抗率 $30\sim 60\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）などの他の添加剤は、少量（ $< 2\%$ ）添加すると結晶粒微細化（ $< 0.5\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）に大きな影響を与え、間接的に導電性に影響を与えます。一方、過剰添加（ $> 3\%\pm 0.1\%$ ）すると、その高抵抗特性が導電ネットワークを支配するため、導電性がさらに低下します（抵抗率の増加 $> 10\%\pm 2\%$ ）。 Mo_2C （ $< 1\%$ ）を添加すると、結合相の分布が改善され、導電性がわずかに向上します（ $< 2\%\pm 0.5\%$ ）。

（3）バランス設計

添加剤の最適化においては、電気伝導性と機械的特性（例えば、耐摩耗性 $> 10^4$ 時間）をバランス良く考慮する必要があります。通常、TiC含有量は $2\%\sim 5\%$ の低レベルに制御され、VC（ $< 1\%$ ）と組み合わせて結晶粒を微細化し、抵抗率 $< 12\mu\Omega\cdot\text{cm}$ を維持し、 K_{1c} （ $>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15MPa·m^{1/2}±0.5) を向上させます。

9.1.1.3.5 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - 表面状態

(1) 影響メカニズム

表面粗さ (Ra) は接触抵抗と電子伝達効率に直接影響します。Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm の場合、表面は平坦で接触抵抗が低く (< 1 mΩ·cm²)、導電性が最適になります。Ra > 0.1 μm ± 0.01 μm の場合、表面の凹凸により接触抵抗が約 10% ± 2% 増加し、電子伝達効率が低下し、局所抵抗が 12.5 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm まで上昇する可能性があります。

(2) 加工の影響

研磨や研削加工（ダイヤモンド研磨材の使用など）により、Ra を 0.02 μm まで低減でき、導電性が大幅に向上します（抵抗率は 10.8 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm まで低下）。逆に、粗い加工（旋削やサンドブラストなど、Ra > 0.2 μm ± 0.01 μm）では、表面欠陥（マイクロクラックや酸化層など）が増加し、抵抗率は約 15% ± 3% 増加します。表面酸化（O 1s ピーク位置の増加 > 0.5%）により、導電性はさらに低下します。

(3) 事例:

WC10Co の微細研磨 (Ra 0.03 μm) 後、抵抗率は 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm に安定し、表面接触抵抗は約 20% ± 2% 減少しました。未処理の粗面 (Ra 0.15 μm) の抵抗率は 12.5 μΩ·cm に達することもあり、表面状態の最適化の重要性を示しています。超音波洗浄後、酸化層の厚さが減少し (< 5 nm)、導電性の一貫性がさらに向上しました。

9.1.1.3.6 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - 包括的な例

WC12Co と WC10Ni を例に挙げると、WC12Co を 1500°C ± 10°C で焼結すると、Co の偏析（偏差 > 0.5% ± 0.1%）により抵抗率が 13 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm に上昇し、局所的な導電率が約 15% ± 2% 低下し、疲労寿命も制限されます (< 10⁶ 回 ± 10⁵ 回)。WC10Ni を 1450°C ± 10°C で焼結すると、Ni が均一に分布し（偏差 < 0.1% ± 0.02%）、抵抗率は 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm にとどまり、K_{IC} は 16 MPa·m^{1/2} ± 0.5 で安定します。WC10Ni は、粒径 (0.5 μm ± 0.01 μm) と表面状態 (Ra 0.04 μm ± 0.01 μm) と相まって、優れた導電性 (< 11.5 μΩ·cm)、硬度 (HV 1450 ± 30)、安定性を示し、組成最適化、プロセス制御、表面処理の相乗効果を発揮します。放電加工においては、WC10Ni の低抵抗率 (11 μΩ·cm) により、放電時間 (< 0.1 ms ± 0.01 ms) が短縮され、加工効率 (> 20% ± 2%) が向上します。

超硬合金の導電性を最適化するには、Co/Ni 含有量 (8% ~ 12%)、粒径 (0.5 ~ 1 μm)、焼結温度 (約 1450°C)、添加剤 (TiC < 5%、VC < 1%)、表面状態 (Ra < 0.05 μm) など、複数の要因を総合的に考慮する必要があります。結合相の比率を正確に制御し、粒子を微細化し、焼結パラメータを最適化し、表面粗さを改善することで、機械的特性 (硬度 > HV 1400 ± 30、K_{IC} > 15 MPa·m^{1/2}) を考慮しながら、導電性を大幅に向上させることができます (< 12 μΩ·cm)。この最適化は、EDM、導電性コーティング、スマートレスポンスアプリケーション (応答時間 < 1 ms ± 0.1 ms)、および電子デバイスにおける超硬

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合金の性能を向上させるための重要なガイドラインとなります。さらに、環境適応性（温度 $<100^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 30%~50%など）と組み合わせることで、航空センサー（疲労寿命 $>10^6$ 倍 $\pm 10^5$ 倍）や医療用インプラント（互換性 $>95\%\pm 2\%$ ）での応用可能性をさらに拡大できます。

9.1.1.4 炭化物導電性の最適化

抵抗率 $<12\ \mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ を達成するには、材料組成、製造プロセス、表面処理、試験方法など、複数の側面から超硬合金の電気伝導性を最適化する必要があります。これらの最適化戦略は、電子移動効率の向上、散乱損失の低減、導電ネットワークの連続性と安定性の向上により、高導電性アプリケーション（電子接点、導電性コーティング、スマート応答デバイスなど）の要件を満たす性能を確保することを目的としています。超硬合金の微細構造特性（WC 粒子や結合相分布など）とマクロ性能要件（硬度 $>\text{HV } 1400\pm 30$ 、 $K_{\text{IC}}>15\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ など）を組み合わせます。理論的分析、実験的検証、微視的特性評価、エンジニアリング応用事例を通じて、以下の具体的な戦略が推奨され、機械的特性、環境適応性、長期信頼性を考慮しながら電気伝導性を総合的に向上させ、ハイエンド製造、新興技術分野、過酷な作業条件における超硬合金の広範な応用の強固な基盤を築きます。

9.1.1.4.1 炭化物導電性の最適化 – 組成最適化

(1) Co/Ni 含有量制御

Co または Ni 含有量を $10\%\pm 1\%$ に設定し、主な導電ネットワークを結合相として提供します。この比率により、十分な自由電子密度（約 $10^{22}\ \text{cm}^{-3}\pm 10^{21}\ \text{cm}^{-3}$ ）が確保され、効率的な電子移動経路が形成され、過剰な含有量（ $>12\%\pm 1\%$ など）によって引き起こされる靱性の低下や偏析の問題を回避できます。SEM 分析によると、 $10\%\pm 1\%$ の結合相は均一に分布しており（偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$ ）、結合強度は $>100\ \text{MPa}\pm 10\ \text{MPa}$ 、抵抗率は $11\ \mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ で安定しており、導電率は $9\times 10^6\ \text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\ \text{S/m}$ に達します。Co/Ni 含有量が高すぎると、粒界の弱化（微小亀裂密度 $>10^3\ \text{m}^{-2}$ ）が進み、電子散乱が悪化し、抵抗率が $13\ \mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ まで上昇する可能性があります。その一方で、導電率は約 $15\%\pm 2\%$ 低下し、 K_{IC} は約 $10\%\pm 2\%$ 低下します（ $<13.5\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ ）。EDS 検出により、さらに Co 含有量が高いと偏析（Ni: Co 比が $1: 1\pm 0.1$ から逸脱）が発生し、局所的な抵抗率が上昇（ $>14\ \mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）し、全体的な性能に影響を与える可能性があることが示されています。

(2) WC 粒径の最適化

WC 粒径は $0.51\ \mu\text{m}\pm 0.01\ \mu\text{m}$ に制御され、粒子を微細化することで界面散乱を低減しています。微粒子化により粒界密度（ $>10^{14}\ \text{m}^{-2}$ ）が増加し、散乱がわずかに増加します。しかし、結合相の分布を最適化することで（Co $10\%\pm 1\%$ など）、全体の抵抗率は $11.5\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 未満 $\pm 0.1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ に大幅に低減し、導電率は $9.1\times 10^6\ \text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\ \text{S/m}$ に向上します。XPS 分析の結果、微粒子（ $<5\ \text{nm}$ 、O 1s ピーク $\sim 532\ \text{eV}\pm 0.1\ \text{eV}$ ）の表面の酸化層の厚さが減少し、電子移動効率が向上し、散乱断面積が $<10^{-18}\ \text{m}^2$ に減少していることが示されています。粒径 $>2\ \mu\text{m}\pm 0.01\ \mu\text{m}$ と比較して、粗粒サンプル（抵抗率が $15\%\pm 3\%$ 増加、約 $13\text{--}14\ \mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）と細粒設計は導電性と硬度（HV 1450 ± 30 ）の両方を考慮し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ており、疲労寿命 ($>10^6$ 回 $\pm 10^5$ 回) も保証されています。

(3) ミクロ設計では、

微量の粒抑制剤 (VC 0.5%~1% または $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$) を添加することで過度の粒成長を抑制し、粒径を $0.5\sim 1\mu\text{m}$ の範囲でさらに安定させます。これらの抑制剤は WC 粒界エネルギー ($< 1 \text{ J/m}^2$) を低下させ、導電ネットワークの接続性を高め (接触面積 $> 95\% \pm 2\%$)、抵抗率を $11\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ まで低下させます。EDS 検出では、抑制剤が均一に分布しており (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)、局所的な導電率の低下 ($< 1\% \pm 0.5\%$) を回避しながら、 K_{1c} ($> 15.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5$) が向上していることが示されています。抑制剤が多すぎると ($> 2\% \pm 0.1\%$)、高抵抗相 (VC、抵抗率約 $60\mu\Omega\cdot\text{cm}$ など) が導入される可能性があるため、添加量を厳密に制御する必要があります。

(4) 効果例

WC10Co を例にとると、粒径 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ の条件下では、抵抗率は $11\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ で安定しており、導電性は粗粒 ($> 2\mu\text{m}$) サンプル (抵抗率約 $13\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、導電率は $7.7 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ に低下) よりも優れています。NiTi 3% $\pm 0.1\%$ のインテリジェント応答設計と組み合わせることで、WC3NiTi サンプルの抵抗率は同じ粒径で $11\mu\Omega\cdot\text{cm}$ に維持され、0.05% $\pm 0.01\%$ の変形率は導電性に影響を与えません。0.8 ms $\pm 0.1 \text{ ms}$ の応答時間は、動的負荷下での導電性の安定性を示しており、構成最適化の有効性と汎用性を検証しています。

9.1.1.4.2 炭化物導電性の最適化 - 焼結プロセスの最適化

(1) 温度制御

焼結温度は、高温 ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) によって引き起こされる Co/Ni 偏析 (偏差 $> 0.5\% \pm 0.1\%$) を回避し、結合相の均一な分布 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) を確保して、低い抵抗率 ($\sim 11\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、導電率 $\sim 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$) を維持するため、 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ に設定されました。SEM 観察により、 1450°C で Co または Ni が溶融して連続ネットワークを形成し、粒界酸化 (O 1s ピーク位置 $< 0.5\%$) が最小限に抑えられ、散乱損失が約 5% $\pm 1\%$ 減少することが示されました。温度が 1500°C を超えると、偏析帯の抵抗率は $13\sim 14\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ に増加し、導電率は約 10% $\pm 2\%$ 減少し、マイクロクラック密度は $> 10^3 \text{ m}^{-2}$ に増加し、長期信頼性に影響を与えます。

(2)

真空条件下での焼結圧力は $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ に制御され、酸化と気孔形成を効果的に低減し (気孔率 $< 0.5\% \pm 0.1\%$)、材料密度を $> 99.5\% \pm 0.1\%$ に高めます。高密度化により電子散乱経路が短縮され (散乱断面積 $< 10^{-18} \text{ m}^2$)、導電性が大幅に向上し、抵抗率は $10.8\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ に低下し、導電率は $9.3 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ に向上しました。大気圧焼結 (密度約 98% $\pm 0.1\%$ 、抵抗率約 $12\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$) と比較して、真空条件下での導電性は約 5% $\pm 1\%$ 向上し、構造密度により疲労寿命 ($> 10^6$ 倍 $\pm 10^5$ 倍) も向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) プロセス最適化

では、傾斜焼結（ $1200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ で1時間低温仮焼結した後、 $1450^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ に昇温）または急速冷却技術（冷却速度 $10^{\circ}\text{C}/\text{分}\pm 1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ）を使用して、異常な粒成長（ $> 2\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）および相分離（Co 偏析 $> 0.5\%\pm 0.1\%$ ）を抑制し、さらに抵抗率を約 $5\%\sim 8\%$ （ $10.5\sim 11\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）低減します。熱シミュレーション分析によると、傾斜焼結により熱応力（ $< 50\text{MPa}$ ）が低減し、微細構造の均一性が最適化され（偏差 $< 0.1\%\pm 0.02\%$ ）、粒界密度 $> 10^{14}\text{m}^{-2}$ が維持され、電子移動効率が約 $6\%\pm 1\%$ 向上します。急速冷却により、NiTi 相変態歪みも低減され（ $< 1\%\pm 0.5\%$ ）、スマート応答性能（変形率 $< 0.1\%\pm 0.01\%$ ）が保証されます。

(4) 熱処理強化

焼結後、低温焼戻し（ $800^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、2時間 ± 0.1 時間）を実施して内部応力（ $< 30\text{MPa}$ ）を除去し、微細構造を最適化し、結合相の連続性を高めました（接触面積 $> 96\%\pm 2\%$ ）。XPS 検出の結果、焼戻し後の表面酸化層の厚さは減少し（ $< 3\text{nm}$ 、O 1s ピーク位置の増加 $< 0.3\%\pm 0.01\%$ ）、抵抗率は $11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ で安定し、導電率は $9.1\times 10^6\text{S}/\text{m}\pm 0.1\times 10^6\text{S}/\text{m}$ に増加しました。焼き戻しにより、 K_{1c} （ $> 16\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ ）と疲労寿命（ $> 10^6$ 回 $\pm 10^5$ 回）も向上し、特に航空センサー（耐高温性 $> 400^{\circ}\text{C}$ ）やスマートツール（寿命 $> 5000\text{m}\pm 500\text{m}$ ）に適しています。

9.1.1.4.3 炭化物導電性の最適化 - 表面処理の最適化

(1) 研磨工程:

ダイヤモンド研磨（粒径 $1\sim 3\mu\text{m}$ ）または超精密研削により、表面粗さ（Ra）を $< 0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ に制御します。平坦な表面により、接触抵抗が約 $10\%\pm 2\%$ （ $1.2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ から $1\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ）減少し、電子伝達効率が向上します（導電率が $5\%\pm 1\%$ 以上増加）。SEM 分析の結果、 $Ra < 0.05\mu\text{m}$ の表面欠陥（マイクロクラック $< 0.1\mu\text{m}$ 、密度 $< 10^2\text{m}^{-2}$ ）が大幅に減少し、接触面積が $> 95\%\pm 2\%$ に増加し、散乱損失が約 $5\%\pm 1\%$ 減少することが示されています。 $Ra > 0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ の粗い表面と比較すると、導電性は約 $10\%\pm 2\%$ 低下します。

(2) 表面洗浄:

無水エタノールまたは超音波洗浄（周波数 40kHz 、 $5\sim 10$ 分）を使用して、表面の油、酸化層（厚さ $< 5\text{nm}$ 、O 1s ピーク $\sim 532\text{eV}\pm 0.1\text{eV}$ ）および汚染物質を除去し、接触面の導電性の一貫性を確保します（偏差 $< 2\%\pm 0.5\%$ ）。洗浄後、接触抵抗は約 $5\%\pm 1\%$ （ $1.1\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ）減少し、抵抗率は $11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ で安定し、導電率は $9.1\times 10^6\text{S}/\text{m}\pm 0.1\times 10^6\text{S}/\text{m}$ に増加しました。XPS 検出では、洗浄後、表面の炭素汚染（C 1s ピーク $\sim 284\text{eV}$ ）が減少し（ $< 5\%\pm 1\%$ ）、電子移動の安定性が向上していることが示されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（3）化学機械研磨（CMP）またはプラズマ洗浄（出力 100W、10 分）を組み合わせた後処理強化

により、Ra をさらに $0.02\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ まで低減でき、接触抵抗は $0.5\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下に低減でき、導電率は $9.3\times 10^6\text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\text{S/m}$ まで向上し、特に高精度電子用途（接触抵抗 $< 0.1\text{m}\Omega$ など）に適しています。プラズマ処理により、残留酸化物層（ $< 2\text{nm}$ 、O 1s ピーク位置の増加 $< 0.2\%\pm 0.01\%$ ）が除去され、表面導電性が約 $8\%\pm 2\%$ 向上し、耐食性（腐食電流密度 $< 10^{-6}\text{A/cm}^2\pm 10^{-7}\text{A/cm}^2$ ）が向上し、海洋環境（湿度 $> 80\%\pm 5\%$ ）に適しています。

（4）実際の検証では、

WC10Ni を $\text{Ra}0.04\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ に研磨した後、抵抗率は $12\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ から $11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ に減少し、導電率は約 $8\%\pm 1\%$ ($9.1\times 10^6\text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\text{S/m}$) 増加することがわかりました。未処理の粗い表面（Ra $0.15\mu\text{m}$ 、抵抗率 $12.5\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、導電率 $8\times 10^6\text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\text{S/m}$ ）と比較して、表面最適化により、特にインテリジェントツール（切削力 $< 10\text{N}\pm 1\text{N}$ 、加工精度 $< 1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ ）で電子伝達効率が大幅に向上し、耐用年数が $5000\text{m}\pm 500\text{m}$ 以上に増加します。

9.1.1.4.4 炭化物導電性の最適化 - Ni 置換

（1）Ni 含有量の最適化

Ni 含有量は $8\%\sim 10\%\pm 0.1\%$ に設定され、Co の一部または全部を置換します。Ni の抵抗率（約 $7\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）は Co の抵抗率（ $6\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）よりもわずかに高くなりますが、耐食性がより優れているため（腐食電流密度 $i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{A/cm}^2\pm 10^{-7}\text{A/cm}^2$ ）、湿気の多い環境や腐食性の高い環境（海洋機器、医療用インプラントなど）に適しています。SEM 分析により、Ni が均一に分布していること（偏差 $< 0.1\%\pm 0.02\%$ ）、接合強度が $100\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$ を超え、粒界酸化（O 1s ピーク位置 $< 0.5\%$ ）が Co（ $< 1\%\pm 0.1\%$ ）よりも低いことが示され、長期安定性が向上しています。

（2）性能比較:

WC10Co と比較して、3.5%NaCl 溶液中での WC10Ni の腐食速度は約 $20\%\pm 2\%$ ($< 0.02\text{mm}$ /年) 減少し、抵抗率は $11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ に維持され、導電率は $9.1\times 10^6\text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\text{S/m}$ で安定しています。XPS 検出により、Ni 表面に不動態層（NiO、厚さ約 $10\text{nm}\pm 1\text{nm}$ ）が形成され、耐酸化性が向上していることが示されています（O 1s ピーク位置の増加 $< 0.1\%\pm 0.01\%$ ）。pH < 4 または高温（ $> 100^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ ）の環境では、Ni サンプルの重量減少率（ $< 0.05\text{mg/cm}^2$ ）は Co の重量減少率（ $> 0.1\text{mg/cm}^2$ ）よりもはるかに低くなります。

9.1.1.4.5 超硬合金の導電性の最適化 - 導電性と耐食性のバランス

（1）Ni の電氣的性質

Ni のフェルミレベル（約 $7\text{eV}\pm 0.1\text{eV}$ ）は Co のフェルミレベル（約 $6.5\text{eV}\pm 0.1\text{eV}$ ）に近く、導電ネットワーク形成能力は同等です。均一な分布（偏差 $< 0.1\%\pm 0.02\%$ ）と相まって、抵抗率は $< 11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ に制御でき、導電率は $9.2\times 10^6\text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\text{S/m}$ に達し、 K_{1c} は $> 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ に維持されます。Ni の融点（ $1455^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ ）は Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

($1495^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) よりも安定しており、高温偏析が減少します ($< 0.2\% \pm 0.02\%$)。

(2) 応用シナリオ:

腐食性環境 ($\text{pH} < 4$ 、湿度 $> 80\% \pm 5\%$ 、または海水浸漬など) では、Ni 置換により耐用年数を延ばすことができます ($> 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間)。特に航空センサー (耐高温性 $> 400^{\circ}\text{C}$ 、疲労寿命 $> 10^6$ 倍 $\pm 10^5$ 倍) や医療用インプラント (適合性 $> 95\% \pm 2\%$) に適しており、生体腐食を低減します ($< 0.01 \text{ mm/年}$)。

9.1.1.4.6 炭化物導電性の最適化 - 合金設計

(1) Co/Ni 混合結合相

Co/Ni 混合結合相 (Co 5% + Ni 5% $\pm 0.1\%$ など) により、Ni の耐腐食性と Co の高導電性 (抵抗率 $\sim 6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) が相乗的に最適化されます。混合相のフェルミ準位整合

($\sim 6.7 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$) により、電子移動効率が向上し、抵抗率はさらに $10.5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ まで低減でき、導電率は $9.5 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ まで向上します。SEM 分析では、混合相が均一に分布しており (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)、粒界酸化が減少していることが示されています (O 1s ピーク位置 $< 0.3\% \pm 0.01\%$)。

(2) ミクロ最適化された

混合相は、結合相ネットワークの連続性を最適化し (接触面積 $> 96\% \pm 2\%$)、散乱損失を $< 5\% \pm 1\%$ に低減し、電子移動経路長を約 $10\% \pm 2\%$ 短縮します。EDS 検出の結果、Co/Ni 比 (1: 1 ± 0.1) は安定しており、粒界強度 ($> 110 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) が向上し、 K_{1c} は $16.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ に増加しました。

(3) WC10 (Ni5Co5) の実用化

海洋環境の電子接点では、抵抗率が $10.5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ で安定しており、導電率は $9.5 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ 、腐食速度は $< 0.01 \text{ mm/年}$ 、寿命は $> 10^5$ 時間 $\pm 10^4$ 時間であり、これは単一の Co (抵抗率 $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、腐食速度 0.02 mm/年) または Ni (抵抗率 $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、耐食性がやや優れている) の配合よりも優れています。スマートツールでは、混合相設計により切削熱が低減し ($< 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$)、寿命が $> 5500 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ に延長されます。

超硬合金の電気伝導率は、組成調整 (Co/Ni $10\% \pm 1\%$ 、粒径 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)、焼結プロセスの改善 (1450°C 真空焼結、密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$)、表面処理 ($R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)、Ni 置換およびハイブリッド設計によって最適化されました。抵抗率は $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ に制御され、導電率は $> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ に向上しました。WC10Ni と WC10 (Ni5Co5) を例にとると、導電性、耐腐食性 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)、機械的特性 (硬度 $\text{HV } 1450 \pm 30$ 、 $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$) を考慮すると、抵抗率はそれぞれ $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ と $10.5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ です。これらの最適化戦略は、スマートツール (切削効率の向上 $> 20\% \pm 2\%$)、航空宇宙センサー (応答時間 $0.8 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ 、耐高温性 $> 400^{\circ}\text{C}$)、医療用インプラント (適合性 $> 95\% \pm 2\%$)、海洋機器 (耐腐食性 $> 10^4$ 時間) の分野で優

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

れており、極限環境（例 $>500^{\circ}\text{C}$ または高湿度 $>90\%\pm 5\%$ ）での応用の可能性は、ナノテクノロジー（粒子 $<0.3\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）または多層導電性コーティング（厚さ $2\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ ）によってさらに高めることができます。

9.1.1.4.7 セメント炭化物の導電性試験仕様

（1）四探針法の適用

四探針法は抵抗率の測定に使用され、 $1\text{mA}\pm 0.01\text{mA}$ の定電流を流すことで $\pm 0.01\mu\Omega\cdot\text{cm}$ の測定精度を確保し、高導電性材料の精密な特性評価に適しています。探針間隔は $1\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ に設定され、幾何学的誤差（ $<0.5\%\pm 0.1\%$ ）を低減し、等間隔配置により電流分布を最適化して、試験結果の再現性を高めます。試験中、サンプル表面は $R_a < 0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を維持し、表面粗さによる接触抵抗（ $<1\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ）の干渉を回避する必要があります。温度制御システム（温度変動 $<\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ）と組み合わせることで、4プローブ法は温度による抵抗率の変化（ $<0.01\mu\Omega\cdot\text{cm}/^{\circ}\text{C}$ ）を正確に捉えることができ、動的環境におけるスマートレスポンスセメントカーバイド（WC3NiTi など）の電気的安定性を評価するのに特に適しています。

（2）環境制御 導

電性を妨げる環境要因（高温 $>100^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ または高湿度 $>80\%\pm 5\%$ など）を回避するため、試験温度は $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度は $<65\%\pm 5\%$ に制御されます。温度が高すぎると、NiTi 相転移（ A_f 約 $100^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）が発生し、変形率（ $>0.1\%\pm 0.01\%$ ）および抵抗率変動（ $>0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.01\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）が増加します。湿度が高いと、表面酸化（O 1s ピーク位置の増加 $>0.5\%\pm 0.1\%$ ）が発生し、接触抵抗が増加する可能性があります。恒温恒湿チャンバー（精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2\%\text{RH}$ ）を使用し、不活性ガス（Ar など）保護と組み合わせ、試験環境の安定性と再現性（偏差 $<1\%\pm 0.5\%$ ）を維持します。

（3）データ検証

測定は 5 回繰り返し、平均値を算出しました。SEM により微細構造を分析し、結合相ネットワークの連続性（ $>95\%\pm 2\%$ ）と粒度分布の均一性（偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$ ）を確認しました。SEM 像では、粒界酸化（O 1s ピーク位置 $<0.3\%$ ）と微小亀裂（ $<0.1\mu\text{m}$ ）が導電性に及ぼす影響を明らかにすることができます。EDS 検出により、Co/Ni 比（1: 1 ± 0.1 ）を検証し、データの信頼性を確保しています。統計分析では、標準偏差（ $<0.05\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）を使用して測定の一貫性を評価します。4プローブ法の高精度（ $\pm 0.01\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）と組み合わせることで、最適化効果を正確に定量化できます（抵抗率の低下 $>5\%\pm 1\%$ ）。

（4）結果例

WC10Ni（ $R_a < 0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）を 4 探針法で試験したところ、抵抗率は $11\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ で安定し、導電率は $9.1\times 10^6\text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\text{S/m}$ に達し、電子接点（リレーやスイッチなど）の導電率要件を完全に満たしました（接触抵抗 $<0.1\text{m}\Omega$ ）。最適化されていない WC12Co（抵抗率 $13\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、導電率 $7.7\times 10^6\text{S/m}\pm 0.1\times 10^6\text{S/m}$ ）と比較して、WC10Ni の抵抗率は $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\%\pm 5\%$ の条件下で約 $15\%\pm 2\%$ 減少し、組成最適化と表面処理の相乗効果が実証されました。スマートツールアプリケーションにおいて、WC10Ni

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の低抵抗率は効率的な EDM（放電時間 $< 0.1 \text{ ms} \pm 0.01 \text{ ms}$ ）と $5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ を超える寿命をサポートします。

9.1.1.4.8 超硬合金の導電性の総合最適化効果

上記の戦略を総合的に適用することで、例えば、真空焼結 $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ （圧力 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ）、粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、 $\text{Ra } 0.04 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ への研磨という条件下で、WC10Ni 合金の抵抗率を $10.8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ に最適化することができ、これは目標値の $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ を下回り、導電率は $9.3 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ に向上します。この最適化効果は、結合相ネットワークの連続性（ $> 96\% \pm 2\%$ ）、粒界密度の最適化（ $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ）、および表面接触抵抗の低減（ $< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ）によるものです。さらに、Ni 置換（ $8\% \sim 10\% \pm 0.1\%$ ）と表面処理により、耐腐食性（腐食電流密度 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）と接触性能（接触面積 $> 95\% \pm 2\%$ ）が大幅に向上し、高信頼性電子部品（航空宇宙センサー、医療用インプラントなど）において優れた性能を発揮します。

最適化されていない WC12Co（抵抗率 $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、腐食速度 0.02 mm/年 ）と比較すると、最適化された WC10Ni では抵抗率が約 $17\% \pm 2\%$ 減少し、耐腐食性が約 $20\% \pm 2\%$ （ $< 0.01 \text{ mm/年}$ ）向上し、耐用年数は $> 10^4 \text{ 時間} \pm 10^3 \text{ 時間}$ に延長されています。

最適化された超硬合金は、電気伝導率要件（抵抗率 $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、伝導率 $> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ ）を満たすだけでなく、機械的強度（硬度 $\text{HV } 1450 \pm 30$ 、 $\text{K1c } K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）と耐用年数（疲労寿命 $> 10^6 \text{ 回} \pm 10^5 \text{ 回}$ ）も考慮されています。

スマートツールでは、切削効率が $20\% \pm 2\%$ 以上向上し（処理時間が $15\% \pm 2\%$ 短縮）、航空センサーでは応答時間 $0.8 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ 、耐高温性が 400°C 以上、疲労寿命が $10^6 \text{ 倍} \pm 10^5 \text{ 倍}$ 以上、医療用インプラントでは適合性が $95\% \pm 2\%$ 以上、生体腐食が 0.01 mm/年 未満であり、産業用途に効率的で信頼性の高いソリューションを提供しています。これらの戦略は共同で、電子機器、航空、工具製造、医療、海洋工学における超硬合金の広範な応用を促進しています。将来的には、ナノテクノロジー（粒子 $< 0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）または多層導電性コーティング（厚さ $2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）を使用して、極端な環境（ $> 500^{\circ}\text{C}$ または高湿度 $> 90\% \pm 5\%$ など）での性能をさらに向上させることができます。

超硬合金の導電性を最適化するには、精密な組成制御（Co/Ni $10\% \pm 1\%$ 、粒径 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、プロセス最適化（ 1450°C 真空焼結、密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$ ）、表面処理（ $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、および Ni 置換（ $8\% \sim 10\% \pm 0.1\%$ ）が必要です。四探針法（精度 $\pm 0.01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）による高精度試験により最適化効果を検証し、SEM および EDS による微細構造分析（結合相ネットワーク $> 95\% \pm 2\%$ ）と組み合わせることで、最適化プロセスの科学的根拠を提供します。

これらの戦略は、電気伝導性（ $> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ ）を向上させるだけでなく、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐腐食性（ $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）と機械的特性（硬度 $> \text{HV } 1400 \pm 30$ ）も向上させ、スマート製造、航空宇宙、バイオメディカルエンジニアリングにおける超硬合金の革新的な応用を促進します。将来的には、より高い要件を満たすために、多機能複合材料の設計を探索することができます。

9.1.1.5 炭化物導電性の工学応用

優れた電氣的・機械的特性を有する超硬合金は、導電性を最適化し、多くのエンジニアリング分野で大きなメリットを発揮しています。組成最適化（Co/Ni 含有量を $10\% \pm 1\%$ に制御など）、微細構造制御（粒径 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ など）、表面処理（ $R_a < 0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ など）といった戦略により、超硬合金の抵抗率と導電性は大幅に向上し、需要の高い用途においても優れた性能を発揮します。最適化された超硬合金は、高硬度（ $\text{HV } 1400 \pm 30$ 以上）、破壊靱性（ $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）、耐腐食性（腐食電流密度 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）を兼ね備えており、電子工学、航空工学、製造業、新興技術分野など幅広い応用の可能性を示しています。以下は、超硬合金の導電性最適化の主なエンジニアリングアプリケーションと性能です。顕微鏡分析、実験データ、実際の事例を補足することで、そのエンジニアリング価値を深く掘り下げています。

9.1.1.5.1 セメント炭化物電気接点

（1）応用シナリオ

超硬合金電子接点は、リレー、スイッチ、遮断器、マイクロエレクトロニクスデバイスなどの高信頼性電子部品に広く使用されています。頻繁な機械的スイッチングやアークショックに対応するため、低抵抗、高耐摩耗性、長寿命が求められます。特に、自動車用電子制御ユニット、産業オートメーションシステム、民生用電子機器においては、接点の電氣的安定性と耐久性に対する要件が特に厳しくなっています。従来の材料（銀系合金など）は酸化や摩耗が起こりやすいため、用途が制限されています。

（2）性能

WC10Ni（粒径 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ ）の抵抗率は $11\mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1\mu\Omega \cdot \text{cm}$ に達し、導電率は $9.1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ で安定しており、接触抵抗は $0.1\text{m}\Omega \pm 0.01\text{m}\Omega$ 未満で、従来の WC10Co（接触抵抗は約 $0.15\text{m}\Omega \pm 0.01\text{m}\Omega$ ）よりも大幅に優れています。その使用寿命は 10^6 回 $\pm 10^5$ 回を超え、WC10Co の 5×10^5 回 $\pm 5 \times 10^4$ 回をはるかに上回り、使用寿命が約 $100\% \pm 10\%$ 増加します。Ni の耐腐食性（ $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）により、湿度の高い環境（湿度 $> 80\% \pm 5\%$ など）や腐食性雰囲気（ $\text{pH} < 4$ など）での接点の安定性がさらに向上し、表面酸化層の厚さ（ $< 5 \text{ nm}$ 、O 1s ピーク $\sim 532 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$ ）は Co（ $> 10 \text{ nm}$ ）よりも大幅に低くなります。

（3）技術的な利点

小さな粒子と均一な Ni 分布（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）により、インターフェース散乱（散乱断面積 $< 10^{-18} \text{ m}^2$ ）が減少し、導電ネットワークの連続性が最適化され（接触面積 $> 95\%$ ）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

±2%)、高周波スイッチング(>1 kHz)下での電氣的安定性が確保されます。高硬度(HV 1450±30)と耐摩耗性(摩耗率<0.05 mm³/m ±0.01 mm³/m)と相まって、WC10Ni 接点はアーク衝撃(電流>10 A)下で低い抵抗率(<11.5 μΩ·cm ±0.1 μΩ·cm)を維持し、マイクロエレクトロニクスデバイス(センサーモジュールなど)の低電力損失要件を満たします。

(4) 応用例

自動車の電子制御ユニットでは、WC10Ni 接点は接触抵抗が低く寿命が長いことため広く使用されており、アーク摩耗(<0.1 μm /回)による故障率(<1%±0.5%)を低減しています。従来の AgCdO 接点(寿命 5×10⁶回、故障率>5%±1%)と比較して、信頼性は約 80%±5% 向上しています。スマートホームスイッチでは、WC10Ni 接点の応答時間(<0.1ms±0.01ms)が高周波動作をサポートし、省エネと長寿命(>10⁶回±10⁵回)の要件を満たしています。

9.1.1.5.2 炭化物導電性の工学応用 - 炭化物 EDM 電極

(1) 応用シナリオ

超硬電極は放電加工(EDM)に使用され、特に精密金型、複雑な金属部品(チタン合金、ステンレス鋼など)、マイクロ部品の加工に適しています。放電効率を向上させ、加工時間と電極の損失を削減するには、高い電気伝導性が求められます。航空機エンジンブレード、医療機器の金型、自動車部品の製造では、加工精度(<1 μm ±0.1 μm)と電極の耐久性に対する要求が高くなります。

(2) 性能

WC10Co (Co 含有量 10%±1%)の電気伝導率は 10.5MS/m±0.1MS/m に達し、加工効率は 95%±2%を超え、従来のグラファイト電極(効率は約 80%±2%)を大幅に上回ります。加工精度は 1 μm ±0.1 μm 未満に制御でき、表面粗さ(Ra)は 0.2 μm ±0.01 μm まで低減され、航空機エンジンブレードや医療機器金型の高精度要件を満たしています。電極は耐摩耗性に優れ、損失率(<0.5%±0.1%)はグラファイト(>1%±0.2%)よりも低くなっています。耐用年数は 100 時間±10 時間を超え、グラファイト電極(50 時間±5 時間)よりもはるかに長くなっています。

(3) 技術的利点:

高 Co 含有量(10%±1%)により形成される連続導電ネットワークは、電流伝送容量(電流密度>10A/mm²)を向上させます。WC の高い硬度(>1500HV±30)と耐熱性(<400°C±10°C変形)と相まって、電極は高エネルギー放電(>50 μJ)下でも構造的完全性を維持します。微細粒径(0.5 μm ±0.01 μm)により、マイクロクラック(<0.1 μm)が減少し、放電均一性が最適化され(偏差<2%±0.5%)、処理効率が約 15%±2%向上します。グラファイトと比較して、WC10Co の低い抵抗率(11 μΩ·cm ±0.1 μΩ·cm)により放電時間が短縮され(<0.1 ms ±0.01 ms)、エネルギー損失が約 10%±1% 減少します。

(4) 応用例

金型製造において、WC10Co 電極は硬化鋼部品(硬度>HRC 50)の加工に使用され、加

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

工時間が大幅に短縮（20%～30%±2%短縮）され、表面品質（ $Ra < 0.2\mu m \pm 0.01\mu m$ ）が精度要件を満たしています。グラファイト電極（ $Ra \sim 0.5\mu m \pm 0.05\mu m$ ）と比較して、仕上げ工程が約 50%±5%削減されます。航空分野では、WC10Co 電極はチタン合金ブレードを精度 $< 0.5\mu m \pm 0.1\mu m$ 、寿命 > 120 時間±10 時間で加工し、高効率生産をサポートしています。

9.1.1.5.3 炭化物導電性の工学応用 - 炭化物導電性コーティング基板

（1）応用シナリオ 導

電性コーティング基材として、超硬合金は耐摩耗工具（切削工具など）、電子部品（回路基板など）、航空部品（タービンブレードなど）に広く使用されています。導電性、密着性、長期使用性能を考慮する必要があります。腐食性環境（海洋機器など）や高温環境（ $400^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ 以上）では、基材は安定した電気的サポートと機械的保護を提供する必要があります。従来の鋼製基材は導電性が低い（ $< 5 \times 10^6 S/m$ ）ため、用途が制限されています。

（2）性能

WC8Ni（表面粗さ $Ra < 0.05\mu m \pm 0.01\mu m$ ）の抵抗率は $10.8\mu\Omega \cdot cm \pm 0.1\mu\Omega \cdot cm$ 、導電率は $9.3 \times 10^6 S/m \pm 0.1 \times 10^6 S/m$ です。コーティングの密着性は $50 MPa \pm 5 MPa$ を超え、耐用年数は 2 年±0.2 年を超えています。WC8Co（密着性約 $45 MPa \pm 5 MPa$ ）と比較して、Ni マトリックスは、腐食速度（ $i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$ ）が低く、腐食環境（3.5% NaCl 溶液など）での重量減少率（ $< 0.05 mg/cm^2$ ）が低いです。 $\pm 0.01 mg/cm^2$ は、Co（ $> 0.1 mg/cm^2 \pm 0.02 mg/cm^2$ ）よりもはるかに低い。XPS 分析により、Ni 表面不動態化層（NiO、厚さ約 $10 nm \pm 1 nm$ ）が耐食性を向上させていることが示された。

（3）技術的な利点:

表面粗さが低い（ $Ra < 0.05\mu m \pm 0.01\mu m$ ）ため、接触抵抗（ $< 1 m\Omega \cdot cm^2$ ）が低下し、Ni の分布が均一（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）で、粒子構造が細かい（ $0.5\mu m \pm 0.01\mu m$ ）ため、コーティングと基材の界面結合が強化され（接触面積 $> 96\% \pm 2\%$ ）、耐用年数が延びます。高硬度（HV 1450 ± 30）と耐熱性（変形温度 $< 500^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ ）を兼ね備えた WC8Ni 基材は、高温または腐食環境下でも多層コーティング（TiN、厚さ $2\mu m \pm 0.1\mu m$ など）の安定した性能をサポートします。

（4）応用例

風力タービンブレードコーティングにおいて、WC8Ni 基材に支持された耐摩耗コーティングは、塩水噴霧環境（NaCl 濃度 5%±0.5%）で 2.5 年±0.2 年の使用後も顕著な劣化が見られず、その導電率（ $> 9 \times 10^6 S/m \pm 0.1 \times 10^6 S/m$ ）および保護性能（摩耗率 $< 0.03 mm^3/m \pm 0.01 mm^3/m$ ）は、従来の WC8Co 基材（1.5 年±0.2 年の使用、摩耗率 $> 0.05 mm^3/m \pm 0.01 mm^3/m$ ）よりも優れています。航空タービンブレードでは、WC8Ni 基材にサポートされた遮熱コーティングは $1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ を超える高温耐性を備え、導電率の安定性（抵抗率 $< 11\mu\Omega \cdot cm \pm 0.1\mu\Omega \cdot cm$ ）によりセンサーの統合をサポートします。

9.1.1.5.4 炭化物導電性の工学応用 - その他の潜在的応用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) 超硬合金電磁波シールド材 導

電率が最適化された WC-Ni 合金は、軽量の電磁波シールドパネルの製造に使用できます。その電気伝導率 ($> 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$) は、高周波電磁波 ($> 1 \text{ GHz}$) を効果的にシールドし、シールド効率は $> 90\% \pm 2\%$ です。微細粒子 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) と Ni 含有量 ($8\%-10\% \pm 0.1\%$) により、導電ネットワークの連続性が向上し (接触面積 $> 95\% \pm 2\%$)、密度 ($\sim 12 \text{ g/cm}^3$) も非常に高くなっています。 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ は銅 (8.9 g/cm^3) よりも約 $25\% \pm 2\%$ 低いいため、5G 機器や航空電子機器の軽量設計に適しています。

(2) 炭化物導電性コネクタ

WC10Ni は、低抵抗 ($11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、導電率 $9.1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$) と高温耐性 ($> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、変形なし) を備え、約 $30\% \pm 2\%$ の軽量化 (密度 12 g/cm^3 vs. 8.9 g/cm^3) により、高電流コネクタにおける銅合金の代替品として新たな選択肢となっています。SEM 分析によると、Ni は均一に分布しており (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)、優れた耐食性 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) があり、海洋ケーブル用途に対応しています。

(3) 炭化物センサー素子 微粒子

WC-Co-Ni 合金は、安定した電気特性 (抵抗率 $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、導電率 $9.1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0.1 \times 10^6 \text{ S/m}$) と、応答時間 $< 1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ 、精度 $> 99\% \pm 0.5\%$ を備えているため、高精度圧力センサーおよび温度センサーの電極材料として使用されています。NiTi $3\% \pm 0.1\%$ (変形率 $< 0.1\% \pm 0.01\%$) のインテリジェントな応答特性は、動的監視をサポートし、航空センサーや産業オートメーションに適しています。

9.1.1.5.5 セメント炭化物導電性の工学応用による包括的な利点

これらの用途は、最適化された導電性を備えた超硬合金が、エレクトロニクス分野における信頼性を大幅に向上させることを実証しています。例えば、高周波スイッチング ($> 1 \text{ kHz}$) における WC10Ni 電子接点の低い接触抵抗 ($< 0.1 \text{ m}\Omega \pm 0.01 \text{ m}\Omega$) は、デバイス寿命 ($> 10^6 \text{ 回} \pm 10^5 \text{ 回}$) を延長し、故障率を $< 1\% \pm 0.5\%$ に低減します。EDM における WC10Co 電極の高い効率 ($> 95\% \pm 2\%$) は、生産コストを削減 ($20\% \sim 30\% \pm 2\%$ 削減) し、表面品質 ($Ra < 0.2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) を約 $50\% \pm 5\%$ 向上させます。WC8Ni コーティング基板は、過酷な環境 (塩水噴霧、NaCl $5\% \pm 0.5\%$ など) でも長期耐用年数 ($> 2.5 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$) を達成し、産業ニーズを満たしています。また、耐摩耗性 ($< 0.03 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{m}$) は従来の材料よりも優れています。

最適化された超硬合金は、低抵抗 ($< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、導電率 $> 10 \text{ MS/m} \pm 0.1 \text{ MS/m}$)、高い電気伝導性、優れた機械的特性 (硬度 $\text{HV } 1450 \pm 30$ 、 $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を備えています。 ± 0.5)、電子接点、EDM 電極、導電性コーティング基板、電磁シールド材料、導電性コネクタ、センサー素子での応用展望をうまく拡大しています。スマート製造では、WC10Ni 接点が効率的なスイッチングをサポートし (応答時間 $< 0.1 \text{ ms} \pm 0.01 \text{ ms}$)、WC10Co 電極が金型生産効率を向上させます ($> 20\% \pm 2\%$)。航空宇宙では、WC8Ni 基板と WC-Co-Ni センサーが高温安定性と高精度 ($< 1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$) を保証します。海洋工学において、WC10Ni コネクタは耐腐食性 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) を備えており、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

寿命が延びます ($> 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間)。

超硬合金の導電性の工学応用は、組成最適化 (Co/Ni 10% $\pm$ 1%、粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)、プロセス制御 ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 真空焼結、密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$)、表面処理 ($R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) の相乗効果による恩恵を受けています。電子接点 (寿命 $> 10^6$ 倍 $\pm 10^5$ 倍)、EDM 電極 (効率 $> 95\% \pm 2\%$)、導電性コーティング基板 (耐用年数 > 2 年 ± 0.2 年) における優れた性能は、導電性最適化の実用的価値を証明しています。さらに、電磁シールド材料 (シールド効率 $> 90\% \pm 2\%$)、導電性コネクタ (軽量化 $30\% \pm 2\%$)、センサー素子 (応答時間 $< 1\text{ms} \pm 0.1\text{ms}$) の潜在能力は、最適化された超硬合金が 5G 技術、航空電子工学、スマート医療の分野へとさらに拡大できることを示しており、高性能材料開発の重要な参考資料となっています。将来的には、ナノ粒子 ($< 0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) や機能傾斜設計を通じて、極限環境 ($> 500^\circ\text{C}$ または高湿度 $> 90\% \pm 5\%$) での応用能力を向上させることができます。

9.1.2 超硬合金の磁気試験と品質管理

超硬合金の磁気特性とその検出技術は、非破壊検査、品質管理、機械的特性予測において重要な役割を果たします。これらの特性は主に結合相の強磁性によって駆動され、微細構造、組成分布、欠陥状態などの複合的な影響によって影響を受けます。精密な磁気試験と分析により、超硬合金の内部品質、均一性、性能の一貫性を効果的に評価し、産業用途における信頼性の高い保証を提供します。本セクションでは、磁気メカニズム、試験技術、エンジニアリング応用を深く探究し、実験データと微視的特性評価を組み合わせることで、超硬合金の磁気検出と品質管理の科学的根拠と実用的価値を包括的に分析します。

9.1.2.1 超硬合金の磁気原理と技術の概要

炭化物の磁性の原理

超硬合金の磁気特性は、主に結合相の強磁性によって決まります。その磁気パラメータには、飽和磁化 (通常 $10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ 未満)、保磁力 (約 $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) が含まれます。これらの特性により、超硬合金は非破壊検査、品質管理、機械的特性予測において大きな応用価値を持ち、結合相の分布、結晶粒状態、内部欠陥を反映することができます。高硬度 ($> \text{HV } 1400 \pm 30$)、破壊靱性 ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$)、耐摩耗性 (摩耗率 $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{m}$) と相まって、磁気試験は超硬合金の性能最適化と生産の安定性のための重要な技術手段となります。このセクションでは、磁気メカニズム、試験技術、エンジニアリングアプリケーションを通じて包括的な分析を行い、磁気特性と微細構造および機械的特性間の本質的な関係を明らかにすることを目的としています。

(1) Co の強磁性の寄与

超硬合金の磁性は主に Co の強磁性に由来し、その磁気モーメントは約 $1.7 \mu_B \pm 0.1 \mu_B$ (ボーア磁子) で、これは Co 原子の対電子のスピン運動と軌道運動に由来します。Co は

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

結合相として連続ネットワークを形成し、その含有量と分布は磁化と保磁力に直接影響を及ぼします。Co 含有量が $10\% \pm 1\%$ のとき、磁気特性は平衡に達し、飽和磁化は $8 \sim 9 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ で安定し、保磁力は約 $100 \sim 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ であり、磁区は均一に分布しています（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）。Co 含有量が高すぎる場合 ($> 12\% \pm 1\%$)、磁化は $> 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に増加しますが、粒界が弱体化するため（マイクロクラック密度 $> 10^3 \text{ m}^{-2}$ ） ± 0.5 、 $K_{1c} (< 13.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ が低下します。一方、Co 含有量が低すぎる場合 ($< 8\% \pm 1\%$)、導電ネットワークが中断されるため、磁化は $< 7 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に低下します。SEM 分析により、Co の均一性（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）が磁気安定性の維持の鍵であることが示されています。

（2）WC の非磁性特性

WC 自体は、磁化強度が $0.1 \text{ emu/g} \pm 0.01 \text{ emu/g}$ 未満の非磁性材料です。その共有結合構造（WC 結合エネルギー $\sim 4 \text{ eV}$ ）は、電子スピンの寄与を制限し、全体的な磁性にほとんど影響を与えません。XPS 検出は、WC 表面に有意な磁気信号がないことを示しています（磁気モーメント $< 0.01 \mu_B$ ）。その主な機能は、高い硬度 ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) と耐摩耗性（摩耗率 $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{m}$ ）を提供することですが、磁気特性はほぼ完全に Co 相に依存しています。WC 粒径 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) は、Co 分布に影響を与えることで磁気パラメータを間接的に制御しますが、それ自身の磁化の寄与はごくわずかです。

（3）微細構造の影響 Co 相の均一性と粒界分布は、磁区の形成と配向を決定する。Co 分布偏差が $0.1\% \pm 0.02\%$ 未満のとき、磁化強度は $8 \sim 9 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ で安定し、保磁力は $100 \sim 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ に維持され、磁場応答の一貫性は ($95\% \pm 2\%$) 以上である。偏析 ($> 0.5\% \pm 0.1\%$) は局所的な磁気不均一性を招き、磁化強度の変動範囲は $\pm 1 \text{ emu/g}$ に拡大し、保磁力は $130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ 以上に上昇する可能性があり、検出精度が低下する。EDS 分析により、偏析ゾーンの Co 含有量は $15\% \pm 1\%$ に達し、高磁化領域 ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) を形成し、一方で粒界密度 ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) は磁区の成長を制限することで保磁力にさらに影響を与えることが示されました。

（4）欠陥は

内部多孔度（多孔度）に影響します。 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ は磁束の均一性に極めて重要です。多孔度または微小亀裂 ($< 0.1 \mu\text{m}$ 、密度 $> 10^2 \text{ m}^{-2}$) は磁場を分散させ、磁化強度を弱めます（低下 $> 5\% \pm 1\%$ ）。SEM 観察によると、多孔度が $> 0.5\% \pm 0.1\%$ の場合、磁化強度は $7 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ まで低下し、保磁力は $\pm 20 \text{ Oe} \pm 2 \text{ Oe}$ 変動し、非破壊検査の感度 ($< 90\% \pm 2\%$) に影響します。マイクロクラックにより局所的な応力集中 ($> 50 \text{ MPa}$) が発生し、 $K_{1c} (< 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5)$ がさらに低下する可能性があるため、焼結プロセス（例： $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 真空焼結）を制御して多孔度を低く保つことが重要です。

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

超硬合金磁気試験技術

（1）機器とパラメータ

磁気検出に一般的に使用される振動サンプル磁力計（VSM）は、測定精度 $\pm 0.1 \text{ emu/g}$ 、感度 $> 99\% \pm 0.5\%$ を備えており、微量磁性材料の正確な特性評価に適しています。テスト中、印加磁場強度は $1 \text{ T} \pm 0.01 \text{ T}$ 、サンプルサイズは $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ で、測定結果の代表性を確保します（誤差 $< 0.5\% \pm 0.1\%$ ）。温度（ $> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ）または湿度（ $> 80\% \pm 5\%$ ）による磁気パラメータドリフト（ $< 0.1 \text{ emu/g} \pm 0.01 \text{ emu/g}$ ）を回避するために、テスト環境を $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $< 65\% \pm 5\%$ に制御する必要があります。

（2）測定指標

Co 相の均一性と内部欠陥を評価するために、VSM により飽和磁化と保磁力を測定した。磁化は Co 含有量と正の相関関係にあり（ $R^2 > 0.95$ ）、Co 含有量が 1% 増加するごとに磁化が約 $0.8 \text{ emu/g} \pm 0.1 \text{ emu/g}$ 増加する。保磁力は粒径と応力状態の影響を受ける。粒径が $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、保磁力は $100 \sim 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ で安定しているが、粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超えると、 $130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ 以上に上昇する。ヒステリシスループ解析と組み合わせることで、磁化と保磁力の変化は微細構造の均一性を反映することができる（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）。

（3）感度と精度

磁気検出感度は $95\% \pm 2\%$ 以上、欠陥率は $0.1\% \pm 0.02\%$ 未満に制御されています。気孔（ $0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 以上）または微小亀裂（ $0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 以上）を検出できます。たとえば、WC10Co サンプルの磁化強度は $8 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ 、保磁力は $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ であり、検出精度は $98\% \pm 1\%$ を超え、高い信頼性を示しています。従来の磁性粒子試験（感度 $\sim 90\% \pm 2\%$ ）と比較して、VSM は高解像度（ $< 0.1 \text{ emu/g}$ ）のため、セメント炭化物の内部欠陥の定量分析に適しています。

（4）データ分析

SEM と EDS を組み合わせて Co の分布を分析し、偏析面積（ $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）と多孔度（ $< 0.05\% \pm 0.01\%$ ）を確認し、さらに磁気パラメータと微細構造の関係を校正しました。SEM 画像では、Co 偏析領域の磁化強度が局所的に増加していることが示されており（ $> 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ ）、EDS 検出では Co 含有量の変動（ $< 0.5\% \pm 0.1\%$ ）を確認し、これは VSM データと一致しています。データ補正後、磁化強度の偏差は $\pm 0.2 \text{ emu/g}$ に減少し、保磁力の変動は $\pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$ に制御され、品質管理の精度（ $> 99\% \pm 0.5\%$ ）が確保されています。

9.1.2.2 超硬合金の磁気機構の解析

超硬合金の磁気特性は、主に結合相（コバルト（Co）やニッケル（Ni）など）の強磁性によって決まり、そのメカニズムには電子スピン、微細構造、製造プロセスなどの複数の要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

因が関与しています。高硬度 ($> HV 1400 \pm 30$)、破壊靱性 ($K_{Ic} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$)、耐摩耗性 (摩耗率 $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{m}$) と相まって、磁気特性は非破壊検査と品質管理の重要な基礎となります。以下では、磁気の発生源、微視的影響、相界面とネットワークの連続性、検出と性能の相関、環境と温度の影響などを通して超硬合金の磁性メカニズムを詳細に説明し、実験データと微視的分析を組み合わせることでその内部法則を明らかにします。

9.1.2.2.1 炭化物の磁性の源

(1) Co の 3d 電子スピン

Co の磁性は、満たされていない 3d 電子殻に由来する。スピンによって生成される磁気モーメントは約 $1.7 \mu_B \pm 0.1 \mu_B$ (ボーア磁子) であり、スピン軌道相互作用を通じて強磁性秩序を形成する。飽和磁化 (飽和磁化、 M_s) は Co の体積分率 (f_{Co}) に比例し、以下の関係で近似できる。

$$M_s \approx f_{Co} \cdot M_{Co}$$

ここで、 f_{Co} は Co の体積分率 ($10\% \pm 1\%$)、 M_{Co} は純 Co の磁化 (約 $160 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$) です。したがって、Co 含有量が 10% の場合、理論上の M_s は約 16 emu/g ですが、実際には微細構造上の制約 (粒界散乱、欠陥効果) により $8 \sim 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に低下します。XPS 検出により、Co 3d ピーク位置 (約 $778 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$) がその不対電子の寄与を裏付けており、磁気安定性は Co ネットワークの連続性 ($> 95\% \pm 2\%$) に依存していることが示されています。

(2) Ni の弱い強磁性

Ni (含有量 $8\% \sim 10\% \pm 0.1\%$) を結合相として添加すると、その磁気モーメントはわずか $0.6 \mu_B \pm 0.1 \mu_B$ であり、これは弱い強磁性体であるため、磁化が大幅に低下します ($< 5 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$)。Ni は、3d 電子対形成度が高く (約 $0.6 \mu_B/\text{原子}$)、弱い強磁性秩序を持ち、飽和磁化は約 $55 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$ (純 Ni) ですが、セメント炭化物では希釈効果により $4 \sim 5 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ まで低下します。Ni を導入すると耐食性は向上しますが ($i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)、全体的な磁性が弱まるため、磁性は低くても耐食性は高いことが求められる用途 (海洋機器など) に適しています。

9.1.2.2.2 超硬合金の磁気特性に対する微細構造の影響

(1) 粒径と保磁力

粒径が $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、粒界密度が高く ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$)、磁区の切り替えを妨げます。切り替えエネルギーは約 $10^{-19} \text{ J} \pm 10^{-20} \text{ J}$ であり、保磁力が $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ に増加し、磁気応答は外部磁場の変化に対してより敏感になります。粗い粒子 ($> 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) は粒界散乱を減らし、磁区切り替えに対する抵抗を減らし、保磁力が $80 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ まで低下する可能性があります。磁化強度の変動は $\pm 0.5 \text{ emu/g} \pm 0.1 \text{ emu/g}$ まで増加します。SEM 分析の結果、細粒サンプルは一貫した磁区配向 ($> 95\% \pm 2\%$) を示

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

しましたが、粗粒サンプルは磁気分布が不均一（偏差 $> 0.5\% \pm 0.1\%$ ）でした。

（2）焼結温度と Co 分布

焼結温度を $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ とすることで、Co 相の均一な分布（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）が確保され、安定した磁化（ $8 \sim 9 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ ）と保磁力（ $100 \sim 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ ）が維持されます。しかし、温度が $1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ を超えると、Co 偏析（ $> 0.5\% \pm 0.1\%$ ）が発生し、局所的な Co 含有量が $15\% \pm 1\%$ に増加して高磁化領域（ $> 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ ）が形成され、磁化偏差が約 $10\% \pm 2\%$ 増加し、保磁力変動が激しくなります（ $> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ ）。EDS 検出により、偏析領域における粒界酸化（O 1s ピーク位置約 $532 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$ ）が増加し（ $> 0.5\% \pm 0.1\%$ ）、磁気一貫性に影響を及ぼしていることが確認されました。

（3）欠陥と空隙

内部欠陥（例えば、空隙 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、密度 $> 10^2 \text{ m}^{-2}$ ）は磁場を分散させることで保磁力を約 $5\% \pm 1\%$ （ $125 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ まで）増加させる。空隙率 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ の高密度試料は磁気特性がより安定し、磁化の一貫性も向上する（偏差 $< \pm 0.2 \text{ emu/g}$ ）が、空隙率が $> 0.5\% \pm 0.1\%$ になると磁化は $7 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に低下し、磁束均一性も低下する（ $< 90\% \pm 2\%$ ）。マイクロクラックにより局所応力（ $> 50 \text{ MPa}$ ）も発生し、 K_{1c} （ $< 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）が低下する可能性があります。これは真空焼結（圧力 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ）によって制御する必要があります。

9.1.2.2.3 超硬合金磁性相界面とネットワークの連続性

（1）Co 相ネットワーク

SEM および EDS 分析の結果、WC10Co 中の Co 相の連続性は $95\% \pm 2\%$ を超えており、効率的な磁気伝導経路を形成していることがわかりました。Co ネットワークの均一性は、磁化強度の空間分布を直接決定します。偏差が $0.1\% \pm 0.02\%$ 未満（ M_s $8 \sim 9 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ 、保磁力 $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ ）の場合、磁気特性は最適です。Co ネットワークの中断（多孔度 $> 0.1\% \pm 0.02\%$ ）は、磁束損失（ $> 5\% \pm 1\%$ ）につながり、磁化強度は約 $10\% \pm 2\%$ 低下します。

（2）Ni 置換効果

WC10Ni サンプルでは、Ni 相の弱い磁性により M_s が $4 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に低下し、保磁力は約 $110 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ ですが、分布の均一性（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）と耐食性（ $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）により磁性の損失を補い、低磁性でありながら高い耐食性が求められる用途（医療用インプラントなど）に適しています。Ni 相の微細粒構造（ $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）により磁区の安定性が向上し、変動範囲は $\pm 0.1 \text{ emu/g}$ に減少しています。

（3）界面散乱

WC/Co 界面における格子不整合（約 $5\% \pm 1\%$ ）は、さらなる散乱を引き起こし、磁区配向に影響を与え、保磁力が約 $5\% \pm 1\%$ （ $125 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ ）増加する。焼結プロセス（例えば、傾斜焼結、 1200°C で予備焼結した後、 $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ に昇温する）を最適化することで、界面欠陥（ $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）を低減し、磁気安定性（ M_s 偏差 $< \pm 0.2 \text{ emu/g}$ ）を高め、 K_{1c} （ > 15.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MPa·m^{1/2}±0.5)を向上させることができる。

9.1.2.2.4 磁気試験と超硬合金の性能の相関関係

(1) VSM 測定

振動試料型磁力計 (VSM) の測定精度は±0.1 emu/g です。印加磁場が 1 T±0.01 T のとき、WC10Co の Ms は 8 emu/g ± 0.5 emu/g、保磁力は 120 Oe ± 10 Oe です。WC10Ni の Ms は 4 emu/g ± 0.5 emu/g まで低下し、保磁力は約 110 Oe ± 10 Oe です。ヒステリシスループから、WC10Co は磁化飽和が速く (<0.5 T±0.01 T)、WC10Ni はより高い磁場 (>0.7 T±0.01 T) が必要であることがわかります。これは、Co/Ni 含有量と微細構造の影響を反映しています。

(2) 欠陥識別

磁気試験により、ひび割れ (<0.1 mm ± 0.01 mm、密度 > 10² m⁻²) および炭素含有量の偏差 (±0.1% ± 0.01%) を識別できます。炭素過剰 (>6.13 wt% ± 0.01 wt%) または炭素不足 (<6.13 wt% ± 0.01 wt%) は、WC / Co 界面の特性を変え、磁化強度 (減少 > 5% ± 1%) および保磁力 (増加 > 10% ± 2%) に影響を与えます。SEM 画像では、Co が炭素偏差領域 (偏差 > 0.5% ± 0.1%) で不均一に分布しており、磁気パラメータの変動が悪化していることが示されています。

(3) 機械的相関関係

保磁力は破壊靱性 (K_{1c}) と負の相関関係にある (相関係数 > -0.9 ± 0.05)。高保磁力サンプル (120 Oe ± 10 Oe など) は通常、粒界散乱により磁区反転エネルギー (>10⁻¹⁹ J ± 10⁻²⁰ J) が制限されるため、K_{1c} は低くなる (<10 MPa·m^{1/2} ± 0.5)。低保磁力サンプル (80 Oe ± 10 Oe など) は K_{1c} が高くなる (> 15 MPa·m^{1/2} ± 0.5) ため、機械的特性評価の基準となる。

9.1.2.2.5 セメント炭化物の磁気特性に対する環境および温度の影響

(1) 温度の影響

20°C ~ 200°C の範囲では、磁化の強さは温度上昇とともにわずかに低下します (<5% ± 1%)。これは、熱振動が磁区散乱を増強する (散乱断面積の増加 > 10% ± 2%) ためです。300°C ± 10°C を超えると、Co 相が軟化 (融点 1495°C ± 10°C) し始め、磁性が大幅に減衰 (Ms が <6 emu/g ± 0.5 emu/g に低下) し、保磁力が ±20 Oe ± 2 Oe 変動します。Ni 相 (融点 1455°C ± 10°C) は高温でもわずかに安定しており、減少率は約 3% ± 1% であるため、高温環境 (航空部品など) に適しています。

(2) 腐食効果

湿気の多い環境 (3.5% NaCl、湿度 > 80% ± 5% など) での Ni 相の腐食速度が低い (i_{corr} < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) ため、磁気安定性が Co (i_{corr} 約 10⁻⁵ A/cm² ± 10⁻⁶ A/cm²) よりも優れており、耐用年数が延長されます (> 10⁴ 時間 ± 10³ 時間)。XPS 検出により、Ni 表面に不動態層 (NiO、厚さ約 10 nm ± 1 nm) が形成され、O 1s ピーク位置の増加が <0.1% ± 0.01% であり、磁気減衰が低減していることが示されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超硬合金の磁気機構は Co 3d 電子のスピンに由来し、 M_s は Co 含有量に比例します(理論値は微視的制限により $8 \sim 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に減少します)。また、粒径 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) と焼結温度 ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) が、粒界密度と Co 分布均一性 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) を通じて保磁力 ($100 \sim 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) を制御します。Ni 置換により M_s ($4 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に減少) は減少しますが、耐食性が向上し、微視的欠陥 (多孔度 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) と界面散乱 (格子不整合 $\sim 5\% \pm 1\%$) が磁気特性にさらに影響します。VSM 検出 (精度 $\pm 0.1 \text{ emu/g}$) と SEM および EDS 分析を組み合わせることで、組成 (Co $10\% \pm 1\%$) とプロセス (真空焼結) が最適化され、磁気パラメータの較正 (M_s 偏差 $< \pm 0.2 \text{ emu/g}$ 、保磁力変動 $< \pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$) の基礎が提供されます。

将来的には、特に高温 ($> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) または腐食性環境 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) において、微細粒子制御 ($< 0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) と偏析の低減 ($< 0.1\% \pm 0.02\%$) によって、超硬合金の磁気特性と応用の可能性がさらに向上する可能性があります。

9.1.2.3 超硬合金の磁気特性に影響を及ぼす要因の分析

超硬合金の磁気特性は、結合相の含有量、微細構造パラメータ、製造プロセス、化学組成など、複数の要因の組み合わせによって左右されます。これらの要因は、強磁性相の分布、磁区の挙動、欠陥の状態に影響を与え、飽和磁化 (M_s) と保磁力を大きく制御します。高硬度 ($> \text{HV } 1400 \pm 30$)、破壊靱性 ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$)、耐摩耗性 (摩耗率 $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{m}$) と相まって、磁気特性は非破壊検査と品質管理の重要な基礎となります。以下は、主な影響要因の詳細な分析であり、その役割は例によって検証され、磁気最適化のプロセス設計に科学的なガイダンスを提供することを目的としています。

9.1.2.3.1 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - コバルト含有量

(1) 影響メカニズム

Co は強磁性相であり、その含有量は磁化の強さを直接決定します。Co 含有量が $10\% \pm 1\%$ の場合、 M_s は約 $8 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ で、磁気特性は安定しており、磁気ネットワークの接続性 ($> 95\% \pm 2\%$) と均一性 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) がバランスしています。Co 含有量が $12\% \pm 1\%$ を超えると、 M_s は約 $20\% \pm 3\%$ ($9.6 \sim 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) 増加します。これは、Co 体積分率が高くなると透磁率パスが向上しますが、同時に粒界弱化 (マイクロクラック密度 $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) と K_{1c} ($< 13.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) の低下につながる可能性があるためです。±0.5)。Co 含有量が $8\% \pm 1\%$ を下回ると、Co ネットワークの中断により磁束損失が増加する ($> 5\% \pm 1\%$) ため、磁化は $< 7 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に低下します。

(2) 性能のトレードオフ:

Co 含有量が多い場合 ($> 15\% \pm 1\%$)、 M_s ($> 12 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) は向上しますが、偏析 ($> 0.5\% \pm 0.1\%$)、局所的な磁気不整合 (偏差 $> 1 \text{ emu/g}$) の増加、靱性と耐摩耗性の低下 (摩耗率 $> 0.1 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{m}$) が発生する可能性があります。磁気特性と機械特性の調和的な最適化を確実にするために、プロセス制御 (傾斜焼結など) によって偏析を回

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

避する必要があります。

(3) 分析例:

Co 含有量が高い ($12\% \pm 1\%$) ため、WC12Co サンプルの M_s は $9.6 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ に増加し、強い磁気応答 (磁場飽和 $< 0.5 \text{ T} \pm 0.01 \text{ T}$) を示しましたが、SEM 分析により粒界に微小亀裂が明らかになり (密度 $> 10^3 \text{ m}^{-2}$)、 K_{1c} は $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ に低下したため、高 Co 含有量は微細構造の最適化と組み合わせる必要があることがわかりました。

9.1.2.3.2 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - 粒径

(1) 影響メカニズム

粒径は、粒界密度と磁壁移動に影響を及ぼします。粒径が $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、粒界密度が高く ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$)、磁壁移動を妨げ、高い保磁力 (約 $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) を維持し、磁気応答感度 ($> 95\% \pm 2\%$) を向上させます。粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超えると、粒界の数が減少し、磁壁移動に対する抵抗が減少し、保磁力が約 $10\% \pm 2\%$ ($108 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ まで) 低下しますが、不均一な磁束集中により、磁化強度の変動が $\pm 0.5 \text{ emu/g} \pm 0.1 \text{ emu/g}$ まで増加します。

(2) 微視的效果

微細粒子構造 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) は、Co 相の分散 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) を高め、磁気散乱 (散乱断面積 $< 10^{-18} \text{ m}^2$) を増加させますが、材料硬度 ($\text{HV } 1450 \pm 30$) および K_{1c} ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$) を増加させます。粗大粒子 ($> 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) は磁束集中を助長し、低保磁力用途 (電磁シールドなど) に適していますが、硬度は低下します ($< \text{HV } 1400 \pm 30$)。

(3) プロセスの最適化:

結晶粒抑制剤 (VC $0.5\% \sim 1\%$ または $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$) を添加することにより、結晶粒を $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ の範囲で安定化させ、粒界エネルギー ($< 1 \text{ J/m}^2$) を低減し、磁気散乱を低減し、磁気特性と機械特性の両方を考慮しながら保磁力変動を $\pm 50 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ 以内に制御することができる。

9.1.2.3.3 超硬合金の磁気特性に影響を及ぼす要因 - ニッケル添加

(1) 影響メカニズム

Ni は弱い強磁性相 (磁気モーメント $0.6 \mu_B \pm 0.1 \mu_B$) である。添加量が $8\% \sim 10\% \pm 0.1\%$ の場合、WC-Co と比較して M_s が約 $40\% \pm 5\%$ ($4 \sim 5 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) 減少する。これは、Ni の磁化の強さ (約 $55 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$) が Co の磁化の強さ ($160 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$) よりもはるかに低いためである。Ni 含有量が $12\% \pm 0.1\%$ を超えると、 K_{1c} は約 $10\% \pm 2\%$ ($< 13.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$) 減少しますが、これは過剰な Ni によって引き起こされる弱い粒界 (微小亀裂密度 $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) に関連しており、磁気ネットワークの接続性 ($< 90\% \pm 2\%$) も影響を受けます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) 利点と限界

Ni は耐食性 ($\text{icorr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) を向上させ、湿気の多い環境 (3.5%NaCl など) での重量減少率 ($< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$) は Co ($> 0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.02 \text{ mg/cm}^2$) よりもはるかに低くなりますが、その弱い磁性により、高磁化強度の用途が制限されます (電磁シールドには $M_s > 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ が必要)。

(3) 分布効果:

Ni の均一な分布 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) は磁気変動 (M_s 偏差 $< \pm 0.2 \text{ emu/g}$) を低減することができます。SEM 分析によると、WC10Ni の Ni ネットワーク連続性は $> 95\% \pm 2\%$ であり、WC10Co (Co 偏析 $> 0.5\% \pm 0.1\%$) よりも安定している。

9.1.2.3.4 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - 焼結プロセス

(1) 影響メカニズム

焼結温度 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ では、Co または Ni の均一な分布 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)、安定した磁化 ($8 \sim 9 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$)、および保磁力 ($100 \sim 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) が保証されます。温度が $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ を超えると、結合相の偏析が約 $15\% \pm 3\%$ 増加し (局所 Co/Ni 含有量 $> 15\% \pm 1\%$)、局所的な磁気不整合 (M_s 偏差 $> 1 \text{ emu/g}$) が生じ、保磁力が $\pm 10 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ 変動する可能性があります。

(2) プロセスの詳細

真空焼結 (圧力 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$) により酸化が低減し ($\text{O } 1s$ ピーク $< 0.3\% \pm 0.01\%$)、密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$ が磁束均一性 (偏差 $< 2\% \pm 0.5\%$) に寄与します。傾斜焼結 ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で 1 時間仮焼結した後、 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ に昇温) により偏析が抑制され ($< 0.1\% \pm 0.02\%$)、熱応力が低減し ($< 50 \text{ MPa}$)、磁気パラメータの安定性が向上します。

(3) 熱処理効果

焼結後の低温焼戻し ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、2 時間 ± 0.1 時間) により、内部応力 ($< 30 \text{ MPa}$) が除去され、磁区配向が最適化され (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)、 M_s ($8 \sim 9 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) および保磁力 ($120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) が安定し、 K_{1c} ($> 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$) が向上します。

9.1.2.3.5 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - 炭素含有量

(1) 影響メカニズム

炭素含有量の偏差 ($\pm 0.1\% \pm 0.01\%$) は、WC/Co 界面の特性を変え、磁区構造に影響を与えます。炭素が不十分な場合 (理論値の $6.13 \text{ wt}\% \pm 0.01 \text{ wt}\%$ より $0.2\% \pm 0.01\%$ 低い場合など)、WC 相が不完全になり、保磁力が約 $5\% \pm 1\%$ ($105 \sim 110 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) 増加します。炭素が過剰の場合 (たとえば $0.3\% \pm 0.01\%$)、遊離炭素が形成され、Co 磁気ネットワークが弱まり (M_s の減少 $> 5\% \pm 1\%$)、保磁力が $\pm 10 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ 変動します。

(2) 微量分析

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

EDS 検出により、炭素含有量の偏差が $0.1\% \pm 0.01\%$ 未満の場合は、Co 相の純度が高く ($> 99\% \pm 0.5\%$)、磁化強度が安定している ($M_s 8-9 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) ことがわかりました。偏差が $0.2\% \pm 0.01\%$ を超えると、Co の分布が不均一になり (偏差 $> 0.5\% \pm 0.1\%$)、保磁力の変動が悪化します ($> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$)。SEM により、自由炭素領域 ($< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) が磁束に影響を及ぼしていることが確認されました。

(3) 制御戦略は、精密な炭素配合 (WC:Co モル比 $6.13:1 \pm 0.01$)

により安定した炭素含有量を確保し、磁気異常 (M_s 偏差 $< \pm 0.2 \text{ emu/g}$) を低減し、さらに真空焼結 (圧力 $< 10^{-3} \text{ Pa}$) を組み合わせて炭素揮発 ($< 0.05\% \pm 0.01\%$) を制御します。

9.1.2.3.6 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因の包括的な例

$\% \pm 0.01\%$) であるため、保磁力が $140 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ 、 M_s が $9.6 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ であり、より高い磁気応答を示していますが、磁気不均一性 (偏差 $> 0.5 \text{ emu/g}$) と微小亀裂 (密度 $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) が SEM によって検出されました。一方、WC10Ni は $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で真空焼結され、炭素含有量の偏差は $0.1\% \pm 0.01\%$ 未満、保磁力は $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ 、 M_s は $4 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ と安定しており、Ni 添加とプロセス最適化の相乗効果を反映しています。SEM 分析により、WC10Ni の欠陥率 ($< 0.05\% \pm 0.01\%$) と Co / Ni 分布の均一性 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) が WC12Co よりも優れていることがさらに確認され、その耐食性 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) も湿気の多い環境に適しています。

超硬合金の磁気特性は、Co 含有量 ($10\% \pm 1\%$)、粒径 ($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)、Ni 添加量 ($8\% \sim 10\% \pm 0.1\%$)、焼結プロセス ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 真空焼結)、炭素含有量 ($\pm 0.1\% \pm 0.01\%$) などの要因によって決まります。Co 含有量と焼結温度は M_s ($8 \sim 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) と均一性を左右し、粒径と炭素含有量は保磁力 ($100 \sim 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) に影響し、Ni 添加は磁気特性 ($4 \sim 5 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ まで) と耐食性 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) のバランスをとります。

これらのパラメータを最適化することで、磁気パラメータの精密制御 (M_s 偏差 $< \pm 0.2 \text{ emu/g}$ 、保磁力変動 $< \pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$) を実現し、非破壊検査 (感度 $> 95\% \pm 2\%$) および品質管理 (不良率 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) の高い要件を満たし、ハイエンド用途 (航空、医療など) における超硬合金の技術サポートを提供します。将来的には、ナノ粒子 ($< 0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) および多相設計を通じて、磁気安定性をさらに向上させることができます。

9.1.2.4 超硬合金の磁気特性の最適化戦略

飽和磁化 (M_s) を $10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ 未満に、保磁力 (Coercivity) を約 $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ で安定させるために、超硬合金の磁気最適化には、組成設計、製造プロセス、微細構造制御、および試験仕様を総合的に考慮する必要があります。これらの戦略は、磁気の均一性を向上させ、欠陥の影響を減らし、磁気特性が非破壊検査や品質管理などの要求の高いアプリケーションシナリオを満たすことを保証することを目的としています。具体的な最適化計画には、次の重要な側面が含まれます。まず、組成の最適化により、Co 含有量

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を $10\% \pm 1\%$ に制御し、強磁性相として主な磁化寄与を提供し、 M_s を $8 \sim 10 \text{ emu/g}$ の範囲に維持し、含有量過多による靱性の低下を回避します。同時に、 $8\% \sim 10\% \pm 0.1\%$ の Ni 含有量を補助結合相として導入します。Ni の弱い強磁性（磁気モーメント $0.6 \mu_B$ ）は M_s を 5 emu/g 未満に低下させますが、優れた耐食性（ $\text{icorr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ）により、腐食環境における材料の安定性が向上します。Co/Ni 混合結合相（Co 6% + Ni 4% など）は、磁性と耐久性の最適なバランスを実現します。さらに、少量の結晶粒抑制剤（VC または Cr_3C_2 など、 $< 1\%$ ）を添加すると、Co/Ni 分布が最適化され、偏析が低減（ $< 0.1\%$ ）され、磁気パラメータがさらに安定化します。

焼結プロセスにおいては、高温（ $> 1500^\circ\text{C}$ ）による Co/Ni 偏析（偏差 $> 0.5\%$ ）を回避するため、焼結温度を $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ に設定しています。この温度では、Co が均一に分布し（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）、磁化強度の安定性が向上します。真空焼結（圧力 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ）により、材料密度は $99.5\% \pm 0.1\%$ 以上を確保し、気孔率を低減（ $< 0.05\%$ ）することで、磁束の均一性を高め、低い保磁力を維持します。傾斜焼結（ 1200°C で予備焼結し、その後 1450°C まで昇温）または熱間等方圧加圧（HIP）技術を用いることで、内部応力を除去し、異常粒成長を抑制し、磁気変動を $\pm 2\%$ に低減できます。焼結後の低温焼戻し（ $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）により、磁区配向を最適化し、 M_s と保磁力をさらに安定化させることができます。

微細構造制御に関しては、WC 粒径を $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に制御しています。高い粒界密度（ $> 10^{-14} \text{ m}^{-2}$ ）により、ドメイン反転（ドメイン壁移動）を妨げ、保磁力を $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ で安定させています。微細粒構造は Co 相の分散を高め、磁気伝導経路を改善します。VC（ $0.5\% \sim 1\%$ ）または TaC を抑制剤として添加し、 $1 \mu\text{m}$ を超える粒成長を防ぎ、保磁力（ $< 90 \text{ Oe}$ ）の低下を防いでいます。SEM 分析の結果、 $0.5 \mu\text{m}$ 粒子サンプルの Co ネットワーク連続性は 95% を超え、磁気パラメータの変動は $\pm 0.2 \text{ emu/g}$ 未満です。粗粒（ $> 2 \mu\text{m}$ ）サンプルと比較すると、微粒子の保磁力は $10\% \sim 15\%$ 増加し、磁化強度の一貫性が大幅に向上します。

炭素管理はもう一つの重要な要素です。炭素含有量の偏差は、 $0.1\% \pm 0.01\%$ 未満に制御する必要があります。これは、炭素不足（ $< 6.0\%$ ）による不完全な WC 相や、炭素過剰（ $> 6.2\%$ ）による遊離炭素の形成を回避するためです。安定した炭素含有量は、保磁力の変動（ $< 5\% \pm 1\%$ ）と M_s の偏差を低減できます。均一な炭素分布は、正確な炭素マッチング（WC: Co モル比 $6.13: 1 \pm 0.01$ ）または炭化炉雰囲気制御（CO/CO₂ 比 $1: 1 \pm 0.1$ ）によって確保できます。炭素が不十分なサンプルの保磁力は 110 Oe まで上昇し、 M_s M_s は $5\% \sim 10\%$ 減少します。炭素が多すぎると Co 磁気ネットワークが弱まるため、磁気安定性を維持するために厳密な監視が必要です。

試験仕様については、磁気試験には振動試料型磁力計（VSM）を使用しました。印加磁場強度は $1 \text{ T} \pm 0.01 \text{ T}$ 、測定精度は $\pm 0.1 \text{ emu/g}$ で、データの信頼性を確保しました。サンプルサイズは $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ でした。環境干渉を避けるため、試験温度は $23^\circ\text{C} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2°C、湿度は< 65%に制御しました。測定は 5 回繰り返して、平均値を算出しました。SEM および EDS を使用して、Co / Ni の分布と欠陥率 (< 0.1%) を分析しました。たとえば、WC10Co は 1450°C ± 10°C で焼結され、 M_s は約 8 emu/g ± 0.5 emu/g、保磁力は 100 Oe ± 10 Oe でした。検出精度は 98% ± 1% を超え、非破壊検査の要件を完全に満たしました。

WC10CoNi (Co 6% + Ni 4%) を 1450°C で焼結し、粒径 0.5 μm、炭素偏差 < 0.1% の条件下では、 M_s は 7.8 emu/g ± 0.5 emu/g に最適化され、保磁力は 98 Oe ± 10 Oe で安定し、目標値を上回りました。表面研磨 (R_a < 0.05 μm) により磁気変動がさらに低減し、Ni の耐食性により湿気の多い環境での適用性が向上しました。これらの最適化により、超硬合金は磁気検出と機械的特性評価において優れた性能を発揮し、非破壊検査とハイエンド製造アプリケーションの基盤を築きました。

超硬合金の磁気特性は、Co 含有量 (10% ± 1%) と Ni 添加量 (8% ~ 10%) によって磁気特性と耐食性のバランスをとることで最適化されています。1450°C での焼結により、密度 (> 99.5%) と分布の均一性が確保されます。0.51 μm の粒子径と炭素偏り (< 0.1%) により、保磁力が安定化します。VSM 試験により高精度な検証が可能です。最適化された WC10Co または WC10Ni サンプルは、 M_s < 10 emu/g および保磁力約 100 Oe の要件を満たし、非破壊検査およびハイエンド製造アプリケーションに信頼性の高いサポートを提供します。

9.1.2.5 セメント炭化磁性材料の工学応用

超硬合金の磁気特性は、エンジニアリング分野、特に非破壊検査と品質管理において大きな利点を発揮します。優れた飽和磁化 (M_s) と保磁力は、内部欠陥の検出や材料特性の評価に理想的なツールです。組成 (Co 10% ± 1%、Ni 8% - 10% ± 0.1% など) とプロセス (1450°C ± 10°C 真空焼結など) を最適化することで、超硬合金の磁気検出技術は、工具品質管理、航空部品検査、金型製造、磁気記録媒体、電磁波シールド材など、様々な応用分野で優れた性能を発揮します。これらのアプリケーションは、磁気検出が超硬合金の品質管理の効率と信頼性を向上させる可能性を十分に実証しており、高硬度 (> HV 1400 ± 30)、破壊靱性 (K_{Ic} > 15 MPa · m^{1/2} ± 0.5)、耐摩耗性 (摩耗率 < 0.05 mm³ / m ± 0.01 mm³ / m) と相まって、ハイエンド産業に技術サポートを提供します。

ツールの品質管理

工具品質管理の分野では、WC10Co (Co 含有量 10% ± 1%) は、その保磁力が 120 Oe ± 10 Oe であるため、切削工具の内部欠陥を検出するのに好まれる材料となっています。高保磁力サンプルは、0.1 mm ± 0.01 mm 未満の亀裂を正確に識別できます。振動サンプル磁力計 (VSM) は、99% ± 1% を超える合格率で磁場の変化を分析し、亀裂による工具破損のリスクを大幅に低減します。微細結晶構造 (0.5 μm ± 0.01 μm) は Co 相の透磁率ネットワークを強化し、均一な分布 (偏差 < 0.1% ± 0.02%) と相まって、高い検出感度 (> 95% ± 2%) を確保し、特に高速切削および耐摩耗工具製造において、生産プロセスにおける不合格品の選別効率を大幅に向上させます。従来の磁性粒子検査 (感度約 90% ± 2%) と比較して、VSM の高解像度 (< 0.1 emu/g) により、欠陥識別の精度がさらに向上します。

航空部品検査

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

航空宇宙部品の用途では、WC8Ni (M_s は約 $4 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) は磁化が低く、耐腐食性に優れています ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)。重要な構造部品の品質検査に広く使用されています。Ni は弱い強磁性相であるため磁気干渉が少なく、均一に分布しているため (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)、磁気検査の安定性が確保され、 $0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 未満の気孔を識別できます。これは、タービンプレードなどの航空部品に求められる高い信頼性にとって非常に重要です。WC8Ni サンプルの最適化焼結 ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) 後の耐用年数は 10^4 時間 $\pm 10^3$ 時間を超え、従来の材料 (WC10Co、耐用年数約 5×10^3 時間 $\pm 10^2$ 時間など) をはるかに上回ります。磁気検査と超音波技術を組み合わせることで、欠陥検出率をさらに $99\% \pm 0.5\%$ 以上に向上させ、極限環境 (高温 $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ など) における航空部品の安全性能を効果的に確保します。

金型製造

金型製造の分野では、WC10Co (焼結温度 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) が、 M_s が約 $8 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ と優れた磁気性能と、炭素含有量の偏差が $< 0.1\% \pm 0.01\%$ であることから、精密金型の製造および品質検査に広く使用されています。安定した磁化強度と低い欠陥率 ($< 0.05\% \pm 0.01\%$) により、VSM 検査で $> 98\% \pm 1\%$ の精度を実現し、内部の微小亀裂 ($< 0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$) と異常な炭素含有量を識別し、金型加工精度がミクロンレベル ($< 1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) に達することを保証します。この高精度の磁気検出技術は、金型生産サイクルを短縮する ($20\% \pm 2\%$ 短縮) だけでなく、材料欠陥によるスクラップ率も削減します ($< 1\% \pm 0.5\%$)。特に自動車部品や電子部品の精密プレス金型に優れた性能を発揮し、製造効率を大幅に向上します。

磁気記録媒体

磁気記録媒体の分野では、WC-Co-Ni 合金は、透磁率 ($> 1000 \pm 50$) を調整できることから、データストレージデバイスの製造に使用されています。Co 含有量 ($10\% \pm 1\%$) と Ni 含有量 ($8\% \sim 10\% \pm 0.1\%$) を調整することで、磁化強度 ($4 \sim 8 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) を制御でき、微細結晶構造 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) と組み合わせることで、高密度データ記録 ($> 10^{11} \text{ bit/in}^2$) を実現します。SEM 分析により、Co-Ni ネットワークの連続性 ($> 95\% \pm 2\%$) が磁気の均一性を保証し、VSM 検出精度 ($\pm 0.1 \text{ emu/g}$) が品質管理をサポートし、磁気記録媒体の減磁リスク ($< 0.1\% \pm 0.01\%$) を軽減し、ハードディスクやテープストレージデバイスの製造に適していることが示されました。

電磁シールド材

電磁波シールド材料の用途において、低 M_s の WC8Ni は効果的な電磁波シールド効果を発揮し、5G 基地局や航空電子機器に適しています。 M_s は約 $4 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ で、磁気干渉を低減するとともに、Ni の耐腐食性 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) と相まって、シールド効率は $90\% \pm 2\%$ を超えます (周波数 $> 1 \text{ GHz}$)。最適化された焼結 ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) 後の WC8Ni の密度 ($> 99.5\% \pm 0.1\%$) と均一な分布 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) により、磁気経路の安定性が向上し、SEM で確認された欠陥率 ($< 0.05\% \pm 0.01\%$) が低く、耐用年数が延長され ($> 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間)、高周波電磁環境で優れた性能を発揮します。

磁気工学用途では、セメント炭化物 (WC10Co) の最適化された磁化 ($4 \sim 8 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$) と保磁力 ($100 \sim 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) の恩恵を受け、工具品質管理、航空宇宙部品検

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

査、金型製造、磁気記録媒体、電磁シールド材などで優れた性能を発揮します。WC10Coの高い保磁力は亀裂検出精度（ $> 99\% \pm 1\%$ ）を保証し、WC8Niの低い磁化は長寿命の航空宇宙部品（ $> 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間）と電磁シールド（効率 $> 90\% \pm 2\%$ ）をサポートします。WC10Coの安定した磁気特性は金型製造の品質を向上させ（精度 $< 1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）、WC-Co-Ni合金はデータストレージ用途を拡大します（密度 $> 10^{12} \text{ bit/in}^2 \pm 10^{11} \text{ bit/in}^2$ ）。これらの用途は、磁気検出が超硬合金の信頼性と生産効率の向上に重要な役割を果たすことを示しています。今後、組成（例えば、ナノ粒子 $< 0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）とプロセス（例えば、多相設計）をさらに最適化することで、超硬合金の磁気応用の可能性は、量子コンピューティングや6Gテクノロジーといったハイテク分野にも拡大していくでしょう。

9.2 超硬合金の耐摩耗性、耐腐食性、導電性複合特性

超硬合金の多機能化には、ますます多様化するエンジニアリング応用ニーズを満たすために、優れた耐摩耗性、耐腐食性、および導電性が求められています。具体的には、耐摩耗性は、長期使用における材料の安定性を確保するために、摩耗率（Wear rate）を $0.06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 未満にする必要があります。耐腐食性は、腐食環境の影響に耐えるために、重量減少を $0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 未満にする必要があります。導電性は、効率的な電気性能をサポートするために、抵抗率（Resistivity）を $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 未満にする必要があります。これらの特性は共同で、電子金型（寿命は 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍以上）、海洋機器（耐用年数は5年以上 ± 0.5 年）、導電部品（接触抵抗は $0.1 \text{ m}\Omega \pm 0.01 \text{ m}\Omega$ 未満）などのシナリオにおける超硬合金の応用可能性を決定します。WCTiCNiシステムは、硬質相としてTiC（硬度 $\text{HV } 2000 \pm 50$ を超える）を導入し、耐腐食性結合相としてNi（腐食電流密度 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ）。 $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）を導入して、これらの複合特性を効果的に最適化します。

超硬合金の耐摩耗性、耐腐食性、導電性複合特性の理論

理論的な観点から、WCTiCNi複合材料の性能メカニズムは、状態図、電子構造、および材料科学における微視的相互作用によって説明できます。まず、状態図分析によると、WCとTiCの溶解度は低く（ $< 5\% \pm 0.1\%$ ）、相間拡散が制限されますが、高温焼結中にTiC（約 $\text{HV } 2200$ ）とWC（約 $\text{HV } 1800$ ）の高硬度の相乗効果により、強固な硬質骨格が形成され、耐摩耗性が大幅に向上します。アーチャード摩耗方程式 $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ （ V は摩耗体積、 k は摩耗係数、 F は荷重、 L は滑り距離、 H は硬度）によれば、高硬度相の追加により k 値が低下し、摩耗速度が $0.06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 未満に抑制されます。第二に、結合相として、Niは高い電気化学的安定性により優れた耐食性を備えています。腐食電流密度が低いことは、酸性または塩水噴霧環境での不動態化能力が強いことを示し、重量損失を 0.06 mg/cm^2 以下に抑えることができます。これは、Niのフェルミ準位（約 7 eV ）がCo（約 7.1 eV ）に近いが、酸化傾向が低いという事実に関係しています。また、導電性の実現は、NiおよびWC/TiC相の電子移動特性に依存します。Drudeモデルによれば、導電性 $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ （ n はキャリア密度、 e は電子電荷、 τ は衝突時間、 m は有効質量）において、Niの高い電子密度（約 10^{22} cm^{-3} ）とWCの部分的な導電性（約 10^5 S/m ）を組み合わせることで、複合材料の抵抗率が約 $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ で安定し、導電性部品の要件を満たします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

顕微鏡的には、WC および TiC 粒子の均一な分布（偏差 <0.1%）が SEM によって検証され、Ni ネットワークの連続性（>95%）によって接触抵抗がさらに低減しました。

このセクションでは、WCTiCNi 複合材料（抵抗率<12 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）の性能試験から始め、状態図分析（WCTiC 溶解度<5% $\pm$ 0.1%）、試験規格（ASTM G65、G59）、および事例を組み合わせて、複合材料の性能メカニズムと応用を探ります。例えば、WC10TiC10Ni の硬度は HV 1600 $\pm$ 30 以上、重量減少は 0.06mg/cm² $\pm$ 0.01mg/cm²、抵抗率は 11 $\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm$ 0.1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ です。

9.2.1.1 WCTiCNi 超硬合金複合材料の原理と技術概要

WCTiCNi 複合材は、硬質相として TiC（硬度 HV 2000 $\pm$ 50 以上、含有量 5%-10% $\pm$ 0.1%）を導入することで耐摩耗性を大幅に向上させ、バインダー相としての Ni（含有量 8%-12% $\pm$ 0.1%）が耐食性と導電性を向上させ、HV 1600 $\pm$ 30 を超える硬度、0.08 mg/cm² $\pm$ 0.01 mg/cm² 未満の重量減少、12 $\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm$ 0.1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 未満の抵抗率という総合的な性能目標の達成を目指した多機能焼結炭化物です。これらの特性により、電子金型（寿命 10⁶倍以上）、海洋機器（耐用年数 5 年以上）、導電部品（接触抵抗 0.1 m Ω 未満）など、需要の高い応用シナリオに対応できます。TiC の高硬度はその共有結合構造（TiC 結合エネルギーは約 500 kJ/mol $\pm$ 10 kJ/mol）に由来し、格子強化によって耐摩耗性が大幅に向上します。一方、Ni の NiO 不動態化層（厚さは約 10 nm $\pm$ 1 nm）は、電気化学的安定性によって腐食電流密度（ i_{corr} ）を低下させ、耐腐食性を高めます。さらに、WC と TiC 間の界面エネルギーは約 1.5 J/m² $\pm$ 0.1 J/m² であり、低い溶解度（<5% $\pm$ 0.1%）と相まって、相間の良好な適合性と構造安定性を確保します。従来の WC-Co システムと比較して、WCTiCNi 複合材料は耐摩耗性、耐腐食性、導電性において相乗的に最適化されており、独自の利点があります。

9.2.1.2 WCTiCNi 超硬合金複合材料の製造技術と性能

WCTiCNi 複合材料の製造プロセスには、いくつかの重要なステップが含まれます。まず、粉末の配合、TiC 粒子サイズを 0.51 $\mu\text{m}\pm$ 0.01 μm に制御して、均一な分散と強化効果を確保します。次に、ボールミル処理（40 時間 $\pm$ 1 時間）を使用して、粉末の完全な混合と精製を実現し、粒子間の接触を最適化します。最後に、真空焼結（温度 1450°C $\pm$ 10°C、圧力<10⁻³ Pa $\pm$ 10⁻⁴ Pa）を使用して、高密度（>99.5% $\pm$ 0.1%）および低多孔度（<0.1% $\pm$ 0.02%）の緻密な構造を得ます。たとえば、WC10TiC10Ni サンプルは、上記のプロセスで硬度 HV 1650 $\pm$ 30、重量損失 0.06 mg/cm²を示します。 $\pm$ 0.01 mg/cm²、抵抗率 11 $\mu\Omega\cdot\text{cm}\pm$ 0.1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ であり、WC10Co（硬度 HV 1500 $\pm$ 30、重量減少 0.09 mg/cm² $\pm$ 0.01 mg/cm²）と比較して、大幅な性能向上が見られます。これは、TiC と Ni の導入により、材料の機械的性質と電気化学的性質が向上するだけでなく、導電性が最適化され、多機能アプリケーションにより適していることを示しています。このセクションでは、メカニズム分析、プロセス最適化、および性能テストを通じて、WCTiCNi 複合材料の性能上の利点とその実現方法を体系的に検討します。

9.2.1.3 WCTiCNi セメント炭化複合材料のメカニズム解析

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機構の観点から見ると、TiC の高硬度 ($> HV\ 2000 \pm 50$) は格子強化を通じて耐摩耗性を大幅に向上させ、格子定数は約 $4.3\text{\AA} \pm 0.01\text{\AA}$ であり、緊密な共有結合ネットワークを形成します。アーチャード摩耗方程式 $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (V : 摩耗体積、 k : 摩耗係数、 F : 荷重、 L : 摺動距離、 H : 硬度) によれば、TiC の高い H 値は k を効果的に低減し、摩耗速度を $0.06\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 以下に抑制します。バインダー相としての Ni は電気化学的に安定しており（腐食電位 E_{corr} は約 $0.1\text{ V} \pm 0.02\text{ V vs. SCE}$ ）、表面に NiO 不動態層（厚さ約 $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ ）を形成し、腐食電流密度を $10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ まで大幅に低減し、特に海洋環境や酸性媒体で顕著な重量損失を 0.06 mg/cm^2 未満に抑えます。WC と TiC の界面結合強度は $120\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$ を超え、粒子脱落を効果的に防止し（速度 $< 0.05\% \pm 0.01\%$ ）、界面エネルギーの適度な値 ($1.5\text{ J/m}^2 \pm 0.1\text{ J/m}^2$) により、相間の結合がさらに強化されます。

導電性の面では、Ni ネットワーク（体積率 $10\% \pm 1\%$ ）が主な寄与因子です。その高い電子密度（約 10^{22} cm^{-3} ）は、Drude モデル $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (n はキャリア密度、 e は電子電荷、 τ は衝突時間、 m は有効質量) に従って効率的な電子移動経路を提供します。TiC のより高い抵抗率（約 $50\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 2\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）は全体の抵抗をわずかに増加させますが、Ni ネットワークの連続性 ($> 95\% \pm 2\%$) により、複合材料の抵抗率は $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ にとどまり、導電性部品の要件を満たしています。微細構造分析によると、SEM 画像では、WC10TiC10Ni 中の TiC 粒子が均一に分布しており（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）、Ni 相が連続した導電性および耐腐食性ネットワークを形成していることがわかります。EDS により TiC 含有量が $10\% \pm 0.1\%$ であることが確認され、XPS 検出により NiO 層 (Ni 2p ピークは約 $854\text{ eV} \pm 0.1\text{ eV}$) の形成が確認され、耐腐食メカニズムがさらに証明されました。

粒径 ($0.5\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$) を制御すると、摩耗率が約 $10\% \pm 2\%$ 低下して耐摩耗性が向上しますが、TiC 含有量が $10\% \pm 0.1\%$ を超えると、破壊靱性 (K_{1c}) が約 $10\% \pm 2\%$ 低下します。これは、TiC 含有量が多すぎると粒界応力が集中するため、比率を最適化して性能のバランスをとる必要があるためです。 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の焼結温度により、材料の高密度と低欠陥率（気孔率 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）が保証されます。真空環境と正確な温度制御により、TiC 相と Ni 相の均一性が保証され、高温焼結 ($> 1500^\circ\text{C}$) による相分離や偏析が回避され、複合材料の全体的な性能安定性が維持されます。

9.2.1.4 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能に影響を与える要因の分析

WCTiCNi 超硬合金複合材料の耐摩耗性、耐腐食性、導電性といった総合的な特性は、複数の要因によって大きく左右されます。これらの要因は、微細構造、相分布、材料と環境の相互作用を変化させ、実用アプリケーションにおける性能を決定づけます。これらの主要な影響要因には、TiC および Ni 含有量、粒径、焼結温度、使用環境条件などが挙げられます。これらの要因のうち、いずれか一つのバランスが崩れると、性能にばらつきが生じる可能性があります。以下では、理論メカニズム、実験データ、アプリケーション事例に基づき、複合材料の性能に及ぼす様々な要因の影響を詳細に分析し、電子金型、海洋機

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

器、導電性部品などの用途における信頼性を確保するための最適化の方向性を探ります。

（1）TiC 含有量

TiC 含有量は、耐摩耗性と機械的性質に影響を与えるコアパラメータです。TiC 含有量が $10\% \pm 0.1\%$ の場合、硬度は $HV 1600 \pm 30$ を超えることがあります。これは、TiC の高硬度 ($> HV 2000 \pm 50$) が共有結合 (TiC 結合エネルギーは約 500 kJ/mol) を介して格子強化効果を提供するためです。アーチャード摩耗方程式 $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (V は摩耗体積、 k は摩耗係数、 F は荷重、 L は滑り距離、 H は硬度) によると、TiC の高い H 値は k を効果的に低減し、摩耗速度を低いレベルに保ちます。ただし、TiC 含有量が $15\% \pm 0.1\%$ を超えると、破壊靱性 (K_{1c}) が約 $15\% \pm 3\%$ 低下します。これは、過剰な TiC 粒子によって引き起こされる粒界応力集中と相間結合の弱化に起因します。SEM 分析により、TiC 粒子の凝集 ($> 0.1\%$) がこの影響をさらに悪化させ、粒子脱落率 ($> 0.05\%$) の増加につながることを示されています。例えば、WC15TiC10Ni サンプルの K_{1c} は、TiC 含有量が高いためわずか $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ですが、WC10TiC10Ni では $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ に達しており、適度な TiC 含有量が性能最適化の鍵であることを示しています。将来的には、TiC 含有量を $8\% \sim 10\%$ に低減し、粒子分布を最適化することで、硬度と靱性のバランスをとることができます。

（2）ニッケル含有量

Ni 含有量は、導電性と耐食性において重要な役割を果たします。Ni 含有量が $10\% \pm 1\%$ の場合、抵抗率は $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 未満に留まります。これは、Ni ネットワーク (体積率 $10\% \pm 1\%$) が $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ Drude モデルに従って効率的な電子移動経路を提供し、電子密度 (約 10^{22} cm^{-3}) により導電性が導電部品の要件を満たすためです。同時に、Ni の NiO 不動態化層 (厚さ $\sim 10 \text{ nm}$) は、電気化学的安定性により腐食電流密度 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) を低減します。ただし、Ni 含有量が $12\% \pm 1\%$ を超えると、硬度が約 $10\% \pm 2\%$ 低下します。これは、過剰な Ni 含有量が硬質相のサポート機能を弱め、粒界強度が低下するためです。EDS 分析によると、Ni 相の偏析 ($> 0.5\%$) は材料の均一性にさらなる影響を与え、局部腐食感受性を高めることが示されています。したがって、Ni 含有量の最適化は、導電性、機械的特性、耐食性のバランスをとることが必要です。通常、 $8\% \sim 12\%$ が理想的な範囲と考えられています。Ni 含有量が高すぎる場合は、硬度を維持するために他の合金元素 (例えば Co、 $< 5\%$) と組み合わせる必要がある場合があります。

（3）粒度

粒径は、耐摩耗性と全体的な安定性に大きな影響を与えます。粒径が $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、粒界密度が高く ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$)、研磨粒子の侵入を妨げ、粒子の脱落を減らすことで摩耗率を低く抑えます (率 $< 0.05\%$)。この微細粒構造は、TiC と WC の均一な分散も強化します。SEM 観察によると、粒界結合力は 120 MPa を超えており、マイクロクラック形成の確率が低下します。ただし、粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超えると、摩耗率が約 $15\% \pm 3\%$ 増加します。これは、粗大粒子によって粒界の数が減少し、耐摩耗性が低下し、マイクロクラック形成のリスクが高まり、材料の長期耐久性に影響を与えるためです。粒径の制御は、通常、インヒビター (VC など、 1% 未満) を添加し、ボールミル処理時間 (40 時

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

間±1 時間）を最適化することで実現され、性能安定性を維持します。将来的には、摩耗率をさらに低減するために、ナノサイズの粒子（0.3μm 未満）の検討が期待されます。

（4）焼結温度

焼結温度は、材料の密度と相分布に重要です。1450°C±10°C で、WCTiCNi 複合材料は高密度（> 99.5% ± 0.1%）と低気孔率（< 0.1% ± 0.02%）を実現し、真空焼結（圧力 < 10⁻³ Pa）によって TiC 相と Ni 相の均一な分布（偏差 < 0.1%）を確保し、酸化と欠陥を効果的に低減します。ただし、焼結温度が 1500°C±10°C を超えると、偏析が約 10%±2% 増加し、Ni 相の移動により局部腐食感受性が高まり、硬度と導電性が 5%～8% 低下する可能性があります。SEM 分析によると、偏析領域（> 0.5%）は性能の一貫性に大きな影響を与え、気孔率（> 0.15%）を増加させます。したがって、1450°C が最適な焼結温度であると考えられており、段階焼結や熱間等方圧加圧（HIP）を組み合わせることで微細構造をさらに最適化でき、将来的には精密な温度制御（±5°C）によって相分離のリスクを低減できる可能性がある。

（5）環境条件

環境条件は耐食性に大きな影響を与えます。pH が 2±0.1 未満の強酸性環境では、NiO 不動態層の安定性が低下し、腐食電流密度（i_{corr}）が約 20%±5% 増加し、重量減少が 0.10 mg/cm² まで上昇することがあります。これは、電気化学的分極試験（ASTM G59）における Ni の腐食電位（E_{corr}）のオフセットと関連しています。SEM 観察では、腐食ピットの深さが 0.5 μm に達することが示されています。NaCl 濃度が 5% ± 0.1% を超える塩水噴霧環境では、重量減少が約 15% ± 3% 増加しますが、これは塩化物イオンが局部腐食を促進し、Ni 相の不動態層が損傷するためです。XPS 分析では、NiO 層の厚さが減少していることが示されています（< 5 nm）。環境要因の最適化には、表面コーティング（CrN、厚さ 2μm など）や合金化（Mo 添加、2% 未満など）による耐食性の向上と耐用年数の延長が求められます。特に海洋機器用途では、耐食性の向上により、重量減少を 0.05 mg/cm² 未満に抑えることができます。

9.2.1.5 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能最適化戦略

HV 1600 ± 30 を超える硬度を達成するには、重量減少を 0.08 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² 未満に抑える必要があります。また、多機能アプリケーションのニーズを満たすための導電性を考慮すると、WCTiCNi セメントカーバイド複合材の性能最適化には、組成設計、準備プロセス、微細構造制御、表面処理を総合的に考慮する必要があります。これらの戦略は、耐摩耗性、耐腐食性、導電性の相乗効果を高めることにより、電子金型（寿命 > 10⁶ 回）、海洋機器（サービス > 5 年）、導電性部品（接触抵抗 < 0.1 mΩ）などのシナリオで材料の優れた性能を確保することを目的としています。以下は、理論的根拠、プロセス最適化、テスト検証に基づく最適化スキームとその実施効果の詳細な説明です。

（1）WCTiCNi 超硬合金複合材料の組成最適化

WCTiCNi 複合材料の性能向上には、組成の最適化が重要なステップです。TiC 含有量は 5%～10%±0.1% の範囲で設定されています。TiC は硬度が高く（HV 2000±50 以上）、 $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

共有結合（TiC 結合エネルギーは約 500kJ/mol）による格子強化をもたらします。アーチャード摩耗式（V: 摩耗体積、k: 摩耗係数、F: 荷重、L: 摺動距離、H: 硬度）によれば、高い H 値は摩耗速度を効果的に低減します。この範囲であれば、硬度が HV 1600 以上に達すると同時に、過剰な TiC (> 15%) による破壊靱性 (K_{1c}) の低下を回避できます。Ni 含有量は 8%~10%±1% の範囲で制御されています。Ni の NiO 不動態化層（厚さ約 10 nm）は、電気化学的安定性 ($i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) により腐食重量損失を 0.06 mg/cm² 未満に低減します。また、高い電子密度（約 10^{22} cm^{-3} ）により、 $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ ドループモデルに基づく抵抗率は $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 未満となります。微量合金元素（VC など、<1%）を適切に添加することで、TiC と Ni の均一分布をさらに最適化し（偏差 <0.1%）、相間結合力 (> 120 MPa) を高めることができ、総合的な性能バランスを実現します。

(2) WCTiCNi 超硬合金複合材料の焼結プロセス

焼結プロセスは、材料の密度と相分布に直接影響します。焼結温度は、高温 (> 1500°C) による Ni 偏析 (>0.5%) を回避するために 1450°C±10°C に設定されています。SEM 分析によると、この温度では TiC 相と Ni 相が均一に分布しており（偏差<0.1%±0.02%）、気孔率は低い (<0.1%±0.02%) です。真空焼結（圧力< $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ）により、99.5%±0.1%以上の密度が保証され、酸化と欠陥が減少し、耐摩耗性と耐腐食性が向上します。理論的には、高密度化により腐食性媒体の浸透経路が短縮され、重量損失をさらに低減できます。段階焼結（1200°Cで予備焼結し、その後 1450°Cまで昇温）または熱間静水圧プレス（HIP）技術を使用すると、微細構造を最適化し、異常な粒成長を抑制し、摩耗率を約 5%~8%低減し、低温焼戻し（800°C±10°C）によって内部応力を除去し、NiO 不動態化層を安定させ、耐用年数を延ばすことができます。

(3) WCTiCNi セメント炭化複合材料の結晶粒制御

粒径の精密制御は、耐摩耗性と機械的性質を向上させる重要な手段です。WC および TiC の粒径は $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に制御されています。高い粒界密度 (> 10^{14} m^{-2}) は、研磨粒子の侵入と粒子の脱落（率 <0.05%）を妨げます。粒界強化理論によれば、微細粒子は硬質相の均一分散を強化します。SEM 観察によると、粒界結合力は > 120 MPa であり、硬度と靱性のバランスを取りながら摩耗速度を低く抑えています ($K_{1c} > 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超えると、粒界の数が減少し、摩耗率が 15%±3% 増加する可能性があり、靱性が低下します。粒度微細化を確実にするために、インヒビター（VC など、0.5%~1%）を添加し、ボールミル処理時間を延長（40 時間±1 時間）する必要があります。将来的には、ナノスケールの粒子 (< 0.3 μm) を検討することで、摩耗率をさらに低減し、硬度を高めることができますが、製造コストとプロセスの複雑さに注意する必要があります。

(4) WCTiCNi 超硬合金複合材料の表面処理

表面処理は、耐摩耗性と耐腐食性を最適化するための効果的な手段です。ダイヤモンド研磨または化学機械研磨（CMP）を使用して、表面粗さ (Ra) を $<0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に制御し、表面欠陥とマイクロクラックを低減し、理論的には表面を平坦化して研磨粒子の付着と腐食性媒体の侵入を低減します。接触力学によると、表面粗さが 10%±2%減少すると、摩耗率が約 10%±2%減少し、接触抵抗も減少し (< 0.1 mΩ)、導電部品の性能が向上しま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。研磨後、超音波洗浄を組み合わせることで残留物を除去し、NiO 不動態化層（厚さ>10 nm）の完全性をさらに向上させ、重量減少を 0.06 mg/cm²未満に安定させることができます。将来的には、耐腐食コーティング（TiN、厚さ 1.5~2μm など）やプラズマ窒化処理を開発して、極端な環境（pH<2 など）での耐腐食性をさらに向上させることもできます。

（5）WCTiCNi セメント炭化複合材の試験仕様

データの信頼性と再現性を確保するために、国際規格に従って性能検証を実施しています。耐摩耗性試験は、ASTM G65（乾いた砂/ゴム車輪摩耗試験）に基づいて実施し、摩耗率を評価しています。耐腐食性試験は、ASTM G59（電気化学的分極試験）に基づいて実施し、重量減少と i_{corr} を測定しています。抵抗率の測定には 4プローブ法を使用しています（精度 $\pm 0.01 \mu\Omega \cdot cm$ ）。試験サンプルのサイズは $10 \times 10 \times 5 mm \pm 0.1 mm$ です。環境条件は $23^\circ C \pm 2^\circ C$ 、湿度<65%に制御されています。測定は 5 回繰り返し、平均値を算出しています。微細構造と相分布は、SEM と EDS を組み合わせて分析しています（偏差<0.1%）。例えば、WC10TiC10Ni を $1450^\circ C \pm 10^\circ C$ で焼結した後、硬度は $HV 1650 \pm 30$ に達し、重量損失は $0.06 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 、抵抗率は $11 \mu\Omega \cdot cm \pm 0.1 \mu\Omega \cdot cm$ となり、目標値を上回り、最適化戦略の有効性を証明しています。

（6）総合的な最適化効果と応用の見通し

上記の戦略の相乗効果により、 $1450^\circ C$ で焼結した WC10TiC10Ni サンプルは、粒径 $0.51 \mu m$ 、 $Ra < 0.05 \mu m$ 、硬度 $HV 1650$ 、重量減少 $0.06 mg/cm^2$ 、抵抗率 $11 \mu\Omega \cdot cm$ となり、当初の目標を上回りました。耐摩耗性は電子金型の要件を満たし（寿命> 10^6 倍）、耐腐食性は海洋機器をサポートし（耐用年数>5 年）、導電性は導電部品に適しています（接触抵抗< $0.1 m\Omega$ ）。WC10Co（硬度 $HV 1500$ 、重量減少 $0.09 mg/cm^2$ ）と比較して、WCTiCNi システムは汎用性において明らかな優位性を持っています。将来的には、ナノ TiC (<100 nm) またはプラズマ焼結 (SPS) 技術を導入することで、硬度を $HV 1700$ 以上にさらに高め、重量損失を $0.05 mg/cm^2$ まで低減できるため、航空およびハイエンド電子機器の分野での応用可能性が拡大します。

WCTiCNi 超硬合金は、TiC 含有量（5%~10%）と Ni 含有量（8%~10%）の最適化により、硬度と耐食性のバランスが取れており、 $1450^\circ C$ の真空焼結により密度（>99.5%）と均一性が確保されています。また、 $0.51 \mu m$ の結晶粒制御により耐摩耗性が向上し、表面研磨（ $Ra < 0.05 \mu m$ ）により摩耗速度が低減し、ASTM 規格試験により性能が基準を満たしていることが確認されています。WC10TiC10Ni を例に挙げると、硬度 $HV 1650$ 、重量減少 $0.06 mg/cm^2$ 、抵抗率 $11 \mu\Omega \cdot cm$ は、多機能ニーズを満たしています。将来的には、ナノテクノロジーと表面改質により、過酷な環境への適用性をさらに高めることができます。

9.2.1.6 WCTiCNi セメント炭化物複合材料の工学的応用

WCTiCNi 超硬合金複合材は、優れた耐摩耗性、耐腐食性、導電性により、様々なエンジニアリング分野で優れた性能を発揮しています。TiC と Ni の比率を最適化し、高度な製造プロセスを採用することで、電子金型、海洋機器、導電性コンタクトといった需要の高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

い用途のニーズを満たすことに成功しました。これらの応用は、WCTiCNi 複合材の多機能性を実証するだけでなく、極限環境や精密製造分野における幅広い応用の基盤を築くものです。以下では、WCTiCNi 複合材の応用シナリオ、性能上の利点、そして実際の事例に基づき、そのエンジニアリング応用価値と産業発展の促進における役割について詳細に考察します。

（１）WCTiCNi 超硬合金複合電子金型

電子金型分野において、WC10TiC10Ni は優れた耐摩耗性と高硬度を有するため、理想的な選択肢です。この材料は微細な粒子径をベースとし、非常に高い硬度を有しています。TiC の添加により摩耗が大幅に低減され、高周波スタンピングにおける金型の長期安定性が確保されます。その耐用年数は 100 万回を超え、従来の材料の性能をはるかに上回っています。さらに、Ni 相の均一な分布と耐腐食性により、湿気の多い工場環境における腐食による金型破損のリスクが低減され、携帯電話の筐体やコネクタ金型などの精密電子部品製造に広く利用され、生産効率と製品品質が大幅に向上しています。

（２）WCTiCNi 超硬合金複合海洋機器部品

WC8TiC10Ni は、優れた耐食性と耐摩耗性により、海洋機器用途において優れた性能を発揮します。表面研磨により表面が非常に滑らかになり、腐食性媒体の浸透が低減し、重量減少も低く抑えられるため、塩水噴霧環境における使用要件を満たし、5 年以上の寿命を実現します。結合相としての Ni は海水侵食に対する強い耐性を提供し、TiC 含有量は材料の硬度を高め、海洋掘削および船舶部品における機器の長期耐久性を確保します。さらに、適度な Ni 含有量は材料の導電性を維持し、オフショアプラットフォームのセンサーや制御システムなどの電気接続要件をサポートし、過酷な環境における信頼性を実証します。

（３）WCTiCNi セメント炭化物複合導電接点

導電性接点の用途において、WC10TiC10Ni は優れた電気特性から高く評価されています。抵抗率は非常に低く抑えられており、Ni ネットワークが効率的な電流の流れを確保します。接触抵抗も非常に小さく、高周波スイッチやマイクロエレクトロニクス機器の要件を満たしています。TiC の高い硬度が摩耗を低減し、100 万回を超える耐用年数を誇るだけでなく、Ni の耐腐食性により湿気や酸性環境でも優れた保護性能を発揮します。自動車の電子制御ユニットや産業用リレーにおいて優れた性能を発揮し、アーク摩耗や接触不良を大幅に低減します。

（４）WCTiCNi 超硬合金複合航空部品コーティング

WCTiCNi 複合材料は、航空部品コーティングにおいても大きな可能性を秘めています。例えば、WC10TiC8Ni はタービnbrレードやエンジンの耐摩耗コーティングに使用されています。その高い硬度と耐高温性（800℃を超える温度に耐えられる）により、部品の耐用年数が大幅に延長されます。TiC は表面保護を強化し、高速気流や粒子による摩耗を軽減します。また、Ni の耐腐食性は高湿度環境や塩水噴霧環境下でもコーティングの安定性を確保し、メンテナンスサイクルを延長します。このコーティングはある程度の導電性も備えており、航空電子機器の接地要件を満たし、航空機エンジンやプロペラ部品におい

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ても優れた性能を発揮し、飛行安全性全体を向上させます。

(5) WCTiCNi セメント炭化複合材石油掘削工具

石油掘削業界では、WC12TiC10Ni が優れた耐摩耗性と耐腐食性を備えているため、ドリルビットや切削工具に広く使用されています。TiC は耐摩耗性を高め、高硬度の岩盤でも長期間の使用を可能にします。また、Ni の添加により、硫黄および塩素を含む環境における工具の耐腐食性が大幅に向上し、重量減少を非常に低く抑えることで、掘削効率と工具寿命を確保します。さらに、表面研磨により摩耗と腐食のリスクが低減されるため、深海および陸上掘削作業において良好な性能を発揮し、交換頻度を減らし、運用コストを削減します。

(6) WCTiCNi セメント炭化複合医療機器

WC8TiC5Ni は、整形外科用メスや歯科用ドリルの製造など、医療機器分野でも注目を集めています。TiC の高い硬度は、刃先の鋭さを維持し、精密手術のニーズを満たすことを保証し、Ni の生体適合性と耐腐食性は、人体の体液環境における腐食リスクを低減します。また、重量減少が非常に少ないため、器具の耐用年数が長くなります。さらに、その低抵抗性は、特定の電気手術器具の導電性要件を満たし、無菌環境や高湿度環境でも良好な性能を発揮し、手術の安全性と効率性を高めます。

(7) WCTiCNi 超硬合金複合材料の総合的な利点と幅広い用途

これらの用途は、WCTiCNi 複合材料の耐摩耗性、耐腐食性、導電性の面での相乗最適化を十分に実証しています。電子金型では、高硬度と低摩耗率が金型寿命を延ばします。海洋機器では、Ni の耐腐食性が長期使用をサポートします。導電性接点では、低抵抗と長寿命が高信頼性要件を満たします。航空部品コーティングでは、耐高温性と耐摩耗性が部品寿命を向上させます。石油掘削ツールでは、耐摩耗性と耐腐食性が作業効率を向上させます。医療機器では、生体適合性と高硬度が安全性を確保します。従来の WC-Co 材料と比較して、WCTiCNi システムは汎用性において明らかな利点があります。例えば、WC10Co の重量減少は WC10TiC10Ni よりも高く、耐腐食性が大幅に向上します。

さらに、WCTiCNi は用途拡大の可能性も示しています。例えば、鉄道線路の耐摩耗層では、その高い硬度により摩耗を低減できます。また、ウェアラブル電子機器では、その低抵抗によりフレキシブルな導電性部品を支えています。将来的には、材料組成と表面処理技術の調整により、エネルギー、医療、輸送分野における応用範囲をさらに拡大することができます。

WCTiCNi 超硬合金複合材は、電子金型、海洋機器、導電性接点、航空部品コーティング、石油掘削ツール、医療機器などで優れた性能を発揮します。WC10TiC10Ni は高硬度、低摩耗性、長寿命で金型要件を満たし、WC8TiC10Ni は低重量減少と長寿命で海洋用途をサポートし、WC10TiC10Ni の低抵抗と接触性能は接触信頼性を確保し、WC10TiC8Ni の耐高温性は航空部品の寿命を向上し、WC12TiC10Ni の耐摩耗性と耐腐食性は掘削効率を最適化し、WC8TiC5Ni の生体適合性は医療機器をサポートします。これらの用途は、WCTiCNi の耐摩耗性、耐腐食性、導電性における総合的な優位性を実証しています。今

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

後、プロセス改善と材料革新を通じて、多様なエンジニアリング分野への応用ポテンシャルをさらに高めることができます。

WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能試験

9.2.2.1 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能試験の原理

性能試験は、WCTiCNi 超硬合金複合材料の総合的な性能を評価するための中核的な手段です。硬度（目標値 $>HV\ 1600\pm30$ ）、摩耗率（目標値 $<0.06\ mm^3/N\cdot m\pm0.01\ mm^3/N\cdot m$ ）、重量減少（目標値 $<0.08\ mg/cm^2\pm0.01\ mg/cm^2$ ）、抵抗率（目標値 $<12\ \mu\Omega\cdot cm\pm0.1\ \mu\Omega\cdot cm$ ）を定量化し、耐摩耗性、耐腐食性、導電性を体系的に評価します。これらの指標は、実用における材料の信頼性と耐久性を直接反映します。試験規格には、耐摩耗性を評価する ASTM G65（乾式砂摩耗試験）、耐腐食性を評価する ASTM G59（電気化学的腐食試験）、導電率を測定する 4 探針法などが含まれており、WCTiCNi 材料の電子分野（接触抵抗 $<0.1m\Omega\pm0.01m\Omega$ など）および海洋環境（耐用年数 $>5\ 年\pm0.5\ 年$ など）における優れた性能を確保することを目的としています。試験プロセスは定量的なデータを提供するだけでなく、材料の最適化とプロセス改善のための科学的根拠も提供します。

9.2.2.2 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能試験方法および装置

性能試験は、高度な試験装置と標準化された手順に依存しています。ピッカース硬度計は、 $10\ kg\pm0.1\ kg$ の荷重で材料表面の押込み測定を実行し、硬度値を正確に評価し、TiC 相の高硬度（ $>HV\ 2000$ ）が耐摩耗性に及ぼす影響を反映します。摩耗試験機は、 $130\ N\pm1\ N$ の荷重で実際の作業条件をシミュレートし、乾式砂摩耗試験（ASTM G65）を通じて摩耗速度を定量化します。試験条件下での砂粒子の研磨と摩擦は、電子金型や石油掘削ツールの使用シナリオなどの高摩耗環境をシミュレートします。電気化学ワークステーションは、電位精度 $\pm0.001\ V$ で腐食試験（ASTM G59）を実行し、3.5%NaCl 溶液での重量減少と腐食電流密度を測定することにより、Ni 相の耐食性と NiO 不動態化層の安定性を評価します。四端子法は、定電流を流して電圧降下を測定することで、Ni ネットワークの導電寄与を反映した抵抗率を正確に測定します。サンプルサイズは通常 $10\times10\times5mm\pm0.1mm$ で、試験環境は環境要因の影響を低減するため、 $23^{\circ}C\pm2^{\circ}C$ 、湿度 65%未満に制御されます。試験は 5 回繰り返し、平均値を算出することで、データの信頼性と統計的意義を確保します。

（1）データ分析と性能検証

試験データは、包括的な分析を通じて WCTiCNi 材料の性能上の利点を明らかにしています。WC10TiC10Ni を例にとると、その硬度は $HV\ 1650\pm30$ に達し、TiC 含有量（ $10\%\pm0.1\%$ ）と微細粒構造（ $0.51\ \mu m$ ）が耐摩耗性を効果的に高めていることを示しています。摩耗率は $0.05\ mm^3/N\cdot m\pm0.01\ mm^3/N\cdot m$ で目標値を上回り、高周波パンチングと切断で優位性を示しています。重量減少は $0.06\ mg/cm^2\pm0.01\ mg/cm^2$ で、 $0.08\ mg/cm^2$ より低く、Ni 含有量（ $10\%\pm1\%$ ）が NiO 不動態化層（厚さ $\sim10\ nm$ ）を通じて優れた耐腐食性を提供し、海洋機器や

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

医療機器の長期使用要件を満たしていることを証明しています。抵抗率は $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ で、 $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 未満であり、Ni ネットワークの連続性 ($> 95\%$) が効率的な導電性を確保し、導電性接点および航空電子機器への応用をサポートしていることを示しています。SEM および EDS 分析により、TiC 粒子の均一な分布 (偏差 $< 0.1\%$) と Ni 相の安定性が確認され、XPS 検出により NiO 層 (Ni 2p ピーク位置 $\sim 854 \text{ eV}$) の形成が確認され、性能データの微視的裏付けが得られました。

(2) アプリケーション指向と拡張検証

試験結果は、WCTiCNi 材料の特定のエンジニアリングシナリオへの適用を直接導きます。電子金型では、硬度と低摩耗率が 100 万回以上の耐用年数を保証します。海洋機器では、低重量減少が 5 年以上の耐用年数をサポートします。導電性接点では、低抵抗率が高い信頼性要件を満たします。さらに、性能試験は、航空部品コーティングなどの他の分野にも拡張されています。WC10TiC8Ni の高い硬度と高温耐性 ($> 800^\circ\text{C}$) は、耐摩耗性および耐腐食性試験を通じてタービンブレードへの適用性を検証しました。石油掘削ツールでは、WC12TiC10Ni の低摩耗率と耐腐食性が、シミュレーション試験を通じて硫黄含有環境での利点を確認しました。医療機器では、WC8TiC5Ni の低重量減少と生体適合性が、腐食試験を通じて整形外科用ツールの使用をサポートします。試験データは、最適化の基盤も提供します。例えば、粒径が大きすぎる ($2 \mu\text{m}$ 超) と摩耗速度が 15% 増加し、焼結温度が高すぎる (1500°C 超) と偏析が 10% 増加する可能性があります、これはプロセス調整によって制御する必要があります。将来的には、動的摩耗試験や長期腐食シミュレーションを導入することで、極限条件下での材料性能をさらに検証することが可能です。

9.2.2.3 WCTiCNi 超硬合金複合材料の性能試験機構の解析

WCTiCNi 超硬合金複合材料の性能試験メカニズム解析は、硬度、摩耗速度、耐腐食性能、抵抗率の背後にある微視的メカニズムを深く解明することを目的としています。これらの特性は、電子機器、海洋、導電性などのエンジニアリング用途における材料の性能を共同で決定します。実験データと微視的観察を組み合わせることで、TiC の強化効果、Ni の靱性と耐食性への寄与、粒径と相分布の影響を分析し、材料性能の最適化と用途拡大のための理論的裏付けを提供します。本セクションでは、硬度試験、摩耗メカニズム、腐食挙動、抵抗率特性の観点から詳細に議論し、実際の試験結果と組み合わせそのメカニズムを検証します。

(1) 硬度試験機構

硬度試験は主に WCTiCNi 複合材料に対する TiC の強化効果を反映しています。TiC の固有硬度は $\text{HV } 2000 \pm 50$ を超えており、これはその緊密な共有結合構造によるものです。この高い硬度は、格子強化を通じて材料全体の性能を大幅に向上させます。WC10TiC10Ni を例にとると、その硬度は $\text{HV } 1650 \pm 30$ に達し、これは WC (約 $\text{HV } 1800 \pm 30$) と TiC の相乗効果によって達成されます。WC は主要な硬質相として基本的な硬度を提供し、TiC の添加により表面の圧縮抵抗がさらに向上します。試験では、ピッカース硬度計 (荷重 $10 \text{ kg} \pm 0.1 \text{ kg}$) を使用して表面の圧痕を測定しました。微細粒構造 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

粒界密度 ($>10^{14} \text{ m}^{-2}$) を高めることで変形抵抗をさらに向上させ、硬度を均一に分散させ、局所的な軟化を低減します。SEM 観察では、TiC 粒子が WC マトリックスに均一に埋め込まれていること（偏差 $<0.1\%$ ）が示され、相間結合強度 ($>120 \text{ MPa}$) を向上させ、高硬度性能を支えています。

（2）摩耗メカニズム解析

摩耗率テストは、実際の作業条件をシミュレートすることで、材料の耐摩耗性を定量化します。WC10TiC10Ni の摩耗率は $0.06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 未満で、これは TiC の高い硬度と Ni の靱性の影響を受けています。摩耗プロセスには、質量損失 (Δm 、精度 $\pm 0.01 \text{ mg}$)、材料密度 (ρ 約 $14.5 \text{ g/cm}^3 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$)、適用荷重 (F $130 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$)、および滑り距離 (L $1436 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$) が含まれ、微細粒子 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) は、研磨材の侵入と亀裂伝播を減らすことで、摩耗率を約 $10\% \pm 2\%$ 低減します。Ni の靱性 (K_{Ic} 約 $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5$) により、摩耗亀裂（サイズ $<0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）の形成がさらに減少し、SEM で観察された摩耗形態では、溝の深さが $1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 未満であることが示され、表面が強力な耐摩耗性を有することが示されました。一方、TiC 含有量が高すぎる ($>15\%$) と、靱性が低下し、微小亀裂のリスクが高まる可能性があるため、比率を最適化してバランスを維持する必要があります。

（3）腐食挙動メカニズム

腐食試験では、電気化学的手法により WCTiCNi の耐食性を評価します。結合相として Ni を使用することで、腐食電流密度 (i_{corr}) は約 $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ となり、従来の Co ベース材料 (i_{corr} は約 $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) よりも大幅に向上しました。これは、Ni 表面に形成された NiO 不動態化層（厚さ約 10 nm ）によるものです。3.5% NaCl 溶液中では、重量減少は $0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に抑えられ、目標値 0.08 mg/cm^2 を下回りました。EDS 分析により、NiO 層の化学組成 (Ni:O 比約 $1:1 \pm 0.1$) が確認され、Ni の電気化学的安定性（腐食電位 E_{corr} 約 0.1 V vs. SCE ）が腐食速度を効果的に抑制していることが示されました。一方、Co 相は同条件下で酸化物を形成しやすく、重量減少は 0.09 mg/cm^2 に達する可能性があります。Ni の添加は、海洋環境や酸性媒体における材料の耐久性を大幅に向上させます。SEM 観察では、腐食ピットの深さが $0.5 \mu\text{m}$ 未満であることが示され、その優位性がさらに裏付けられました。

（4）抵抗特性解析

抵抗率試験では、4プローブ法で WCTiCNi の電気伝導率を測定します。WC10TiC10Ni の抵抗率は $11 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0.1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ で安定しており、目標値の $12 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ を下回っています。これは主に Ni ネットワークの連続性 ($>95\% \pm 2\%$) によるものです。Ni は結合相として効率的な電子移動経路を提供します。TiC は非金属硬質相として高い固有抵抗率（約 $50 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）を持ち、複合材料全体の抵抗をわずかに増加させます（寄与 $<5\% \pm 1\%$ ）が、Ni 相の均一な分布（偏差 $<0.1\%$ ）により、全体の導電性は優れたままであり、導電性接点や航空電子機器への応用をサポートしています。SEM 分析では、Ni 相が 3 次元ネットワークを形成していることが示され、EDS では Ni 含有量 ($10\% \pm 1\%$) が抵抗率と負の相関関係にあることを確認しました。これは、Ni 含有量を適度に増やすと抵抗率がさらに低下する可能性があることを示していますが、硬度と耐食性のバランスを取る必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。

（５）顕微鏡観察と総合的なメカニズム

SEM および EDS による顕微鏡分析では、性能メカニズムの直感的な証拠が得られます。摩耗形態には明確な溝と摩耗跡が見られます。 $0.5\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ の粒径は、摩耗の拡大を効果的に制限します。NiO 層の存在は、腐食性媒体の浸透を減らします。EDS は、TiC 含有量 ($10\%\pm 0.1\%$) と硬度および摩耗率の相関関係を検出します。XPS 分析はさらに、NiO 層の化学状態 (Ni 2p ピーク $\sim 854\text{ eV}$) を検証し、耐食メカニズムを裏付けています。粒界強化と相間結合 ($> 120\text{ MPa}$) の相乗効果により、気孔率 ($< 0.1\%\pm 0.02\%$) と欠陥率 ($< 0.05\%$) が減少し、材料の全体的な性能安定性が向上します。WC10Co と比較して、WCTiCNi は韌性と耐食性の点で明らかな利点があり、摩耗率と重量損失データは従来の材料よりも優れています。

（６）アプリケーションの検証と最適化の方向性

試験機構分析は、WCTiCNi のエンジニアリング用途における性能を導きます。電子金型では、高硬度と低摩耗率が 100 万回以上の寿命をサポートします。海洋機器では、低重量損失が 5 年以上の耐用年数を保証します。導電性接点では、低抵抗率が高い信頼性要件を満たします。将来の最適化では、粒径を $0.3\mu\text{m}$ に縮小して摩耗率をさらに低減し、Ni 含有量を 12% に増やして耐食性を高めることに重点を置くことができますが、硬度低下のリスクに注意してください。表面コーティング (TiN など) を導入すると、耐食性が向上し、 $\text{pH} < 2$ 環境での耐用年数が延長されます。プラズマ焼結 (SPS) 技術を使用すると、密度と均一性が向上し、航空および医療分野のより高い要件を満たすことができます。

WCTiCNi 超硬合金複合材料の性能試験メカニズムは、TiC による硬度強化 ($\text{HV } 1650\pm 30$)、Ni による韌性と耐腐食性の向上 (重量減少 0.06 mg/cm^2)、Ni ネットワークによる導電性のサポート (抵抗率 $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) などの相乗効果を明らかにしています。また、微細粒子と相間結合により、摩耗率は $0.06\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 未満です。SEM と EDS は微視的証拠を提供し、今後、粒子の最適化と表面処理を通じて、多分野への応用性能をさらに向上させることができます。

9.2.2.4 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能試験方法

WCTiCNi 超硬合金複合材料の性能試験の精度と一貫性を確保するには、硬度、摩耗率、耐腐食性能、抵抗率などの主要な指標をカバーする標準化された試験方法と精密機器が必要です。これらの試験方法は、材料の耐摩耗性、耐腐食性、導電性を反映するだけでなく、電子金型、海洋機器、導電性接点などの応用シナリオにおけるデータの適用性も保証する必要があります。試験条件とサンプル準備プロセスを最適化することで、試験結果は材料の性能評価、プロセス改善、エンジニアリングアプリケーションのための信頼できる基礎を提供できます。以下は、多機能性能の要件を満たすための試験精度と再現性を確保するための試験方法、機器パラメータ、およびサンプル準備の詳細な説明です。

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

（1）硬度試験

硬度試験はピッカース硬度計で行います。10kg±0.1kg の荷重を加えて材料表面に圧痕をつけ、対角線の長さを測定して±30 の精度で硬度値を算出し、TiC 相（硬度>HV 2000）の全体強化への寄与を反映します。試験前に、表面が平坦で明らかな欠陥がないことを確認する必要があります。また、圧痕の位置は、相互影響を避けるために、圧痕の対角線の長さの 2.5 倍以上離してください。各試験は 5 回繰り返し、平均値を取ることで誤差を減らします。WC10TiC10Ni サンプルの硬度は通常、HV 1650±30 に達します。この高精度試験方法は、高周波スタンピングおよび切削における材料の耐久性を評価するのに適しており、電子金型および石油掘削ツールのアプリケーション要件を確保します。

（2）摩耗試験

摩耗試験は、ASTM G65 に準拠し、乾式砂/ゴム車輪摩耗試験機を用いて、適用荷重 130 N ± 1 N、摺動距離 1436 m ± 1 m で実施し、実際の作業条件下での摩耗挙動をシミュレートしました。試験中は、一定流量で砂粒子をサンプル表面に洗い流し、精密天秤（精度±0.01 mg）を使用して質量損失を測定しました。摩耗率は材料の密度（約 14.5 g/cm³）に基づいて計算し、目標値は 0.06 mm³/N · m ± 0.01 mm³/N · m 未満でした。試験環境は 23°C ± 2°C、湿度 < 65% に制御され、各試験は 3 回繰り返され、平均値を取得することで再現性 > 95% ± 2% を確保しています。例えば、WC10TiC10Ni の摩耗率は 0.05 mm³/N · m ± 0.01 mm³/N · m に達し、これはその微細粒構造 (0.5 μm) と TiC の均一な分布 (偏差 < 0.1%) により耐摩耗性が効果的に向上し、航空部品コーティングや鉄道の耐摩耗層に適していることを示しています。

（3）腐食試験

腐食試験は、ASTM G59 規格に準拠した電気化学ワークステーションを用いて、スキャン速度 0.1 mV/s ± 0.01 mV/s で実施し、3.5% NaCl 溶液中で腐食電流密度 (i_{corr}) と重量減少を測定しました。サンプルを 24 時間浸漬した後、3 電極システム（作用電極、参照電極、補助電極）を用いて分極曲線を記録し、重量減少を秤量（精度±0.01 mg/cm²）で測定し、目標値は 0.08 mg/cm² 未満でした。±0.01 mg/cm²。試験温度は 25°C ± 1°C に制御し、pH は 6.5 ~ 7.0 に安定させ、3 回繰り返して平均値を取得しました。WC10TiC10Ni の重量減少は 0.06 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²、 i_{corr} は約 10^{-6} A/cm² であり、これは Co ベースの材料よりも優れており、海洋機器や医療機器における Ni の NiO 不動態化層 (厚さ ~ 10 nm) の耐腐食性の利点を証明しています。

（4）抵抗率試験

抵抗率試験は 4 プローブ法を採用し、定電流源を用いて 1mA ± 0.01mA を流し、電圧降下を測定して抵抗率を計算します。精度は ±0.01 μΩ·cm、目標値は 12 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm 未満です。プローブ間隔は 1mm で、サンプル表面には酸化層や汚れがあってもなりません。試験は 5 回繰り返し、平均値を取ることで Ni ネットワークの導電寄与（95% 以上の導通）を確保します。WC10TiC10Ni の抵抗率は 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm で安定しており、Ni 相の高電子密度と均一な分布（偏差 < 0.1%）を反映しており、導電性接点やウェアラブル電子機器の低接触抵抗要件 (< 0.1 mΩ) を満たしています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（５）サンプルの準備

サンプルの準備は、テストの精度を確保するための重要なステップです。ダイヤモンド研磨または化学機械研磨（CMP）を使用して、表面粗さ（Ra）を $<0.05\mu\text{m}\pm0.01\mu\text{m}$ に制御し、表面欠陥とマイクロクラックを減らし、表面を平坦化して摩耗率と腐食性媒体の浸透を減らします。研磨後、超音波洗浄を使用して残留物を除去します。サンプルサイズは $10\times10\times5\text{mm}\pm0.1\text{mm}$ で、応力集中を避けるためにエッジの面取りは 0.2mm です。準備されたサンプルの表面均一性はSEM（偏差 $<0.1\%$ ）によって検証され、後続のテストのための一貫した基礎を提供します。たとえば、上記の準備下でのWC10TiC10Niサンプルの摩耗率は $0.05\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、再現性は $>95\%\pm2\%$ であり、研磨プロセスによってテスト結果の信頼性と一貫性が大幅に向上することを示しています。

（６）環境管理とデータ検証

試験中は環境条件を厳密に管理し、温度は $23^\circ\text{C}\pm2^\circ\text{C}$ 、湿度は65%未満に維持することで、温湿度の干渉を低減します。試験前には機器の校正を行い、負荷、電流、電位パラメータの安定性を確保しました。データ検証は、標準サンプル（WC10Coなど）との比較、SEMとEDSを組み合わせた微細構造分析、TiC含有量（ $10\%\pm0.1\%$ ）とNi分布（偏差 $<0.1\%$ ）の確認、XPSによるNiO層の形成確認などによって実施しました。試験結果は、航空コーティング（耐高温性）や医療機器（生体適合性）などの他の応用シナリオにも拡張でき、材料最適化のためのデータサポートを提供します。

（７）アプリケーションの方向性と将来の改善

これらの試験方法は、WCTiCNi材料のエンジニアリングへの応用を直接的に導きます。硬度試験は、電子金型や石油掘削ツールの耐久性評価をサポートします。摩耗試験は、航空部品や鉄道耐摩耗層の性能を最適化します。腐食試験は、海洋機器や医療機器の長期信頼性を確保します。抵抗率試験は、導電性接点やウェアラブル電子機器のニーズを満たします。将来的には、動的摩耗シミュレーション（高速回転試験など）と長期腐食浸漬（1000時間以上）を導入し、自動化装置（ロボット研磨システムなど）と組み合わせて効率を向上させ、ナノスケールの表面処理（TiNコーティングなど）を使用して粗さを $\text{Ra}<0.03\mu\text{m}$ までさらに低減し、試験精度と材料性能を向上させることができます。

WCTiCNi超硬合金複合材料の性能試験は、ピッカース硬度計（荷重10kg）、ASTM G65（荷重130N）、ASTM G59（走査速度 0.1mV/s ）、および四探針法（電流1mA）を用いて実施し、硬度、摩耗率、重量減少、抵抗率を定量化した。精度確保のため、サンプルは $\text{Ra}<0.05\mu\text{m}$ に研磨した。WC10TiC10Niを例にとると、摩耗率は $0.05\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、再現性は95%を超えており、本方法の信頼性が検証された。今後は、動的試験と表面最適化により、多分野への応用可能性をさらに高めることができる。

9.3 超硬合金の自己潤滑性と耐凝着性

9.3.1 超硬合金の自己潤滑と非付着性の理論

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

自己潤滑性（摩擦係数 $<0.2 \pm 0.01$ ）と非凝着性（凝着力 $<1 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ ）は、現代の産業用途において超硬合金に求められる特性です。これらの特性は、固体潤滑剤（ MoS_2 や C など、含有量 $5\% \pm 0.1\%$ ）の導入と表面テクスチャ（深さ $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）の最適化によって大幅に向上し、高速切削（速度 $>500 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ ）、ドライ加工（摩擦熱 $<100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ）、金型成形（離型力 $<10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ ）といった高負荷加工のニーズを満たします。従来の WCCo 材料は、自然摩擦係数（約 0.5 ± 0.05 ）が高いため、低摩擦・高密着条件への対応が困難で、ドライ加工や精密成形において摩耗や密着の問題が発生する可能性があります。一方、WCTiCNi システムは、固体潤滑剤の低せん断特性とテクスチャ設計による抗力低減効果を組み合わせ、自己潤滑性と密着防止性を向上させる新たなソリューションを提供します。

（１）固体潤滑剤の導入

固体潤滑剤 MoS_2 と C は、自己潤滑性と非固着性を実現する鍵です。層状化合物である MoS_2 は、層間のファンデルワールス力が弱い（約 0.1 eV ）ため、低摩擦特性を提供し、摩擦係数を 0.15 ± 0.01 まで低減できるため、高速切削やドライ加工環境に適しています。C（グラファイトや炭化物など）は、層状構造と自己潤滑性により、特に高温（ $>500^\circ\text{C}$ ）において、表面間のせん断応力をさらに低減します。含有量を $5\% \pm 0.1\%$ に制御すると、固体潤滑剤は WC および TiC マトリックスに均一に分散されます（偏差 $<0.1\%$ ）。SEM 分析により、 MoS_2 と C 粒子が相界面に埋め込まれ、金属間の直接接触が減少し、凝着力が $0.8 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ に低下していることが示されています。WCCo の高い摩擦係数（ 0.5 ± 0.05 ）と比較して、この添加によりエネルギー損失と熱蓄積（ $<100^\circ\text{C}$ ）が大幅に減少し、工具寿命と加工効率が向上します。例えば、WC5 MoS_2 のドライカットにおける摩擦係数は 0.15 ± 0.01 、凝着力は $0.8 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ であり、クーラントフリー加工の環境保護要件を満たしています。

（２）表面性状と潤滑機構

レーザーエッチングや機械加工により、材料表面に厚さ約 $0.1 \mu\text{m}$ のテクスチャを施し、自己潤滑性と非付着性を高めます。これらのテクスチャ構造は MoS_2 または C 粒子を捕捉して貯蔵し、摩擦対間の直接接触を減らします。ストライベック曲線は、境界潤滑領域（低速・低負荷）から混合潤滑領域（中速・中負荷）にかけて、潤滑剤の分布が改善され、摩擦係数が 0.2 未満に低下することを示しています。テクスチャの深さと間隔（約 $100 \sim 120 \mu\text{m}$ ）を最適化すると、付着力（ $<1 \text{ N}$ ）が効果的に低下し、特に金型成形では、脱型力が $10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ に低下し、ワークの付着と表面損傷が減少します。SEM 観察によると、テクスチャ内の潤滑層の厚さは約 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ で、特に粘着性のある材料（アルミニウム合金など）を加工するときに、工具表面へのチップの付着傾向が大幅に低下します。さらに、このテクスチャにより摩擦熱（ $<100^\circ\text{C}$ ）が急速に放散され、高温による結合が回避され、工具寿命が延びます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) トライボロジー理論と試験基準

トライボロジー理論は、自己潤滑と凝着防止のメカニズムを理論的に裏付けています。ストライベック曲線は、荷重と速度による潤滑状態の変化を説明しています。WCTiCNi システムは、固体潤滑剤と組織設計により、境界潤滑から混合潤滑への移行を実現し、摩擦係数を WCCo の 0.5 から 0.15~0.2 に低減します。試験規格 ASTM G99（ビンディスク摩擦摩耗試験）を用いて、摩擦係数と凝着力を定量化します。荷重範囲は 10~200N、速度は 0.1~1m/s で、試験は 3 回繰り返し、平均値をとることでデータの信頼性を確保しています。環境条件は 25°C±2°C、湿度 50%±5% に制御され、乾式加工および高速切削条件をシミュレートしています。表面形態分析 (SEM) および潤滑剤分布 (EDS) と組み合わせたテスト結果により、摩擦と接着の低減における MoS₂ および C の役割が検証され、材料の最適化をサポートするデータが提供されます。

(4) トライボロジー理論と試験基準

トライボロジー理論は、自己潤滑と凝着防止のメカニズムを理論的に裏付けています。ストライベック曲線は、荷重と速度による潤滑状態の変化を説明しています。WCTiCNi システムは、固体潤滑剤と組織設計により、境界潤滑から混合潤滑への移行を実現し、摩擦係数を WCCo の 0.5 から 0.15~0.2 に低減します。試験規格 ASTM G99（ビンディスク摩擦摩耗試験）を用いて、摩擦係数と凝着力を定量化します。荷重範囲は 10~200N、速度は 0.1~1m/s で、試験は 3 回繰り返し、平均値をとることでデータの信頼性を確保しています。環境条件は 25°C±2°C、湿度 50%±5% に制御され、乾式加工および高速切削条件をシミュレートしています。表面形態分析 (SEM) および潤滑剤分布 (EDS) と組み合わせたテスト結果により、摩擦と接着の低減における MoS₂ および C の役割が検証され、材料の最適化をサポートするデータが提供されます。

超硬合金固体潤滑剤 (MoS₂、C) の導入

9.3.2.1 超硬合金固体潤滑剤の原理と技術の概要

固体潤滑剤 MoS₂ および C を導入することで、超硬合金の自己潤滑性が大幅に向上します。MoS₂（層間せん断強度 <1MPa±0.1MPa、含有量 5%±0.1%）と C（グラファイト形態、摩擦係数 <0.1±0.01）は、低せん断力（<1MPa±0.1MPa）によって摩擦係数を効果的に低減し、目標値は <0.2±0.01 に設定されているため、高速切削、乾式加工、金型成形の低摩擦要件を満たします。MoS₂ の層状構造（層間隔約 6.2Å±0.1Å）は滑らかな滑り面を提供し、表面間の直接接触と摩擦抵抗を低減すると同時に、C の sp₂ 結合（CC 結合エネルギーは約 600kJ/mol±10kJ/mol）は層状特性により表面付着力（<1N±0.1N）を低減し、耐凝着性能を高めます。WC はマトリックスとして高い硬度（>HV 1500±30）を維持し、材料の構造的な支持を提供します。潤滑剤は、潤滑効果と機械的特性の相乗的な最適化を確保するために均一に分散させる必要があります（偏差 <0.1%±0.02%）。この組み合わせにより、超硬合金は従来の高硬度の利点を基に、低摩擦と耐凝着性に対する現代産業のより高い要件に適応することができます。

典型的な層状化合物である MoS₂ の自己潤滑性は、その独特の六方結晶構造に由来します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

層間は弱いファンデルワールス力（約 0.1 eV）で結合されています。この低い結合エネルギーにより、機械応力下でも層が滑りやすくなり、特にオイルフリー潤滑や高温環境（> 400°C など）で摩擦抵抗が大幅に低減します。含有量を 5%±0.1%に制御すると、MoS₂粒子が WC マトリックス中に均一に分散し、連続潤滑ネットワークを形成できます。これにより、金属間の直接接触が減少し、摩擦熱の蓄積（< 100°C）を効果的に抑制し、工具寿命を延ばします。C のグラファイト形態は、その 2 次元ラメラ構造と低い表面エネルギー（約 0.1 J/m²）に基づいています。sp²結合の高い安定性と低せん断特性により、高速切削（例えば 500 m/分以上）やドライ加工において優れた耐凝着性を発揮します。凝着力は 1 N±0.1 N 未満に低減されるため、アルミニウム合金や銅合金などの粘着性の高い材料の加工に特に適しています。この 2 つは相乗的に作用し、MoS₂が動的潤滑を提供し、C が静的耐凝着性を高めることで、相補的な潤滑機構を形成します。

WC は超硬合金の骨格材料として、緻密な格子構造と粒界強化効果により高硬度（> HV 1500±30）を有し、高負荷下での材料の構造的完全性を保証します。しかし、WC 自体は摩擦係数が高く（約 0.5±0.05）、自然な自己潤滑性を欠いているため、この欠陥は MoS₂ と C の導入によって補われます。潤滑剤の均一な分布（偏差 < 0.1%±0.02%）が性能最適化の鍵です。SEM 分析によると、MoS₂ と C 粒子は WC 相境界に埋め込まれ、約 5-10 μm の潤滑層を形成し、相間摩擦と凝着傾向を低減します。この分布は、粉末混合とボールミルプロセスによって実現され、潤滑剤が WC の硬度と耐摩耗性に影響を与えないようにしながら、全体的な性能を向上させます。従来の WCCo 材料と比較して、WCTiCNi システムは潤滑剤の添加により摩擦係数を約 70%、接着力を 50%以上低減し、乾式加工効率と金型離型品質を大幅に向上させます。

さらに、この自己潤滑性と防凝着性の設計の利点は、その適応性にも反映されています。

MoS₂は真空または不活性雰囲気中で特に優れた性能を発揮し、航空・宇宙技術の用途に適しています。一方、C₂の高温安定性はエネルギーおよび重機分野をサポートします。潤滑剤の低せん断力はエネルギー損失を低減するだけでなく、加工時の熱応力（< 100°C）も低減し、工具や金型の耐用年数を延ばし、グリーン製造と持続可能な開発という産業動向にも合致しています。この多段階の相乗最適化により、超硬合金は高硬度を維持しながら低摩擦性と防凝着性の飛躍的な向上を実現し、現代産業の効率的で環境に優しい多機能材料のニーズを満たし、高速切削、ドライ加工、精密成形に信頼性の高いサポートを提供します。

9.3.2.2 超硬合金固体潤滑剤（MoS₂、C）のメカニズム解析

炭化物において、MoS₂と C の自己潤滑性と耐凝着性は、その独特な微細構造と物理化学的特性に由来し、高速切削、ドライ加工、金型成形における材料の摩擦挙動を大幅に改善します。本セクションでは、潤滑機構、機械的特性への影響、ミクロ分布の詳細な分析を通じて、MoS₂と C が WC マトリックスの構造的完全性を維持しながら、摩擦係数と凝着を相乗的に低減する仕組みを探り、潤滑剤の含有量と調製プロセスを最適化するための科学的根拠を提供します。

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

（１）超硬合金固体潤滑剂（MoS₂、C）の潤滑機構

MoS₂の自己潤滑性は、主にその層状結晶構造における弱いファンデルワールス力（約 0.1 eV ± 0.01 eV）に由来します。この低い結合エネルギーにより、せん断力の作用下で層が滑りやすくなります。摩擦過程において、摩擦ペアの表面を覆う転写膜（厚さ約 10 nm ± 1 nm）が形成され、摩擦係数は 0.15 ± 0.01 に低下します。この転写膜は、接触面における MoS₂粒子の堆積と再配向によって実現され、特に乾燥環境や高温環境（例えば 400℃超）において、金属間の直接接触と摩擦抵抗を大幅に低減します。C は、sp²ハイブリッド構造（滑りエネルギー約 0.01 eV ± 0.001 eV）によるラメラ滑りにより、潤滑効果を高めます。また、表面エネルギーが低い（約 0.1 J/m²）ため、付着力を 0.8 N ± 0.1 N 未満に効果的に低減します。これは、アルミニウム合金や銅合金などの粘着性の高い材料の加工に特に適しています。MoS₂と C の相乗効果により、動的潤滑と静的潤滑が組み合わさり、MoS₂が連続的な滑り界面を提供し、C が耐付着性を高めることで、摩擦性能が最適化されます。

（２）超硬合金固体潤滑剂（MoS₂、C）の機械的性質への影響

WC5MoS₂サンプルでは、硬度は HV 1550 ± 30 に留まり、破壊靱性（K_{1c}）は約 10 MPa·m^{1/2} ± 0.5 であり、潤滑剤の添加が WC マトリックスの機械的特性に限定的に与える影響があることを示しています。MoS₂と C 粒子は WC マトリックスに均一に埋め込まれています。SEM 分析は、潤滑剤が WC の格子構造に大きな干渉を及ぼさないことを示しています（偏差 < 0.1% ± 0.02%）。硬度は主に WC と TiC によって提供され、靱性は Ni 相の塑性寄与の恩恵を受けています。ただし、MoS₂含有量が 5% ± 0.1% を超えると、K_{1c}は約 10% ± 2% 減少します。これは、過剰な潤滑剤が粒界の弱化または粒子の凝集(> 0.1%)につながり、マイクロクラック形成のリスクが高まるためです。したがって、潤滑剤含有量の正確な制御が、機械的特性と潤滑効果のバランスを維持するための鍵となります。5%が理想的な範囲と考えられており、比率の最適化によって性能の低下を回避する必要があります。

（４）超硬合金固体潤滑剂（MoS₂、C）の微視的分布と検証

SEM および EDS による顕微鏡分析では、潤滑メカニズムの視覚的証拠が得られました。SEM 観察では、MoS₂粒子が WC マトリックスに均一に埋め込まれていることが示され（偏差 < 0.1% ± 0.02%）、摩擦試験後の転写フィルム被覆率が 90% ± 2% を超えており、潤滑剤が摩擦プロセス中に接触面を効果的に移動して覆い、摩耗と付着を低減したことを示しています。EDS 分析では、MoS₂の化学組成（Mo: S 比約 1: 2 ± 0.1）を確認し、その層状構造の完全性を検証しました。また、XPS 検出では、C の sp²構造（C 1s ピーク位置へ 284 eV ± 0.1 eV）が示され、低摩擦特性の原因を裏付けています。MoS₂の熱分解（分解温度 > 1200℃ ± 10℃）を回避し、高温調製プロセス中の潤滑剤の安定性を確保するため、焼結温度は 1400℃ ± 10℃ に制御されました。さらに、SEM 観察により、粒径（0.5 μm ± 0.01 μm）が潤滑剤の均一な分散に寄与し、界面欠陥(< 0.05%)を低減していることが示されました。

（５）超硬合金固体潤滑剂（MoS₂、C）の摩擦挙動と荷重影響

摩擦係数は荷重に対して一定の規則性を示します。荷重が 50 N ± 1 N を超えると、摩擦係

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

数はわずかに増加します（ $5\% \pm 1\%$ 未満）。これは、高荷重によって転写フィルムの厚さ（ 8 nm 未満）が圧縮され、局所的な金属接触が増加するためです。ただし、 WC5MoS_2 の摩擦係数は 0.15 ± 0.01 の範囲にとどまり、 WC10Co (0.5 ± 0.05) よりも優れているため、 MoS_2 と C の潤滑効果は中〜高荷重下でも有効であることがわかります。SEM 分析によると、高荷重下では転写フィルムが局所的に損傷します（ 5% 未満）が、 C の sp^2 滑りが潤滑効果を補い、接着力は $0.8\text{ N} \pm 0.1\text{ N}$ 未満を維持します。摩擦熱（ 100°C 未満）の制御は、潤滑剤の低せん断特性の恩恵を受け、高温誘起結合を回避し、工具寿命を延ばします。

（6）超硬合金固体潤滑剤（ MoS_2 、 C ）の適用検証と最適化の方向性

WC5MoS_2 はエンジニアリング用途で検証されています。高速切削（ 500 m/min ）では、摩擦係数 0.15 ± 0.01 、凝着力 $0.8\text{ N} \pm 0.1\text{ N}$ により、ドライ加工の摩耗と切削片の付着が大幅に減少し、工具寿命が約 30% 向上します。金型成形では、低付着性がプラスチック製品のスムーズな離型をサポートします（離型力 $< 10\text{ N}$ ）。将来的には、 MoS_2 含有量を 6% に増やすか、ナノ MoS_2 （粒子サイズ $< 100\text{ nm}$ ）を導入して転写フィルムの安定性を高め、摩擦係数を 0.12 に下げることによって最適化できます。表面テクスチャリング（深さ $110\mu\text{m}$ ）またはプラズマ溶射技術と組み合わせることで、凝着力をさらに 0.5 N 未満に下げることができ、航空機エンジンや重機などの高温（ $> 800^\circ\text{C}$ ）または高荷重（ $> 200\text{ N}$ ）のシナリオに適しています。

MoS_2 は、弱いファンデルワールス力（ 0.1 eV ）と膜移動（ 10 nm ）により摩擦係数を 0.15 ± 0.01 まで低減します。 C は sp^2 すべり（ 0.01 eV ）により付着力を 0.8 N 未満まで低減します。 WC5MoS_2 の硬度は $\text{HV } 1550$ 、 $\text{K}_{1c} 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ は機械的特性を維持し、SEM および EDS により潤滑剤の均一な分布が確認されています。 1400°C での焼結により分解を防ぎ、将来的にはナノ最適化により潤滑効果をさらに向上させることができます。

9.3.2.3 超硬合金固体潤滑剤（ MoS_2 、 C ）に影響を与える因子の分析

超硬合金固体潤滑剤 MoS_2 および C は、さまざまな要因の影響を大きく受け、潤滑剤の分布、微細構造、環境条件の変化により、高速切削、乾式加工、金型成形における摩擦係数と接着性能が共同で決定されます。 MoS_2 および C の含有量、粒径、焼結温度、使用環境などの重要なパラメータは、自己潤滑および接着防止効果に直接影響し、材料の機械的特性（硬度、靱性など）にも一定の影響を及ぼします。これらの要因間のメカニズムと関係を分析することにより、潤滑剤の設計および調製プロセスを最適化し、エンジニアリングアプリケーションの低摩擦および高耐久性の要件を満たすことができます。このセクションでは、各影響要因の特性、実験データ、およびアプリケーションケースに基づいて、潤滑性能への影響を詳細に説明し、最適化の提案を示します。

（1） MoS_2 含有量

MoS_2 含有量は、潤滑性と機械特性に影響を与える重要な要素です。含有量が $5\% \pm 0.1\%$ の場合、摩擦係数を 0.2 ± 0.01 未満に低減できます。 MoS_2 層状構造の弱いファンデルワールス力（ $0.1\text{ eV} \pm 0.01\text{ eV}$ ）は、安定した転写膜（厚さ $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ ）を形成し、摩擦抵抗を効

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

果的に低減します。この含有量では、SEM 分析により、MoS₂は WC マトリックスに均一に埋め込まれ（偏差<0.1%±0.02%）、被覆率は 90%±2%を超えており、高速切削（500 m/分）やドライ加工のニーズに対応しています。しかし、MoS₂含有量が 10%±0.1%を超えると、破壊靱性（K_{1c}）が約 15%±3%低下します。これは、潤滑剤が多すぎるために粒界が弱体化したり、粒子が凝集したり（>0.1%）するためであり、マイクロクラックのリスクが高まります。たとえば、WC10MoS₂は MoS₂含有量が多いため、K_{1c}はわずか 8 MPa·m^{1/2}です。±0.5 ですが、WC5MoS₂は 10 MPa·m^{1/2}±0.5 に達し、5%が機械的特性と潤滑効果のバランスポイントであることを示しています。将来的には、MoS₂を段階的に添加することで、局所的な濃度を制御し、靱性の低下を回避できるようになります。

（2）C 含有量

C 含有量は、密着性と硬度に大きな影響を与えます。含有量が 3%±0.1%の場合、密着性は低いレベル（<0.8 N±0.1 N）に留まります。C の sp²結合構造（滑りエネルギー 0.01 eV ± 0.001 eV）と層状滑り特性により、特にアルミニウム合金またはプラスチックを加工する場合、表面間の密着性が低下します。SEM 観察によると、C 粒子は約 5~10μm の厚さの均一な潤滑膜を形成し、これにより耐凝着性能が向上します。ただし、C 含有量が 5%±0.1%を超えると、過剰な C 含有量によって WC マトリックスの格子強度が弱まるため、硬度が約 10%±2%低下します。EDS 分析によると、C 相の偏析（>0.2%）は、TiC と WC の均一な分布を妨げる可能性があります。したがって、3%~5%が理想的な範囲と考えられており、より高い C 含有量では、硬度（>HV 1500）を維持するために微量の硬化剤（VC など、<1%）が必要になります。最適化は、ナノ C（粒子径<100 nm）の分散を改善することで達成でき、さらに接着力を<0.5 N まで低減できます。

（3）粒度

粒径は潤滑性能と転写膜の安定性に非常に重要です。粒径が 0.51μm±0.01μm の場合、転写膜は 90%±2%を超える被覆率で安定して形成されます。MoS₂粒子と C 粒子は微細粒界（密度>10¹⁴m⁻²）間に均一に分布しているため、摩擦係数の増加が抑えられ、摩擦係数は 0.2±0.01 未満に保たれます。SEM 分析によると、微細粒子は研磨材の侵入と亀裂の伝播を制限し、潤滑剤の耐荷重性を高めます。ただし、粒径が 2μm±0.01μm を超えると、摩擦係数は約 10%±2%増加します。これは、粗大粒子が粒界の数を減らし、転写膜の被覆率が低下し（<85%）、局所的な金属接触が増加し、付着力が 1N 以上に上昇する可能性があるためです。粒径を制御するには、抑制剤（VC など、0.5%~1%）の添加と、ボールミル処理時間の最適化（40 時間±1 時間）が必要です。将来的には、ナノ粒子（<0.3 μm）を検討することで、転写膜をさらに安定化させ、潤滑効率を向上させることができます。

（4）焼結温度

焼結温度は、潤滑剤の完全性と性能安定性に直接影響を及ぼします。1400°C±10°Cでは、MoS₂は大きな分解を示さずに安定しています（分解温度>1200°C±10°C）。SEM 観察では、潤滑剤が均一に分布していること（偏差<0.1%）、摩擦係数と凝着力がそれぞれ 0.15±0.01 と<0.8N±0.1N に達していることが示されています。しかし、焼結温度が 1450°C±10°Cを超えると、MoS₂の分解が約 5%±1%増加し、EDS は Mo と S の比率が不均

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

衡（Mo: S<1: 2）であることを検出し、潤滑性能が低下し、摩擦係数が 0.25 ± 0.01 まで上昇する可能性があります。高温はC相の過度の黒鉛化を引き起こし、硬度（HV 1500以上）に影響を与える可能性があります。そのため、 1400°C が最適温度と考えられており、Ar 保護雰囲気または傾斜焼結（ 1200°C での予熱）と組み合わせることで、分解リスクをさらに低減し、潤滑油の安定性を向上させることができます。

（5）環境

環境条件は潤滑性能に大きな影響を与えます。湿度が $50\%\pm5\%$ を超えると、摩擦係数は約 $10\%\pm2\%$ 増加します。これは、 MoS_2 およびC表面に水が吸着され、層間滑り能力が弱まり、転写フィルム（被覆率<85%）の形成が妨げられ、付着力が $1\text{N}\pm0.1\text{N}$ まで上昇する可能性があるためです。SEM 分析では、高湿度下では表面に微量の酸化物（<0.1%）が現れ、摩擦抵抗がさらに増加することが示されています。乾式処理または海洋環境では、湿度を30%~50%に制御することで潤滑効果を最適化できます。NiのNiO不動態化層（厚さ~10nm）は、高湿度環境で追加の保護を提供し、重量減少は $<0.06\text{mg}/\text{cm}^2$ のままです。

将来的には、表面コーティング（TiN、厚さ $2\mu\text{m}$ など）や吸湿剤（ SiO_2 、<1%など）の添加によって湿度の影響を軽減し、低摩擦性能を維持できるようになります。

（6）包括的なケース

WC10MoS_2 と WC5MoS_2 を例に挙げると、 WC10MoS_2 は MoS_2 含有量が高すぎる（10%）ため、 $K1c$ が $8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm0.5$ に低下し、摩擦係数はわずかに上昇して 0.18 ± 0.01 となり、靱性と潤滑効果の間でトレードオフが生じています。一方、 1400°C で焼結した WC5MoS_2 は、 $K1c$ が $10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm0.5$ 、摩擦係数 0.15 ± 0.01 、密着力 $0.8\text{N}\pm0.1\text{N}$ に達し、優れた総合性能を示しています。湿度60%の環境では、 WC5MoS_2 の摩擦係数は 0.165 ± 0.01 に上昇しますが、表面研磨（ $R_a<0.05\mu\text{m}$ ）により 0.16 ± 0.01 に回復できます。将来的には、 MoS_2 含有量を4%~6%に制御し、C含有量を2%~4%に制限し、粒子を $0.3\mu\text{m}$ に微細化し、焼結温度を 1380°C ~ 1420°C に調整し、防湿コーティングを開発して摩擦係数を0.12に、接着力を0.5N未満に下げることによって最適化を実現し、航空エンジンや医療機器の高い要件を満たすことができます。

WCTiCNi 超硬合金の潤滑性能は、 MoS_2 含有量（5%）、C含有量（3%）、粒径（ $0.51\mu\text{m}$ ）、焼結温度（ 1400°C ）、周囲湿度（<50%）の影響を受けます。5% MoS_2 は摩擦係数を<0.2に低下させ、3%Cは粘着力を低減し、微粒子と中温焼結は転写膜の安定性を確保し、高湿度は摩擦を増加させます。 WC5MoS_2 をベースとすると、その性能は WC10MoS_2 よりも優れており、将来的には配合とコーティングを最適化することで潤滑効果をさらに向上させることができます。

9.3.2.4 超硬合金固体潤滑剤（ MoS_2 、C）の最適化

超硬合金固体潤滑剤の摩擦係数 $<0.2\pm0.01$ を達成するために、耐凝着性能（凝着力<

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.8 N±0.1 N) と機械的安定性 (硬度 > HV 1500、 $K_{1c} > 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を考慮しながら、潤滑剤の最適化、焼結プロセスの調整、粒子制御、表面処理の包括的な戦略が必要です。これらの最適化措置は、 MoS_2 と C の自己潤滑効果を高め、高速切削 (> 500 m/min)、ドライ加工、金型成形の低摩擦要件を満たしながら、WC マトリックスの構造的完全性を維持することを目的としています。これにより、電子金型、海洋機器、航空部品などの用途に信頼性の高いサポートを提供します。以下では、プロセスパラメータ、微細構造、表面特性の観点から最適化スキームを詳細に説明し、実際の結果を組み合わせることで実現可能性を検証します。

(1) 潤滑油の最適化

潤滑剤の最適化は、摩擦係数を低減する鍵となります。 MoS_2 含有量は $5\% \pm 0.1\%$ に設定され、その層状構造 (層間間隔 $6.2 \text{ \AA} \pm 0.1 \text{ \AA}$) と低せん断力 ($< 1 \text{ MPa} \pm 0.1 \text{ MPa}$) は、転写膜 (厚さ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) を形成することで摩擦抵抗を効果的に低減し、摩擦係数を 0.15 ± 0.01 まで低減できます。C 含有量は $3\% \pm 0.1\%$ に制御され、その sp^2 結合構造 (CC 結合エネルギー $600 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) は層状滑り (滑りエネルギー $0.01 \text{ eV} \pm 0.001 \text{ eV}$) を提供し、付着力を $< 0.8 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ まで低減します。これは、特に粘性のある材料の加工に適しています。SEM 分析の結果、 MoS_2 と C は WC マトリックス中に均一に分布しており (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)、被覆率は $> 90\% \pm 2\%$ であり、 MoS_2 含有量の過剰 ($> 10\% \text{ MoS}_2$ または $> 5\% \text{ C}$) による靱性の低下 (K_{1c} が $10\% \sim 15\%$ 低下) を回避しています。微量の抑制剤 (VC など、 $< 1\%$) を添加することで、潤滑剤と WC の適合性をさらに最適化し、潤滑膜の安定性を高めることができます。

(2) 焼結工程

焼結プロセスは、潤滑剤の完全性と材料の密度に直接影響します。推奨温度は $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力は $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ で、ホットプレスによって達成されます。 1400°C は MoS_2 の分解温度 ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) よりも低いため、潤滑剤が熱分解しないことが保証されます。SEM 観察では、 MoS_2 と C 粒子が安定した分布 (偏差 $< 0.1\%$) を維持し、密度は $99\% \pm 0.1\%$ に達し、気孔率は $< 0.1\% \pm 0.02\%$ であることが示されています。高圧 (50 MPa) は、潤滑剤が WC 相境界に埋め込まれることを促進し、連続的な潤滑ネットワークを形成し、摩擦熱 ($< 100^\circ\text{C}$) を低減します。従来の真空焼結法と比較して、ホットプレス法は高温 ($> 1450^\circ\text{C}$) による潤滑剤の分解 ($> 5\% \pm 1\%$) を回避し、段階加熱 (1200°C で予熱後、 1400°C まで昇温) により熱応力を低減し、潤滑効果と硬度 ($> \text{HV } 1500$) のバランスを確保します。Ar 保護雰囲気により、さらに酸化が防止され、潤滑膜の長期安定性が向上します。

(3) 穀物管理

潤滑性能を最適化するには、粒径の精密制御が重要です。目標は $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に制御することです。微細粒界 (密度 $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) により、潤滑剤の耐荷重性と潤滑油膜の安定性が向上します。SEM 分析の結果、粒径が $0.51 \mu\text{m}$ の場合、 MoS_2 および C 粒子が粒界に均一に分散し、転写膜の被覆率が $90\% \pm 2\%$ を超え、摩擦係数が 0.2 ± 0.01 未満にとどまり、接着力が $0.8 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ 未満であることが示されました。粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超えると、粒界の数が減少し、転写膜の被覆率が減少 (85% 未満) し、摩擦係数が $10\% \pm 2\%$ 増加する可能性があり、接着力が 1 N 以上に上昇します。結晶粒の微細化は、抑制剤 (VC

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

など、0.5%~1%)を添加し、ボールミル処理時間を延長(40 時間 $\pm$ 1 時間)することにより達成されます。将来的には、ナノ粒子($<0.3\mu\text{m}$)を検討することで、潤滑効率をさらに向上させ、高負荷($>200\text{N}$)の作業条件に適応することができます。

(4) 表面処理

表面処理は、研磨技術によって潤滑性能を最適化します。表面粗さ(Ra)を $0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ 未満に制御し、ダイヤモンド研磨または化学機械研磨(CMP)を使用して表面欠陥や微小亀裂を除去することをお勧めします。平坦な表面は、摩擦対の直接接触を減らし、MoS₂転写フィルムの接着力を高め(被覆率 $>95\%\pm 2\%$)、摩擦係数を 0.15 ± 0.01 に下げ、さらに接着力を $<0.7\text{N}\pm 0.1\text{N}$ に下げます。研磨後、超音波洗浄を組み合わせることで残留物を除去し、SEMで表面の均一性(偏差 $<0.1\%$)を確認し、湿度($>50\%$)による摩擦係数の増加($<5\%\pm 1\%$)を減らします。表面処理はまた、摩擦熱($<90^\circ\text{C}$)の急速な放散を促進し、工具寿命を延ばします。金型成形において、 $\text{Ra}<0.05\mu\text{m}$ は離型力($<10\text{N}\pm 1\text{N}$)を大幅に低減し、ワークピースの表面品質を向上させます。将来的には、表面耐摩耗性と潤滑耐久性を向上させるために、TiNコーティング(厚さ $2\mu\text{m}$)やプラズマ窒化処理の導入が検討されています。

(5) 総合的な最適化効果と適用検証

上記の戦略により、 1400°C でホットプレス焼結したWC5MoS₂C3(MoS₂5%、C3%)は、粒径 $0.51\mu\text{m}$ 、 $\text{Ra}<0.05\mu\text{m}$ で、摩擦係数 0.15 ± 0.01 、密着性 $0.7\text{N}\pm 0.1\text{N}$ 、硬度HV1550 ± 30 、 $\text{K}_{1c}10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ を達成し、目標値を上回りました。高速切削(500m/分)では、工具寿命が30%向上し、摩擦熱が $<90^\circ\text{C}$ となり、ドライ加工のニーズを満たしました。金型成形では、脱型力が8Nに低減し、プラスチックの付着が低減しました。海洋機器では、低密着性により5年以上の使用に耐えます。WC10Co(摩擦係数 0.5 ± 0.05 、密着力 $>2\text{N}$)と比較して、WCTiCNiシステムは大きな利点を示しています。将来的には、ナノ潤滑剤や多層コーティングを用いることで、摩擦係数を0.12まで、密着力を0.5N未満までさらに低減し、航空エンジンや医療機器の高い要求を満たすことができます。

(6) 環境管理と将来の発展

試験および適用中は、周囲湿度を30%~50%に制御し、摩擦係数($10\%\pm 2\%$)が $50\%\pm 5\%$ を超えることによる増加を回避する必要があります。Ar保護焼結および防湿コーティング(SiO₂、 $<1\%$)は、湿度の影響を低減し、潤滑性能を維持できます。将来的には、動的潤滑シミュレーション(高速回転テストなど)と長期耐久テスト(>1000 時間)を導入し、プラズマ溶射技術を使用して潤滑層の厚さを $15\mu\text{m}$ まで増やし、高温($>800^\circ\text{C}$)または高荷重($>200\text{N}$)環境での性能を最適化し、エネルギーおよび重機への応用の可能性を拡大します。

超硬合金固体潤滑剤は、MoS₂5%とC₂3%の配合により摩擦係数を0.2未満に最適化し、 1400°C のホットプレス焼結により潤滑安定性を確保します。また、 $0.51\mu\text{m}$ の粒子が転写膜効果を高め、 $\text{Ra}_{10\mu\text{m}}$ 以下の表面処理により付着性を低減します。WC₁₀MoS₂C₂を例にとると、その性能はWC₁₀Coよりも優れています。将来的には、ナノテクノロジーとコーティングの改良により、過酷な作業条件のニーズにもさらに応えることができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2.3 セメント炭化物固体潤滑剤（MoS₂、C）の工学的応用

自己潤滑性超硬合金は、MoS₂とCを固体潤滑剤として導入することで、低摩擦・高耐久性の作業条件における性能を大幅に向上させ、現代産業の効率的な加工と環境保護に対する多様な要求を満たしています。優れた摩擦係数（ $< 0.2 \pm 0.01$ ）と密着力（ $< 0.8 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ ）を備えたこの材料は、高速切削、乾式加工、金型成形などのシーンで優れた性能を発揮し、工具や金型の寿命を延ばすだけでなく、加工時のエネルギー消費と熱蓄積を削減します。以下では、具体的な応用シーン、性能上の利点、実際の事例に基づいて、そのエンジニアリング応用価値を詳細に検討し、産業効率と持続可能な発展への貢献を分析します。

（1）高速切断

高速切削分野において、WC5MoS₂は優れた自己潤滑性を有するため、理想的な選択肢です。粒径は $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ に制御されており、MoS₂粒子がWCマトリックスに均一に埋め込まれ（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）、安定した転写膜（厚さ $10\text{nm} \pm 1\text{nm}$ ）を形成し、摩擦係数は 0.15 ± 0.01 に低減されます。SEM分析によると、転写膜の被覆率は $90\% \pm 2\%$ を超えており、切削片と工具表面の直接接触を大幅に低減し、工具寿命を $5000\text{m} \pm 500\text{m}$ 以上延長します。これは、従来のWC10Co工具（寿命約 3000m ）をはるかに上回ります。この性能は、高硬度材料（チタン合金など）や高速条件（ $> 500 \text{ m/分}$ ）の加工において特に顕著であり、摩耗率と切削抵抗が低減し、表面仕上げが向上し、クーラントの使用量が削減されるため、グリーン製造のトレンドと一致します。

（2）乾式処理

自己潤滑超硬合金は、低付着性と熱管理能力に優れており、優れた性能を発揮します。表面を $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に研磨することで、表面欠陥やマイクロクラックが減少し、Cのsp²結合構造（滑りエネルギー $0.01 \text{ eV} \pm 0.001 \text{ eV}$ ）が均一な潤滑膜を形成し、付着力が $0.8 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ に低下します。これは、アルミニウム合金や銅などの粘着性のある材料の加工に特に適しています。摩擦熱は $< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ に制御され、SEM観察によると、潤滑膜の厚さは約 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ で、熱を効果的に放散して高温付着を防ぎ、従来の材料に比べて

工具寿命が約 $20\% \sim 30\%$ 延長します。クーラントを使用しないドライ加工は、環境汚染と加工コストを削減し、自動車部品や電子部品の製造に広く使用されており、環境保護と高効率加工における自己潤滑超硬合金の潜在力を実証しています。

（3）金型成形

金型成形用途では、WC5MoS₂は離型力が低く寿命が長いいため好まれています。MoS₂の層状構造（層間間隔 $6.2\text{\AA} \pm 0.1\text{\AA}$ ）は、弱いファンデルワールス力（ $0.1\text{eV} \pm 0.01\text{eV}$ ）により摩擦係数を低減し、離型力が $10\text{N} \pm 1\text{N}$ 未満に低下します。これにより、プラスチックまたは金属ワークピースの金型表面への付着が減少し、成形部品の表面品質が向上します。SEM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

分析によると、潤滑剤転写フィルムの被覆率は $90\% \pm 2\%$ を超え、金型寿命は 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍を超え、WC10Co 金型（寿命約 5×10^5 倍）をはるかに上回っています。この性能は、携帯電話ハウジングや自動車ダッシュボードの製造などの精密射出成形やスタンピングにおいて傑出しており、離型不良やメンテナンス頻度を減らし、生産効率と経済的メリットを大幅に向上させます。

（4）航空部品のコーティング

WC10MoS₂は、航空部品コーティング分野にも展開されており、特にタービンブレードやエンジンの耐摩耗コーティングに用いられています。低摩擦係数 (0.15 ± 0.01) により、高速気流や粒子の摩耗による摩耗を低減します。粒径は $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ で、潤滑剤の均一な分散を確保し、耐用年数を 6,000 時間以上に延長します。MoS₂の高温安定性 ($> 400^\circ\text{C}$) は、航空エンジン環境下でも潤滑効果を維持し、摩擦熱は 100°C 未満であるため、部品の耐疲労性を高め、メンテナンスコストを削減します。高高度飛行環境における信頼性要件にも適しています。

（5）石油掘削ツール

石油掘削工具においては、WC8MoS₂C (MoS₂ 5%、C 3%) が優れた耐凝着性と耐摩耗性から好まれています。潤滑膜がドリルビットと岩石間の凝着を低減し、凝着力は $0.8 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ 未満に抑えられ、従来の材料と比較してドリルビットの寿命が約 25% 延長されます。乾式掘削条件下では、摩擦熱は 100°C 未満に抑えられます。MoS₂とCの相乗効果により、切削抵抗が低減し、特に硫黄含有岩石や高硬度岩石層での掘削効率が向上し、交換頻度と運用コストを削減します。

（6）医療機器

WC5MoS₂は、整形外科用メスや歯科用ドリルなどの医療機器分野でも高い評価を得ています。摩擦係数 0.15 ± 0.01 、粘着力 $0.7 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ という低摩擦切削を実現し、組織の損傷と癒着を軽減します。 $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の表面研磨により、刃先の鋭さが向上し、5,000 回を超える耐用年数を実現。滅菌環境における高精度の要件を満たし、手術の安全性と器具の耐久性を向上させます。

（7）包括的な給付と適用範囲の拡大

これらの用途は、自己潤滑性超合金の摩擦と凝着の低減における優位性を十分に実証しています。高速切削における工具寿命の延長、ドライ加工における環境影響の低減、金型成形における生産効率の向上、航空コーティングにおける部品の耐久性向上、石油掘削ツールにおける作業効率の向上、医療機器における外科用品質の確保に貢献します。WC10Co（摩擦係数 0.5 ± 0.05 、凝着力 $> 2 \text{ N}$ ）と比較して、WCTiCNi システムの摩擦係数は約 70% 低減し、凝着力は 50% 以上低減されるため、加工精度と工具寿命が大幅に向上します。さらに、自己潤滑特性は、鉄道線路の耐摩耗層、WC8MoS₂C による線路と輪軸間の摩擦損失の低減、ウェアラブルエレクトロニクスにおける WC3C の低凝着性など、新たな用途にも対応しています。将来的には、ナノ潤滑剤や多層コーティングを通じて、エネルギー、航空、医療分野での応用可能性がさらに拡大する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

自己潤滑性超硬合金は、高速切削、ドライ加工、金型成形、航空コーティング、石油掘削工具、医療機器などの分野で優れた性能を発揮します。WC5MoS₂の摩擦係数は0.15±0.01、工具寿命は5000m以上、WC3Cの密着力は0.8N、摩擦熱は100°C未満、WC5MoS₂の離型力は10N未満、寿命は10⁶倍以上であり、潤滑最適化による加工効率と寿命向上を実証しています。今後、材料革新を通じて、より幅広いエンジニアリングニーズに対応していきます。

9.3.2 超硬合金の表面性状と潤滑機構

9.3.2.1 超硬合金の表面テクスチャと潤滑機構の原理と技術の概要

超硬合金の表面テクスチャ設計は、材料表面に特殊な微細構造を導入することで、自己潤滑性と耐凝着性を大幅に向上させます。テクスチャの深さは110μm±0.1μmに設定され、間隔は50~100μm±1μmです。これらのテクスチャ構造は、固体潤滑剤（MoS₂やCなど）を蓄え、摩耗チップ（サイズ<1μm±0.1μm）を捕捉することで、摩擦係数（<0.2±0.01）と凝着力（<1N±0.1N）を効果的に低減し、高速切削、ドライ加工、金型成形などの低摩擦要件を満たします。テクスチャ設計は、ストライベック曲線理論に基づいています。流体動圧潤滑状態を最適化することで、油膜厚さは約1μm±0.1μmとなり、耐摩耗性（摩耗率<0.06mm³/N·m±0.01mm³/N·m）と硬度（>HV1500±30）を維持しながら潤滑効果を高めます。テクスチャ構造は、テクスチャのない表面と比較して、摩擦対の直接接触を減らすだけでなく、微細な溝やピットを通して摩耗粉を捕捉し、二次摩耗を防ぎ、工具寿命を延ばします。潤滑性と耐摩耗性の相乗的な最適化を実現することが目標で、電子金型、航空部品、石油掘削ツールなどの需要の高いシナリオに適しています。

テクスチャはレーザー加工技術によって実現され、波長1064nm±1nm、出力10W±0.1Wのレーザー装置を使用し、精度±0.1μmでテクスチャの深さと間隔の一貫性を確保しています。たとえば、WC5MoS₂サンプルの摩擦係数は、テクスチャ深さ5μm±0.1μmの条件下で0.12±0.01に低下し、テクスチャなしのサンプル（0.15±0.01）よりも優れており、付着力は0.7N±0.1Nに低下しており、表面テクスチャが潤滑性能を大幅に向上させることが実証されています。このセクションでは、潤滑メカニズム、加工技術、エンジニアリングアプリケーションの側面から詳細な分析を行い、テクスチャ設計が超硬合金の摩擦と耐久性をどのように最適化できるかを探ります。

9.3.2.2 超硬合金表面テクスチャ加工技術

テクスチャ加工にはレーザー加工技術を採用しています。波長1064nm±1nmのNd:YAGレーザーを使用し、10W±0.1Wの出力で精密エッチングを行います。スキャン速度は100mm/s±1mm/sに制御され、精度は±0.1μmに達します。レーザーパラメータを最適化した後、テクスチャ深さ110μm±0.1μm、間隔50~100μm±1μmで均一な微細構造を形成します。SEM検査により、テクスチャエッジが滑らか（Ra<0.05μm±0.01μm）であることが確認され、応力集中を回避しています。加工中は、Ar保護雰囲気がMoS₂の酸化（分解温度>1200°C±10°C）を防ぎ、潤滑剤の安定性を確保します。機械加工と比較して、レー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

レーザー加工は熱影響部 ($<10\ \mu\text{m}$) を低減し、WC マトリックスの硬度 ($>\text{HV } 1500 \pm 30$) を維持します。その後の熱処理（例： $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の焼戻し）により残留応力が除去され、テクスチャとマトリックス間の結合が強化されます。例えば、レーザーテクスチャリング後、 WC5MoS_2 の摩擦係数は 0.15 ± 0.01 から 0.12 ± 0.01 に低下し、摩耗率は $0.06\ \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\ \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 未満となり、プロセス最適化の有効性を実証しています。

超硬合金の表面性状と潤滑機構の解析

超硬合金の表面テクスチャは、微細構造設計によって自己潤滑性と耐摩耗性を大幅に向上させます。テクスチャ構造は、潤滑剤の貯蔵性を高め、油膜形成を最適化し、摩耗粉を捕捉することで摩擦係数と表面摩耗を低減し、高速切削、ドライ加工、金型成形などの用途に効率的な潤滑サポートを提供します。本セクションでは、テクスチャの潤滑メカニズムを深く分析し、摩擦係数、摩耗速度、せん断力への影響を探ります。さらに、顕微鏡観察と実験データを組み合わせ、テクスチャの深さ、間隔、加工技術が MoS_2 転写膜とどのように連携して潤滑効果を最適化するかを明らかにし、性能最適化の方向性を提案します。

9.3.2.3 超硬合金の表面性状と潤滑機構

表面テクスチャは、潤滑剤貯蔵容量 ($>90\% \pm 2\%$) を増加させることにより、自己潤滑性能を大幅に向上させます。マイクログループまたはピットは MoS_2 および C 粒子を貯蔵して連続油膜（厚さ $1\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ ）を形成し、摩擦係数を 0.12 ± 0.01 に低下させます。この油膜は、摩擦ペア間に流体潤滑を提供し、直接的な金属接触を低減します。ストライベック曲線は、混合潤滑条件下では、テクスチャ構造が潤滑剤の分布を最適化し、摩擦抵抗を低減することを示しています。テクスチャはまた、摩耗粉（サイズ $<1\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ ）を捕捉することにより三体摩耗を低減し、摩耗速度は、特に高速切削（例 $>500\ \text{m/min}$ ）で、 $<0.05\ \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\ \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ に制御されます。テクスチャ深さ $5\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ は流体力学的効果を最適化し、局所圧力は $1\ \text{MPa} \pm 0.1\ \text{MPa}$ を超え、油膜の耐荷重性を高めます。また、間隔 $50\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ は油膜の均一性（偏差 $<0.1\% \pm 0.02\%$ ）を確保し、局所的な潤滑不足を回避します。 MoS_2 の転写膜（厚さ $10\ \text{nm} \pm 1\ \text{nm}$ ）はせん断力 ($<1\ \text{MPa} \pm 0.1\ \text{MPa}$) をさらに低減し、その層状構造（層間隔 $6.2\ \text{\AA} \pm 0.1\ \text{\AA}$ ）はテクスチャ内で滑りを抑制し、被覆率は $90\% \pm 2\%$ を超え、相乗的に付着力を低減します ($<0.8\ \text{N} \pm 0.1\ \text{N}$)。

9.3.2.4 超硬合金の表面テクスチャの顕微鏡観察と検証

SEM 分析の結果、テクスチャ表面の摩耗粉が大幅に減少していることが示され ($<1\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$)、テクスチャキャプチャ効果が有効であり、二次摩耗と表面傷が減少したことを示しています。EDS 検出により、 MoS_2 がテクスチャ領域に豊富に含まれていることを確認し (Mo: S 比 $\sim 1: 2 \pm 0.1$)、潤滑剤の化学的安定性を検証しました。さらに、XPS は

MoS_2 の S 2p ピーク位置 ($\sim 162\ \text{eV} \pm 0.1\ \text{eV}$) を示し、その低せん断特性の原因を裏付けています。レーザー処理後、表面粗さ $R_a < 0.1\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 、テクスチャ完全性 $> 95\% \pm 2\%$ 、SEM ではテクスチャエッジが明らかな熱影響部なしで滑らかであること ($<10\ \mu\text{m}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が観察され、潤滑剤の均一な付着と油膜の安定性が確保されました。テクスチャ加工されていない表面 ($R_a \sim 0.5 \mu\text{m}$) と比較すると、テクスチャ加工された表面は粗さが低いいため、潤滑剤の付着性が向上し、工具寿命が延びます。

9.3.2.5 炭化物表面テクスチャパラメータの影響

テクスチャの深さは、潤滑性能と摩耗性能に二重の効果をもたらします。 $5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ の深さで流体力が最適化され、 $1\text{MPa} \pm 0.1\text{MPa}$ を超える圧力で油膜の安定性が確保され、摩擦係数は 0.12 ± 0.01 となります。しかし、テクスチャの深さが $10\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ を超えると、摩耗率は約 $10\% \pm 2\%$ 増加します。これは、テクスチャが深すぎると応力集中や潤滑剤の過剰な蓄積が発生する可能性があるためです。SEM 分析によると、深さが $10\mu\text{m}$ を超えると、摩耗粉の捕捉効率が低下し ($<85\%$)、局所摩耗が増加することがわかります。 $50\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ の間隔で油膜の均一な分布 (偏差 $<0.1\% \pm 0.02\%$) が確保されます。間隔が大きすぎる場合 ($100\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ を超える場合)、潤滑剤の貯蔵効率が低下し、摩擦係数が 0.18 ± 0.01 に上昇する可能性があります。将来的には、マルチスケールテクスチャ設計 (例えば、 $5\mu\text{m}$ のマイクロテクスチャと 100nm のナノテクスチャの組み合わせ) により、潤滑性と耐摩耗性のバランスをとることができます。

(1) 摩擦挙動と速度の影響

摩擦係数は滑り速度と一定の規則性を示しています。速度が $0.5 \text{ m/s} \pm 0.01 \text{ m/s}$ を超えると、摩擦係数はわずかに低下します ($5\% \pm 1\%$ 未満)。これは、高速走行時に MoS_2 転写膜の動的形成が加速され、油膜厚さがわずかに増加し ($1.1\mu\text{m}$ 超)、せん断力がさらに低下する (0.9 MPa 未満) ためです。SEM 観察では、高速摩擦後、転写膜被覆率が $95\% \pm 2\%$ 超に増加し、付着力が $0.7 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ に低下することが示されています。ただし、速度が高すぎる ($1 \text{ m/s} \pm 0.01 \text{ m/s}$ を超える) と、油膜が損傷し (90% 未満)、摩擦係数が再び上昇する可能性があります。高速作業条件に適応するには、テクスチャの深さと潤滑剤含有量を最適化する必要があります。摩擦熱 ($<100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) の制御はテクスチャの放熱による恩恵を受け、ツールの耐久性を延長します。

(2) アプリケーションの検証と最適化の方向性

テクスチャ潤滑機構はエンジニアリング用途で検証されています。高速切削では、 WC5MoS_2 (テクスチャ深さ $5\mu\text{m}$) の摩擦係数は 0.12 ± 0.01 、工具寿命は $5000\text{m} \pm 500\text{m}$ を超え、切削抵抗が低減します。乾式加工では、 WC3C の付着力は $0.7\text{N} \pm 0.1\text{N}$ 、摩擦熱は $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 未満であり、アルミニウム合金加工に適しています。金型成形では、 WC5MoS_2 の離型力は $10\text{N} \pm 1\text{N}$ 未満、寿命は 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍を超えます。将来的には、テクスチャ深さを $7 \sim 10\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ に調整することで油膜耐荷重性を高め、摩擦係数を 0.1 ± 0.01 に低減し、最適化を図ることができます。レーザーナノマシニング (波長 532nm) を使用してテクスチャを 100nm まで微細化し、摩耗率を $<0.04\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ まで低減します。プラズマ噴霧 MoS_2 コーティング (厚さ $15\mu\text{m}$) と組み合わせることで、航空機エンジンや重機などの高温 ($>800^\circ\text{C}$) または高負荷 ($>200\text{N}$) 環境に適応できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

潤滑剤 (>90%) を蓄え、摩耗粉を捕捉することで、摩擦係数を 0.12 ± 0.01 まで低減します。 $5\mu\text{m}$ の深さが流体力学的効果を最適化します。 MoS_2 転写膜 (10nm) がせん断力を低減します。SEM および EDS により潤滑効果を検証します。レーザー加工により、 $\text{Ra} < 0.1\mu\text{m}$ を確保します。将来的には、ナノテクスチャリングとコーティングの最適化により、過酷な動作条件下での性能をさらに向上させることができます。

9.3.2.6 超硬合金の表面性状と潤滑性に影響を与える要因の分析

超硬合金の表面テクスチャの潤滑性能は、潤滑剤の分布、油膜の安定性、加工品質、環境条件の変化によって、高速切削、乾式加工、金型成形における摩擦係数と耐摩耗性を決定する要因の組み合わせによって影響を受けます。テクスチャの深さ、間隔、潤滑剤含有量、加工精度、環境湿度などの重要なパラメータは、自己潤滑効果と機械的特性のバランスに直接影響します。これらの要因のメカニズムと相互作用を分析することにより、テクスチャ設計と加工技術を最適化し、電子金型、航空部品、石油掘削ツールなどの高需要シナリオのニーズを満たすことができます。このセクションでは、各影響要因の特性、実験データ、およびアプリケーションケースに基づいて、潤滑性能への影響を詳細に説明し、改善提案を提示します。

(1) テクスチャの深さ

テクスチャの深さは、潤滑および摩耗性能に大きな影響を与えます。深さが $5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ の場合、摩擦係数は低いままです ($< 0.12 \pm 0.01$)。これは、適切な深さが流体潤滑を最適化するためです。油膜厚さは約 $1\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ で、圧力は $> 1\text{MPa} \pm 0.1\text{MPa}$ で、潤滑剤の耐荷重能力を支えます。SEM 分析によると、深さ $5\mu\text{m}$ で MoS_2 転写膜 (厚さ $10\text{nm} \pm 1\text{nm}$) の被覆率が $> 90\% \pm 2\%$ になり、摩耗率が $0.05\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ に制御されます。ただし、テクスチャの深さが $10\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ を超えると、摩耗率が約 $10\% \pm 2\%$ 増加します。その理由は、テクスチャが深すぎると応力集中や潤滑剤の過剰蓄積が生じ、切削片捕捉効率 ($< 85\%$) が低下し、局所摩耗が激化するためです。例えば、テクスチャ深さ $15\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ の WC5MoS_2 の摩耗率は $0.08\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ に達するのに対し、 $5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ではわずか $0.05\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ にとどまります。これは、潤滑と耐摩耗性のバランスをとるために、深さを厳密に制御する必要があることを示しています。

(2) テクスチャ間隔

テクスチャ間隔は、油膜の安定性と潤滑の均一性にとって非常に重要です。 $50 \sim 100\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ の間隔範囲で均一な油膜分布 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) が確保され、摩擦係数は $< 0.12 \pm 0.01$ 、付着力は $< 0.8\text{N} \pm 0.1\text{N}$ に抑えられます。SEM 観察では、 $50\mu\text{m}$ 間隔の微細溝が MoS_2 および C 粒子を効果的に保持し、転写油膜の被覆率は $> 90\% \pm 2\%$ であることが示され、高速切削およびドライ加工の要件を満たしています。しかし、間隔が $50\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ 未満の場合、摩擦係数は約 $5\% \pm 1\%$ 増加します。これは、過密な組織が潤滑剤の流れを制限し、油膜厚さが減少し ($< 0.9\mu\text{m}$)、局所接触が増加し、凝着力が $1\text{N} \pm 0.1\text{N}$ まで上昇する可能

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性があるためです。間隔が大きすぎる場合 ($>100\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$)、貯蔵効率が低下し、摩擦係数は 0.18 ± 0.01 まで上昇します。間隔分布を最適化するにはレーザー加工が必要です。将来的には、段階的な間隔設計を使用して潤滑の均一性を向上させることができます。

(3) 潤滑剤

潤滑剤含有量は、転写膜の品質と機械的特性に直接影響します。MoS₂含有量が $5\%\pm 0.1\%$ の場合、転写膜の被覆率は高く ($>90\%\pm 2\%$)、摩擦係数は 0.12 ± 0.01 に低下し、層状構造 (層間間隔 $6.2\text{\AA}$) は、弱いファンデルワールス力 ($0.1\text{ eV}\pm 0.01\text{ eV}$) を通じてせん断力 ($<1\text{ MPa}\pm 0.1\text{ MPa}$) を低減します。EDS 分析により、MoS₂が濃縮されていること (Mo:S₄₄₉₇₀ ... しかし、MoS₂含有量が $10\%\pm 0.1\%$ を超えると、過剰な潤滑剤が粒界の弱化または凝集 ($>0.1\%$) につながり、マイクロクラックのリスクが高まるため、破壊靱性 (K_{1c}) が約 $10\%\pm 2\%$ 低下します。AC 含有量が $3\%\pm 0.1\%$ の場合、sp²滑り (滑りエネルギー $0.01\text{ eV}\pm 0.001\text{ eV}$) と接着 $<0.8\text{ N}\pm 0.1\text{ N}$ が得られます。C 含有量が高すぎると ($>5\%\pm 0.1\%$)、硬度が低下します ($>10\%\pm 2\%$) ため、比率を最適化する必要があります。将来的には、ナノ潤滑剤を導入して被覆率を向上させることができます。

(4) 処理精度

加工精度は、テクスチャ品質と潤滑効果に極めて重要です。レーザー出力 $10\text{ W}\pm 0.1\text{ W}$ で加工することで、テクスチャの完全性は $95\%\pm 2\%$ 以上、表面粗さ Ra は $0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ 未満となり、SEM による検証ではテクスチャのエッジが滑らかで、熱影響部 ($<10\mu\text{m}$) が無いことが確認されています。高精度加工により MoS₂転写膜の密着性が向上し、摩擦係数は 0.12 ± 0.01 、摩耗率は $0.05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 未満となります。しかし、レーザー出力が $20\text{ W}\pm 0.1\text{ W}$ を超えると、損傷は約 $5\%\pm 1\%$ 増加し、SEM 観察ではテクスチャのエッジにマイクロクラック ($<0.5\mu\text{m}$) または溶融領域 ($>15\mu\text{m}$) が観察され、油膜安定性は低下 ($<90\%$) し、摩擦係数は 0.16 ± 0.01 に増加します。最適化には出力と走査速度 ($100\text{ mm/s}\pm 1\text{ mm/s}$) の制御が必要であり、将来的にはマルチビームレーザーを使用することで加工の一貫性を向上させることができます。

(5) 環境

環境条件は潤滑性能に大きな影響を与えます。湿度が $50\%\pm 5\%$ を超えると、摩擦係数は約 $10\%\pm 2\%$ 増加します。これは、MoS₂および C 表面に水が吸着され、層間滑り能力が弱まり、転写フィルムの被覆率 ($<85\%$) が低下し、接着力が $1\text{ N}\pm 0.1\text{ N}$ に増加するためです。SEM 分析では、高湿度下では表面に微量の酸化物 ($<0.1\%$) が現れ、摩擦抵抗が増加します。乾式処理または海洋環境では、 $30\%\sim 50\%$ の湿度制御により潤滑を最適化できます。Ni の NiO 不動態化層 (厚さ $\sim 10\text{ nm}$) は、高湿度環境での保護を提供し、重量減少は $<0.06\text{ mg/cm}^2$ です。将来的には、防湿コーティング (TiN、厚さ $2\mu\text{m}$ など) や乾燥剤 (SiO₂、 $<1\%$ など) を使用して、湿度の影響を軽減し、低摩擦性能を維持できるようになります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（6）包括的なケースと最適化の方向性

WC5MoS₂を例にとると、テクスチャ深さ $5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ 、間隔 $50\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 、MoS₂ 5% $\pm 0.1\%$ 、レーザー出力 $10\text{W}\pm 0.1\text{W}$ の条件下では、摩擦係数は 0.12 ± 0.01 、摩耗率は $0.05\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ $\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ であり、深さ $15\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ で $0.08\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ より優れています。湿度 60% の環境では、摩擦係数は 0.132 ± 0.01 まで上昇しますが、 $R_a < 0.05\mu\text{m}$ まで研磨することで 0.125 ± 0.01 まで回復できます。今後の最適化により、テクスチャの深さを $7\sim 10\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ に調整して油膜の支持力を高めたり、間隔を $40\sim 60\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ に最適化して潤滑の均一性を改善したり、MoS₂ 含有量を 4% $\sim$ 6% に制御して靱性の低下を防いだり、レーザー出力を $8\sim 12\text{W}\pm 0.1\text{W}$ に制限して損傷を減らしたり、防湿コーティングを開発して高温 ($> 800^\circ\text{C}$) や高湿度 ($> 70\%$) の環境に適応したりできるようになります。

超硬合金表面テクスチャの潤滑性能は、テクスチャの深さ ($5\mu\text{m}$)、間隔 ($50\sim 100\mu\text{m}$)、MoS₂ 含有量 (5%)、加工精度 (10W)、および周囲湿度 ($< 50\%$) の影響を受けます。テクスチャの深さが $5\mu\text{m}$ の場合、摩擦係数は 0.12 に低下しますが、深さが深すぎると摩耗率が上昇します。将来的には、パラメータとコーティングを最適化することで、過酷な作業条件下での性能を向上させることができます。

9.3.2.7 超硬合金の表面テクスチャと潤滑の最適化戦略

炭化物表面テクスチャの摩擦係数 $< 0.2\pm 0.01$ を達成するには、耐凝着性 (凝着力 $< 0.8\text{N}\pm 0.1\text{N}$) と耐摩耗性 (摩耗率 $< 0.06\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) を考慮しながら、テクスチャ設計、潤滑剤の最適化、加工技術の改善、表面処理の最適化の包括的な戦略を通じて達成する必要があります。これらの対策は、MoS₂ と C の自己潤滑効果を高め、高速切削、乾式加工、金型成形の低摩擦要件を満たし、WC マトリックスの硬度 ($> \text{HV } 1500\pm 30$) と靱性 ($K_{IC} > 10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) を維持することを目的としています。以下は、テクスチャパラメータ、潤滑剤比率、加工技術、表面処理、テスト仕様の観点から最適化スキームを詳細に説明し、実際の結果を組み合わせることで実現可能性を検証したものです。

（1）テクスチャデザイン

テクスチャ設計は潤滑性能を最適化するための核心であり、推奨される深さは $5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ 、間隔範囲は $50\sim 100\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ です。この深さは、流体力学的効果により安定した油膜 (厚さ $1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) を形成し、圧力は $> 1\text{MPa}\pm 0.1\text{MPa}$ で、摩擦係数は 0.12 ± 0.01 に低下します。SEM 分析によると、転写膜の被覆率は $> 90\%\pm 2\%$ です。 $50\sim 100\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ の間隔は、油膜の均一な分布 (偏差 $< 0.1\%\pm 0.02\%$) を確保し、摩耗粉 ($< 1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) を捕捉し、三体摩耗を低減して、摩耗率は $< 0.06\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ です。深さ $> 10\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ (摩耗率が $10\%\pm 2\%$ 増加) と比較して、深さ $5\mu\text{m}$ では応力集中が回避され、高速切断や金型成形の要件に適しています。

（2）潤滑剤

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

潤滑剤の最適化により、潤滑効果が向上しました。MoS₂含有量は 5%±0.1%に設定されています。その層状構造（層間間隔 6.2Å±0.1Å）は、弱いファンデルワールス力（0.1 eV±0.01 eV）を介して移動膜（厚さ 10nm±1nm）を形成し、摩擦係数を 0.12±0.01 に低減します。C 含有量は 3%±0.1%に制御され、sp²結合構造（滑りエネルギー 0.01 eV±0.001 eV）により、付着力を 0.8 N±0.1 N 未満に低減します。SEM 観察により、潤滑剤が均一に分散していることが確認されています（偏差<0.1%±0.02%）。MoS₂>10%±0.1% または C>5%±0.1% の場合、K_{1c}が 10%～15%低下する可能性があります。微量抑制剤（VC など、1%未満）を添加することで、相溶性を最適化することができます。将来的には、ナノ潤滑剤を導入することで、被覆率を向上させることができます。

（3）加工技術

加工技術は、波長 1064 nm±1 nm、出力 10W±0.1W のレーザー技術を採用し、テクスチャ精度±0.1μm、スキャン速度 100mm/s±1mm/s を確保しています。SEM 観察では、出力 10W でテクスチャの完全性は 95%±2%以上、Ra<0.1μm±0.01μm であり、熱影響部（<10μm）がないため、MoS₂転写フィルムの密着性が促進されます。出力>20W±0.1W（損傷が 5%±1% 増加）と比較して、10W ではマイクロクラック（<0.5μm）や熔融部が回避され、Ar 保護雰囲気により MoS₂の酸化（分解温度>1200°C±10°C）が防止されます。その後、800°C±10°C でアニール処理することで、応力が除去され、テクスチャと基板間の結合が強化されます。

（4）表面処理

表面処理 研磨により潤滑性を最適化し、推奨粗さは Ra<0.05 μm±0.01 μm です。ダイヤモンド研磨または化学機械研磨（CMP）を使用して欠陥を除去します。平坦な表面は MoS₂ 転写フィルムの付着性を高め（被覆率 > 95%±2%）、摩擦係数を 0.12±0.01 に下げ、付着力を <0.7 N±0.1 N にします。研磨後の超音波洗浄で残留物が除去され、SEM で均一性（偏差 <0.1%）を確認し、湿度（>50%±5%）による摩擦増加（<5%±1%）を抑えます。金型成形では、Ra<0.05 μm により離型力（<10 N±1 N）が軽減され、ワークピースの品質が向上します。

（5）試験仕様

試験は ASTM G99 規格のピンディスク摩擦摩耗試験を採用し、荷重 10 N±0.1 N、速度 0.1 m/s±0.01 m/s で低速作業環境をシミュレートしました。環境は 25°C±2°C、湿度 50%±5% に制御され、3 回繰り返して平均し、摩擦係数と摩耗率を測定しました。この条件下では、WC5MoS₂C3 サンプルの摩擦係数は 0.12±0.01、摩耗率は 0.05 mm³/N·m±0.01 mm³/N·m であり、最適化されていないサンプル（0.15±0.01）よりも良好でした。SEM と EDS を組み合わせて転写フィルムの被覆率と潤滑剤の分布を分析することで、将来的には高速テスト（>0.5 m/s±0.01 m/s）や高温環境（>400°C）に拡張できます。

（6）総合的な最適化効果と適用検証

上記の戦略により、WC5MoS₂C3 は、テクスチャ深さ 5μm、ピッチ 50～100μm、レーザー 1064nm、Ra <0.05μm の条件下で、摩擦係数 0.12±0.01、密着力 0.7N±0.1N、摩耗率

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.05mm³/N·m を実現します。±0.01mm³/N·m、硬度 HV 1550±30、K_{1c} 10MPa·m^{1/2}±0.5。高速切削での工具寿命>5000m±500m、乾式加工での摩擦熱<100°C±1°C、金型成形での工具寿命>10⁶倍±10⁵倍。WC10Co（摩擦係数 0.5±0.05）と比較して、最適化後の性能は約 75% 向上します。将来的には、ナノテクスチャリングや多層コーティングにより、高温(>800°C) や高荷重(>200 N) への適応も可能となります。

（7）環境管理と将来の発展

湿度は 30%~50% に制御され、湿度上昇（10%±2%）を防ぎます。また、Ar 保護と防湿コーティング（SiO₂ など、1% 未満）により安定性が向上します。将来的には、プラズマ溶射（厚さ 15μm）と組み合わせた動的摩耗試験（>1 m/s ± 0.01 m/s）または長期耐久性試験（>1000 時間）を導入することで、航空およびエネルギー用途の拡大を目指します。

炭化物の表面テクスチャは、深さ 5μm、間隔 50~100μm、MoS₂5%、C₂3%、1064nm レーザー、Ra<0.05μm に最適化されており、摩擦係数<0.2 を実現しています。ASTM G99 試験でその効果が検証されています。WC5MoS₂C₃ を例にとると、WC10Co よりも優れた性能を示しており、将来的にはナノテクノロジーとコーティングによってさらに向上する可能性があります。

9.3.2.8 超硬合金の表面テクスチャと潤滑工学への応用

MoS₂ および C 潤滑剤と組み合わせた超硬合金表面テクスチャは、自己潤滑性能を大幅に向上させ、さまざまな高要求エンジニアリングシナリオで優れた性能を発揮します。テクスチャ構造は、油膜形成と切削片捕捉を最適化することで、摩擦係数（<0.2±0.01）と凝着力（<0.8 N ± 0.1 N）を低減し、工具および部品の耐用年数を延ばし、高速切削、ドライ加工、精密機械のアプリケーション要件を満たします。以下では、具体的なアプリケーションシナリオ、性能上の利点、および実際のケースに基づいて、そのエンジニアリングアプリケーション価値を詳細に説明し、産業効率と耐久性への貢献を分析します。

（1）高速工具

高速工具用途において、WC5MoS₂ は優れた自己潤滑性により優れた性能を発揮します。テクスチャ深さは 5μm±0.1μm に設定されており、MoS₂ 転写膜（厚さ 10nm±1nm）の形成が最適化され、摩擦係数は 0.12±0.01 に低減されます。SEM 分析によると、転写膜の被覆率は 90%±2% を超えており、チップと工具表面の直接接触が低減し、工具寿命が 5000m±500m 以上延長され、従来の WC10Co 工具（寿命約 3000m）をはるかに上回ります。この性能は、高硬度材料（チタン合金やステンレス鋼など）の加工や高速条件（>500m/min）で特に顕著であり、切削抵抗と摩耗率が低減し、表面仕上げが向上し、クーラント使用量が削減され、環境に優しい製造要件を満たします。

（2）乾燥したカピ

ドライモールドでは、WC3C は低付着性と長寿命という点で有利です。テクスチャ間隔を 50μm±1μm に設定することで、油膜の均一な分布（偏差<0.1%±0.02%）を確保しています。C の sp² 結合構造（滑りエネルギー 0.01eV±0.001eV）は安定した潤滑膜を形成し、付着力

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は $0.8\text{N}\pm 0.1\text{N}$ に低減します。SEM 観察では、テクスチャが摩耗粉 ($<1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) を捕捉し、二次摩耗を低減し、金型寿命が 10^6 回 $\pm 10^5$ 回を超え、WC10Co 金型（寿命約 5×10^5 回）をはるかに上回っていることが示されています。自動車のダッシュボードや電子機器ハウジングの製造などの乾式射出成形やスタンピングでは、低接着性によりワークの接着力が低下し、摩擦熱が $100^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ 未満に制御されるため、生産効率と表面品質が向上し、環境に優しい加工の利点が反映されます。

（3）軸受部品

ベアリング部品の用途では、WC5MoS₂は優れた耐久性と低摩擦特性を示し、表面は $\text{Ra} < 0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ に研磨され、MoS₂転写フィルムの密着性が向上し（被覆率 $>95\%\pm 2\%$ ）、摩擦係数は 0.15 ± 0.01 と安定しています。テクスチャの深さ $5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ は流体潤滑を最適化し、油膜厚さは約 $1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ で、ベアリング内の摩擦ペアの摩耗が低減し、耐用年数は 10^4 時間 $\pm 10^3$ 時間を超え、従来のスチールベアリング（寿命約 5000 時間）よりも優れています。この性能は、航空機エンジン、自動車トランスミッションシステム、産業機械で傑出しており、メンテナンス頻度とエネルギー消費を削減します。

（4）航空タービンコーティング

WC10MoS₂テクスチャコーティングは、航空タービン部品において優れた性能を発揮します。テクスチャの深さは $5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ 、間隔は $50\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ で、高速気流や粒子の摩耗による摩擦を低減します。摩擦係数は 0.12 ± 0.01 で、耐用年数は 6000 時間以上に延長されます。MoS₂の高温安定性 ($>400^\circ\text{C}$) は、エンジン環境下でも潤滑効果を維持します。摩擦熱は 100°C 未満であるため、コーティングの耐疲労性が向上し、航空部品のメンテナンスコストが削減され、高高度飛行条件にも適しています。

（5）石油掘削ツール

WC8MoS₂C (MoS₂ 5%、C 3%) テクスチャードドリルビットは、石油掘削において優れた性能を発揮します。テクスチャ深さ $5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ で掘削屑 ($<1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) を捕捉し、付着力は $0.8\text{N}\pm 0.1\text{N}$ 未満で、従来の素材と比較してドリルビット寿命が約 25% 向上します。乾式掘削条件下では、摩擦熱が 100°C 未満で、MoS₂と C が相乗的に切削抵抗を低減し、硫黄含有岩層や高硬度岩層での効率が向上し、交換頻度と運用コストを削減します。

（6）医療機器

WC5MoS₂テクスチャードメスは医療分野で高い可能性を示しています。テクスチャ間隔 $50\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 、 $\text{Ra} < 0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ は、低摩擦切削を実現し、摩擦係数 0.12 ± 0.01 、接着強度 $0.7\text{N}\pm 0.1\text{N}$ を実現し、組織損傷を軽減します。寿命は 5000 回を超え、滅菌環境における高精度の要件を満たし、手術の安全性と器具の耐久性を向上させます。

（7）包括的な給付と適用範囲の拡大

表面テクスチャと潤滑剤の相乗効果により、超硬合金の性能が大幅に向上し、高速工具の切削寿命が延び、ドライモールドの生産効率が向上し、ベアリング部品の耐久性が向上し、航空コーティングによりメンテナンスコストが削減され、石油掘削ツールの動作効率が最適化され、医療機器の安全性が確保されます。WCTiCNi テクスチャシステムの摩擦係数

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は WC10Co（摩擦係数 0.5 ± 0.05 、粘着力 $> 2 \text{ N}$ ）と比較して、約 75% 低減され、粘着力が 50% 以上低減されるため、加工精度と工具寿命が向上します。さらに、テクスチャ設計は鉄道線路の耐摩耗層などの新しい用途をサポートし、WC8MoS₂C は線路の摩擦損失を低減します。ウェアラブルエレクトロニクスでは、WC3C の低粘着性がフレキシブル導電性部品をサポートします。将来的には、ナノテクスチャリングや多層コーティングを通じて、エネルギー分野や航空分野への応用が拡大する可能性があります。

超硬合金の表面テクスチャは、高速工具、乾式金型、軸受部品、航空コーティング、石油掘削工具、医療機器などで優れた性能を発揮します。WC5MoS₂ の摩擦係数は 0.12 ± 0.01 で寿命は 5000m 以上、WC3C の密着力は 0.8N で寿命は 10⁶ 倍以上、WC5MoS₂ の耐用年数は 10⁴ 時間以上であり、テクスチャと潤滑剤の相乗的な最適化による自己潤滑性能を実証しています。今後、材料革新により、より幅広いニーズに対応できるようになります。

9.4 バイオニクスとインテリジェントセメントカーバイド

バイオニックでインテリジェントな超硬合金は、革新的な材料設計により、適応性（応答時間 $< 1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ ）と高性能（硬度 $> \text{HV } 1400 \pm 30$ ）を実現し、傾斜構造（気孔率 $5\% - 20\% \pm 1\%$ ）、多孔質構造（気孔サイズ $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）、応答性材料（変形率 $< 0.1\% \pm 0.01\%$ ）と組み合わせられ、インテリジェント製造（精度 $< 1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）、バイオメディカル（互換性 $> 95\% \pm 2\%$ ）、航空（疲労寿命 $> 10^6$ 回 $\pm 10^5$ 回）などの分野のニーズを満たしています。従来の超硬合金は、均一で緻密な構造のために適応性に欠け、動的負荷、温度変化、または生物学的環境への対応が難しく、複雑な作業条件での適用が制限されています。バイオニックデザインは、自然界の多層構造と適応特性（貝殻や竹など）にヒントを得たもので、スマート応答材料（NiTi 合金など）の変形能力と組み合わせられ、セメントカーバイドにインテリジェントな潜在能力を注入します。

本章では、バイオニック微細構造（傾斜・多孔質）の設計原理、インテリジェント応答材料のメカニズムと応用展望から始め、バイオニクスの事例、材料特性分析、エンジニアリング事例を組み合わせ、超硬合金のインテリジェント化に向けた発展の道筋を探ります。例えば、傾斜 WC-Co（気孔率 $10\% \pm 1\%$ ）の硬度は $\text{HV } 1450 \pm 30$ に達し、変形率は $0.05\% \pm 0.01\%$ で、インテリジェント金型の動的調整要件をうまく満たしています。

バイオニック微細構造設計

バイオニック微細構造はスマート超硬合金の核心であり、貝殻の層状傾斜構造と竹の多孔質靱性配置にヒントを得ています。傾斜構造は、5% から $20\% \pm 1\%$ までの段階的な気孔率分布により、高い表面硬度（ $> \text{HV } 1500$ ）から高い内部靱性（ $K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）への移行を実現します。SEM 分析では、気孔が均等に分布していること（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）が示されており、亀裂伝播に対する抵抗力を高めています。多孔質構造は、 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ の気孔サイズで設計されており、材料の透過性を高め、潤滑剤（MoS₂ など）の浸透や生物組織の成長を促進します。気孔率が $10\% \pm 1\%$ の場合、硬度は $\text{HV } 1450 \pm 30$ を維持し、変形率は $< 0.1\% \pm 0.01\%$ となり、適応変形の要件を満たしています。殻内の CaCO₃ 層と有機層

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の交互構造は、傾斜設計の機械的最適化に役立ち、竹の節間多孔質配置は多孔質構造の応力分散を誘導しました。従来の WC-Co 単層構造と比較して、バイオニック設計は疲労寿命を向上させました ($>10^6$ 倍 $\pm 10^5$ 倍)。

スマートレスポンスマテリアル

スマートレスポンス材料は、超硬合金に適応性を与えます。NiTi 変形合金は代表的な例です。その形状記憶効果と超弾性（変形率 $<0.1\% \pm 0.01\%$ ）により、 $<1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ の応答時間内で材料の変形を調整し、動的負荷や温度変化に適応します。NiTi の相転移温度（約 $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ）は、熱処理によって調整されます。WC マトリックスに統合された後、傾斜構造の Ni 相（含有量 $5\%-10\% \pm 0.1\%$ ）はインテリジェントネットワークを形成します。SEM 観察では、NiTi 粒子が均一に分布している（偏差 $<0.1\%$ ）ことが示されており、材料の歪み回復能力（ $>95\% \pm 2\%$ ）が向上しています。従来の超硬合金と比較して、スマートレスポンス材料は、熱膨張や機械的応力によって引き起こされる微小亀裂（ $<0.5 \mu\text{m}$ ）を低減します。航空部品では疲労寿命が 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍に向上し、WC10Co（約 5×10^5 倍）よりも優れています。

9.4.1 セメント炭化物のバイオニック微細構造（傾斜構造と多孔質構造）

9.4.1.1 セメント炭化物の傾斜多孔質構造の原理と技術概要

バイオニック微細構造は、傾斜構造（硬度 $\text{HV } 1400 \sim 1800 \pm 30$ 、気孔率 $5\% \sim 20\% \pm 1\%$ ）と多孔質構造（気孔サイズ $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）を組み合わせることで、超硬合金の機械的特性（^{破壊} 靱性 $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）を大幅に最適化します。 ± 0.5 ）および機能性（エネルギー吸収率 $>50\% \pm 5\%$ ）により、適応性と耐久性が向上します。このデザインは自然にヒントを得ています。殻の層状構造（硬度勾配約 $1 \text{ GPa/mm} \pm 0.1 \text{ GPa/mm}$ ）は、外層の高硬度 CaCO_3 と内部の有機層の靱性を組み合わせることで優れた耐衝撃性を実現し、竹の多孔質構造（気孔率約 $30\% \pm 2\%$ ）は、節間分布により応力分散とエネルギー吸収を最適化します。これらの自然界のプロトタイプは、スマート製造、バイオメディカル、航空といった需要の高い用途に対応するために、硬度 $> \text{HV } 1400 \pm 30$ 、疲労寿命 $> 10^6$ 倍 $\pm 10^5$ 倍を達成することを目標とした、超硬合金のバイオニック設計にインスピレーションを与えました。従来の均一で高密度な超硬合金（WC-Co など）と比較して、バイオニック微細構造は、勾配と多孔性によって靱性とエネルギー吸収性能を向上させ、動的環境における単一構造の限界を打ち破ります。

製造工程では、勾配粉末積層法を採用し、粒径 $0.52 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の WC 微粉末を使用し、積層により Co 含有量を制御して硬度勾配を実現し、気孔形成剤 PMMA（粒径 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）を添加して多孔質構造を導入し、 $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で焼結し、中程度の圧力（ $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ）と組み合わせて材料密度と気孔の均一性を確保します。たとえば、勾配 WC-Co（気孔率 $10\% \pm 1\%$ ）の硬度は $\text{HV } 1450 \pm 30$ に達し、 K_{1c} は $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ であり、均一 WC-Co の $\text{HV } 1500 \pm 30$ および $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ よりも優れており、バイオニック設計の性能上の利点を実証しています。このセクションでは、メカニズム分析、準備プロ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

セス、最適化戦略の観点から、傾斜構造と多孔質構造がセメント炭化物のエンジニアリング応用の可能性をどのように高めることができるかを検討します。

9.4.1.2 超硬合金の傾斜構造と多孔質構造のメカニズムと解析

超硬合金のバイオニック微細構造は、傾斜構造と多孔質構造の協調設計を通じて、その機械的特性と機能性を大幅に最適化し、インテリジェント製造、バイオメディカル、航空などの分野に高性能材料を提供します。本セクションでは、傾斜構造と多孔質構造のメカニズムを深く分析し、硬度、靱性、エネルギー吸収率、疲労寿命への影響を探ります。さらに、顕微鏡観察と実験データを組み合わせ、Co 含有量の傾斜、多孔質パラメータ、WC 粒径が超硬合金のエンジニアリング応用の可能性をどのように高めるかを明らかにします。

（1）勾配構造のメカニズム

傾斜構造は、Co 含有量（5%～15%±1%）を段階的に分布させることで、硬度勾配（HV 1400～1800±30）を形成します。表面の Co 含有量が高い（15%±1%）ため靱性が高く、内部の Co 含有量が低い（5%±1%）ため硬度が確保されます。SEM 分析では、Co の分布が連続的（偏差<0.1%±0.02%）であり、相境界欠陥を回避していることが示されています。この傾斜設計により、応力分散率が 50%±5%を超え、層状化により応力集中を緩和します。破壊靱性（ K_{IC} ）は均一構造と比較して約 30%±5%増加し、 $15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ を超えます。疲労試験（ 10^6 回 ± 10^5 回）では、亀裂の進展は勾配構造によって抑制され、長さは $0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 未満でした。これは、Co 勾配により亀裂伝播速度（ $< 10^{-6} \text{ m/s}$ ）が遅くなるため、均一な WC-Co（亀裂の進展 $> 0.2 \text{ mm}$ ）よりも良好でした。

（2）多孔質構造のメカニズム

多孔質構造は、 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ の気孔サイズで設計されており、材料密度が約 $12 \text{ g/cm}^3 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ に低下します。これは、均質 WC-Co $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ の 14.5 g/cm^3 と比較して低下するため、重量が軽減されるとともに、エネルギー吸収が 50%±5%以上向上します。気孔率 10%±1%で硬度と靱性のバランスが取れており、WC 粒子 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ によって提供される気孔壁強度は $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ を超えます。SEM 観察では、気孔壁が緻密であることがわかります（気孔率偏差<0.5%±0.1%）。これにより、圧縮強度が向上します。しかし、気孔率が 20%±1%を超えると、硬度は約 20%±3%低下します。これは、過剰な気孔率は粒界の弱化とマイクロクラック密度の増加（ $> 10^4 \text{ m}^{-2}$ ）につながり、構造安定性に影響を与えるためです。エネルギー吸収率の向上は、多孔質構造による衝撃エネルギーの分散に由来し、動的荷重環境に適しています。

（3）ミクロ分析

SEM による顕微鏡観察では、勾配 WC-Co の Co 分布は連続的であり、多孔質構造の多孔度偏差は<0.5%±0.1%であり、 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ の細孔サイズが均一に分布しているため、材料の透過性とエネルギー吸収が向上していることが確認されました。EDS 検出により、Co 含有量の勾配（5%-15%±1%）が確認され、表面の Co 濃縮（15%±1%）が靱性サポートを提供します。XPS 分析では、酸素含有量が低いことが示されており（O 1s ピークヘ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

532 eV $\pm$ 0.1 eV)、1400°C $\pm$ 10°C の焼結プロセスによって酸化が効果的に制御され、表面安定性が最適化されていないサンプル（酸素含有量 $>$ 0.5%）よりも優れていることがわかります。さらに疲労試験の結果から、亀裂の拡大は 0.1 mm $\pm$ 0.01 mm 未満であることが裏付けられ、勾配と多孔質構造の相乗的な強化効果が実証されました。

（4）焼結温度と性能制御

1400°C $\pm$ 10°C の焼結温度は、気孔率と機械的特性を制御する鍵です。MoS₂ の分解温度（ $>$ 1200°C $\pm$ 10°C）よりも低いため、潤滑油の安定性が確保され、Ar 保護雰囲気酸が酸化を抑制します。温度制御により、気孔率の偏差は 0.5% $\pm$ 0.1% 未満となり、SEM 観察では WC の粒度が 0.5 μ m $\pm$ 0.01 μ m に微細化され、気孔壁の強度は 100MPa $\pm$ 10MPa を超えています。高温焼結（ $>$ 1450°C $\pm$ 10°C）と比較して、1400°C では粒成長（ $>$ 2 μ m）による硬度の低下（ $>$ 10% $\pm$ 2%）を回避し、K_{1c} $>$ 15MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.5 を維持します。

（5）アプリケーションの検証と最適化の方向性

勾配多孔質構造はエンジニアリングにおいて優れた性能を発揮し、勾配 WC-Co（気孔率 10% $\pm$ 1%）硬度 HV 1450 $\pm$ 30、K_{1c} 16 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.5、疲労寿命 $>$ 10⁶ 倍 $\pm$ 10⁵ 倍で、スマート金型や航空部品に適しています。気孔率を 5% $\sim$ 10% $\pm$ 0.5% に微細化し、気孔径を 50 μ m $\pm$ 0.1 μ m に縮小し、ナノ WC（ $<$ 0.3 μ m）を導入して気孔壁強度（ $>$ 120MPa）を向上させ、3D プリントと組み合わせて複雑な勾配を実現し、高温（ $>$ 800°C）や高荷重（ $>$ 200N）に適応することで最適化を実現できます。

超硬合金のバイオニック微細構造は、Co 勾配（5% $\sim$ 15%）、K_{1c} の 30% 増加、エネルギー吸収率 50% 超の多孔質構造（細孔径 110 μ m）、そして 1400°C での焼結により、HV 1400 $\sim$ 1800 の硬度を実現し、性能を確保しています。例えば、WC-Co 勾配（HV 1450、K_{1c} 16MPa $\cdot$ m^{1/2}）は、将来的にナノ最適化によって耐久性をさらに向上させることができます。

9.4.1.3 超硬合金のバイオニック微細構造、勾配および多孔質構造に影響を与える要因の分析

超硬合金のバイオニック微細構造、傾斜構造、多孔質構造の性能は、気孔率、Co 勾配、気孔径、焼結温度、粒径など、多くの要因によって制御され、微視的メカニズムを通じて材料の硬度、破壊靱性（K_{1c}）、強度、エネルギー吸収率に影響を与えます。以下では、破壊力学、複合界面理論、熱力学的平衡、多孔質材料の力学モデル、粒子強化メカニズム、焼結速度論などの科学的原理に基づき、各要因とその理論的根拠を分析します。

（1）多孔性

、超硬合金の破壊靱性（K_{1c}）と硬度に直接影響します。気孔率が 10% $\pm$ 1% の場合、適度な気孔が応力分散に役立つため、K_{1c} は高くなります（ $>$ 15 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.5）。気孔率が 20% $\pm$ 1% を超えると、硬度は約 20% $\pm$ 3% 低下します（たとえば、HV 1450 $\pm$ 30 から HV 1200 $\pm$ 30）。これは、気孔率の増加が材料の連続性を弱めるためです。グリフィス亀裂理論によると、気孔は初期の亀裂源として機能し、過度の気孔率は亀裂伝播のエネルギー放出を増加させ、硬度を低下させます。一方、均一に分布した気孔はエネルギー散逸メカニズム（塑性変形など）を通じて K_{1c} を増加させ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ますが、これはギブソン・アシュビーモデルにおける多孔質材料の機械的挙動と一致しています。

(2) 共線勾配

コバルト (Co) の勾配分布は、応力分散性能を向上させます。Co 含有量が 5%~15%±1% の場合、応力分散効果が良好で、破壊靱性が約 10%±2% 向上します。これは、低い Co 勾配が安定した結合相ネットワークを形成し、フィックの第二法則の拡散制御勾配分布モデルに準拠するためです。Co 含有量が 20%±1% を超えると、偏析が約 10%±2% 増加し（局所 Co 含有量偏差 > 0.5%±0.1%）、粒界が弱くなり、硬度変動が激しくなります。これは相分離理論（ギブスの自由エネルギー最小化）に従い、粒界エネルギー (> 1 J/m²) が増加し、材料強度が低下します。

(3) 絞り

気孔サイズはエネルギー吸収率と強度に影響します。気孔サイズが 10 μm±0.1 μm の場合、小さな気孔サイズにより応力分散が容易になるため、エネルギー吸収率は高くなります（90%±2% 以上）。気孔サイズが 20 μm±0.1 μm を超えると、強度は約 15%±3% 低下します（たとえば、1000 MPa から 850 MPa±20 MPa）。これは、大きな気孔が応力集中を誘発しやすいためです。Hashin-Shtrikman 理論に基づくと、小さな気孔は応力を分散させることでエネルギー吸収率を高めませんが、大きな気孔は局所的な応力集中をもたらす、これは最大せん断応力理論と一致しています。

(4) 焼結温度

焼結温度は、微細構造の安定性と多孔度に大きな影響を与えます。1400°C±10°C では、構造が安定し、多孔度の偏差は 1%±0.1% 未満です。これは、温度が Co の融点（1495°C）に近く、均一な液相を形成し、粒子の再配置を促進するためです。これは、Kingery モデルの固相焼結および液相焼結理論と一致しています。温度が 1450°C±10°C を超えると、多孔度の偏差は約 5%±1% 増加し（局所多孔度 > 0.5%±0.1%）、材料の均一性が低下します。これは、Arrhenius 式における拡散速度の指数関数的増加と一致しています。

(5) 粒度

粒径は性能最適化に影響します。粒径が 0.51 μm±0.01 μm のとき、性能が最適となり、K_{1c} は 16 MPa·m^{1/2}±0.5 に達し、硬度は HV 1450±30 で安定します。これは、微細粒子によって粒界密度 (> 10¹⁴ m⁻²) が増加し、亀裂伝播が妨げられ、ホールベッチ関係に従うためです。粒径が 2 μm±0.01 μm を超えると、K_{1c} は約 10%±2% 減少し（14.4 MPa·m^{1/2}±0.5 まで）、これは粒界密度の減少によるオロワン強化メカニズムと一致しています。

(6) 包括的な例

WC-Co を例にとると、気孔率が 25%±1% のサンプルは気孔が多すぎるため、硬度は HV 1200±30 にとどまり、K_{1c} は 13 MPa·m^{1/2}±0.5 に低下します。一方、気孔率が 10%±1% で粒径が 0.51 μm±0.01 μm のサンプルは、硬度が HV 1450±30 で、K_{1c} は 16 MPa·m^{1/2}±0.5 を維持し、優れた総合特性を示しています。SEM 分析により、さらに、Co 勾配が 10%±1%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

で焼結温度が $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ のサンプルは、他の条件のサンプルよりも偏析率 ($< 0.1\% \pm 0.02\%$) と気孔均一性 ($> 95\% \pm 2\%$) が大幅に優れていることが確認されました。

超硬合金のバイオニック微細構造、傾斜構造、多孔質構造の性能は、気孔率 ($10\% \pm 1\%$)、Co 勾配 ($5\% \sim 15\% \pm 1\%$)、気孔径 ($10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)、焼結温度 ($1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)、粒径 ($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) などの要因によって制御されます。気孔率と粒径は K_{1c} と硬度を左右し、Co 勾配は応力分散を最適化し、焼結温度は構造安定性を確保し、気孔径はエネルギー吸収と強度に影響を与えます。これらのパラメータを最適化することで、工具や金型などのハイエンド用途のニーズを満たす精密な性能制御が可能になります。

9.4.1.4 超硬合金のバイオニック微細構造、傾斜構造および多孔質構造の最適化

$K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ の超硬合金バイオニック微細構造は、エネルギー吸収率 ($> 50\% \pm 5\%$)、疲労寿命 ($> 10^6 \text{ 回} \pm 10^5 \text{ 回}$)、複雑な環境での安定性を考慮しながら、構造設計、気孔形成剤の最適化、焼結プロセスの調整、粒子制御などの包括的な戦略を通じてこれを達成する必要があります。これらの最適化措置は、傾斜構造と多孔質構造の相乗効果を高め、自然のバイオニック原理（貝殻の硬度勾配や竹の多孔質靱性など）を最大限に活用して、材料の適応性と耐久性を維持しながら、インテリジェント製造、バイオメディカル、航空などの需要の高いアプリケーションのニーズを満たすことを目的としています。以下では、構造パラメータ、準備プロセス、マイクロ制御、環境適応性の観点から最適化スキームを詳細に説明し、実験データと実際のアプリケーション効果を組み合わせ、その実現可能性を十分に検証し、さらなる改善の余地を探ります。

（1）構造

構造の最適化は、 $10\% \pm 1\%$ の多孔度と $5\% \sim 15\% \pm 1\%$ の Co 含有量勾配に基づいています。多孔度 $10\% \pm 1\%$ では、均質 WC-Co $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ の場合の 14.5 g/cm^3 と比較して、微細多孔構造 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ によって材料密度が約 12 g/cm^3 に低下し、重量が大幅に軽減されるとともに、多孔質構造による衝撃エネルギーの効率的な分散によりエネルギー吸収が $50\% \pm 5\%$ 超に増加します。SEM 分析により、気孔が均等に分布している（偏差 $< 0.5\% \pm 0.1\%$ ）ことが示され、多孔度が $20\% \pm 1\%$ を超える場合の粒界弱化によって引き起こされる硬度の低下（約 $20\% \pm 3\%$ ）とマイクロクラックの増加 ($> 10^4 \text{ m}^{-2}$) が回避されます。Co 含有量の勾配が 5% （内部高硬度部）から 15% （表面高靱性部）に増加し、硬度勾配 HV $1400-1800 \pm 30$ を形成し、 K_{1c} が約 $30\% \pm 5\%$ ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$) 増加し、応力分散率が $50\% \pm 5\%$ を超え、層別化により応力集中を緩衝することで耐疲労性が大幅に向上し、疲労寿命は $10^6 \text{ 倍} \pm 10^5 \text{ 倍以上}$ に達します。この勾配設計は、スマートモールドの頻繁な変形や航空部品の高周波振動などの動的荷重環境に特に適しています。均一構造 (K_{1c} 約 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$) と比較して、靱性が大幅に向上します。

（2）造孔剤

PMMA を造孔剤として使用し、その粒子径は $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ に精密に制御されています。添加量は $5\% \pm 0.1\%$ に設定され、熱分解によって均一な多孔質構造を形成することを目的としています。PMMA は焼結プロセス中に $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ で分解し、気孔径 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の多孔質ネットワークを生成します。SEM は、WC 粒子 ($0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$) の微細な支持により、気孔率の偏差が $<0.5\%\pm 0.1\%$ であり、気孔壁の強度が $>100\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$ であることを確認しています。 $5\%\pm 0.1\%$ の添加量は、多孔性と硬度のバランスを確保します。5%未満の含有量では、エネルギー吸収が不十分 ($40\%\pm 5\%$ 未満) となり、衝撃環境における材料の性能が制限される可能性があります。一方、 $10\%\pm 0.1\%$ を超える含有量では、硬度の低下 ($10\%\pm 2\%$ 超) や、過剰な多孔性による構造安定性の低下が生じる可能性があります。最適化により、ナノサイズの PMMA (粒子サイズ $< 50\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) を導入することで多孔構造を微細化し、靱性をさらに高め、生体適合性 (骨組織の成長など) を向上させることができます。特にインプラント用途においてその可能性が期待されます。

(3) 焼結工程

焼結工程では、 $1400^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{MPa}\pm 1\text{MPa}$ の圧力でホットプレスを行い、材料の密度と気孔率の均一性を確保しています。 1400°C は MoS_2 の分解温度 ($> 1200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) よりも低く、Ar 保護雰囲気下での酸化を効果的に防止します。SEM 観察では、WC 粒子は微細化されており、気孔率の偏差は $10\%\pm 1\%$ から $0.5\%\pm 0.1\%$ 未満に制御されていることが示されています。 50MPa の圧力により、Co 勾配分布の均一性 (偏差 $< 0.1\%\pm 0.02\%$) と細孔壁強度 ($> 100\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$) が向上し、高温焼結 ($> 1450^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) による粒成長 ($> 2\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$) や硬度低下 ($> 10\%\pm 2\%$) が回避されます。段階的な加熱戦略 (1200°C で予熱した後、 1400°C まで加熱) により、熱応力 ($< 50\text{MPa}$) をさらに低減し、 $K_{1c} > 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ に向上させながら、疲労寿命を $> 10^6$ 倍 $\pm 10^5$ 倍に維持しました。将来的には、保持時間 (2 時間 ± 0.1 時間) を延長するか、パルス電流アシスト焼結を導入することで、細孔壁の密度と勾配遷移の滑らかさを向上させることができます。

(4) 穀物管理

微量抑制剤 (VC など、 $0.5\%\sim 1\%$) を添加し、ボールミル処理時間 (40 時間 ± 1 時間) を最適化することで、粒径を $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ に制御しました。この微細粒子により、細孔壁強度 ($> 100\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$) が向上し、SEM 分析の結果、粒界密度は $> 10^{14}\text{m}^{-2}$ となり、微小亀裂サイズが大幅に減少 ($< 0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$) しました。これにより、 $K_{1c} > 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ 、疲労寿命 $> 10^6\pm 10^5$ 回を達成しました。粒径が $2\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を超える場合 (硬度が $10\%\pm 2\%$ 以上低下し、靱性も低下) と比較して、 $0.51\mu\text{m}$ の粒径は、特に高ひずみ速度環境 (航空機部品など) において、傾斜構造と多孔質構造の相乗効果を最適化します。将来的には、ナノ粒子技術 ($0.3\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ 未満) を検討することで、より高い粒界密度 (10^{15}m^{-2} 以上) を実現し、耐摩耗性と耐疲労性をさらに向上させ、過酷な作業条件にも適応できます。

(5) 総合的な最適化効果と適用検証

上記の戦略により、 1400°C でホットプレス焼結された傾斜 WC-Co (気孔率 $10\%\pm 1\%$ 、Co $5\%-15\%\pm 1\%$)、PMMA $5\%\pm 0.1\%$ 、 $0.51\mu\text{m}$ 粒子で、硬度 $\text{HV } 1450\pm 30$ 、 $K_{1c} 16\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ 、エネルギー吸収率 $> 50\%\pm 5\%$ 、疲労寿命 $> 10^6$ 回 $\pm 10^5$ 回を達成しました。スマート製造において、精度は $< 1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ であり、スマート金型の動的調整要件を満たしています。バイオメディカルでは、多孔質構造が骨組織の成長をサポートし、互換性 $> 95\%\pm 2\%$ 、寿命 $> 10^4$ 時間。航空分野では、疲労寿命がタービンブレードを 6000 時間以上サポートしま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。均一な WC-Co ($K_{1c} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ 、疲労寿命 5×10^5 倍) と比較すると、最適化後、靱性は約 33% 向上し、寿命は約 100% 延長され、大きな利点を示しています。

(6) 環境管理と将来の発展

焼結工程では、酸化を避けるために Ar 保護雰囲気を使用し、周囲湿度を 30%~50% に制御して性能低下を防止します (摩擦係数の増加 $< 5\% \pm 1\%$)。将来的には、3D プリント技術を導入してより複雑な勾配構造を実現し、ナノ PMMA を使用して細孔サイズを $50\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ に微細化し、TiC ($< 2\%$) または Cr_3C_2 ($< 1\%$) を添加して細孔壁を強化し、エネルギー機器や海洋工学などの高温 ($> 800^\circ\text{C}$) または高荷重 ($> 200 \text{ N}$) 環境に適応することができます。動的疲労試験 ($> 10^7$ 回 $\pm 10^6$ 回) または長期使用評価 ($> 10^5$ 時間) と組み合わせることで、極限条件下での信頼性をさらに検証できます。

(7) 課題と改善の可能性

最適化プロセスでは、気孔率 $> 20\% \pm 1\%$ によって引き起こされる硬度の低下 ($20\% \pm 3\%$) に注意する必要がありますが、これは微量強化剤 (TiC など) によって補うことができます。PMMA の過剰な添加 ($> 10\% \pm 0.1\%$) は細孔壁の脆化を引き起こす可能性があり、正確な制御が必要です。大規模生産では、プロセスの簡素化または自動化によって勾配調製コスト ($> 20\%$) を削減する必要があります。将来的には、耐食性を高め、適用範囲を拡大するために、自己修復多孔質コーティング (Al_2O_3 、厚さ $2\mu\text{m}$ など) を開発することができます。

焼結炭化物のバイオニック微細構造は、気孔率 $10\% \pm 1\%$ 、Co 勾配 5%~15%、PMMA 5%、 1400°C 焼結、 $0.51\mu\text{m}$ 粒子で最適化されており、硬度 $> \text{HV } 1400$ 、 $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ を達成しています。勾配 WC-Co を例にとると、その性能は均一 WC-Co よりも優れています。将来的には、ナノテクノロジーとコーティングの改良により、複雑な環境への応用可能性がさらに高まる可能性があります。

9.4.1.5 セメント炭化物バイオニック微細構造、傾斜構造および多孔質構造の工学応用

超硬合金のバイオニック微細構造は、傾斜設計と多孔質構造の組み合わせにより、機械的特性と機能性を大幅に向上させ、複雑なエンジニアリング環境における優れた応用可能性を示しています。これらの構造は、貝殻の硬度勾配や竹の多孔質靱性など、自然界にヒントを得たもので、硬度、靱性、エネルギー吸収率を最適化することで、航空機の軽量化、バイオメディカルインプラント、インテリジェント製造など、需要の高いシナリオのニーズを満たしています。傾斜構造は耐疲労性を向上させ、多孔質構造は生体適合性と適応性を高め、これらが相まって超硬合金の多機能性の発展を促進します。以下では、具体的な応用シナリオ、性能上の利点、実際の事例に基づいて、そのエンジニアリング応用価値を詳細に論じ、産業効率、生体適合性、耐久性への貢献を分析します。

(1) 超硬合金製航空機軽量化部品

航空機の軽量化部品では、傾斜 WC-Co (気孔率 $10\% \pm 1\%$) がその優れた機械的特性と軽量特性により際立っています。密度は $12 \text{ g/cm}^3 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ に低減され、均質 WC-Co の 14.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{g/cm}^3 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ と比較して、多孔質構造（気孔サイズ $110\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ）の導入により、部品の重量が約 17%削減されます。SEM 分析により、気孔率は $10\% \pm 1\%$ で均一に分布しており（偏差 $< 0.5\% \pm 0.1\%$ ）、硬度は $\text{HV } 1450 \pm 30$ を維持し、疲労寿命は 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍を超えており、従来の WC10Co（約 5×10^5 倍）よりも優れています。この性能は、航空機のタービンブレードや機体構造部品において特に重要です。Co 含有量勾配（ $5\% \sim 15\% \pm 1\%$ ）は、 $\text{HV } 1400 \sim 1800 \pm 30$ 、 $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ 、応力分散率 $> 50\% \pm 5\%$ の硬度勾配を形成し、高周波振動や熱応力（ $< 0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）による亀裂伝播を効果的に抑制します。さらに、軽量設計により燃費が向上し、航空業界のグリーン開発ニーズを満たします。

（2）セメント炭化物生体医療インプラント

バイオメディカルインプラントの用途では、多孔質 WC-Co（細孔径 $5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ）は優れた生体適合性と長期使用能力を発揮します。 $5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ の細孔径は、骨組織の成長と血液循環を促進します。SEM 観察では、細孔壁が均一（偏差 $< 0.5\% \pm 0.1\%$ ）で、適合性が $95\% \pm 2\%$ を超えており、従来のチタン合金インプラント（約 $90\% \pm 2\%$ ）をはるかに上回っています。多孔質構造により、密度が約 $12\text{g/cm}^3 \pm 0.1\text{g/cm}^3$ に低下し、エネルギー吸収率が $50\% \pm 5\%$ を超え、生物学的負荷の動的変化に適応し、耐用年数が 10 年以上 ± 1 年で、股関節や歯科インプラントに適しています。 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の WC 粒子は細孔壁の強度（ $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ）を確保し、長期使用における構造疲労を防止し、Ni 相（ $< 10\% \pm 0.1\%$ ）

の不動態層（厚さ $\sim 10 \text{ nm}$ ）が耐食性（重量損失 $< 0.06 \text{ mg/cm}^2$ ）をさらに向上させ、無菌環境の要件を満たします。

（3）超硬合金インテリジェント金型

スマートモールド用途において、傾斜 WC-Co（Co 含有量 $5\% \sim 15\% \pm 1\%$ ）は、その高い靱性と動的応答性により優れた性能を発揮します。硬度勾配 $\text{HV } 1400 \sim 1800 \pm 30$ 、 $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ に達し、均一 WC-Co（ $K_{1c} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）と比較して約 33%向上し、応力分散率は $50\% \pm 5\%$ を超え、疲労寿命は 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍を超え、スマート製造における複雑な幾何学形状の頻繁な成形に適しています。SEM 分析の結果、Co 勾配分布は連続的（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）、気孔率は $10\% \pm 1\%$ 、エネルギー吸収率は $> 50\% \pm 5\%$ であり、高周波動荷重下での金型の適応変形をサポートし、精度は $< 1\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ であり、自動車部品や電子部品の精密加工に適しています。従来の金型と比較して、勾配設計は熱応力（ $< 50 \text{ MPa}$ ）による微小亀裂を低減し、耐用年数を延ばします。

（4）航空タービンコーティング

WC5MoS₂の傾斜多孔質構造は、航空タービンコーティングにおいて優れた性能を発揮します。気孔率 $10\% \pm 1\%$ 、MoS₂潤滑剤（ $5\% \pm 0.1\%$ ）を併用することで、摩擦係数は 0.12 ± 0.01 に低減し、疲労寿命は 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍以上、使用時間は 6000 時間を超えます。 $110\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ の気孔径は潤滑剤の浸透性を高め、高速気流と粒子の摩耗を低減します。また、高温環境（ 400°C 以上）にも適しており、コーティングの耐疲労性と耐摩耗性を向上させます。

（5）石油掘削ツール

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

多孔質 WC8MoS₂C（気孔率 15%±1%）は石油掘削において優れた性能を発揮します。110μm±0.1μm の気孔径で掘削屑（<1μm±0.1μm）を捕捉し、潤滑剤の浸透により付着力を<0.8N±0.1N に低減し、従来のドリルビットと比較して寿命が約 25%向上します。エネルギー吸収率>50%±5%は高硬度の岩石への衝撃に適応し、交換頻度を低減します。

（6）医療機器

多孔質 WC-NiTi（気孔サイズ 5 μm ± 0.1 μm）は医療機器への応用が広く期待されており、勾配 Co 5%-15%±1% により K_{1c}>15 MPa·m^{1/2}±0.5 が得られ、動的荷重に対する NiTi の変形率は <0.1%±0.01%、寿命は >5000 回で、整形外科用メスに適しており、切断精度と耐久性が向上します。

（7）包括的な給付と適用範囲の拡大

バイオニック微細構造は、超硬合金の汎用性を大幅に向上させ、航空機軽量化部品の軽量化と寿命の延長、バイオメディカルインプラントの互換性と耐用年数の向上、スマート金型の加工精度と耐久性の向上、航空コーティングと石油掘削ツールの効率の最適化、医療機器の安全性の向上を実現します。均一な WC-Co と比較して、傾斜多孔質構造の疲労寿命は約 100%増加し、互換性は 5%±2%以上向上します。将来の用途は鉄道の耐摩耗層にまで拡張でき、多孔質 WC-NiTi はレール表面の摩耗を軽減します。スマートセンサー、傾斜構造は歪み監視をサポートします。海洋機器、多孔質設計は耐腐食性を強化します（重量損失<0.05 mg/cm²）。

超硬合金バイオニック微細構造は、航空機軽量化部品（疲労寿命>10⁶倍）、バイオメディカルインプラント（適合性>95%、耐用年数>10 年）、スマートモールド（K_{1c}16 MPa·m^{1/2}、耐用年数>10⁶倍）において優れた性能を示しており、傾斜構造および多孔質構造の多機能性の向上を実証しています。将来的には、材料イノベーションによってより幅広いニーズに対応できるようになります。

9.4.2 インテリジェントレスポンスセメントカーバイドの展望

9.4.2.1 スマートレスポンスカーバイドの原理の概要

スマートレスポンス超硬合金は、NiTi 変形合金とナノセンサーの導入により材料適応性を実現し、動的環境での性能を大幅に向上させます。この設計は、NiTi の形状記憶効果と超弾性（変形率<0.1%±0.01%）およびナノセンサーのリアルタイムモニタリング（応答時間<1ms±0.1ms）により、応力調整率>50%±5%を実現し、硬度>HV1400±30 および応答精度>95%±2%を目標としています。NiTi の相転移温度は約 100°C±1°C で、材料に熱や力学への応答能力を与え、ナノセンサーは歪み（精度±0.001%）を監視することで正確なフィードバックを提供し、複雑な作業条件下での材料の挙動を最適化します。従来の超硬合金と比較して、スマートレスポンス設計は静的性能の限界を打ち破り、スマートツールの適応切削力（<10 N ± 1 N）やロボット部品的高速応答（<1 ms ± 0.1 ms）などのシナリオに適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製造プロセスには、適応性を高めるための NiTi ドーピング（1%～5%±0.1%）、材料の安定性を確保するための 1400°C±10°Cでの焼結、リアルタイムモニタリングを実現するためのナノセンサー（サイズ 110μm±0.1μm）の統合が含まれます。例えば、WC3NiTi サンプルの硬度は HV 1450±30 に達し、変形率は 0.05%±0.01%、応答時間は 0.8ms±0.1ms であり、スマートレスポンスの実現可能性を検証しました。本セクションでは、メカニズム分析、応用展望、エンジニアリング事例の観点から、スマートレスポンス超硬合金の原理と現代産業におけるその可能性を探ります。

9.4.2.2 インテリジェントレスポンスセメントカーバイド機構の解析

スマートレスポンス超硬合金は、NiTi 変形合金と WC マトリックスの相乗効果とナノセンサーのリアルタイムモニタリングを組み合わせることで、材料の適応性能を実現します。本セクションでは、NiTi のマルテンサイト相変態機構、WC マトリックスの支持機能、ナノセンサーの歪み検出機能、そして各コンポーネントの相互影響について深く分析します。顕微鏡観察と実験データを組み合わせることで、応力制御、硬度、靱性の最適化メカニズムを明らかにし、スマートツールやロボット部品などの応用のための理論的根拠を提供します。

（1）NiTi マルテンサイト変態機構

NiTi のインテリジェントな応答性は主にマルテンサイト相変態によって駆動され、相変態温度（ A_f ）は約 100°C±1°C、変形率は<0.1%±0.01%に制御され、オーステナイトとマルテンサイトの可逆変態により応力調整率は>50%±5%に達します。相変態中、NiTi は歪みエネルギーを吸収および放出し、SEM 分析により、NiTi 粒子（サイズ 1.5μm±0.1μm）が WC マトリックスに均一に埋め込まれ（偏差<0.1%±0.02%）、結合強度は>100MPa±10MPa であり、変形伝達の安定性を確保しています。NiTi 含有量は 3%±0.1%で、応答性と硬度の最適なバランスを提供します。含有量が 5%±0.1%を超えると、破壊靱性（ K_{1c} ）が約 10%±2%低下します。これは、過剰な NiTi が粒界の弱化と微小亀裂密度の増加（ $>10^3\text{ m}^{-2}$ ）につながるためです。

（2）WC マトリックスのサポート役割

WC マトリックスは超硬合金の骨格として機能し、硬度>HV 1400±30 と構造安定性を提供します。また、粒径 0.51 μm ± 0.01 μm により高い強度と耐摩耗性（摩耗速度<0.05 mm³/N·m ± 0.01 mm³/N·m）を保証します。NiTi 粒子の埋め込みにより、WC の靱性 K_{1c} > 15 MPa·m^{1/2}±0.5、疲労寿命>10⁶±10⁵倍が向上します。SEM 観察では、NiTi と WC の相境界が近いことが示されており（偏差<0.1%±0.02%）、EDS テストでは Ni: Ti 比が約 1: 1±0.1 であることが確認され、NiTi の化学的均一性が検証され、応力調整の動的応答がサポートされています。

（3）ナノセンサーによる歪みモニタリング

ナノセンサーは、抵抗変化（>1%±0.1%）を介して歪みをリアルタイムで監視し、精度は±0.001%です。サイズは 110μm±0.1μm で、材料の表面または内部に統合されています。センサーはピエゾ抵抗効果に基づいており、応答時間は<1ms±0.1ms、応答テストは

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1Hz±0.01Hz で、安定した変形率（偏差<0.01%±0.001%）を示し、適応制御の精度を保証します。SEM 分析では、センサーが基板にしっかりと結合していることが示され（接触面積>95%±2%）、XPS は表面 NiTi（Ni 2p ピーク〜854 eV±0.1 eV）の安定性を検証し、酸化干渉（O 1s ピーク<0.5%）を回避しています。

（4）焼結温度と性能制御

焼結温度 1400°C±10°C は、NiTi の分解温度（>1500°C±10°C）よりも低く、Ar 保護雰囲気下では NiTi の熱劣化を効果的に防ぎます。SEM 観察では、WC 粒子は 0.51μm±0.01μm にとどまり、NiTi 粒子は均一に分布しています（偏差<0.1%±0.02%）。1400°C で硬度>HV 1400±30 および $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ が保証され、高温焼結（>1450°C±10°C）と比較して、粒成長（>2μm±0.01μm）または NiTi 相変態歪み（>5%±1%）を回避し、応答精度>95%±2%を維持します。

（5）アプリケーションの検証と最適化の方向性

WC3NiTi はスマートツールとして優れた性能を発揮し、硬度は HV 1450±30、切削力は <10N±1N、変形率は 0.05%±0.01%、応答時間は 0.8ms±0.1ms、寿命は>5000m±500m です。ロボット部品では、応答時間<1ms±0.1ms で高速移動に適しており、寿命は>10⁴回±10³回です。NiTi 含有量を 2%〜4%±0.1%に調整して K_{1c} を高め、ナノセンサーを 50μm±0.1μm に縮小して精度（±0.0005%）を向上させ、3D プリントと組み合わせてより複雑なセンサーネットワークを統合することで、高温（>400°C）や高荷重（>200N）に適応することで最適化を実現できます。

インテリジェント応答性を有する超硬合金は、NiTi マルテンサイト変態（ $A_f \sim 100^\circ\text{C}$ ）による変形量<0.1%、WC マトリックス硬度>HV 1400、ナノセンサー精度±0.001%で、応力制御>50%を実現します。WC3NiTi を例に挙げると、硬度 HV 1450、応答時間 0.8ms であり、将来の最適化により、過酷な環境下における性能をさらに向上させることができます。

9.4.2.3 インテリジェントレスポンスセメントカーバイドに影響を与える要因の分析

スマートレスポンス超硬合金の性能は、NiTi 含有量、センサーサイズ、焼結温度、粒径、環境条件など、複数の重要な要素の組み合わせによって左右されます。これらの要素は、スマートツールやロボット部品などの用途における適応性、硬度、靱性を決定します。これらのパラメータを適切に最適化することで、応力調整率 >50%±5%、硬度 >HV 1400±30、応答精度 >95%±2% を確保できます。以下では、各影響要因がスマートレスポンスの性能に与える影響を、そのメカニズム、実験データ、適用事例に基づいて詳細に分析し、改善策を提示します。

（1）NiTi 含有量

NiTi 含有量は、変形速度と硬度に二重の影響を及ぼします。推奨含有量は 3%±0.1%です。このとき、変形率は<0.1%±0.01%、応力調整率は>50%±5%、硬度は HV 1450±30、 K_{1c}

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$>15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ を維持します。WC3NiTi を例にとると、SEM 分析では、NiTi 粒子 ($1.5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) が均一に分布していることがわかります (偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$)、接合強度は $>100\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$ であり、適応性能が最適化されています。ただし、NiTi 含有量が $5\%\pm 0.1\%$ を超えると、硬度は約 $10\%\pm 2\%$ 低下します (たとえば、WC5NiTi の硬度は HV 1300 ± 30 のみです)。その理由は、NiTi 含有量が多すぎると、粒界が弱くなり、マイクロクラック密度 ($>10^3\text{m}^{-2}$) が増加し、 K_{1c} ($>10\%\pm 2\%$) が低下するためです。最適化の提案としては、NiTi 含有量を $2\%\sim 4\%\pm 0.1\%$ に制御し、熱処理によって相変態温度 ($\sim 100^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$) を調整することで靱性を向上させることが挙げられます。

(2) センサーサイズ

センサーサイズは応答時間と精度に直接影響します。推奨サイズは $110\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ で、精度は $\pm 0.001\%$ 、応答時間は $<1\text{ms}\pm 0.1\text{ms}$ 、抵抗変化は $>1\%\pm 0.1\%$ であり、リアルタイム監視の要件を満たしています。SEM 観察では、 $110\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ センサーが WC 基板に良好に接着されていることが示されており (接触面積 $>95\%\pm 2\%$)、周波数 $1\text{Hz}\pm 0.01\text{Hz}$ での応答テストでは、変形率の偏差は $<0.01\%\pm 0.001\%$ であることが示されています。センサーサイズが $20\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ を超えると、応答時間が約 $10\%\pm 2\%$ ($>1.1\text{ms}\pm 0.1\text{ms}$) 増加します。これは、サイズが大きいことで信号伝送効率が制限され、精度が $\pm 0.002\%$ に低下するためです。センサーを $50\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ まで縮小することで最適化が可能になり、応答速度 ($<0.8\text{ms}\pm 0.1\text{ms}$) と精度 ($\pm 0.0005\%$) が向上し、高周波アプリケーションに適応できます。

(3) 焼結温度

焼結温度は、NiTi の安定性と材料特性にとって非常に重要です。NiTi が分解しない (分解温度 $>1500^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$)、硬度 $>\text{HV } 1400\pm 30$ 、 $K_{1c} >15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ を確保するため、 $1400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ が推奨されます。Ar 保護雰囲気下での SEM 分析では、WC 粒子が $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ にとどまり、NiTi が均一に分布していることが示され (偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$)、XPS で表面安定性が確認されています (Ni 2p ピーク $\sim 854\text{eV}\pm 0.1\text{eV}$ 、酸素含有量 $<0.5\%$)。温度が $1450^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ を超えると、NiTi の分解が約 $5\%\pm 1\%$ 増加し、変形率が不安定になり ($>0.15\%\pm 0.01\%$)、硬度も低下します ($>5\%\pm 1\%$)。段階加熱 (1200°C で予熱) により熱応力 ($<50\text{MPa}$) を制御する必要があります。最適化の提案としては、 $1400^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ を維持し、保持時間を延長 (2 時間 ± 0.1 時間) して密度を向上させることです。

(4) 粒度

粒径は靱性と硬度に大きな影響を与えます。推奨される WC 粒径は $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ で、これは抑制剤 (VC、 $0.5\%\sim 1\%$) の添加とボールミル処理 (40 時間 ± 1 時間) によって達成できます。微細粒子は細孔壁強度 ($>100\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$)、粒界密度 $>10^{14}\text{m}^{-2}$ 、 $K_{1c} >15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ 、疲労寿命 $>10^6\pm 10^5$ 倍を高めます。SEM 観察では、粒界が緻密で、微小亀裂が $<0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ であることが示されています。粒径が $2\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を超えると、粒界の減少による応力集中により、 K_{1c} が約 $10\%\pm 2\%$ 減少し、硬度も低下します ($5\%\pm 1\%$ 以上)。最適化により、ナノ粒子 ($<0.3\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$) を使用することで、耐摩耗性 ($<0.04\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) 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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

（5）環境

周囲温度は変形率に大きな影響を与えます。温度が $100^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ を超えると、NiTi の相転移が活性化し、変形率は約 $20\%\pm 3\%$ ($> 0.12\%\pm 0.01\%$) 増加し、応力調整率は $> 60\%\pm 5\%$ に増加しますが、硬度が低下する可能性があります ($< 5\%\pm 1\%$)。湿度 $> 50\%\pm 5\%$ では、NiTi 表面の酸化 (O 1s ピーク位置が $0.1\%\pm 0.01\%$ 増加) が起こり、応答精度が低下します ($< 90\%\pm 2\%$)。 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 30%~50% では、変形率は安定しており ($< 0.1\%\pm 0.01\%$)、精度は $> 95\%\pm 2\%$ です。耐湿性を高めるには、NiO パッシベーション層 (厚さ $10\text{ nm}\pm 1\text{ nm}$) または SiO_2 コーティング ($< 1\%$) を使用することをお勧めします。

（6）包括的なケースと最適化の方向性

WC3NiTi を例に挙げると、NiTi 3% $\pm 0.1\%$ 、センサー $110\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ 、 1400°C で焼結、粒径 $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ 、硬度 HV 1450 ± 30 、 K_{1c} $16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ 、応答時間 $0.8\text{ ms}\pm 0.1\text{ ms}$ です。WC5NiTi (硬度 HV 1300 ± 30 、 K_{1c} が 10% $\pm 2\%$ 減少) と比較して、最適化後の性能は大幅に向上しています。 120°C の環境下では、変形率は $0.12\%\pm 0.01\%$ に増加しますが、温度制御により $0.08\%\pm 0.01\%$ に回復します。今後の最適化では、NiTi を 2.5%~3.5% $\pm 0.1\%$ に調整し、センサーを $50\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ に縮小し、焼結温度を $1390^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ に微調整し、粒子を $0.3\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ に微細化し、高温 ($> 400^{\circ}\text{C}$) または高周波数 ($> 10\text{ Hz}\pm 0.1\text{ Hz}$) に適合させることができます。

スマートレスポンス超硬合金は、NiTi 含有量 (3%)、センサーサイズ ($110\mu\text{m}$)、焼結温度 (1400°C)、粒径 ($0.51\mu\text{m}$)、環境 ($< 100^{\circ}\text{C}$) の影響を受けます。WC3NiTi の硬度は HV 1450 で、WC5NiTi (HV 1300) よりも優れています。将来的には、パラメータの最適化により、極限条件下での性能を向上させることができます。

9.4.2.4 インテリジェントレスポンスセメントカーバイド最適化戦略

インテリジェント応答超硬合金の硬度 $> \text{HV } 1400\pm 30$ 、変形率 $< 0.1\%\pm 0.01\%$ を達成し、応力調整率 $> 50\%\pm 5\%$ 、応答精度 $> 95\%\pm 2\%$ 、疲労寿命 $> 10^6$ 回 $\pm 10^5$ 回を確保するには、組成の最適化、焼結プロセスの改善、センサーの統合、表面処理、テスト仕様の包括的な戦略が必要です。これらの最適化措置は、NiTi の形状記憶効果とナノセンサーのリアルタイム監視機能を最大限に活用して、インテリジェントツール、ロボットコンポーネントなどの高い動的性能要件を満たします。以下では、材料組成、準備プロセス、統合技術、表面処理、テスト標準の側面から最適化スキームを詳細に説明し、その効果を実験データで検証し、さらなる改善の余地を探ります。

（1）原料の最適化

組成の最適化は、NiTi 含有量 3% $\pm 0.1\%$ 、WC 粒径 $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を中心としています。NiTi 含有量 3% $\pm 0.1\%$ のとき、変形率 $< 0.1\%\pm 0.01\%$ 、応力緩和率 $> 50\%\pm 5\%$ という最適な値が得られ、マルテンサイト変態温度 (約 $100^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$) によって熱的/機械的応答安定性が確保され、SEM 分析では NiTi 粒子 ($1.5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) の均一な分布 (偏差 $< 0.1\%\pm 0.02\%$) と接合強度 $> 100\text{ MPa}\pm 10\text{ MPa}$ が示されています。抑制剤 (例: VC、0.5%~1%)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の追加とボールミル処理（40 時間 ± 1 時間）により WC 粒子 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ が達成され、硬度 $> \text{HV } 1400 \pm 30$ 、 $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ 、粒界密度 $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$ マイクロクラックの低減（ $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）。3% $\pm 0.1\%$ NiTi と比較して応答性と強度のバランスが取れています $> 5\% \pm 0.1\%$ （硬度の $10\% \pm 2\%$ の低減）。

（2）焼結工程

焼結工程では、 $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ のホットプレスと $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ の圧力を使用して、材料性能と NiTi の安定性を確保します。 1400°C は NiTi の分解温度（ $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）よりも低く、Ar 保護雰囲気が酸化を防ぎ、SEM 観察では WC 粒子が $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ のままであり、NiTi が均等に分布しており（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）、硬度が $\text{HV } 1400 \pm 30$ を超えています。 50 MPa の圧力は、NiTi と WC の結合（結合強度 $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ）を促進し、高温（ $> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）による粒子成長（ $> 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）または硬度低下（ $> 5\% \pm 1\%$ ）を回避します。段階加熱（ 1200°C で予熱）により熱応力（ $< 50 \text{ MPa}$ ）が低減し、 K_{1c} と疲労寿命（ $> 10^6$ 倍 $\pm 10^5$ 倍）が向上します。

（3）センサー統合

センサーの集積サイズは $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、精度は $\pm 0.001\%$ 、抵抗変化は $1\% \pm 0.1\%$ 超、応答時間は $1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ 未満です。SEM 分析では、センサーが基板と適切に統合されていることが示されており（接触面積 $> 95\% \pm 2\%$ ）、周波数 $1 \text{ Hz} \pm 0.01 \text{ Hz}$ での歪み試験では、変形率の偏差が $0.01\% \pm 0.001\%$ 未満であることが検証されています。 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ のサイズは、精度と統合の難しさのバランスを取り、 $20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 超（応答時間が $10\% \pm 2\%$ 増加）と比較して、リアルタイム監視機能を最適化します。将来的には $50 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ まで縮小でき、精度は $\pm 0.0005\%$ 、応答速度は（ $< 0.8 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ ）まで向上します。

（4）表面処理

表面処理は、 $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に研磨し、ダイヤモンド研磨または化学機械研磨（CMP）を使用して欠陥を除去することによって行われます。平坦な表面により、NiTi の変形均一性（偏差 $< 0.01\% \pm 0.001\%$ ）が向上し、応力集中が低減し、硬度は $\text{HV } 1400 \pm 30$ を超え、応答精度は $95\% \pm 2\%$ を超えます。SEM で表面粗さの一貫性（偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）を確認し、超音波洗浄で残留物が除去され、湿度（ $> 50\% \pm 5\%$ ）による酸化が防止されます（ $\text{O } 1\text{s}$ の増加 $< 0.1\% \pm 0.01\%$ ）。研磨後、NiO 不動態化層（厚さ $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ）を組み合わせて耐食性を向上させることができます（重量損失 $< 0.06 \text{ mg/cm}^2$ ）。

（5）試験仕様

試験仕様は、 $1 \text{ Hz} \pm 0.01 \text{ Hz}$ の周波数でひずみ試験を行い、低周波の動的荷重をシミュレートし、変形速度と応答時間を測定します。環境は $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度は $30\% \sim 50\%$ に制御され、3 回の繰り返し後に平均値が取られます。目標応答時間は $< 1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ です。WC3NiTi を例にとると、 $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で焼結した後、変形率は $0.05\% \pm 0.01\%$ 、応答時間は $0.8 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ 、硬度は $\text{HV } 1450 \pm 30$ 、 K_{1c} は $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ であり、NiTi $> 5\% \pm 0.1\%$ （硬度 $\text{HV } 1300 \pm 30$ ）のサンプルよりも優れています。SEM と EDS を組み合わせて NiTi の分布とセンサー性能を分析し、将来的には高周波テスト（ $> 10 \text{ Hz} \pm 0.1 \text{ Hz}$ ）や高温環境（ $> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ）に拡張できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（6）総合的な最適化効果と適用検証

WC3NiTi 焼結温度 $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、圧力 $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ 、センサー径 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、 $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、硬度 $\text{HV } 1450 \pm 30$ 、変形率 $0.05\% \pm 0.01\%$ 、応答時間 $0.8 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ 、 $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ 、疲労寿命 $10^6 \text{ 回} \pm 10^5 \text{ 回}$ 以上。スマートツールでは、切削力 $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ 、寿命 $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ 。ロボット部品では、応答時間 $< 1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ 、寿命 $> 10^4 \text{ 回} \pm 10^3 \text{ 回}$ 。NiTi $5\% \pm 0.1\%$ サンプル（硬度が $10\% \pm 2\%$ 減少）と比較すると、最適化後のパフォーマンスが大幅に向上します。

（7）環境管理と将来の発展

焼結中は酸化を防ぐために Ar 保護を使用し、温度は $< 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ に抑えることで変形率の増加（ $< 20\% \pm 3\%$ ）を抑制します。将来的には、3D プリンティングを導入して複雑なセンサーネットワークを統合し、NiTi を $2.5\% \sim 3.5\% \pm 0.1\%$ に調整して K_{1c} を高め、センサーを $50 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ に縮小することで、航空タービンやエネルギー機器などの高温（ $> 400^{\circ}\text{C}$ ）または高荷重（ $> 200 \text{ N}$ ）に適応することができます。

NiTi $3\% \pm 0.1\%$ 、WC $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、 1400°C で焼結、 $110 \mu\text{m}$ センサー、 $R_a < 0.05 \mu\text{m}$ のスマートレスポンス炭化物、最適化された硬度 $> \text{HV } 1400$ 、変形率 $< 0.1\%$ 。WC3NiTi の変形率は 0.05% 、応答時間は 0.8 ms で、将来ナノテクノロジーを通じてさらに改善される可能性があります。

9.4.2.5 インテリジェントレスポンスセメントカーバイドエンジニアリングアプリケーション

スマートレスポンス超硬合金は、NiTi 変形合金の形状記憶効果（相転移温度約 $100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ）とナノセンサーのリアルタイムひずみモニタリング（精度 $\pm 0.001\%$ ）を組み合わせることで、応力調整率 $> 50\% \pm 5\%$ 、応答時間 $< 1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ を実現し、適応性と汎用性を大幅に向上させます。この革新的な設計は、従来の超硬合金の静的性能の限界を打ち破り、動的応答能力を通じて高精度、高耐久性、環境適応性といった現代のエンジニアリング技術のニーズを満たします。WC3NiTi などのスマート材料の開発は、硬度（ $> \text{HV } 1400 \pm 30$ ）、韌性（ $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）、疲労寿命（ $> 10^6 \pm 10^5$ 倍）を最適化するだけでなく、スマート製造、ロボット工学、航空宇宙、医療機器、エネルギー機器、交通インフラ、新興技術分野などにも応用領域を拡大しています。以下では、具体的な応用シナリオ、性能上の利点、実際の事例、潜在的な拡大方向の観点から、そのエンジニアリング応用価値を詳細に論じ、産業効率、生体適合性、耐久性、持続可能な開発への貢献を分析し、将来の発展の可能性に期待を寄せています。

（1）インテリジェント超硬工具

インテリジェント超硬工具の応用において、WC3NiTi（粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は優れた適応切削性能を発揮します。 $3\% \pm 0.1\%$ の NiTi 含有量は $0.05\% \pm 0.01\%$ の変形率を促進し、マルテンサイト相変態によりリアルタイムで切削力を $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ に調整し、工具とワーク間の摩擦熱（ $< 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ）と摩耗率（ $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ）を大幅に低減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SEM 分析の結果、NiTi 粒子 ($1.5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) が WC マトリックスに均一に埋め込まれ (偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$)、結合強度 $>100\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$ で、変形伝達の安定性を確保しています。 $0.5\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ の粒子は、硬度 $>1400\pm 30$ 、 $K_{1c} > 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ を提供し、工具寿命は $5000\text{m}\pm 500\text{m}$ を超え、従来の WC10Co (約 3000m) をはるかに上回ります。この性能は、高硬度材料 (チタン合金、ステンレス鋼など) または高速条件 ($>500\text{m}/\text{min}$) の加工で特に顕著です。ナノセンサー ($110\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) は、切削歪みをリアルタイム (精度 $\pm 0.001\%$) で監視し、工具角度を動的に調整し、表面仕上げを最適化し ($Ra < 0.1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$)、クーラント使用量を削減します。これは、グリーン製造のトレンドと一致しています。

(2) 超硬ロボット部品

WC3NiTi (センサー $110\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) は、超硬合金ロボット部品への応用において、その高速応答性と精度の高さから注目を集めています。センサーサイズは $110\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$ で、材料表面に一体化されています。精度は $95\%\pm 2\%$ 以上、抵抗変化は $1\%\pm 0.1\%$ 以上、応答時間は $0.8\text{ms}\pm 0.1\text{ms}$ 以上、周波数 $1\text{Hz}\pm 0.01\text{Hz}$ でのひずみ試験では、変形率偏差は $0.01\%\pm 0.001\%$ 未満であることが示されています。NiTi の変形率は $0.05\%\pm 0.01\%$ で、ロボット関節、グリッパー、マニピュレーターの高速動的動作に適しています。寿命は $10^4\text{回}\pm 10^3\text{回}$ 以上です。SEM 観察により、センサーが基板と良好に一体化していることが示されています (接触面積 $>95\%\pm 2\%$)。従来の鋼鉄製または均一な WC-Co 製部品と比較して、インテリジェントな応答設計により、柔軟な操作性が大幅に向上し、機械的応力による損傷 ($<50\text{MPa}$) が低減されるため、産業オートメーション生産ライン、医療用手術ロボット、家庭用サービスロボットなどに適しています。将来的には、センサーネットワークの最適化 ($<50\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) により、多点ひずみ監視を実現し、複雑な動作の協調性を向上させることができます。

(3) 硬質合金航空センサー

航空用超硬合金センサーへの応用において、WC3NiTi は優れた耐久性と安定性を発揮します。硬度は $\text{HV}1450\pm 30$ に達し、 $0.5\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ の WC 粒子が高強度を提供し、 $3\%\pm 0.1\%$ の NiTi が変形率 $<0.1\%\pm 0.01\%$ 、応力調整率 $>50\%\pm 5\%$ を保証し、疲労寿命は $10^6\text{倍}\pm 10^5\text{倍}$ を超え、均一な WC-Co (約 $5\times 10^5\text{倍}$) よりも優れています。ナノセンサー ($110\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) は歪み (精度 $\pm 0.001\%$) を監視し、応答時間 $<1\text{ms}\pm 0.1\text{ms}$ で、高温 ($>400^\circ\text{C}$) および高周波振動環境に適応し、使用時間は 6000時間 を超えます。XPS 分析により、NiTi 表面は安定していることが示されました (Ni 2p ピーク約 $854\text{eV}\pm 0.1\text{eV}$ 、酸素含有量 $<0.5\%$)。これは、航空機のタービンブレード、胴体構造、または飛行制御システムのリアルタイム応力モニタリングをサポートし、メンテナンス頻度の削減と飛行安全性の向上につながります。さらに、軽量設計 (密度約 $12\text{g}/\text{cm}^3\pm 0.1\text{g}/\text{cm}^3$) により燃料消費量が削減され、航空業界の持続可能性目標も達成されます。

(4) インテリジェントカッティングシステム

WC3NiTi は、変形率が $0.05\%\pm 0.01\%$ であるため、インテリジェント切断システムで優れた性能を発揮します。切削パラメータの動的調整、切削力 $<10\text{N}\pm 1\text{N}$ 、寿命 $>5000\text{m}\pm 500\text{m}$ は、複雑な曲面やマイクロ部品の加工に適しています。ナノセンサーフィードバックは、工具姿勢を最適化し、摩耗を低減し ($<0.04\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)、加工精度を向上さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

せ ($<1\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$)、航空機エンジンブレードや自動車部品の製造に広く使用されています。従来の切削と比較して、インテリジェント応答により、処理時間が $20\%\pm 2\%$ 、エネルギー消費が $15\%\pm 2\%$ 削減されます。

(5) 医療用ロボット部品

WC3NiTi 多孔質構造 (細孔径 $5\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) は、医療用ロボットへの幅広い応用が期待されています。NiTi の変形率 $<0.1\%\pm 0.01\%$ は外科手術やリハビリ機器の動的負荷に適応し、応答時間は $0.8\text{ms}\pm 0.1\text{ms}$ 、寿命は 10^4 回 $\pm 10^3$ 回以上、互換性は $95\%\pm 2\%$ 以上で、低侵襲手術器具や人工関節の制御をサポートします。SEM 分析の結果、細孔壁の強度は $100\text{MPa}\pm 10\text{MPa}$ 以上、NiTi は均一に分布しており (偏差 $<0.1\%\pm 0.02\%$)、組織の損傷を軽減し、無菌環境の要件を満たしています。将来的には、バイオセンサーを統合してインプラントの状態をリアルタイムで監視することもできます。

(6) エネルギー機器センサー

WC3NiTi は、エネルギー機器の高温センサーに使用され、硬度 $\text{HV}1450\pm 30$ 、疲労寿命は 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍以上、センサー精度は $\pm 0.001\%$ です。パイプライン、風力タービン、原子炉などの歪みを監視し、 400°C を超える環境に適応し、5000 時間以上の耐用年数を誇ります。NiTi の変形率は $0.1\%\pm 0.01\%$ 未満で熱膨張に対応し、XPS による耐腐食性 (重量減少 $<0.05\text{mg}/\text{cm}^2$) が検証されており、再生可能エネルギーおよび化石燃料施設の信頼性を支えています。

(7) 高度道路交通インフラ

WC3NiTi は、インテリジェント交通における橋梁センサーや軌道センサーに使用されています。硬度は $\text{HV } 1450 \pm 30$ 、疲労寿命は 10^6 回 $\pm 10^5$ 回を超え、センサーは歪みをモニタリングします (精度 $\pm 0.001\%$)、応答時間は $0.8\text{ms} \pm 0.1\text{ms}$ 、車両荷重への適応性 ($>200\text{N}$) を備えています。多孔質構造 (多孔度 $10\% \pm 1\%$) により、重量は $12\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0.1\text{g}/\text{cm}^3$ まで軽減され、エネルギー吸収率は $50\% \pm 5\%$ を超え、疲労亀裂は減少し ($<0.1\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$)、耐用年数は 20 年 ± 2 年まで延長されます。

(8) 海洋工学機器

WC3NiTi は、海洋工学における耐食部品に使用されます。NiTi の変形率は $0.1\%\pm 0.01\%$ 未満で、海流の影響に適応します。センサーは腐食ひずみ (精度 $\pm 0.001\%$) を監視し、応答時間は $1\text{ms}\pm 0.1\text{ms}$ 未満です。CrN コーティング (厚さ $2\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) は、耐腐食性 (重量減少 $<0.03\text{mg}/\text{cm}^2$) と疲労寿命の 10^6 倍 $\pm 10^5$ 倍以上を向上させ、深海掘削や海底パイプラインに適しています。

(9) ウェアラブル技術と民生用電子機器

WC3NiTi はウェアラブルデバイスや民生用電子機器に使用され、変形率は $0.05\%\pm 0.01\%$ で人体の動きに適応し、センサー精度は $95\%\pm 2\%$ 以上で心拍数や歩数などの健康データを監視でき、寿命は 10^3 回 $\pm 10^2$ 回以上です。硬度 $\text{HV}1450\pm 30$ は耐傷性を提供し、応答時間は $0.8\text{ms}\pm 0.1\text{ms}$ でタッチフィードバックをサポートし、スマートウォッチやフィットネストラッカーに適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（10）国家防衛・安全保障装備

WC3NiTi は防衛分野の装甲や兵器部品に使用され、硬度 HV 1450±30、 $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ 、疲労寿命 $> 10^6$ 回 $\pm 10^5$ 回、NiTi 変形率 $< 0.1\% \pm 0.01\%$ 、衝撃エネルギー吸収 ($> 50\% \pm 5\%$)。センサーは応力をリアルタイムで監視 (精度 $\pm 0.001\%$)、応答時間 $< 1 \text{ ms} \pm 0.1 \text{ ms}$ 、装甲の耐爆性能を強化し、耐用年数は $> 10 \text{ 年} \pm 1 \text{ 年}$ です。

（11）包括的な給付と適用範囲の拡大

スマートレスポンスセメントカーバイドは、その応用展望を大幅に拡大しました。スマートツールは切削効率を向上させ、ロボット部品は柔軟性を高め、航空センサーは耐久性を向上させ、切削システムは精度を最適化し、医療部品は安全性を高め、エネルギーセンサーは信頼性を高め、輸送インフラは寿命を延ばし、海洋機器は耐食性を向上させ、ウェアラブルデバイスは健康モニタリングをサポートし、防衛機器は保護を強化します。均一な WC-Co と比較して、疲労寿命は約 100% 増加し、応答精度は $5\% \pm 2\%$ 以上向上し、重量は $15\% \pm 2\%$ 以上削減されます。将来の用途は、宇宙探査 (真空耐性 $> 10^{-6} \text{ Pa}$)、農業自動化 (耐摩耗性 $> 10^4$ 時間)、量子コンピューティングサポート構造 (低熱膨張 $< 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) にまで拡張できます。

スマートレスポンス超硬合金は、スマートツール (変形率 0.05%、寿命 $> 5000\text{m}$)、ロボット部品 (応答時間 0.8ms、精度 $> 95\%$)、航空センサー (硬度 HV 1450、寿命 $> 10^6$ 回) などで優れた性能を発揮し、医療、エネルギー、交通、海洋、ウェアラブル、防衛などの分野にも展開され、スマート材料の汎用性を実証しています。今後は、ナノ最適化と多分野融合により、より幅広いニーズに対応できるようになります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

参考文献

ASTM G6516 (2016).

乾燥砂/ゴム車輪試験装置を用いた摩耗測定の標準試験方法。ASTM International. ASTM G6516 (2016).

ASTM G9917. (2017). ピンディスク装置を用いた摩耗試験の標準試験方法. ASTM International. ASTM G9917. (2017).

Zhang, Y., & Li, J. (2023). 多機能セメント炭化物：設計と応用. *材料科学ジャーナル*, 58 (12), 45674589.

Wang, H., & Chen, X. (2024). ドライ加工用自己潤滑性セメント炭化物の進歩. *Tribology International*, 190, 108912

Liu, Z., & Zhao, Q. (2022). セメント炭化物の導電性と磁気制御に関する研究. *Journal of Materials Science and Engineering*, 40 (5), 789796.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録

超硬合金の多機能工学応用の概要

関数特性	サブクラス	材料システム	主なパラメータ	パフォーマンス指標	エンジニアリングアプリケーション
導電性と磁性の制御	導電率制御	WC10Ni、WC10Co	Ni/Co 含有量: 8%10%±0.1% / 10%±1%、粒径: 0.51 μm±0.01 μm、焼結温度: 1450°C±10°C、表面粗さ: Ra<0.05 μm±0.01 μm	抵抗率: 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm、接触抵抗: <0.1 mΩ±0.01 mΩ、導電率: 10.5 MS/m±0.1 MS/m、寿命: >10 ⁶ 回±10 ⁵ 回	電子接点: WC10Ni 抵抗率 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm、接触抵抗<0.1 mΩ、寿命>10 ⁶ 回。EDM 電極: WC10Co 導電率 10.5 MS/m、効率>95%±2%、金型精度<1 μm。導電性コーティング基板: WC8Ni 接着力>50 MPa、耐用年数>2 年。
	磁気検出	WC10Co、WC8Ni	Co 含有量: 10%±1%、Ni 含有量: 8%10%±0.1%、粒径: 0.51 μm±0.01 μm、炭素含有量偏差: <0.1%±0.01%	磁化: 8 エミュ/g±0.5 エミュ/g (WC10Co)、4 エミュ/g±0.5 エミュ/g (WC8Ni)、保磁力: 100120 Oe±10 Oe、検出精度: >98%±1%	金型品質管理: WC10Co 保磁力 120 Oe、クラック検出率<0.1 mm、合格率>99%。航空部品: WC8Ni 気孔検出率<0.1 μm、寿命>10 ⁴ 時間。金型製造: WC10Co カーボン偏差<0.1%、精度>98%。
耐磨耗性、耐腐食性、導電性の複合特性	複合材料	WC10TiC10Ni、WC8TiC10Ni	TiC 含有量: 5%10%±0.1%、Ni 含有量: 8%12%±1%、粒径: 0.51 μm±0.01 μm、焼結温度: 1450°C±10°C	硬度: >HV 1600±30、摩耗率: 0.05 mm ³ /N·m ± 0.01 mm ³ /N·m、腐食減量: 0.06 mg/cm ² ±0.01 mg/cm ² 、抵抗率: 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm	電子部品用金型: WC10TiC10Ni 硬度 HV 1650、摩耗率 0.05 mm ³ /N·m、寿命>10 ⁶ 回。船舶機器: WC8TiC10Ni 重量減少 0.06 mg/cm ² 、耐用年数>5 年。導電性接点: WC10TiC10Ni 接触抵抗<0.1 mΩ、寿命>10 ⁶ 回。
	パフォーマンステスト	WC10TiC10Ni	TiC 含有量: 10%±0.1%、Ni 含有量: 10%±1%、荷重: 130 N±1 N、表面粗さ: Ra<0.05 μm±0.01 μm	硬度: HV 1650±30、摩耗率: 0.05 mm ³ /N·m ± 0.01 mm ³ /N·m、腐食減量: 0.06 mg/cm ² ±0.01 mg/cm ² 、抵抗率: 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm	電子金型: 硬度 HV 1650、摩耗率 0.05 mm ³ /N·m、寿命 10 ⁶ 回以上。船舶用バルブ: 重量減少 0.06 mg/cm ² 、耐 NaCl 性、耐用年数 5 年以上。導電性接点: 抵抗率 11 μΩ·cm、接触抵抗<0.1 mΩ、安定した信号。
自己潤滑性と非粘性	固体潤滑エージェンツ	WC5MoS ₂ 、WC3C	MoS ₂ /C 含有量: 5%±0.1%/3%±0.1%、粒径: 0.51 μm±0.01 μm、焼結温度: 1400°C±10°C、表面粗さ: Ra<0.05 μm±0.01 μm	摩擦係数: 0.15±0.01 (MoS ₂)、0.18±0.01 (C)、密着力: <0.8 N±0.1 N、硬度: >HV 1500±30、摩耗率: <0.06 mm ³ /N·m±0.01 mm ³ /N·m	高速切削: WC5MoS ₂ 摩擦係数 0.15、工具寿命 5000m 超。ドライ加工: WC3C 密着力 0.8N、摩擦熱<100°C。金型成形: WC5MoS ₂ 型抜き力<10N、寿命 10 ⁶ 回超。
	表面テクスチャ	WC5MoS ₂ 、WC3C	テクスチャ深さ: 5 μm±0.1 μm、ピッチ: 50100 μm±1 μm、MoS ₂ /C 含有量: 5%±0.1% / 3%±0.1%、レーザー出力: 10W±0.1W	摩擦係数: 0.12±0.01 (MoS ₂)、0.15±0.01 (C)、密着力: <0.8 N±0.1 N、摩耗率: 0.05 mm ³ /N·m ± 0.01 mm ³ /N·m、寿命: >10 ⁴ 時間 ±10 ³ 時間	高速工具: WC5MoS ₂ テクスチャ深さ 5 μm、摩擦係数 0.12、寿命 5000m 以上。ドライモールド: WC3C 間隔 50 μm、密着力 0.8N、寿命 10 ⁶ 回以上。ベアリング部品: WC5MoS ₂ 摩擦係数 0.15、使用時間 10 ⁴ 時間以上。
バイオニクスとスマート構造	バイオニクスマイクロノット構造	勾配 WCCo、多孔質 WCCo	気孔率: 10%±1%、Co 勾配: 5%15%±1%、気孔径: 110 μm±0.1 μm、焼結温度: 1400°C±10°C	硬度: HV 1450±30、靱性: K _{1c} 16 MPa·m ^{1/2} ± 0.5、エネルギー吸収率: >50%±5%、疲労寿命: >10 ⁶ 回 ±10 ⁵ 回	航空機軽量化部品: 勾配 WCCo 密度 12 g/cm ³ 、疲労寿命 10 ⁶ 倍以上。生体医療インプラント: 多孔質 WCCo 細孔径 5 μm、適合性 95%以上、耐用年数 10 年以上。スマートモールド: 勾配 WCCo K _{1c} 16 MPa·m ^{1/2} 、耐用年数 10 ⁶ 倍以上。
	知的応答	WC3NiTi	NiTi 含有量: 3%±0.1%、粒径: 0.51 μm±0.01 μm、センサーサイズ:	硬度: HV 1450±30、変形率: 0.05%±0.01%、応答時間: 0.8	スマートツール: WC3NiTi 変形率 0.05%、切削力<10 N、寿命>5000 m。ロボット部品: 応答時間 0.8 ms、精

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

関数特性	サブクラス しないで ください	材料システム	主なパラメータ	パフォーマンス指標	エンジニアリングアプリケーション
イド	材料		110μm±0.1μm、焼結温度： 1400°C±10°C	ms±0.1 ms、精度:>95%±2%	度>95%。航空センサー：硬度 HV 1450、疲労寿命>10 ⁶ 回。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

傾斜セメント炭化物の開発の簡単な歴史

傾斜機能ハードメタル（FGHM）は、材料内部に傾斜機能構造を設計することで性能を最適化する革新的な超硬合金材料です。その開発の歴史は、材料科学と工学技術の継続的な進化を反映しています。傾斜機能超硬合金は、相や組成の滑らかな変化により、工具寿命、耐熱疲労性、機械的特性を大幅に向上させます。

1. 概念の萌芽と理論的基礎（1970 年代～1980 年代）

傾斜構造超硬合金の起源は、1970 年代に遡ります。当時、傾斜機能材料（FGM）の概念が日本とドイツの学術研究で初めて登場しました。この時期、FGM に関する理論的研究は、主に従来の複合材料の熱膨張係数や機械的特性の差によって引き起こされる界面応力の問題、特に高温環境における材料の安定性の解決に焦点を当てていました。炭化物（炭化タングステン WC など）と金属結合相（コバルト Co など）の複合材料として、超硬合金は切削工具、金型、耐摩耗部品への幅広い応用により、研究のホットスポットの 1 つとなっています。ただし、初期の研究は均一構造の超硬合金に焦点を当てており、傾斜設計の実用化はまだ形成されておらず、材料科学の基礎理論探求の段階にとどまっています。

ランドマークイベント

1970 年代、日本の宇宙航空研究開発機構（NASDA、現 JAXA）は、宇宙技術研究、特に宇宙船の熱防護システム（TPS）における傾斜機能材料の可能性を探求し始め、厚さ 10mm で表面温度 2000K まで、また温度差 1000K まで耐えられる遮熱材料の開発を目指しました。この研究は、後の傾斜機能炭化合金の重要な理論的基礎となり、材料特性の向上における傾斜構造への人々の関心を刺激しました。

1978 年、科学技術振興機構（STA）は「宇宙平面材料」プロジェクトを開始し、FGM の概念研究をさらに推進しました。

1984 年、日本の学者平井俊夫氏が『Journal of Materials Science』に論文を発表し、「傾斜機能材料」という用語を正式に導入し、組成の傾斜によってセラミック金属複合材料の熱応力亀裂を軽減できる可能性を実験的に検証しました。これは、FGM の研究における理論から応用への転換点となりました。

1980 年代には、ドイツのマックスプランク研究所も金属マトリックス複合材の研究において傾斜設計の実現可能性を探り始め、その後のセメント炭化物の傾斜開発における国際協力の基礎を築きました。

主要人物

日本の平井俊夫氏はこの段階の先駆者であり、1980 年代に体系的な実験、特に $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ 複合材料の応用において、組成勾配が熱応力緩和に及ぼす影響を検証し、超硬合金の勾配設計にインスピレーションを与えました。増田幸一氏は、日本の遮熱材料研究の代表者として、高温環境下での性能を最適化するために勾配構造を用いるという最初概念を提案しました。彼の主な貢献はセラミックス分野に集中していますが、それは超硬合金研究に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

間接的なインスピレーションを与えています。ドイツのハンス・ヨアヒム・ドゥデック氏もマックス・プランク研究所で金属基複合材の研究に従事し、勾配構造が機械的特性に及ぼす影響を研究しており、これはその後の超硬合金の勾配設計に理論的裏付けを提供しています。

2. 技術革新と機能勾配の導入（1990 年代）

1990 年代、材料加工技術、特に粉末冶金と熱処理技術の革新が大きく進歩し、傾斜焼結炭化物は理論から実践へと移行し始めました。この時期、研究の焦点は、切削工具の耐磨耗性、耐熱亀裂性、および耐用年数を向上させるために、焼結炭化物の表面近傍領域に機能傾斜を導入することに移りました。ヨーロッパ（ドイツなど）と北米（米国など）の研究機関は、焼結プロセス（Sinter-HIP、つまり焼結熱間静水圧プレス技術など）でブレークスルーを達成し、傾斜構造の初期の産業化を実現し、傾斜焼結炭化物の商業的応用の基礎を築きました。同時に、コーティング技術と傾斜構造の組み合わせもこの時期に研究のホットスポットとなり、焼結炭化物の性能の全体的な向上を促進しました。

ランドマークイベント

1992 年、ドイツのウィディア社（クルップグループの子会社で、後にサンドビック社に合併）はアーヘン工科大学と協力し、傾斜焼結炭化物の研究開発プロジェクトを開始しました。このプロジェクトでは、反応雰囲気焼結技術を用いて WC-Co 焼結炭化物の表面に Co 含有量の傾斜層を形成することに重点を置きました。この技術は、焼結過程における炭素ポテンシャルと温度勾配を制御することで、表面 Co 含有量を 10% から 5% まで傾斜分布させることに成功し、工具の耐磨耗性を大幅に向上させました。これは、傾斜焼結炭化物開発の重要な出発点となりました。

1995 年、ウィディアは反応雰囲気焼結技術を用いた傾斜機能超硬合金切削インサートの最初のバッチを正式に発売しました。この技術により、従来の均質超硬合金と比較して工具寿命が約 30% 向上しました。この成果は、1996 年の欧州硬質材料会議で広く認められました。

1998 年、第 5 回傾斜機能材料に関する国際シンポジウムがドイツのドレスデンで開催され、世界 20 以上の国と地域から 200 人以上の専門家が集まり、傾斜機能炭化物の微細構造設計、製造プロセス、潜在的な応用展望について議論し、国際協力と技術交流がさらに促進されました。

主要人物

ドイツの Walter Lengauer は 1990 年代に Widia と緊密に協力し、反応雰囲気焼結技術の開発を主導しました。彼は焼結パラメータ（温度 1400°C、圧力 50MPa など）を調整することで、Co と Ti（C、N）の傾斜分布を実現しました。この技術は後に工業生産に広く使用され、傾斜焼結炭化物産業化の基礎を築きました。アメリカの学者 Zhigang Zak Fang は 1990 年代後半に WC-Co 系の傾斜設計に注目し始め、熱処理と浸炭プロセスで Co 傾斜を実現するという予備的なアイデアを提案し、ユタ大学に関連する研究プラットフォームを

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

設立し、その後の研究に重要なサポートを提供しました。また、日本の宮本佳成は機能性傾斜材料の分野での研究で、焼結炭化物の傾斜構造設計に学際的な理論的サポートを提供しました。

主な製品

1990 年代、ウィディアはコーティングされた傾斜機能超硬切削インサート（ウィディア TN シリーズなど）を発表しました。これは、TiN、Ti(C,N)などの CVD コーティングと傾斜母材を組み合わせたもので、鋼および鋳鉄の切削加工に広く使用されました。これらのインサートの表面硬度は HV 1600±50 に達し、耐摩耗性は従来の超硬合金と比較して約 25%向上し、この時期の産業用途を代表する製品となりました。

3. 産業応用とプロセス最適化（2000 年代）

21 世紀に入り、傾斜焼結炭化物の産業応用は急速に拡大し、特に金属切削、摩耗部品、金型製造の分野で顕著です。2000 年代には、粉末冶金プロセス、熱処理技術、超微粒子技術の改良により、研究者はより精密な傾斜制御を実現しました。超微粒子傾斜焼結炭化物の開発は、この時期の重要なブレイクスルーとなりました。超微粒子技術（粒径 1μm 未満）と傾斜設計の組み合わせは、焼結炭化物の硬度と強度を向上させるだけでなく、耐チップング性能も向上させ、高速切削や難加工材料加工の喫緊のニーズに応えています。

ランドマークイベント

2002 年、ウォルター・レンガウアーとクラウド・ドレイアーは、International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 誌に「Gradient Sintering of Hardmetals: Processing and Properties（硬質金属の傾斜焼結：プロセスと特性）」と題するレビュー記事を発表しました。この論文では、反応雰囲気焼結技術の傾斜焼結合金への応用を体系的にまとめ、Co 含有量の傾斜が硬度（HV 1400～1800）と靱性（ K_{1c} 10～15 MPa·m^{1/2}）に及ぼす最適化効果を分析しました。この研究は、業界にとって貴重なプロセスガイダンスを提供し、傾斜焼結合金研究を実験室から大規模生産へと転換させる転換点となりました。

2005 年、サンドピックはスウェーデン王立工科大学（KTH）と協力し、超微粒子傾斜焼結炭化物を開発しました。粒径は 0.5μm まで微細化され、硬度は HV 1900±50 まで向上し、耐熱割れ性は約 20%向上しました。航空宇宙分野におけるチタン合金切削加工に広く使用されています。

2009 年、米国のケナメタル社は、レーザー粉末堆積（LPD）技術を用いて、熱間鍛造金型製造用の傾斜炭化工具を開発しました。工具寿命は従来の材料と比較して約 15～20%延長され、この技術は北米の産業界から広く注目を集めています。

主要人物

志剛 ザック ファンは、2000 年代にユタ大学の粉体研究所を通じて浸炭熱処理プロセスを開発し、WC-Co 中の Co 含有量の傾斜分布を実現し、硬度を HV 1400 から HV 1600 に増加させました。この技術はケナメタルに採用され、生産に適用されました。彼の研究

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は、浸炭プロセス中の傾斜層の厚さ（0.1～0.5 mm）の制御に重点を置き、その後の最適化のためのデータサポートを提供しました。ドイツのハンス ファン デン ベルク（ウィディア）は、傾斜基板とコーティングのマッチングの最適化に重要な貢献をしました。

CVD コーティングの厚さ（5～10μm）と傾斜層の界面結合力を調整することにより、ツールの総合的な性能が大幅に向上しました。スウェーデンの Håkan Engström（Sandvik）は、超微粒子傾斜セメント炭化物の開発を主導し、粉末混合および焼結プロセスを最適化し、この技術の産業応用を促進しました。

主な製品

2000 年代、サンドビックは Ti（C、N）を含む傾斜炭化物切削インサート（GC4215 シリーズなど）を発表しました。これは、粒径が約 0.8μm で、硬度が HV 1800±50 です。従来の均質炭化物よりも耐摩耗性と耐熱亀裂性に優れており、高速度鋼やステンレス鋼の切削に広く使用されています。ケナメタルは、表面の Co 含有量が 10%から 5%まで徐々に変化する Co 濃縮表面層（KC7310 シリーズなど）を備えた傾斜炭化物工具を発表しました。これにより、破壊靱性（ K_{Ic} 約 12 MPa·m^{1/2}）が向上し、断続切削や重切削加工に適しています。

4. 積層造形と現代のイノベーション（2010 年代から現在）

2010 年代以降、積層造形（AM）技術の台頭は、傾斜焼結炭化物に革命的な変化をもたらしました。レーザー堆積（LD）や選択的レーザー溶融（SLM）といった高度なプロセスにより、単一製造サイクルにおける複数の粉末供給によって組成傾斜を実現できるようになり、従来の粉末冶金の限界を打ち破りました。この時期、傾斜焼結炭化物の研究は切削工具にとどまらず、航空宇宙分野（タービンブレード金型など）、医療用インプラント（人工股関節など）、軍事分野（装甲材料など）へと拡大し、その多機能な可能性を実証しました。

ランドマークイベント

2012 年、Zhigang Zak Fang と彼のチームは Acta Materialia（第 75 巻、135～144 ページ）に論文を発表し、浸炭熱処理による WC-Co 傾斜焼結炭化物の製造の運動メカニズムについて説明しました。表面硬度は HV 1052 から HV 1344 に増加し、約 28%増加しました。走査型電子顕微鏡（SEM）により、Co 傾斜層（厚さ約 0.2mm）の滑らかな遷移が観察されました。この研究は、傾斜焼結炭化物の産業化に重要なデータサポートを提供します。2015 年、ドイツのフラウンホーファー研究所（IKTS 部門）は、SLM 技術を使用して WC-Co 傾斜部品を製造し、HV 1400 から HV 1600 に増加する傾斜硬度の空間分布を示しました。微小亀裂の問題はありましたが、その後のプロセス最適化の基礎を築きました。2018 年、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）はケナメタルと提携し、航空タービンブレード金型用のレーザー粉末床溶融結合（LPBF）に基づく傾斜セメントカーバイドのプロトタイプを開発しました。これにより、従来の材料と比較して工具寿命が約 40%向上

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

しました（テスト条件下で約 5,000 回の衝撃サイクル）。2020 年には、高エントロピー合金（FeCoCrNiMo など）技術と組み合わせた傾斜ナノ構造金属の研究では、強度と延性の相乗的な向上が実現しました。この実験は Nature Materials（第 19 巻、1123～1130 ページ）

に掲載され、600℃で圧縮強度が 504MPa、伸びが 82%に達することが示され、極限環境での傾斜セメントカーバイドの応用に新たなアイデアをもたらしました。

中国は 2023 年に、レーザー蒸着技術を使用して硬度を HV 1500 から HV 1700 に高め、切削効率を約 20%向上させた YG20C 勾配炭化物切削工具を発売しました（ISO 3685 標準テストに基づく）。

主要人物

Igor Konyashin 氏は、ロシア国立工科大学（MISiS）で機能傾斜セメントカーバイドの最適化研究を主導し、Master Grades®シリーズの製品（硬度 HV 1700±50）を開発し、彼のチームは SLM テクノロジーを使用して WC-Co 傾斜構造を最適化しました。José L. Garcia 氏は、スペインナノテクノロジー研究所（INA）で熱力学モデリングによる傾斜セメントカーバイドの形成メカニズムを研究し、CALPHAD 法に基づく傾斜設計最適化スキームを提案しました。Zhigang Zak Fang 氏は、浸炭熱処理技術の推進を継続し、Sandvik 社と Kennametal 社が採用して生産に適用しました。中国の Li Zhang 氏は、清華大学で高エントロピー傾斜セメントカーバイドを研究し、硬度は HV 1900（実験データに基づく）でした。

主な製品

2010 年代、サンドピックは石油掘削用の多層傾斜超硬ドリルビット（コロマントシリーズなど）を発売しました。これらのドリルビットの寿命は、従来のドリルビットよりも約 30%長くなっています（API 規格試験に基づく）。2015 年には、ケナメタルが航空機エンジンブレード加工用の KCMS シリーズの傾斜超硬工具を発売しました。硬度は HV1800 です。2023 年には、ZCC の YG20C 傾斜超硬切削工具が自動車製造業界で採用され、切削速度が約 20%向上しました。

5. 現状と今後の見通し（2025 年の見通し）

2025 年 6 月 13 日現在、傾斜焼結炭化物は航空宇宙、自動車製造、医療インプラント、軍事分野で重要な地位を占めています。積層造形技術の普及は、カスタマイズされた傾斜設計の開発を加速させ、熱安定性とマイクロメカニズムの研究（転位の進化や相変挙動など）は、現在の学界と産業界の最先端トピックとなっています。同時に、人工知能（AI）技術の急速な進歩は、特に中国のタングステン産業の文脈において、傾斜焼結炭化物の研究開発と応用に新たな機会と課題をもたらしています。傾斜焼結炭化物の将来の発展は、より多様化とインテリジェント化の傾向を示しています。

AI 主導のマテリアルデザイン

機械学習モデルや生成的敵対的ネットワーク（GAN）などの AI アルゴリズムは、傾斜焼結炭化物の微細構造と性能の関係を予測するために広く使用されています。大量の実験

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

データと有限要素シミュレーションの結果を分析することにより、AI は Co や Ti (C、N) などの成分の分布を最適化し、硬度（目標値 HV 1800±50）と破壊靱性（ $K_{1c} > 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）に最適な傾斜スキームを正確に予測し、従来の実験サイクルを大幅に短縮し、研究開発時間を 50% 以上削減すると期待されています。この方法は、Sandvik や Kennametal などの企業の研究開発プロセスで最初に検証されており、高い効率と信頼性を示しています。たとえば、Sandvik は AI モデルを使用して WC-Co-Ti (C、N) 傾斜構造の比率を最適化し、硬度の均一性の偏差を 0.01 mm 未満に低減しました。

スマート製造統合

産業用 IoT (IIoT) とデジタルツイン技術を組み合わせた AI 技術を積層製造プロセスに統合し、粉末供給速度、レーザー出力、温度パラメータをリアルタイムで監視して、傾斜層の均一性と一貫性を確保します。AI システムは、リアルタイムデータに基づいて SLM プロセスのパラメータを調整し、傾斜層の幾何学的偏差を 0.01 mm 以内に制御できるため、歩留まりが約 10% 向上します。Sandvik は、スウェーデンのサンドビケンにあるスマートファクトリーに同様の AI 最適化生産ラインを導入し、傾斜炭化工具の自動生産を実現し、生産効率と製品品質を大幅に向上させました。さらに、ケナメタルは、溶融プールの温度（ $< 300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ）と応力データに関するリアルタイムフィードバックを提供して傾斜層の微細構造を最適化する AI ベースの閉ループ製造システムを開発しています。

適応型パフォーマンス最適化

AI は、埋め込みセンサーを通じて切削工程中の温度（ $< 300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ）、応力（ $< 500 \text{ MPa}$ ）、摩耗データを収集し、傾斜構造の熱処理パラメータ（焼鈍温度 $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、保持時間 2 時間など）を動的に調整します。この適応能力により、傾斜焼結炭化物は $200^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ の広い温度範囲で優れた性能安定性を維持でき、特に航空機エンジンブレード、自動車タービン部品、深海機器などの高温・高応力環境に適しています。ケナメタルは関連技術を開発しており、2025 年末までに適応性能を備えた傾斜炭化工具のプロトタイプを発売し、 500°C で HV1700±50 の硬度を維持することを目標としています。

持続可能性と環境保護

AI は、シミュレーション計算を通じて原材料の利用効率を最適化し、Co などの貴金属の使用量を削減することで、材料消費量を 5% 以上削減できると見込まれています。同時に、リサイクル可能な材料（リサイクルタングステン粉末など）と低炭素製造プロセス（焼結エネルギー消費量の 10% 削減など）を組み合わせることで、AI 駆動型傾斜セメントカーバイド生産プロセスは、2025 年の世界的なグリーン製造基準（EU のエコデザイン指令や中国のカーボンピーク行動計画など）を満たし、二酸化炭素排出量を削減し、業界の持続可能な開発の可能性を高めます。たとえば、ZCC はリサイクルタングステン粉末用の傾斜セメントカーバイドの生産を最適化する AI の試験運用を開始しており、2025 年には年間 500 トンの CO₂ 削減を達成すると予想されています。

中国のタングステン産業

2025 年 1 月 3 日、中国タングステンオンラインの WeChat 公式アカウントは記事を公開し、2025 年は中国のタングステン業界にとって AI 元年になると正式に提唱しました。こ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の取り組みは、中国のタングステン業界のインテリジェント化における重要な節目となります。中国タングステンオンラインは、AI 技術がデータ駆動型の材料設計とプロセス最適化を通じて超合金業界を再構築し、傾斜構造超合金の研究開発に強力な技術サポートを提供すると指摘しました。例えば、AI はタングステン資源の分布と加工パラメータの分析、傾斜構造の性能最適化に活用されており、世界の超合金市場における中国の競争力向上が期待されています。さらに、中国タングステンオンラインは、AI 元年の到来により、スマートセンサーによる傾斜セメント炭化物の焼結プロセスのリアルタイム監視など、タングステン産業チェーンの上流と下流のデジタル統合が促進され、不良率が 5% ±1% 削減されると強調しました。

中国タングステンインテリジェント製造の先進コンセプト

中国タングステン業界のリーディングカンパニーとして、中国タングステン智能製造は超合金の 2 つの新たな先進コンセプトを提案し、AI 社会技術環境における開発理念をさらに豊かにしました。まず、超合金の高エントロピーコンセプトは、高エントロピー合金元素（FeCoCrNiMo など）を傾斜超合金に導入して、多相傾斜構造を形成します。この構造は、エントロピー値（ $>1.5R$ ）を増加させることにより、材料の熱安定性と耐食性を高めます。実験データによると、硬度は $HV1900\pm50$ に達し、破壊靱性は約 $20\%\pm3\%$ 向上し、特に航空宇宙や深海機器などの極限環境に適しています。中国タングステン智能製造は、高エントロピー傾斜超合金の開発に取り組んでいます。第二に、超合金グレードバッチングのコンセプトは、AI 駆動型デジタル管理システムを通じて、超合金の各バッチの性能追跡とカスタマイズ生産を実現します。各バッチの傾斜超合金には固有のデジタル識別子が付与されます。AI システムはビッグデータ分析を通じて、性能偏差を $0.005mm$ 以内に制御することを保証し、ハイエンド製造における一貫性とトレーサビリティのニーズを満たします。これらのコンセプトは、中国の超合金分野における技術革新を反映するだけでなく、世界の傾斜超合金産業の新たな発展基準を確立しました。

傾斜焼結炭化物の開発の歴史は、理論探求から産業応用への飛躍を目の当たりにしてきました。その発展は、材料科学、加工技術、そして応用ニーズの協調的な推進力に支えられています。AI 技術環境の支援を受け、中国タングステン産業の「AI 元年」構想と中国タングステンインテリジェント製造の革新的理念を組み合わせることで、傾斜焼結炭化物は、インテリジェント化、カスタマイズ化、持続可能な発展をさらに実現し、将来的には工具材料および構造材料分野の中核技術となり、世界の製造業の高効率化とグリーン化を力強く支えることが期待されます。

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

付録:

超硬ボール

超硬合金ボールは、炭化物（炭化タングステン WC、炭化チタン TiC など）を硬質相とし、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする球状の高性能材料です。優れた硬度、耐摩耗性、耐衝撃性により、工業、軍事、精密製造分野で広く使用されています。以下は、材料科学と工学の応用の背景を踏まえ、その特徴、応用シーン、材料比較、製造プロセス、サイズ規格表などを網羅した包括的な紹介です。

1. 超硬合金ボールの特性

超硬ボールは通常 WC-Co 系を採用し、密度は $14\sim 15\text{g/cm}^3$ 、硬度は HV 1400~1800、破壊靱性 (K_{1c}) は $10\sim 20\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ で、従来の鋼球（密度 $7.75\sim 8.05\text{g/cm}^3$ 、硬度 HV 200~400）をはるかに上回ります。球面設計により表面接触と応力分布が最適化され、圧縮強度は $3000\sim 4000\text{MPa}$ に達し、耐摩耗性はセラミックボール ($<0.01\text{mm}^3/\text{m}$) よりも優れています。精密焼結 ($1400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$) または積層製造技術により、粒径を $0.5\sim 1\mu\text{m}$ に制御でき、表面粗さ (Ra) は $0.01\mu\text{m}$ と低く、高精度の要件を満たします。特殊な配合 (WC-TiC-Ni など) により、軽量性と性能の両方を考慮して密度を $12\sim 13\text{g/cm}^3$ に調整できます。

2. 超硬合金ボールの性能

高い硬度と耐摩耗性

超硬ボールは極めて高い硬度 (HV 1400~1800) を有し、高速摩擦 ($>10^4\text{rpm}$) または連続衝撃 ($>2000\text{N}$) 条件下でも優れた性能を発揮します。摩耗率は $0.02\text{mm}^3/\text{m}$ と低く、従来の鋼球 ($>0.1\text{mm}^3/\text{m}$) と比べて大幅に優れています。研磨環境や切削環境における長期使用に適しており、表面摩耗や材料剥離に効果的に抵抗します。

優れた耐衝撃性

破壊靱性 (K_{1c}) は $10\sim 20\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の範囲にあり、疲労サイクル耐性は 10^6 回を超えます。優れた耐亀裂成長性を有し、最大 4000MPa の瞬間衝撃荷重に耐えることができます。特に、軍用子弾やショットピーニングにおける高応力環境に適しています。

優れた熱安定性

広い温度範囲 ($-50^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$) にわたって性能が安定しており、熱膨張係数は $6\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と、鋼鉄 ($12\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) を大幅に下回ります。これにより、極高温・低温環境下でも寸法と性能の安定性を確保し、航空機エンジンや化学ポンプなどの過酷な環境下でも優れた性能を発揮します。

優れた均一性と精度

球面对称誤差は 0.001mm 以内に制御され、表面粗さは $0.01\mu\text{m}$ に達するため、非常に高い幾何学的精度と転がりの一貫性が得られ、ミクロンレベルの許容誤差が求められる精密機器（ボールねじなど）や光学機器の要件を満たします。

優れた耐腐食性

特殊なコーティング (TiN など) や配合 (WC-TiC-Ni など) により、酸やアルカリの腐食

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

(pH 1~14) に耐性があり、表面酸化率は 0.1 mg/cm²/h 未満であるため、化学環境での耐用年数が延長され、特に化学ポンプや海洋機器に適しています。

効率的なエネルギー伝達

球面設計により応力分散が最適化され、高いエネルギー伝達効率 (90%±2%以上) を実現します。高速投射 (800~1000 m/s など) 時や衝撃時には、エネルギー放出を集中させ、貫通力や補強効果を高めます。

4. 超硬合金ボールの応用シナリオ

ベアリングとバルブ

直径 0.5~10 mm の超硬ボールは、高速ベアリング (> 10⁴ rpm) に使用され、耐摩耗性は < 0.01 mm³/m、寿命は > 10⁵ 時間±10³時間で、航空機エンジンに適しています。

研磨材とショットピーニング

1~5mm のボールを使用してショットピーニング (圧力 0.2~0.5MPa) を行い、表面硬化層を 0.1~0.2mm にすることで、鉄鋼部品の寿命を 20%±3%延長します。

精密機器

0.1 ~ 1 mm のボールは光学機器のボールねじに使用され、許容差は 0.001 mm 未満、安定性は 99.9% を超え、半導体装置に適しています。

軍事利用

10~50 mm の弾丸を子弾または破片として使用し (初速度 800~1000 m/s)、軽装甲 (<50 mm) を貫通し、徘徊型弾薬または手榴弾として適しています。

ケミカルポンプ

耐腐食性炭化物ボール (WC- TiC -Ni)、耐酸・耐アルカリ性 (pH 1~14)、流動安定性 >95%±2%。

5. 超硬ボールと従来の材料の比較

材料	密度 (g/cm ³)	硬度 (HV)	K _{1c} (MPa·m ^{1/2})	利点	制限事項
超硬ボール	14-15	1400-1800	10~20	高い浸透性、耐摩耗性	高コストと高密度
スチールボール	7.75-8.05	200~400	50~100	低コストで処理が簡単	貫通力が弱い
セラミックボール (Si ₃ N ₄)	3.2-3.3	1400-1600	6-8	軽量で耐熱性	高い脆さ
ガラス玉	2.5~2.6	500~600	0.5~1	低コスト	耐摩耗性が低い

超硬ボールは、硬度と耐摩耗性において鋼やガラスボールよりも優れており、セラミック

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ボールに近いですが、靱性がより優れており、高密度が主な制限となります。

6. 寸法と仕様

以下は、様々な用途に適した超硬合金ボールの一般的な寸法です。これらのデータは、業界標準（ISO 3290 など）と実際の生産ニーズに基づいています。

直径(mm)	重量(g)	許容範囲(±mm)	表面粗さ (Ra, μm)	硬度 (HV)	推奨アプリケーション
0.1	0.0007	0.0005	0.005	1400-1500	ミニチュアベアリング、計器
0.5	0.0087	0.001	0.01	1450-1550	精密ボールねじ
1.0	0.069	0.001	0.01	1500-1600	バルブ、ショットピーニング
5.0	1.72	0.002	0.01	1550-1650	研磨材、高速ベアリング
10.0	13.8	0.002	0.01	1600-1700	化学ポンプ、軍用子弾
20.0	110	0.005	0.015	1650-1750	破片弾頭、衝突部分
50.0	1720	0.01	0.02	1700-1800	軍用運動エネルギー弾、重機

注：重量は密度 14.5 g/cm³に基づいて計算されています。公差と粗さはお客様のご要望に応じて調整可能です（±0.0001 mm）。特殊仕様（直径 0.05 mm、100 mm など）は、特注生産となります。

7. 製造工程

粉末冶金

WC-Co 粉末 (90:10) を真空中 (10⁻³Pa)、1400°C±10°C で焼結し、ボール径は 0.1〜50mm、

硬度は HV 1500±30 であった。

積層造形

SLM 技術は、層厚 50 μm±5 μm、精度 ±0.01 mm で複雑な球面形状を印刷できるため、小ロットのカスタマイズに適しています。

表面処理

ダイヤモンド研磨仕上げ (Ra<0.01 μm)、PVD コーティング TiN (5-10 μm)、耐腐食性 <0.1 mg/cm²/h。

品質管理

レーザースキャンでは球面誤差 (<0.001 mm) を検出し、超音波検査では内部欠陥 (<0.05 mm) を検出します。

優れた機械的特性と幅広い用途を持つ超硬合金ボールは、産業分野や軍事分野の主要部品となっています。多様な仕様と製造プロセスにより、高精度・高耐久性が求められる用途での使用において確固たる基盤を築いています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

スマートレスポンスカーバイド

スマートレスポンス超硬合金は、従来の超硬合金の高硬度、耐摩耗性、破壊靱性（ K_{1c} ）の利点を統合し、外部刺激（温度、圧力、磁場、化学環境など）に対する自己適応または応答特性を備えた新しいタイプの材料です。その核心は、従来のコバルト（Co）またはニッケル（Ni）をインテリジェント結合相（形状記憶合金 NiTi、感熱ポリマー、埋め込み型応答性ナノ粒子など）に置き換え、動的な性能調整と自己修復機能を実現することです。以下は、材料科学、スマート材料技術、エンジニアリングアプリケーションに基づく包括的な展開であり、特性、影響要因、理論的根拠、適用シナリオ、材料比較、製造プロセス、および将来の開発方向を網羅しています。

1. インテリジェントレスポンスカーバイドの特徴

スマートレスポンス超硬合金は、硬質相として炭化タングステン（WC）、炭化チタン（TiC）、または炭化ホウ素（ B_4C ）をベースに、スマート結合相（NiTi、CuAlNi、グラフェンドープナノ複合材料など）で構成されています。密度範囲は $10\sim 14\text{ g/cm}^3$ で、多孔質設計（気孔率 $5\%\sim 15\%$ ）または軽量添加剤（ Al_2O_3 、SiC など）により $9\sim 12\text{ g/cm}^3$ に最適化できます。スマートレスポンス特性には、温度変化下での硬度の自動調整（HV 1200 $\sim$ 1600）、磁場下での摩擦係数の低減（ $10\%\pm 2\%$ ）、または亀裂発生時の自己修復（回復率 $80\%\pm 5\%$ ）などがあります。これらの特性により、動的負荷や過酷な環境でも優れた性能を発揮します。

2. パフォーマンス上の利点

適応性

$50^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$ の温度範囲では、マルテンサイト-オーステナイト相変態に基づいて硬度が動的に調整され、衝撃エネルギー吸収は $90\%\pm 3\%$ に達し、高温環境に適しています。

自己治癒

SiC またはポリマーマイクロカプセルに埋め込まれた接着剤は、亀裂が伝播すると放出され、 K_{1c} 回復率は $80\%\pm 5\%$ で、耐用年数を延ばします。

多彩な対応

磁場（ $> 1\text{ T}$ ）または pH の変化（ $4\sim 7$ ）下で、表面特性（潤滑性や耐腐食性など）を調整し、複雑な作業条件に適応させることができます。

耐久性

従来の超硬合金と比較して、スマート相の動的緩衝効果により、摩耗率が $15\%\pm 2\%$ （ $< 0.04\text{ mm}^3/\text{m}$ ）減少します。

3. 影響要因と理論的議論

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

結合相の組成

NiTi 含有量が 5%~15%±1% の場合、形状記憶効果が顕著となり、 K_{1c} は $15\% \pm 2\%$ ($18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$) 増加します。一方、NiTi 含有量が 20%±1% を超える場合、硬度は $10\% \pm 3\%$ (HV 1200±30) 低下します。マルテンサイト変態理論によれば、NiTi 含有量が低い場合 (<5%) はひずみが最適化され、含有量が高い場合 (粒界エネルギー > 1 J/m²) は粒界不安定性につながる事が指摘されています。

気孔率

気孔率が 10%±1% の場合、エネルギー吸収率は高く (>90%±2%)、自己修復効率は 85%±3% です。一方、気孔率が 20%±1% を超えると、強度は $15\% \pm 3\%$ 低下し ($850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$)、強度は低下します。ギブソン・アシュビーモデルによれば、適度な気孔率は貯蔵スペースを提供し、過剰な気孔率はグリフィス亀裂理論に従って支持力を弱めます。

焼結温度

1300°C~1400°C±10°C では微細構造が安定し、応答感度は 95%±2% を超えます。1450°C±10°C を超えるとナノ粒子が凝集し、性能は 5%±1% 低下します。Kingery 焼結理論によれば、適度な温度では相界面の結合が促進され、過度に高い温度では拡散が制御不能に加速されます (Arrhenius の式)。

粒度

粒子径が $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、応答速度は速く (<1 秒)、 K_{1c} は $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ に達します。粒子径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超える場合、応答は 10%±2% 遅れます。ホール・ペッチ関係は、微粒子が界面反応を促進し、粗大粒子が動的性能を低下させることを示しています (オロワン機構)。

外部刺激の強度

磁場が 1~2 T または温度が 150°C±10°C の場合、応答振幅は最大になり (硬度変化 > 200 HV)、マクスウェル・ボルツマン分布に基づくと、刺激強度は位相変化率と指数関数的に相関します。

4. アプリケーションシナリオ

インテリジェント兵器システム

砲身のライニングには、高温 (> 200°C) で適応的に膨張する NiTi 結合相が使用されており、摩耗が軽減され、機関銃や戦車砲に適した 10^4 ラウンド ± 10^3 ラウンドまで耐用年数が延長されます。

航空宇宙機器

衛星ロボットアームジョイントには、粒径が $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の磁場応答構造が採用されており、HV 1500±30、10%の軽量化、真空下 (10^{-6} Pa) での潤滑性の維持を実現しています。

医療機器

多孔度が 10% ± 1% の自己修復インプラント (人工股関節など) は、37°C で生体適合性コーティングを放出し、 K_{1c} 回復率は 80% ± 5% で、術後合併症を軽減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

工業用切削工具

動的硬度調整（HV 1200-1600）、切削負荷の変化時に自動適応、摩耗率 $<0.05\text{ mm}^3/\text{m} \pm 0.01\text{ mm}^3/\text{m}$ 、高精度加工に適しています。

スマートアーマー

多孔質構造（ $10\% \pm 1\%$ ）は衝撃を受けると自己修復し、磁場に応じて硬度を調整することで 9mm ピストル弾から保護します。鋼板より 15%軽量で、防弾チョッキや車両のサイドガードなどに使用できます。

5. 各種材料の比較

素材の種類	密度 (g/cm ³)	硬度 (HV)	K _{1c} (MPa·m ^{1/2})	スマート機能	制限
スマートレスポンスカーバイド	10~12 歳	1200-1600	10~20	適応性と自己治癒性	高密度、高コスト
従来の超硬合金	14-15	1400-1800	10~20	なし	反応がなく重い
形状記憶合金 (NiTi)	6.4~6.5	300~400	20~40 歳	形状記憶	硬度が低く、耐摩耗性が低い
スマートポリマー	1.0~1.5	50~100	1-5	ストレス感知、自己治癒	保護性能が低い
セラミックマトリックス複合材料	2.5~3.0	2000~3000 年	3-5	熱応答	脆性が高く、加工が難しい
スマートメタルガラス	6.0~7.0	500~1000	30~50	応力磁気応答	形成が難しい

スマートレスポンス超硬合金は、硬度と靱性の点で形状記憶合金やスマートポリマーより優れており、従来の超硬合金に近く、適応性があり、セラミックの脆さより優れており、金属ガラスの動的応答ポテンシャルを備えています。

6. 製造工程

粉末冶金

WC 粉末を NiTi 粉末と混合（質量比 85:15）し、真空中（ 10^{-3}Pa ）で $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ で焼結して均一な微細構造を形成しました。

積層造形

選択的レーザー溶融法 (SLM) を使用し、層厚 $50\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 、多孔度 $10\% \pm 1\%$ に制御して複雑な勾配構造を実現しました。

ナノ複合材料

自己修復機能を強化するために、SiC ナノ粒子 (<1%) がメカニカルアロイングによって埋め込まれますが、これを活性化するには高温アニール ($1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) が必要です。

7. 開発の方向性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

多刺激反応

密度を $8\sim 10\text{ g/cm}^3$ に低減し、 K_{1c} を $20\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上に高めた、温度・磁気・化学の 3 つの応答性を持つ材料を開発します。

ナノ強化

カーボンナノチューブ (CNT、 $<2\%$) を添加すると導電性と靱性が向上し、応答速度は <0.5 秒となり、これは量子力学的インターフェース効果と一致します。

インテリジェントデザイン

AI と組み合わせて微細構造を最適化し、相変化点 ($\pm 5^\circ\text{C}$) を予測し、機械学習を通じて焼結パラメータを調整することで、コストを $20\%\pm 5\%$ 削減します。

環境適応性

耐食性応答 (例: $\text{pH } 3\sim 9$) を研究し、寿命を 10^5 時間 $\pm 10^4$ 時間以上に延長して海洋機器に拡張します。

8. 課題と展望

課題としては、高コスト (従来の合金の 2 倍以上の製造コスト)、長期安定性 (5 年以上のエージング試験)、大規模生産能力などが挙げられます。将来性は、スマートアーマー、医療用インプラント、産業用ツールへの統合応用にあります。その理論的基盤は、相変化ダイナミクス (ランガーモデル)、微細構造最適化 (ツェナーピンニング)、多場応答 (マクスウェル方程式) を網羅しており、スマート材料技術の実用化を促進します。

適応性と自己修復性を備えたスマート応答性超硬合金は、兵器、航空宇宙、医療、そして産業において新たな分野を開拓しました。その汎用性と理論的革新性は互いに補完し合い、将来的にはスマートエンジニアリング材料の主流となることが期待されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録：

低密度炭化物装甲

近年、低密度超硬合金を装甲材料として研究・応用する動きが注目を集めています。その目的は、従来の超硬合金の微細構造を最適化することで密度を低減し、高い硬度、耐磨耗性、防護性能を維持することで、装甲の軽量化ポテンシャルを高めることです。以下は、既存の知見と関連技術背景に基づき、新たな理論的考察、各種装甲材料の比較、そして低密度超硬合金装甲の応用シナリオを交えて、最適化の概要を示します。

1. 低密度超硬合金の特性

低密度超硬合金は、炭化タングステン（WC）をベースとしています。多孔質構造、傾斜設計、または結合相（コバルト Co やニッケル Ni など）の含有量を調整することにより、微細構造が最適化され、密度が低下します。従来の超硬合金（WC-Co など）の密度は約 $14\sim 15\text{ g/cm}^3$ で、鋼（ $7.75\sim 8.05\text{ g/cm}^3$ ）よりも高くなっています。プロセスの改善（気孔率を $10\%\sim 20\%$ 増加させる、チタン Ti や炭化チタン TiC などの軽量添加剤を追加するなど）により、密度を $10\sim 12\text{ g/cm}^3$ まで低減できます。これは従来の超硬合金よりも大幅に優れていますが、それでも鋼よりはわずかに高くなります。低密度設計は、単位面積あたりの重量（面密度）を軽減し、車両の加速性能やオフロード能力など、装甲システムの機動性を向上させることを目的としています。

2. パフォーマンス上の利点

保護性能

$K_{1c} 10\sim 20\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ を有し、徹甲弾（AP）および破片による脅威に効果的に抵抗します。バイオニック微細構造（例えば、気孔率 $10\%\pm 1\%$ ）は、応力分散を通じて耐衝撃性を向上させます。

重量の最適化

従来の超硬合金と比較して、密度は約 $20\%\sim 30\%$ （例えば 14 g/cm^3 から $10\sim 12\text{ g/cm}^3$ ）減少しますが、それでも鋼鉄（ $7.75\sim 8.05\text{ g/cm}^3$ ）よりわずかに重いです。しかし、多孔質設計により、単位面積あたりの重量を $15\%\sim 25\%$ 削減することができ、間接的に戦場での対応速度を向上させます。

加工性

μm ）を焼結プロセス（ $1400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ など）で製造することで、さまざまな保護ニーズを満たす複雑な装甲構成を実現できます。

3. 影響要因と理論的議論

気孔率

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

K_{1c} が 10%±1% の場合、K_{1c} は高く (>15 MPa·m^{1/2})、硬度は HV 1450±30 を維持します。K_{1c} が 20%±1% を超えると、硬度は 20%±3% 低下します (HV 1200±30)。グリフィス亀裂理論によれば、中程度の気孔は応力を分散させ、

強い靱性

多孔性が高すぎると、亀裂伝播エネルギーが増加し、硬度が低下しますが、これはギブソン・アシュビー モデルにおける多孔質材料の機械的挙動と一致しています。

共勾配

Co 勾配が 5%~15%±1% の場合、応力分散は良好で K_{1c} は 10%±2% 増加します。一方、Co 勾配が 20%±1% を超える場合、偏析は 10%±2% 増加します。フィックの第二法則に基づくと、Co 勾配が低い場合、安定した結合相ネットワークが形成されます。一方、Co 勾配が高すぎる場合、ギブス自由エネルギーが最小化され、相分離が生じ、粒界エネルギー (>1 J/m²) が増加します。

絞り

10 μm±0.1 μm ではエネルギー吸収率が高く (>90%±2%)、直径が 20 μm±0.1 μm を超えると強度は 15%±3% 低下し (850 MPa±20 MPa)、Hashin-Shtrikman 理論によれば、小さな気孔は応力を分散させる一方、大きな気孔は応力集中を引き起こし、これは最大せん断応力理論と整合しています。

焼結温度

1400°C±10°C では構造は安定しており、気孔率の偏差は 1%±0.1% 未満です。1450°C±10°C を超えると、偏差は 5%±1% 増加します。Kingery モデルによれば、Co の融点に近い 1400°C では均一な液相が形成され、1450°C を超えると拡散速度は指数関数的に増加し (Arrhenius の式)、気孔の崩壊を引き起こします。

粒度

0.51 μm±0.01 μm では、K_{1c} は 16 MPa·m^{1/2}±0.5 に達し、硬度は HV 1450±30 です。直径が 2 μm±0.1 μm を超えると、K_{1c} は 10%±2% 減少します。ホール・ペッチの関係は、微細粒子は粒界密度 (>10¹⁴ m⁻²) を増加させて亀裂を阻害するのに対し、粗大粒子は障壁を低下させることを示しています (オロワン機構)。

4. 各種装甲材料の比較

素材の種類	密度 (g/cm ³)	硬度 (HV)	破壊靱性 (K _{1c} 、MPa·m ^{1/2})	重量の優位性	保護性能	制限
低密度セメント 炭化物	10~12 歳	1200-1800	10~20	従来の超硬合金より 20%~30%軽量	徹甲弾と破片に 対する高い耐性	密度は依然として鋼 鉄より高く、コストも

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

素材の種類	密度 (g/cm ³)	硬度 (HV)	破壊靱性 (K _{1c} 、MPa·m ^{1/2})	重量の優位性	保護性能	制限
						高い
スチール (RHA)	7.75 ~ 8.05	200~400	50~100	ベース重量	良い、広く使われている	硬度が低く、変形しやすい
アルミニウム合金 (5083)	2.6~2.8	100~150	20~30	スチールより 70%軽量	装甲貫通弾に対する防御力が低い	複合補強が必要
セラミック (B ₄ C)	2.5~2.7	2000 ~ 3000	3-5	スチールより 70%軽量	非常に高い硬度、対装甲貫通力	脆性が高く、サポート層が必要
複合材料 (ケブラー)	1.4~1.6	50~100	20~40 歳	スチールより 80%軽量	断片化防止、優れた柔軟性	硬度が低く、装甲貫通抵抗が限られている

低密度超硬合金は、硬度と靱性において鋼やアルミニウム合金よりも優れており、セラミックに近い特性を持っています。しかし、密度が高いため、重量を最適化するには多孔質設計や複合構造と組み合わせる必要があります。鋼はコストが低いものの保護性能は限られており、アルミニウム合金とセラミックは軽量化に適していますが、補助材料が必要であり、複合材料は柔軟な保護性能に適しています。

5. 適用シナリオ

軽装甲車

たとえば、偵察車両や無人戦闘車両では、密度が 10~12 g/cm³ の低密度セメント炭化物は、鋼鉄よりも高い硬度 (HV 1200 対 HV 400) を提供し、単位面積あたりの重量を 15%~25% 削減し、速度 (> 50 km/h) とオフロード能力を向上させ、迅速な展開ミッションに適しています。

航空輸送可能な機器

たとえば、ヘリコプターで運ばれる防護プレートは、多孔質構造（多孔度 10%±1%）と勾配 Co（5%-15%）を組み合わせることで、重量を 20% 削減し、航空輸送重量制限（< 5 トン）を満たしながら、7.62 mm AP 弾から保護することができます。

個人用保護具

軽量の胸当てとして使用できます。結晶粒径 0.51μm±0.01μm の構造は HV1450±30 を実現し、9mm 拳銃弾に対する防護性能を備え、鋼板より 15%軽量であるため、特殊部隊に適しています。

船舶補助装甲

小型スピードボートのサイドガードに使用されます。1400°C±10°Cの焼結温度で安定した構造を実現し、破片の飛散を防ぎます。密度を最適化することで、重量を 20%削減し、速度（40 ノット以上）を向上させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

6. 限界と開発の方向性

密度（ $10\sim 12\text{ g/cm}^3$ ）は鋼鉄（ $7.75\sim 8.05\text{ g/cm}^3$ ）よりも高いものの、低密度超硬合金は高出力の徹甲弾（0.50 口径 AP 弾など）に対する防御力が不十分であり、セラミックスや複合材料と組み合わせる必要があります。また、加工の複雑さ（気孔率制御など）と高コストが大規模応用を制限しています。現在の研究は、密度を $8\sim 10\text{ g/cm}^3$ 、硬度を HV 1000 以上に低減できる TiC-Co 系または高エントロピー合金に焦点を当てています。積層造形技術（SLM など）は微細構造を正確に制御でき、多層設計（超硬合金＋軽量層）により、より高い総合性能が期待されます。

低密度炭化物装甲は、高硬度と軽量性の両立を目指しています。その理論的根拠は、破壊力学と焼結力学を網羅しています。構造最適化と複合材設計により、軽量車両、航空機器、そして個人防護における可能性を示しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

スマートツール

スマート切削工具は、現代の製造業と材料科学、センサー技術、インテリジェント制御技術との深い融合による革新的な成果です。インテリジェント応答性超硬合金、セラミックマトリックス複合材料、または高性能コーティングをベースにした先進的な切削工具であり、適応型切削性能、リアルタイムモニタリング、自己修復機能を統合しています。その核心は、マイクロセンサー（歪みゲージ、温度センサー、加速度計など）、応答性コーティング（熱、磁気、化学感応材料など）、インテリジェント結合相（形状記憶合金 NiTi、ナノ複合材料など）を組み込むことで、切削プロセスにおける動的最適化、摩耗検出、損傷修復を実現することです。この種の工具は、従来の超硬合金の高い硬度、耐摩耗性、破壊靱性（ K_{1c} ）を継承するだけでなく、外部条件（切削負荷、温度、磁場など）に適応的に応答する能力を持ち、CNC システム（CNC）またはインダストリー4.0 プラットフォームとシームレスに統合され、加工効率、精度、工具寿命を大幅に向上させます。以下は、材料科学、インテリジェント製造技術、エンジニアリングの応用背景に基づいた包括的な議論であり、特性、影響要因、理論の根拠、応用シナリオ、材料の比較、製造プロセス、開発方向、課題と展望を網羅しています。

1. スマートツールの特徴

スマートツールは、密度範囲 $10 \sim 14 \text{ g/cm}^3$ のスマートレスポンス炭化物（WC-NiTi または WC-TiC-NiTi 複合材料など）またはセラミックマトリックス複合材料（ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ など）をベースとしています。多孔質構造（気孔率 $5\% \sim 15\%$ ）または軽量添加剤（TiC、 Al_2O_3 など）を導入することで、軽量性と強度の両方を考慮し、密度を $9 \sim 12 \text{ g/cm}^3$ に最適化できます。スマートツールの機能は以下のとおりです。

適応型切断

切削速度 $500 \sim 2000 \text{ m/分}$ では、硬度は動的に調整され（HV $1200 \sim 1800$ ）、相変化またはコーティング応答により振動が低減され（ $< 0.05 \text{ mm}$ ）、表面粗さが最適化されます（ $R_a < 0.02 \mu\text{m}$ ）。

リアルタイム監視

内蔵のマイクロセンサーが温度（ $< 300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ）、応力（ $< 500 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ）、振動（ $< 0.1 \text{ g}$ ）、摩耗深さ（ $\pm 0.01 \text{ mm}$ ）をリアルタイムで収集し、そのデータをワイヤレス伝送（遅延 < 0.1 秒）を介して CNC システムにフィードバックします。

自己治癒

埋め込まれた SiC ナノ粒子またはマイクロカプセル化されたポリマーは、微小亀裂（ $< 0.1 \text{ mm}$ ）が発生すると接着剤を放出し、 K_{1c} 回復率は $80\% \pm 5\%$ で、耐用年数を大幅に延長します。

汎用性

磁場（ $> 1 \text{ T}$ ）または pH 変化（ $4 \sim 7$ ）下では、表面摩擦係数が $10\% \pm 2\%$ 減少し、耐腐食性が $15\% \pm 3\%$ 増加し、さまざまな処理環境に適応します。

これらの機能により、スマートツールは高精度、高効率、過酷な作業条件下でも優れたパフォーマンスを発揮することができ、特に現代の製造業のインテリジェンスと持続可能性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の要求に適しています。

2. パフォーマンス上の利点

適応型切断

結合相の相変態（NiTi のマルテンサイト-オーステナイト変態など）またはコーティングの熱膨張調整により、切削負荷が変化したときに工具が切削パラメータを自己最適化し、工具とワークピース間の動的応力（ $<100\text{ MPa}$ ）を軽減し、切削効率を $15\%\pm 2\%$ 向上させ、表面品質を $20\%\pm 3\%$ 向上させます（ R_a は $0.1\text{ }\mu\text{m}$ から $0.02\text{ }\mu\text{m}$ に低下）。

リアルタイム監視

センサー ネットワークは、多次元データのサポート、熱による損傷を防ぐための温度監視（ 300°C を超えると警告）、送り速度を最適化するための応力監視（ $<0.1\text{ mm/回転}$ ）、寿命を予測するための摩耗監視（誤差 $<5\%$ ）を提供し、予知保全を実現します。

自己治癒

ナノフィラー（例：SiC、粒子サイズ $<50\text{ nm}$ ）またはマイクロカプセル（直径 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ ）は、亀裂の伝播時に活性化し、エポキシまたは金属接着剤を放出します。その結果、修復率は $80\%\pm 5\%$ 、寿命は $20\%\pm 3\%$ （ $>10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間）延長されます。

耐久性

従来の工具と比較して、摩耗率は $20\%\pm 2\%$ （ $<0.03\text{ mm}^3/\text{m}$ ）減少し、耐酸化性は $10\%\pm 2\%$ （ $<0.1\text{ mg/cm}^2/\text{h}$ ）向上し、高負荷（航空チタン合金の切削など）および高温環境に適しています。

3. 影響要因

結合相の組成

NiTi 含有量が $5\%\sim 15\%\pm 1\%$ の場合、切削適応性は良好で、 K_{1c} は $15\%\pm 2\%$ 増加し（ $18\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ ）、硬度は $\text{HV } 1500\pm 30$ で安定します。一方、NiTi 含有量が $20\%\pm 1\%$ を超えると、硬度は $10\%\pm 3\%$ 低下し（ $\text{HV } 1200\pm 30$ ）、粒界は不安定になります。マルテンサイト相変態理論によれば、NiTi 含有量が低いとひずみが最適化され（ $<5\%$ ）、含有量が高いと粒界エネルギーが上昇し（ $>1\text{ J/m}^2$ ）、ギブスの自由エネルギー最小化の原理に従います。

気孔率

気孔率が $10\%\pm 1\%$ の場合、エネルギー吸収率は高く（ $>90\%\pm 2\%$ ）、自己修復効率は $85\%\pm 3\%$ に達し、切削安定性が向上します。一方、気孔率が $20\%\pm 1\%$ を超えると、強度は $15\%\pm 3\%$

低下し（ $850\text{ MPa}\pm 20\text{ MPa}$ ）、ギブソン・アシュビーモデルは、適度な気孔率は応力を分散させる一方、過剰な気孔率は組織を弱めると指摘しています。グリフィス亀裂理論は、亀裂伝播エネルギーの増加を支持しています。

焼結温度

$1300^\circ\text{C}\sim 1400^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ では、微細構造は安定し、応答感度は $95\%\pm 2\%$ 以上、コーティング密着性は 50 N/mm^2 以上です。 $1450^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ を超えると、性能は $5\%\pm 1\%$ 低下します。Kingery

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

焼結理論によれば、適度な温度が相界面の結合を促進することが示されており、Arrhenius の式は高温下での暴走拡散を説明しています。

粒度

直径が $0.5 \sim 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、切削精度は高く（公差 $< 0.005 \text{mm}$ ）、 K_{1c} は $16 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ に達し、摩耗率は $< 0.02 \text{mm}^3/\text{m}$ です。直径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超える場合、摩耗率は $10\% \pm 2\%$ 増加します。ホール・ペッチの関係は、微細粒子が耐摩耗性を向上させることを示し、オロワン機構は粗粒子の性能低下を説明しています。

コーティングの厚さ

厚さが $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ の場合、熱応答効率は $90\% \pm 2\%$ を超え、摩擦係数は $10\% \pm 2\%$ 減少します。厚さが $15 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ を超えると、接着力は $10\% \pm 2\%$ 減少します。接着理論によれば、適度な厚さは界面接着を最適化しますが、厚すぎると内部応力（ 200MPa 超）が蓄積されます。

センサー感度

ひずみ感度 $> 100 \mu\epsilon$ 、温度分解能 $< 1^\circ\text{C}$ 、圧電効果と熱電効果に基づき、データの精度を保証します。

4. アプリケーションシナリオ

航空機製造

チタン合金（Ti-6Al-4V など）タービンブレードの加工、硬度自動調整（HV 1500 ± 30 ）、温度監視 $< 250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、精度 $\pm 0.01 \text{mm}$ 、スクラップ率を $10\% \pm 2\%$ 削減、複雑な表面加工に適しています。

自動車産業

歪みセンサーを内蔵したアルミニウムボディ部品（6061）の切断により、 400MPa 未満の負荷を検出し、送り速度（ $0.05 \sim 0.2 \text{mm}/\text{回転}$ ）を動的に調整し、効率を $15\% \pm 2\%$ 向上させ、大量生産のニーズを満たします。

金型製造

高硬度鋼（H13、HV 500 ± 20 ）を加工し、自己修復コーティングにより微小亀裂（ $< 0.05 \text{mm}$ ）を修復します。寿命は最大 10^4 時間 $\pm 10^3$ 時間で、交換頻度を $20\% \pm 3\%$ 削減し、メンテナンスコストを削減します。

エレクトロニクス産業

シリコンウェーハ（厚さ $< 0.5 \text{mm}$ ）の精密加工、粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、滑らかな切断面（ $R_a < 0.02 \mu\text{m}$ ）、プロセスを最適化するためのリアルタイムデータフィードバック、マイクロエレクトロニクス部品およびチップ製造に適しています。

エネルギー機器

風力タービンブレードのダイカット、耐高温性（ $< 300^\circ\text{C}$ ）、適応硬度、熱亀裂のリスク低減（ $< 0.1 \text{mm}$ ）、過酷な環境および長寿命要件に適しています。

造船業

加工されたステンレス製プロペラは、磁場応答により摩擦が低減（ < 0.1 ）し、耐食性が $15\% \pm 3\%$ 向上し、高塩分の海洋環境に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. 各種材料の比較

素材の種類	密度 (g/cm³)	硬度 (HV)	K1c K_{1c} K1c (MPa·m ^{1/2})	スマート機能	制限
スマートレスポンスカーバイド	10~12 歳	1200-1800	10~20	自己適応、監視、自己修復	高密度、高コスト
従来の超硬合金	14-15	1400-1800	10~20	なし	反応しない、寿命が限られている
セラミックコーティングされた切削工具	2.5~3.0	2000~3000 年	3-5	熱応答	脆性が高く、壊れやすい
炭化物コーティング（PVD）	6.0~7.0	1500-2500	5-10	耐摩耗性	適応性がなく、寿命が短い
スマートポリマー複合材料	1.0~1.5	50~100	1-5	ストレスセンシング	硬度が低く、高温に耐えられない
ナノコーティングされた切削工具	5.0~6.0	1000-1500	10~15 歳	自己潤滑性	耐高温性が低い

スマートレスポンス超硬合金は、硬度と靱性の点でセラミックコーティングやポリマー複合材より優れており、従来の超硬合金に近い性能を持ち、適応機能と監視機能を備え、超硬合金コーティングの寿命限界を超え、ナノコーティングの潤滑ポテンシャルを備えています。

6. 製造工程

粉末冶金

WC 粉末と NiTi 粉末（85:15）を混合し、真空中（10⁻³Pa）で 1400°C±10°C で焼結し、気孔率を 10%±1%に制御して、硬度 HV1500±30 の均一な微細構造を形成しました。

積層造形

選択的レーザー溶融法（SLM）は、層厚 50 μm ± 5 μm、埋め込みセンサー (<1 mm³)、精度 ±0.01 mm で、複雑な形状に適しています。

表面処理

PVD 蒸着 TiAlN または CrN コーティング（5~10μm）、高温焼鈍処理（1000°C±10°C）により応答性が活性化され、接着力は 50 N/mm²を超え、耐摩耗性は 20%±2%向上します。

センサー統合

小型ひずみゲージ（感度 >100 με ）と熱電対（分解能 <1°C）がレーザー溶接で埋め込まれており、信号伝送速度は >100 Hz で、産業用 IoT と互換性があります。

後処理

プラズマ研磨により表面欠陥（Ra<0.01 μm）が除去され、コーティングと基材間の界面結合強度が向上します（>60 N/mm²）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. 開発の方向性

マルチセンサー融合

温度、振動、摩耗、アコースティックエミッションセンサーを統合してデジタルツインモデルを構築し、寿命を予測（誤差<3%）し、ディープラーニングに基づいて切削パラメータを最適化し、エネルギー消費を 10%±2%削減します。

アダプティブコーティング

温度・磁気・化学の3つの応答性を持つコーティングが開発され、硬度範囲は HV1000～2000 に拡張され、応答時間は 0.5 秒未満で、マクスウェル・ボルツマン分布と電気化学反応速度論に準拠しています。

ナノ強化

カーボンナノチューブ (CNT、<2%) またはグラフェン (<1%) を追加すると、熱伝導率 (>200 W/m·K) と靱性が向上し、量子インターフェース効果とナノ複合材料強化理論に基づき、 K_{1c} が $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ まで増加します。

インテリジェント制御

5G とエッジコンピューティングを統合することで、切削データのリアルタイムフィードバック（遅延<0.05 秒）を提供し、柔軟な製造に適応し、加工誤差を±0.005mm まで低減できます。

持続可能なデザイン

環境に優しい製造基準に沿って、材料の無駄を 10% ± 2% 削減するリサイクル可能なコーティングを開発します。

8. 課題と展望

課題としては、製造コストの高さ（従来のツールの3～4倍以上）、高温（400℃以上）におけるセンサーの信頼性（10⁵サイクル以上）、複雑な動作条件下での長期安定性（5年以上）などが挙げられます。将来性は、相変化ダイナミクス（ランガーモデル）、微細構造最適化（ツェナーピンニング）、センサー技術（圧電効果）、多場連成（マクスウェル方程式）、ナノ複合材料理論（ハルピン・ツァイモデル）を理論的基盤とするインテリジェント製造の深層応用にあります。インテリジェントツールは、航空、自動車、電子機器、エネルギー処理の分野において、効率的、精密、かつ持続可能な開発を促進し、インダストリー4.0の中核となるでしょう。

スマートツールは、適応型切削、リアルタイムモニタリング、自己修復機能により、現代の加工技術に革命をもたらしました。その汎用性と理論的な革新性は互いに補完し合い、将来的には世界の製造業を牽引すると期待されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

超硬放電加工電極

超硬合金放電加工(EDM)電極は、炭化タングステン(WC)をマトリックス(8592 重量%)とし、Co (610 重量%) または Ni (612 重量%) をバインダー相として用い、粉末冶金(ボールミル、CIP、HIP 焼結)によって製造されます。高硬度(1600~2000HV)、優れた耐摩耗性(摩耗量<0.02 mm³/h、ASTM G65)、耐高温性(>1000°C、耐酸化性)、高導電性(>90% IACS、IEC 6051221)、耐アーク侵食性(<0.01 mm³/min、IEC 60850)を特徴としています。表面には PVD/CVD コーティング(TiN、ZrN、13μm、摩擦係数<0.2 など)または機能性コーティング(Cu、Ag、0.52μm、導電率>95% IACS)が施されており、耐アーク侵食性、耐摩耗性、電気特性が向上しています。電極は、航空宇宙、金型製造、自動車、医療分野の精密 EDM 加工(タービンプレード、微細孔、複雑なキャビティなど)や、高硬度材料(チタン合金、金型鋼、400~600HV など)の加工に使用され、高精度(偏差<±0.005mm)、低電極損失(<0.5%)、優れた表面品質(Ra 0.1~0.3μm)を実現します。

この記事では、標準規格(GB/T 7997、ASTM G65、IEC 60850、ISO 9001)に基づいて、セメント炭化物 EDM 電極の技術、性能、アプリケーション、および最適化の提案を示します。

超硬合金放電加工電極の特性

1.1 超硬合金放電加工電極材料の組成

マトリックス

WC: 85 - 92 wt%、超微粒子(D50 0.1 - 0.4 μm)、硬度 1600 - 2000 HV。

Co: 6 - 10 wt%、高靱性(K_{IC} 1015 MPa·m^{1/2})、耐アーク侵食性が 10% 向上。

Ni: 6 - 12 wt% (オプション)、耐食性(電解質 <0.01 mm/y)、導電性が 5% 増加。

添加剤: TaC (0.1~0.3 wt%)、抗酸化能力が 10% 増加。ZrC (0.2~0.5 wt%)、耐摩耗性が 5% 増加。

コーティング

TiN (PVD): 硬度 2000 - 2400 HV、耐熱性 800°C、耐アーク侵食性。

ZrN (PVD): 硬度 2200 - 2600 HV、耐腐食性、耐付着性が 15% 向上。

Cu/Ag (PVD): 導電率 >95% IACS、耐熱性 600°C、アーク安定性 20% 向上。

傾斜構造: 表面の Co/Ni が低い(6-8 wt%)、コアの Co/Ni が高い(10-12 wt%)、耐摩耗性が 20% 増加、耐亀裂性が 15% 増加。

1.2 セメント炭化物放電加工電極の性能パラメータ

硬度: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017)。

曲げ強度: 1.8~2.5 GPa (GB/T 38512015)。

破壊靱性: 10 - 15 MPa·m^{1/2} (Co ベース 1215、Ni ベース 1012)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

耐摩耗性：摩耗速度 $<0.02\text{ mm}^3/\text{h}$ （ASTM G65）。
耐食性：電解質（pH 410）、 $<0.01\text{ mm/y}$ （NACE MR0175）。
耐高温性： $>1000^\circ\text{C}$ 、耐酸化性（ $<0.01\text{ mg/cm}^2$ 、500 時間）。
耐アーク侵食性：損失 $<0.01\text{ mm}^3/\text{分}$ （IEC 60850）。
電気伝導率： $>90\%$ IACS（Cu/Ag コーティング、IEC 6051221）。
表面粗さ： $\text{Ra}0.05\sim0.2\mu\text{m}$ 、加工精度 15%向上。
電極損失： $<0.5\%$ （金型鋼の加工、パルス幅 $50\sim100\mu\text{s}$ ）。

1.3 超硬合金放電加工電極の利点

高い耐摩耗性：超微粒子 WC+ コーティング、損失 $<0.5\%$ 、寿命が 35 倍延長。
アーク侵食耐性：TiN / ZrN コーティング、侵食速度 $<0.01\text{ mm}^3/\text{分}$ 、銅電極よりも優れています。
高導電性：Cu/Ag コーティング、導電性 $>95\%$ IACS、処理効率が 20% 向上。
耐腐食性：Ni ベース+ZrN、電解質腐食に耐性があり、長期処理に適しています。
高精度：低損失+精密加工、偏差 $\leq\pm0.005\text{mm}$ 、表面 $\text{Ra}0.1\sim0.3\mu\text{m}$ 。

2. 超硬合金電極放電加工プロセス

2.1 超硬合金放電加工用粉末の調製

原材料：WC（D50 $0.1\sim0.4\mu\text{m}$ 、純度 99.95%以上）、Co/Ni（D50 $0.51\mu\text{m}$ ）、TaC/ZrC（D50 $0.51\mu\text{m}$ ）。
ボールミル処理：遊星ボールミル（ZrO₂ ボール、15: 1）、400 rpm、1620 時間、粒子サイズ偏差 $\leq\pm0.03\mu\text{m}$ 、均一性 $>99\%$ 。

2.2 EDM による炭化物電極の成形

方法：冷間等方圧成形（CIP）または精密成形。
パラメータ：250~300MPa、保持圧力 60 秒、タングステン鋼鑄型（偏差 $\leq\pm0.02\text{mm}$ ）、ピレット密度 $8.5\sim10.0\text{g/cm}^3$ 。
結果：寸法偏差 $\leq\pm0.03\text{ mm}$ 、亀裂率 $<0.3\%$ 。

2.3 超硬合金放電加工電極の焼結

方法：真空焼結+HIP。
パラメータ：
脱蠟：200~500°C、2°C/分、H₂ 雰囲気（O₂ $<2\text{ ppm}$ ）、 10^{-3} Pa 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

焼結: 1350~1400°C、 10^{-5} 10^{-6} Pa、22.5 時間。

HIP: 1350°C、120MPa (Ar)、11.5 時間。

結果: 密度 14.8 - 15.0 g/cm³、多孔度 <0.0003%、硬度 1600 - 2000 HV。

2.4 超硬合金放電加工電極の精密加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール (13 μm)、5000 rpm、送り 0.003~0.01 mm/

パス、幾何偏差<±0.005 mm、Ra 0.05~0.2 μm。

EDM: 放電加工、微細溝/穴 (Ø0.1~0.5mm)、偏差<±0.003mm。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (0.30.5 μm)、1200 rpm、Ra <0.05 μm、アーク安定性が 10% 向上。

2.5 EDM 用超硬合金電極コーティング

方法: PVD/CVD (Ti/Zr/Cu/Ag ターゲット、>99.99%)。

パラメータ: TiN / ZrN / Cu/Ag (13 μm)、 10^{-5} Pa、200 ~ 400 °C、バイアス 80 V、蒸着速度 0.51 μm/h。

結果: 接着力 >80 N、摩擦係数 <0.2、導電率 >95% IACS。

2.6 超硬放電加工電極の検査

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4μm)、EBSD (粒界応力<2%)。

性能: 硬度偏差 <±30 HV (ISO 6508)、摩耗 <0.02 mm³/h、耐腐食性 (<0.01 mm/y)。

ジオメトリ: CMM (偏差 <±0.003 mm)、レーザー スキャン (スロット偏差 <±0.002 mm)。

非破壊検査: X 線 (欠陥 <0.005 mm)、超音波 (亀裂 <0.003 mm)。

電気特性: 導電率>90% IACS、アーク侵食率<0.01 mm³/分 (IEC 60850)。

加工テスト: 電極損失<0.5%、加工偏差<±0.005mm、表面 Ra0.10.3μm。

超硬合金放電加工電極の応用シナリオ

超硬 EDM 電極は、高精度、高効率、複雑な処理要件に対応するプロセス、テスト、および選択の提案を提供します。

3.1 航空タービンプレードの加工

作業条件: 金型鋼 (H13、500 HV)、電解液 (pH 7)、パルス幅 50μs、電流 20A。

デザイン

タイプ: 複合曲面電極 (50×30×10 mm)。

材質: WC8%Co (D50 0.1 - 0.4 μm、TaC 0.3 wt%)、硬度 1900 HV。

コーティング: TiN (2 μm、PVD、硬度 2400 HV、耐熱性 800°C)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

形状：表面偏差 $\leq \pm 0.003$ mm、 $Ra < 0.1$ μ m。

プロセス：ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD TiN (300°C)。

パラメータ：加工深さ 5mm、パルス幅 50 μ s、電流 20A、加工時間 2 時間。

テスト：

電極損失： $< 0.4\%$ （銅電極 2%、5 倍の減少）。

加工精度：偏差 $\leq \pm 0.005$ mm、 $Ra 0.2$ μ m。

耐アーク腐食性：損失 < 0.01 mm³/分、寿命が 4 倍に増加。

耐腐食性：電解液中で 100 時間、 < 0.01 mm/y。

選択：WCCo+TiN、高硬度の複雑な表面、定期的な研磨に適しています。

利点：損失が少なく、精度が高く、処理効率が 20% 向上します。

3.2 金型微細穴加工

動作条件：チタン合金 (Ti6Al4V、350 HV)、電解質 (pH 6)、パルス幅 30 μ s、電流 10 A。

デザイン

タイプ：微細孔電極 ($\varnothing 0.5$ mm、長さ 10 mm)。

材質：WC10%Ni (D50 0.1 - 0.4 μ m、ZrC 0.5 wt%)、硬度 1700 HV。

コーティング：ZrN (1.5 μ m、PVD、硬度 2600 HV、非付着性)。

形状：開口偏差 $\leq \pm 0.002$ mm、 $Ra < 0.05$ μ m。

プロセス：ボールミル処理 18 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、EDM 仕上げ、PVD ZrN (250°C)。

パラメータ：穴の深さ 5 mm、パルス幅 30 μ s、電流 10 A、処理時間 1 時間。

テスト：

電極損失： $< 0.3\%$ (銅電極の場合は 1.5%、5 分の 1 以下)。

加工精度：偏差 $\leq \pm 0.003$ mm、 $Ra 0.1$ μ m。

耐アーク腐食性：損失 < 0.008 mm³/分、寿命が 5 倍に増加。

耐腐食性：電解液中で 200 時間、 < 0.01 mm/y。

選択：WCNi+ZrN、微細穴加工、定期洗浄に適しています。

利点：高精度の付着防止、微細孔品質が 15% 向上します。

3.3 医療用インプラント空洞処理

動作条件：CoCr 合金(500 HV)、電解質(pH 8)、パルス幅 100 μ s、電流 15 A。

デザイン

タイプ：キャビティ電極 (20×10×5 mm)。

材質：WC8%Co (D50 0.1 - 0.4 μ m、TaC 0.3 wt%)、硬度 1800 HV。

コーティング：Cu (1 μ m、PVD、導電率 $> 95\%$ IACS)。

形状：キャビティ偏差 $\leq \pm 0.004$ mm、 $Ra < 0.1$ μ m。

プロセス：ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD Cu (200°C)。

パラメータ：キャビティ深さ 3 mm、パルス幅 100 μ s、電流 15 A、処理時間 3 時間。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

テスト：
電極損失：<0.5%（銅電極 2.5%、5 倍の減少）。
加工精度：偏差<±0.005mm、Ra0.3μm。
耐アーク腐食性：損失 <0.01 mm³/分、寿命が 3 倍に増加。
導電率:>95% IACS、処理効率が 20%向上。
選択: WCCo+Cu、高伝導性キャビティ、定期的な研磨に適しています。
利点: 高効率、低損失、キャビティ品質が 10% 向上。

超硬合金放電加工電極の性能比較

パラメータ	超硬合金（WCCo/Ni）	銅電極	グラファイト電極
硬度（HV）	1600 年 - 2000 年	50～100	50～80
曲げ強度（GPa）	1.8～2.5	0.2～0.4	0.02～0.05
靱性（KIC、MPa·m ^{1/2} ）	10～15 歳	20～30 歳	12
耐摩耗性（mm ³ /h）	<0.02	0.51.0	0.30.6
アーク浸食抵抗（mm ³ /min）	<0.01	0.05 - 0.1	0.03 - 0.06
電気伝導率（% IACS）	90 歳以上	95 歳以上	10～20
電極損失（%）	<0.5	1.5～2.5	1.0～2.0
加工精度(mm)	±0.005 未満	±0.01 0.02	±0.008 - 0.015
寿命倍数（銅と比較）	35	1	1.52

超硬 EDM 電極の特長：

低損失：WC 基板、損失 <0.5%、寿命が 35 倍に増加。
耐アーク侵食性: TiN / ZrN コーティング、侵食速度 <0.01 mm³/分、銅よりも優れています。
高導電性: Cu/Ag コーティング、導電性 >95% IACS、高効率。
高精度：精密加工、偏差<±0.005mm、Ra0.10.3μm。

超硬電極放電加工の最適化に関する推奨事項

材料の選択:

タービンブレード：WC8%Co+TiN、アーク侵食耐性が 15%向上。
微細穴加工：WC10%Ni+ZrN、耐付着性が 20%向上。
キャビティ処理：WC8%Co+Cu、導電性が 10%向上。
添加剤：TaC 0.3 wt%、ZrC 0.5 wt%、耐摩耗性が 5%向上します。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1350°C、120 MPa、気孔率 <0.0003%、耐摩耗性が 15%向上。
研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール（13μm）、偏差<±0.005mm、Ra<0.05μm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

コーティング:

TiN (2 μ m、PVD)、耐アーク侵食性が 20% 向上しました。

ZrN (1.5 μ m、PVD)、抗癒着性が 15% 向上しました。

Cu (1 μ m、PVD)、導電性が 10% 増加しました。

EDM 仕上げ: スロット偏差 $<\pm 0.002$ mm、精度が 5% 向上。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 10^{-6}Pa 。

5 軸 CNC: 偏差 $<\pm 0.003$ mm。

コーティング装置: 堆積速度 0.51 $\mu\text{m/h}$ 、偏差 $<\pm 0.03\mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

タービンブレード: WCCo+TiN、金型鋼、パルス幅 50 μs 、電流 20A。

微細穴加工: WCNi+ZrN、チタン合金、パルス幅 30 μs 、電流 10A。

キャビティ加工: WCCo+Cu、CoCr 合金、パルス幅 100 μs 、電流 15A。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4 μm)、EBSD (粒界応力 $<2\%$)。

性能: ASTM G65 (<0.02 mm³ / h)、耐腐食性 (<0.01 mm/y)、耐アーク侵食性 (<0.01 mm³ / min)。

ジオメトリ: CMM (偏差 $<\pm 0.003$ mm)、レーザー スキャン (スロット偏差 $<\pm 0.002$ mm)。

電気特性: 導電率 $>90\%$ IACS、電極損失 $<0.5\%$ (IEC 60850)。

規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 $<0.01\%$ 。

GB/T 38502015: 密度偏差 $<\pm 0.1$ g/cm³。

GB/T 38512015: 強度 1.82.5 GPa 。

GB/T 79972017: 硬度 1600~2000 HV。

ASTM G65: 摩耗率 <0.02 mm³/h。

NACE MR0175: 硫化物応力割れに対する耐性。

IEC 60850: アーク浸食試験。

ISO 9001: 品質管理。

超微粒子 WC (0.1~0.4 μm)、Co/Ni 結合相 (6~12 重量%)、PVD/CVD コーティング (TiN/ZrN/Cu、13 μm) を最適化することで、超硬合金 EDM 電極は高硬度 (1600~2000 HV)、耐摩耗性 (<0.02 mm³/h)、耐アーク浸食性 (<0.01 mm³/min)、高導電性 ($>90\%$ IACS)、高精度 (偏差 $<\pm 0.005$ mm) を実現します。この電極は、航空タービンブレード、金型の微細孔、医療用インプラントキャビティの加工に適しており、損失 $<0.5\%$ 、寿命 35 倍、Ra 0.1~0.3 μm 、加工効率 15~20% 向上を実現します。粒径、コーティング厚さ、放電加工仕上げを最適化することでコストを削減できますが、超精密加工 (コスト増加率 10%) とアーク安定性 (10⁶ 倍以上) が課題となります。炭化物電極は銅電極やグラファイト電極よりも優れており、精密加工 (ISO 9001) の高い信頼性要件を満たしています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

付録：

炭化物導電性コーティング基板

超硬合金導電性コーティング基板は、炭化タングステン（WC）をマトリックス（85～92重量％）とし、Co（6～10重量％）またはNi（6～12重量％）を結合相として用い、粉末冶金（ボールミル、CIP、HIP 焼結）によって製造されます。高硬度（1600～2000HV）、優れた耐摩耗性（摩耗量<0.02mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01mm/y、pH 212、HCl、SO₄²⁻含有）、耐高温性（>800℃、耐酸化性）、高強度（曲げ強度 1.8～2.5GPa）を特徴としています。表面には PVD/CVD 導電性コーティング（Cu、Ag、Au、NiP など、0.53μm、導電性>95% IACS、IEC 6051221）が施されており、導電性、耐アーク浸食性（<0.01 mm³/分、IEC 60850）、低接触抵抗（<10 μΩ）が向上しています。この基板は、航空宇宙（電気コネクタ、導電性スリップリング）、新エネルギー（バッテリー電極、燃料電池バイポーラプレート）、電子機器（回路基板接触パッド）に使用され、高電流密度（10～100 A/cm²）、振動（1050 g）、腐食環境（塩水噴霧、湿熱）に耐え、高導電性（>95% IACS）、低損失（<0.5%）、長寿命（>10⁶ サイクル）を実現し、表面粗さは Ra 0.05～0.2μm です。

この記事では、標準規格（GB/T 7997、ASTM G65、IEC 6051221、ISO 9001）に基づいて、セメント炭化物導電性コーティングの基板、プロセス、性能、アプリケーション、および最適化の提案を示します。

超硬合金導電性コーティング基材の特性

1.1 超硬合金導電性コーティング基材の組成

炭化物導電性コーティング基板：

WC: 85 - 92 wt%、超微粒子（D50 0.1 - 0.4 μm）、硬度 1600 - 2000 HV。

Co: 6 - 10 wt%、高靱性（KIC 1015 MPa·m^{1/2}）、疲労耐性が 10% 増加。

Ni: 6 - 12 wt% (オプション)、耐食性（HCl、SO₄²⁻<0.01 mm/y）、導電性が 5% 増加。

添加剤: TaC (0.1 - 0.3 wt%)、耐酸化性が 10% 向上します。ZrC (0.2 - 0.5 wt%)、耐摩耗性が 5% 向上します。

炭化物導電性コーティング基材導電性コーティング：

Cu (PVD)：導電率>98% IACS、耐熱性 600℃、接触抵抗<8μΩ。

Ag (PVD): 導電率 >99% IACS、耐熱性 650℃、耐アーク侵食性。

Au (PVD): 導電率 >95% IACS、耐熱性 700℃、耐腐食性 20% 向上。

NiP（化学メッキ）：導電率 >90% IACS、硬度 8001000 HV、耐腐食性。

傾斜構造：表面の Co/Ni が低い（6-8 wt%）、コアの Co/Ni が高い（10-12 wt%）、耐摩耗性が 20% 増加、耐亀裂性が 15% 増加。

表面改質：ナノテクスチャリング（特徴サイズ 50 - 200 nm）、接触面積の 15% 増加、抵抗の 10% 削減。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

1.2 セメント炭化物導電性コーティング基板の性能パラメータ

硬度: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017)。
曲げ強度: 1.8~2.5 GPa (GB/T 38512015)。
破壊靱性: 1015 MPa·m^{1/2} (Co ベース 1215、Ni ベース 1012)。
耐摩耗性: 摩耗速度<0.02 mm³/h (ASTM G65)。
耐食性: pH 212、<0.01 mm/y (NACE MR0175)。
耐高温性: >800°C、耐酸化性 (<0.01 mg/cm²、500 時間)。
電気伝導率: >95% IACS (IEC 6051221)。
接触抵抗: <10 μΩ (IEC 6051221)。
耐アーク侵食性: 損失 <0.01 mm³/分 (IEC 60850)。
表面粗さ: Ra0.05~0.2μm、接触安定性が 20%向上。
サイクル寿命: >10⁶ 回 (10100 A/cm²、MILSTD810G)。

1.3 超硬合金導電性コーティング基板の利点

高導電性: Cu/Ag/Au コーティング、導電性>95%IACS、接触抵抗<10μΩ。
高い耐摩耗性: 超微粒子 WC+ コーティング、摩耗 <0.02 mm³/h、寿命が 35 倍延長。
耐腐食性: Ni ベース + Au/NiP、塩水噴霧/湿気および熱に対する耐性があり、銅ベースよりも優れています。
耐高温性: Au コーティング、酸化防止、高温環境 (700°C) に適しています。
耐アーク侵食性: Ag/Au コーティング、損失 <0.01 mm³/分、高電流に適しています。

超硬合金導電性コーティング基板の製造プロセス

2.1 粉末の調製

原材料: WC (D50 0.1~0.4μm、純度 99.95%以上)、Co/Ni (D50 0.51μm)、TaC/ZrC (D50 0.51μm)。
ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO₂ ボール、15: 1)、400 rpm、1620 時間、粒子サイズ偏差<±0.03μm、均一性>99%。

2.2 形成

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。
パラメータ: 250~300MPa、保持圧力 60 秒、タングステン鋼鑄型 (偏差<±0.02mm)、ピレット密度 8.5~10.0g/cm³。
結果: 寸法偏差 <±0.03 mm、亀裂率 <0.3%。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 焼結

方法：真空焼結+HIP。

パラメータ：

脱蠟：200～500℃、2℃/分、H₂ 雰囲気（O₂ <2 ppm）、10⁻³ Pa。

焼結：1350～1400℃、10⁻⁵ 10⁻⁶ Pa、22.5 時間。

HIP：1350℃、120MPa（Ar）、11.5 時間。

結果：密度 14.8 - 15.0 g/cm³、多孔度 <0.0003%、硬度 1600 - 2000 HV。

2.4 精密機械加工

研削：5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール（13 μm）、5000 rpm、送り 0.003～0.01 mm/

パス、幾何学的偏差<±0.005 mm、Ra 0.05～0.2 μm。

EDM：放電加工、微細溝/穴（Ø 0.1～0.5 mm）、偏差<±0.003 mm。

研磨：ダイヤモンド研磨ペースト（0.3 - 0.5 μm）、1200 rpm、Ra <0.05 μm、接触抵抗が 10% 削減されます。

2.5 導電性コーティング

方法：PVD（Cu/Ag/Au ターゲット、>99.99%）または無電解メッキ（NiP）。

パラメータ：Cu/Ag/Au（0.53 μm）、10⁻⁵ Pa、200～400℃、バイアス 80 V、堆積速度 0.51 μm/h、NiP（13 μm）、pH 4.5～5.5、85℃。

結果：接着力 >80 N、導電率 >95% IACS、接触抵抗 <10 μΩ。

2.6 表面改質

方法：レーザーマイクロマシニング（波長 1064 nm）によりナノテクスチャ（特徴サイズ 50 - 200 nm）を生成します。

パラメータ：電力 1020 W、周波数 50 kHz、スキャン速度 500 mm/s。

結果：接触面積は 15% 増加し、接触抵抗は 10% 減少し、導電安定性は 20% 向上しました。

2.7 検出

微細構造：SEM（粒度 0.1～0.4μm）、EBSD（粒界応力<2%）。

性能：硬度偏差 <±30 HV (ISO 6508)、摩耗 <0.02 mm³/h、耐腐食性 (<0.01 mm/y)。

ジオメトリ：CMM（偏差 <±0.003 mm）、レーザー スキャン（表面偏差 <±0.002 mm）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

非破壊検査: X 線 (欠陥 $<0.005\text{ mm}$)、超音波 (亀裂 $<0.003\text{ mm}$)。

電気特性: 導電率 $>95\%$ IACS、接触抵抗 $<10\text{ }\mu\Omega$ 、アーク侵食抵抗 $<0.01\text{ mm}^3/\text{分}$ (IEC 6051221)。

環境試験: MILSTD810G (塩水噴霧 1000 時間、高湿 $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$ 、振動 50g)。

導電性コーティング基板の適用シナリオ

炭化物導電性コーティング基板は、高い導電性、耐摩耗性、および過酷な環境要件、プロセス、テスト、および選択の提案を提供します。

3.1 航空用電気コネクタ

動作条件: 50 A/cm^2 、 10 g 振動、 $55^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 、塩水噴霧 ($5\%\text{ NaCl}$)、 10^6 サイクル。

デザイン

タイプ: コンタクトピン ($\varnothing 2\text{ mm}$ 、長さ 10 mm)。

材質: WC10%Ni (D50 $0.1 - 0.4\text{ }\mu\text{m}$ 、ZrC $0.5\text{ wt}\%$)、硬度 1700 HV 。

コーティング: Au ($1\text{ }\mu\text{m}$ 、PVD、導電率 $>95\%$ IACS、耐熱性 700°C)。

形状: 真円度偏差 $<\pm 0.002\text{ mm}$ 、 $R_a < 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 、ナノテクスチャ $50 - 100\text{ nm}$ 。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa 、HIP 1350°C (120 MPa 、 1.5 時間)、5 軸研削、PVD Au (250°C)、レーザー微細加工。

パラメータ: 電流密度 50 A/cm^2 、振動 10 g 、抜き差し周波数 1 Hz 。

テスト:

寿命: 2×10^6 回 (銅基板の場合は 5×10^5 回、4 倍長い)。

摩耗率: $<0.01\text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $<0.01\text{ mm/y}$ 。

接触抵抗: $<8\text{ }\mu\Omega$ 、導電率 $>95\%$ IACS。

耐振動性: 10g 、 10^6 回、故障なし。

選択: WCNi+Au、高電流腐食および通常の NDT に適しています。

利点: 低抵抗、耐腐食性、接続信頼性が 20% 向上。

3.2 燃料電池バイポーラプレート

動作条件: 100 A/cm^2 、 80°C 、高湿 ($95\%\text{ RH}$)、酸性電解質 ($\text{pH } 3$)、 10^7 サイクル。

デザイン

タイプ: バイポーラプレート ($100 \times 100 \times 2\text{ mm}$)。

材質: WC8%Co (D50 $0.1 - 0.4\text{ }\mu\text{m}$ 、TaC $0.3\text{ wt}\%$)、硬度 1900 HV 。

コーティング: NiP ($2\text{ }\mu\text{m}$ 、化学メッキ、導電率 $>90\%$ IACS、硬度 1000 HV)。

形状: フローチャネル偏差 $<\pm 0.003\text{ mm}$ 、 $R_a < 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、ナノテクスチャ $100 - 200\text{ nm}$ 。

プロセス: ボールミル処理 18 時間、CIP 300 MPa 、HIP 1350°C (120 MPa 、 1.5 時間)、5 軸研削、化学 NiP メッキ (85°C)、レーザー微細加工。

パラメータ: 電流密度 100 A/cm^2 、温度 80°C 、サイクル周波数 0.1 Hz 。

テスト:

寿命: 1.5×10^7 回 (ステンレスの場合は 3×10^6 回、5 倍長くなります)。

摩耗率: $<0.02\text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $<0.01\text{ mm/y}$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

接触抵抗: <10 $\mu\Omega$ 、導電率>90% IACS。

耐熱・耐湿性: 95% RH、1000 時間、腐食なし。

選択: WCCo+NiP、酸性および高湿熱、定期的な清掃に適しています。

利点: 耐腐食性、高導電性、バッテリー効率が 15% 向上。

3.3 電子回路基板の接触パッド

動作条件: 20 A/cm²、振動 5 g、40°C ~ 150°C、乾燥環境、10⁶ 接点。

デザイン

タイプ: コンタクトパッド (5×5×0.5 mm)。

材質: WC8%Co (D50 0.10.4 μ m、ZrC 0.5wt%)、硬度 1800HV。

コーティング: Ag (1 μ m、PVD、導電率>99% IACS、耐熱性 650°C)。

形状: 平面度偏差 <±0.002 mm、Ra <0.05 μ m、ナノテクスチャ 50100 nm。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD Ag (200°C)、レーザー微細加工。

パラメータ: 電流密度 20 A/cm²、振動 5 g、接触周波数 1 Hz。

テスト:

寿命: 2×10⁶ 回 (銅基板の場合は 4×10⁵ 回、5 倍長くなります)。

摩耗率: <0.01 mm³/h、アーク侵食耐性: <0.01 mm³/分。

接触抵抗: <7 $\mu\Omega$ 、導電率>99% IACS。

耐振動性: 5G、10⁶回、故障なし。

選択: WCCo+Ag、高周波接触および定期的な研磨に適しています。

利点: アークに対する抵抗が低く、接触安定性が 20% 向上します。

超硬合金導電性コーティング基板の性能比較

パラメータ	超硬合金 (WCCo/Ni)	銅基板	ステンレス鋼基板
硬度 (HV)	1600 年 - 2000 年	50~100	200~300
曲げ強度 (GPa)	1.8~2.5	0.2~0.4	0.5~0.8
靱性 (K _{IC} 、MPa·m ^{1/2})	10~15 歳	20 ~ 30 歳	50~70
耐摩耗性 (mm ³ /h)	<0.02	0.5~1.0	0.2~0.5
耐食性 (mm/y、pH 212)	<0.01	0.1~0.3	0.05 - 0.1
電気伝導率 (% IACS)	95 歳以上	>98	23
接触抵抗 ($\mu\Omega$)	10 未満	<5	50~100
アーク浸食抵抗 (mm ³ /min)	<0.01	0.05 - 0.1	0.03 - 0.06
寿命倍数 (銅と比較)	35	1	1.52

超硬合金導電性コーティング基板の特長:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

高導電性: Cu/Ag/Au コーティング、導電性 $>95\%$ IACS、接触抵抗 $<10\mu\Omega$ 。
耐摩耗性: WC 基板、摩耗 $<0.02\text{ mm}^3/\text{h}$ 、寿命が 35 倍に増加。
耐腐食性: Ni ベース + Au/NiP、塩水噴霧/湿気および熱に対する耐性があり、銅ベースよりも優れています。
耐アーク侵食性: Ag/Au コーティング、損失 $<0.01\text{ mm}^3/\text{分}$ 、高電流に適しています。

超硬合金導電性コーティング基板の最適化提案

材料の選択:

電気コネクタ: WC10%Ni+Au、耐腐食性と導電性が 15% 向上。
燃料電池バイポーラプレート: WC8%Co+NiP、耐酸性が 20% 向上。
回路基板接触パッド: WC8%Co+Ag、アーク耐性が 15% 増加しました。
添加剤: TaC 0.3 wt%、ZrC 0.5 wt%、耐摩耗性が 5% 向上します。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1350°C、120 MPa、気孔率 $<0.0003\%$ 、導電率 10% 増加。
研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール ($13\mu\text{m}$)、偏差 $<\pm 0.005\text{ mm}$ 、 $R_a<0.05\mu\text{m}$ 。
コーティング:
Au ($1\mu\text{m}$ 、PVD)、接触抵抗が 10% 削減されました。
NiP ($2\mu\text{m}$ 、化学メッキ)、耐食性が 20% 向上しました。
Ag ($1\mu\text{m}$ 、PVD)、導電性が 5% 増加しました。
レーザーマイクロマシニング: ナノテクスチャ 50200 nm 、接触面積が 15% 増加。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、 10^{-6} Pa 。
5 軸 CNC: 偏差 $<\pm 0.003\text{ mm}$ 。
コーティング装置: 堆積速度 $0.51\mu\text{m}/\text{h}$ 、偏差 $<\pm 0.03\mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

電気コネクタ: WCNi+Au、 $50\text{ A}/\text{cm}^2$ 、 $55^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 、塩水噴霧。
バイポーラプレート: WCCo+NiP、 $100\text{ A}/\text{cm}^2$ 、 80°C 、酸性電解質。
接触パッド: WCCo+Ag、 $20\text{ A}/\text{cm}^2$ 、 $40^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 、乾燥環境。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 $0.1\sim 0.4\mu\text{m}$)、EBSD (粒界応力 $<2\%$)。
性能: ASTM G65 ($<0.02\text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 ($<0.01\text{ mm}/\text{y}$)、電気伝導性 ($>95\%$ IACS)。
ジオメトリ: CMM (偏差 $<\pm 0.003\text{ mm}$)、レーザー スキャン (表面偏差 $<\pm 0.002\text{ mm}$)。
環境: MILSTD810G (塩水噴霧 1000 時間、高湿 $85^\circ\text{C}/85\% \text{ RH}$ 、振動 50 g)。
電気特性: 接触抵抗 $<10\mu\Omega$ 、アーク侵食抵抗 $<0.01\text{ mm}^3/\text{分}$ (IEC 6051221)。

規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 $<0.01\%$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 38502015: 密度偏差 $\leq \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 。

GB/T 38512015: 强度 1.8 - 2.5 GPa。

GB/T 79972017: 硬度 1600 - 2000 HV。

ASTM G65: 磨损率 $< 0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

NACE MR0175: 硫化物应力开裂に対する耐性。

IEC 6051221: 電気接触特性。

IEC 60850: アーク浸食試験。

ISO 9001: 品質管理。

超微粒子 WC ($0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$)、Co/Ni 結合相 (6~12wt%)、PVD/化学めっき導電性コーティング (Cu/Ag/Au/NiP, $0.53 \mu\text{m}$)、ナノテクスチャ表面を最適化することで、高硬度 (1600~2000HV)、耐摩耗性 ($< 0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 ($< 0.01 \text{ mm/y}$)、高導電性 ($> 95\% \text{ IACS}$)、低接触抵抗 ($< 10 \mu\Omega$) を実現した超硬合金導電性コーティング基板。この基板は、航空電気コネクタ、燃料電池バイポーラプレート、電子回路基板コンタクトパッドに適しており、寿命は 35 倍、Ra は $0.05 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 、導電効率は 15~20% 向上します。粒径、コーティング厚、レーザー微細加工を最適化することでコストを削減できますが、超精密加工 (コスト増加率 10%) とコーティング均一性 (偏差 $\leq \pm 0.03 \mu\text{m}$) が課題となります。超硬基板は銅やステンレス鋼基板よりも優れており、高い信頼性の導電性要件 (ISO 9001) を満たしています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

超硬合金製航空機軽量化部品

航空機軽量化用超硬合金部品は、炭化タングステン（WC）を母材（8592 重量%）とし、Co（6～10 重量%）または Ni（6～12 重量%）を結合相として粉末冶金（ボールミル、CIP、HIP 焼結）で製造されます。高硬度（1600～2000HV）、優れた耐摩耗性（摩耗量<0.02 mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01 mm/y、pH 212、HCl、SO₄²⁻含有）、耐高温性（>800℃、耐酸化性）、耐疲労性（>10⁶倍、MILSTD810G）を特徴としています。材料比率と構造（多孔質構造や薄肉構造など）を最適化することで、部品の密度は 8～12 g/cm³（従来の超硬合金 14.8～15.0 g/cm³より 20～40%軽量）に低減され、強度対重量比（>200 MPa·cm³/g）はチタン合金（100～150 MPa·cm³/g）よりも優れています。表面には PVD/CVD コーティング（TiN、Al₂O₃、13 μm、摩擦係数<0.2 など）または機能性コーティング（Au、Ag、0.52 μm、導電率>90% IACS）が施され、耐摩耗性、耐腐食性、電気特性が向上しています。これらの部品は航空宇宙分野（主翼コネクタ、ファスナー、ブラケットなど）で使用され、高応力（100～500MPa）、振動（10～100g）、極限環境（55℃～800℃）にさらされます。耐用年数は従来の材料（ステンレス鋼、チタン合金、300～600HV など）の 35 倍で、表面粗さは Ra 0.05～0.2μm です。

この記事では、標準規格（GB/T 7997、ASTM G65、MILSTD810G、AS9100）に基づいて、セメントカーバイド航空機軽量化部品の製造、プロセス、性能、アプリケーション、最適化に関する提案を示します。

超硬合金製航空機軽量化部品の特性

1.1 超硬合金製航空機軽量化部品

材料構成

マトリックス:

WC: 85 - 92 wt%、超微粒子（D₅₀ 0.1 - 0.4 μm）、硬度 1600 - 2000 HV。

Co: 6 - 10 wt%、高靱性（K_{IC} 10 - 15 MPa·m^{1/2}）、疲労耐性が 10%向上。

Ni: 6 - 12 wt%（オプション）、耐腐食性（HCl、SO₄²⁻<0.01 mm/y）、高温耐酸化性。

添加剤: Cr₃C₂（0.2～0.5 wt%）は粒成長を抑制し、硬度を 5% 向上させます。TaC（0.1～0.3 wt%）は抗酸化特性を 10% 向上させます。

体重減少:

多孔質構造: 気孔率 5～15%、気孔径 50～200μm、密度低下 20～30%。

薄壁: 壁厚 0.52mm、重量 10～20%軽減。

複合強化材: 炭素繊維/CNT（13 重量%）、強度対重量比が 15%増加。

コーティング:

TiN (PVD): 硬度 2000 - 2400 HV、耐熱性 800℃、耐摩耗性。

Al₂O₃ (CVD): 硬度 1800 - 2200 HV、耐熱性 1000℃、耐腐食性。

Au/Ag (PVD): 導電率 >90% IACS、耐熱性 500 - 600℃、酸化防止。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

傾斜構造：表面の Co/Ni が低く（6-8 wt %）、中心部の Co/Ni が高く（10-12 wt %）、耐摩耗性が 20% 向上し、耐亀裂性が 15% 向上します。

超硬合金製航空機軽量化部品の性能パラメータ

硬度：1600 - 2000 HV（GB/T 79972017）。

曲げ強度：1.8~2.5 GPa（GB/T 38512015）。

破壊靱性：10 - 15 MPa·m^{1/2}（Co ベース 12 - 15、Ni ベース 10 - 12）。

強度重量比：>200 MPa·cm³/g（チタン合金 100 - 150）。

密度：8 - 12 g/cm³（20 - 40% の軽量化）。

耐摩耗性：摩耗速度<0.02 mm³/h（ASTM G65）。

耐食性：pH 212、<0.01 mm/y（NACE MR0175）。

耐高温性：>800°C、耐酸化性（<0.01 mg/cm²、500 時間）。

疲労耐性：>10⁶ 回（100 - 500 MPa、MILSTD810G）。

電気伝導率：>90% IACS（Au/Ag コーティング、IEC 6051221）。

表面粗さ：Ra0.05~0.2μm、接触安定性が 20% 向上。

1.3 超硬合金製航空機軽量化部品の利点

高強度、低密度：多孔質/薄壁、強度対重量比 >200 MPa·cm³/g、20 - 40% の軽量化。

高い耐摩耗性：超微粒子 WC+ コーティングにより、寿命が 35 倍に延び、故障率が 30% 減少します。

耐高温性：TiN / Al₂O₃ コーティング、酸化防止、高温環境（800°C）に適しています。

耐腐食性：Ni ベース + Al₂O₃、航空燃料/塩水噴霧に耐性があり、過酷な環境に適しています。

疲労耐性：靱性の高い Co/Ni は、チタン合金よりも優れた高周波振動 (>10⁶ 回) に耐えます。

超硬合金製航空機軽量化部品の製造工程

2.1 粉末の調製

原材料：WC（D50 0.1~0.4μm、純度 99.95%以上）、Co/Ni（D50 0.51μm）、Cr3C2/ TaC（D50 0.51μm）、炭素繊維/CNT（D50 0.1~0.5μm）。

ボールミル処理：遊星ボールミル（ZrO₂ ボール、15: 1）、400 rpm、1620 時間、粒子サイズ偏差<±0.03μm、均一性>99%。

2.2 形成

方法：冷間等方圧成形（CIP）+ 積層造形（3D プリントによる支援）。

パラメータ：250~300MPa、保持圧力 60 秒、タングステン鋼鑄型（偏差<±0.02mm）、ピ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

レット密度 8.5~10.0g/cm³。

3D プリント: SLM (選択的レーザー溶融)、WCNi 粉末、層厚 30 - 50 μm、多孔度 5 - 15%。
結果: 寸法偏差 <±0.03 mm、気孔率偏差 <±0.5%、ひび割れ率 <0.3%。

2.3 焼結

方法: 真空焼結+HIP。

パラメータ:

脱蠟: 200~500°C、2°C/分、H₂ 雰囲気 (O₂ <2 ppm)、10⁻³ Pa。

焼結: 1350~1400°C、10⁻⁵ 10⁻⁶ Pa、22.5 時間。

HIP: 1350°C、120MPa (Ar)、11.5 時間。

結果: 密度 8 - 12 g/cm³、多孔度 <0.0003%、硬度 1600 - 2000 HV。

2.4 精密機械加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール (13 μm)、5000 rpm、送り 0.003~0.01 mm/

パス、幾何学的偏差 <±0.005 mm、Ra 0.05~0.2 μm。

EDM: 放電加工、微細穴/スロット (Ø 0.1-0.5 mm)、偏差 <±0.003 mm。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (0.3~0.5 μm)、1200 rpm、Ra <0.05 μm、摩擦係数が 10% 減少。

2.5 コーティング

方法: PVD/CVD (Ti/Al/Au/Ag ターゲット、>99.99%)。

パラメータ: TiN / Al₂O₃ / Au/Ag (13 μm)、10⁻⁵Pa、200 - 400°C、バイアス 80 V、堆積速度 0.51 μm/h。

結果: 接着力 >80 N、摩擦係数 <0.2、導電率 >90% IACS。

2.6 検出

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4μm)、EBSD (粒界応力 <2%)。

性能: 硬度偏差 <±30 HV (ISO 6508)、摩耗 <0.02 mm³/h、耐腐食性 (<0.01 mm/y)。

ジオメトリ: CMM (偏差 <±0.003 mm)、レーザー スキャン (開口偏差 <±0.002 mm)。

非破壊検査: X 線 (欠陥 <0.005 mm)、超音波 (亀裂 <0.003 mm)。

環境試験: MILSTD810G (55°C~800°C、100g 振動、10⁶ サイクル)。

機械試験: 疲労耐性 (>10⁶ 回、MILSTD810G)、強度重量比 (>200 MPa·cm³ / g)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

航空機軽量化部品の応用シナリオ

航空機用軽量化セメント炭化物部品は、高強度、低密度、および過酷な環境の要件に応じたプロセス、テスト、および選択の提案を提供します。

3.1 硬質合金製航空機軽量化部品の主翼コネクタ

条件: 300 MPa、100 g 振動、55°C ~ 200°C、塩水噴霧 (5% NaCl)、 10^6 サイクル。

デザイン

タイプ: コネクティングプレート (100×50×2mm、多孔度 10%)。

材質: WC10%Ni (D50 0.1 - 0.4 μm 、Cr3C2 0.4 wt%、CNT 2 wt%)、硬度 1700 HV。

コーティング: Al_2O_3 (2 μm 、CVD、耐熱温度 1000°C、耐腐食性)。

形状: 開口偏差 $<\pm 0.002 \text{ mm}$ 、 $\text{Ra} < 0.1 \mu\text{m}$ 、密度 9.5 g/cm³。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、SLM (気孔率 10%)、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、CVD Al_2O_3 (400°C)。

パラメータ: 応力 300 MPa、振動 100 g、サンプリング レート 1 kHz。

テスト:

寿命: 2×10^6 回 (チタン合金の場合は 5×10^5 回、4 倍長くなります)。

摩耗率: $< 0.01 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $< 0.01 \text{ mm/y}$ 。

強度対重量比: 220 MPa·cm³/g、30%の軽量化。

耐振動性: 100g、 10^6 回、故障なし。

選択: WCNi+ Al_2O_3 +CNT、高応力腐食および通常の NDT に適しています。

利点: 高強度、低密度、耐腐食性、翼の安定性が 15% 向上。

3.2 航空機軽量化部品用超硬合金ファスナー（ボルト）

条件: 200 MPa、20 g 振動、40°C ~ 150°C、乾燥環境、 10^7 サイクル。

デザイン

タイプ: ボルト (M6、厚さ 1 mm、多孔度 8%)。

材質: WC8%Co (D50 0.10.4 μm 、TaC 0.3wt%、カーボンファイバー1wt%)、硬度 1800HV。

コーティング: TiN (1 μm 、PVD、耐熱温度 800°C、硬度 2400 HV)。

形状: ねじ偏差 $<\pm 0.003 \text{ mm}$ 、 $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m}$ 、密度 10 g/cm³。

プロセス: ボールミル処理 18 時間、CIP 300 MPa、SLM (気孔率 8%)、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD TiN (250°C)。

パラメータ: 応力 200 MPa、振動 20 g、トルク 10 Nm。

テスト:

寿命: 1.5×10^7 回 (ステンレス鋼は 2×10^6 回、7.5 倍長い)。

摩耗率: $< 0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $< 0.01 \text{ mm/y}$ 。

強度対重量比: 210 MPa·cm³/g、25%の軽量化。

耐疲労性: 200MPa、 10^7 回、破損なし。

選択: WCCo+TiN +カーボンファイバー、高周波振動、定期的なトルク検査に適しています。

利点: 低密度、高強度、耐疲労性、組み立て効率が 10% 向上。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 硬質合金製航空機軽量化部品ブラケット（エンジンサスペンション）

条件: 500 MPa、50 g 振動、200～800℃、航空燃料、 10^6 サイクル。

デザイン

タイプ:ブラケット(200×100×1.5mm、薄肉)。

材質: WC8%Co (D50 0.1 - 0.4 μm 、Cr3C2 0.3 wt%、TaC 0.2 wt%)、硬度 1900 HV。

コーティング: Al_2O_3 (2 μm 、CVD、耐熱温度 1000℃) + Au (0.5 μm 、PVD、導電率>95% IACS)。

形状: 壁厚偏差 $\pm 0.002\text{ mm}$ 、 $\text{Ra} < 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、密度 11 g/cm³。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350℃ (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、CVD Al_2O_3 (400℃)、PVD Au (200℃)。

パラメータ: 応力 500 MPa、振動 50 g、温度 800℃。

テスト:

寿命: 2×10^6 回 (チタン合金は 4×10^5 回、5 倍)。

摩耗率: $< 0.01\text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $< 0.01\text{ mm/y}$ 。

強度対重量比: $230\text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$ 、20%の軽量化。

耐高温性: 800℃、500 時間、酸化なし。

選択: WCCo + Al_2O_3 + Au、高温、高応力、および通常の NDT に適しています。

利点: 高温耐腐食性、強力な導電性、エンジン効率が 10% 向上します。

超硬合金製航空機軽量化部品の性能比較

パラメータ	超硬合金 (WCCo/Ni)	チタン合金 (Ti6Al4V)	ステンレス鋼 (316L)
硬度 (HV)	1600 年 - 2000 年	300～400	200～300
曲げ強度 (GPa)	1.8～2.5	0.9～1.2	0.5～0.8
靱性 (KIC、 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	10～15 歳	40～60 歳	50～70
強度対重量比 ($\text{MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$)	> 200	100～150	60～80
密度 (g/cm^3)	812	4.4	8.0
耐摩耗性 (mm^3/h)	< 0.02	0.10.3	0.20.5
耐食性 (mm/y 、pH 212)	< 0.01	0.02～0.05	0.05 - 0.1
耐熱性 (℃)	> 800	400～600	300～500
疲労耐性 (倍、500 MPa)	$> 10^6$	$10^5 - 10^6$	$10^4 - 10^5$
寿命倍数 (ステンレス鋼と比較)	35	23	1

超硬合金製航空機軽量化部品:

軽量化: 多孔質/薄壁、密度 812 g/cm³、軽量化 2040%。

高強度: 強度対重量比 $> 200\text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$ 、チタン合金よりも優れています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

耐磨耗性: WC 基板、摩耗 $<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、寿命が 35 倍に増加。

耐食性: Ni ベース + Al_2O_3 、塩水噴霧/燃料に対する耐性があり、ステンレス鋼よりも優れています。

超合金製航空機軽量化部品の最適化提案

材料の選択:

ウィングコネクタ: $\text{WC10\%Ni+Al}_2\text{O}_3 + \text{CNT}$ 、耐腐食性、30%の軽量化。

ファスナー: $\text{WC8\%Co+TiN}$ +カーボンファイバー、疲労防止、25%の軽量化。

エンジンブラケット: $\text{WC8\%Co+Al}_2\text{O}_3 + \text{Au}$ 、耐高温性と電気伝導性が 10%向上。

添加剤: Cr3C2 0.4 wt%、 TaC 0.3 wt%、硬度が 5%増加。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1350°C 、120 MPa、気孔率 $<0.0003\%$ 、強度が 15%増加。

3D プリント: SLM、多孔度 515%、軽量化 2030%。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール ($13\mu\text{m}$)、偏差 $\leq \pm 0.005\text{mm}$ 、 $\text{Ra} < 0.05\mu\text{m}$ 。

コーティング:

Al_2O_3 ($2\mu\text{m}$ 、CVD)、高温耐性が 15%向上しました。

TiN ($1\mu\text{m}$ 、PVD)、耐磨耗性が 20%向上しました。

Au ($0.5\mu\text{m}$ 、PVD)、導電性が 10%増加しました。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、 10^{-6}Pa 。

SLM 装置: 層厚 30~50 μm 、多孔度偏差 $\leq \pm 0.5\%$ 。

5 軸 CNC: 偏差 $\leq \pm 0.003 \text{ mm}$ 。

作業条件の適応:

翼コネクタ: $\text{WCNi+Al}_2\text{O}_3$ 、300 MPa、 $55^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 、塩水噴霧。

ファスナー: WCCo+TiN 、200 MPa、 $40^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 、乾燥環境。

支持体: $\text{WCCo+Al}_2\text{O}_3 + \text{Au}$ 、500 MPa、200 - 800°C 、燃料油。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4 μm)、EBSD (粒界応力 $<2\%$)。

性能: ASTM G65 ($<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 ($<0.01 \text{ mm/y}$)、耐熱性 ($>800^\circ\text{C}$ 、 $<0.01 \text{ mg/cm}^2$)。

ジオメトリ: CMM (偏差 $\leq \pm 0.003 \text{ mm}$)、レーザー スキャン (開口偏差 $\leq \pm 0.002 \text{ mm}$)。

環境: MILSTD810G ($55^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 、100g、 10^6 回)。

機械的性質: 強度対重量比 ($> 200 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$)、疲労耐性 ($> 10^6$ 回)。

規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 $<0.01\%$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 38502015: 密度偏差 $\leq \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 。

GB/T 38512015: 强度 1.8 - 2.5 GPa。

GB/T 79972017: 硬度 1600 - 2000 HV。

ASTM G65: 摩擦率 $< 0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

NACE MR0175: 硫化物应力开裂に対する耐性。

MILSTD810G: 環境適応性(振動、温度、腐食)。

AS9100: 航空宇宙品質管理。

超微粒子 WC ($0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$)、Co/Ni 結合相 (6~12 重量%)、多孔質/薄肉、PVD/CVD コーティング (TiN/Al₂O₃/Au, $13 \mu\text{m}$) を最適化することで、高硬度 (1600~2000HV)、耐磨耗性 ($< 0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 ($< 0.01 \text{ mm/y}$)、耐高温性 ($> 800^\circ\text{C}$)、高強度対重量比 ($> 200 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$) を実現する超硬合金製航空機軽量化部品。この部品は、翼コネクタ、ファスナー、エンジブラケットなどに適しており、20~40%の軽量化、35 倍の寿命延長、Ra 0.05~0.2 μm 、15%の信頼性向上を実現します。気孔率、コーティング厚、SLMプロセスを最適化することでコストを削減できますが、超精密加工(コスト増加率 10%)と気孔均一性(偏差 $\leq \pm 0.5\%$)が課題となります。超硬合金はチタン合金やステンレス鋼よりも優れており、航空宇宙産業の厳しい要件 (AS9100、MILSTD810G) を満たしています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

セメント炭化物バイオメディカルインプラント

セメント系超硬合金製バイオメディカルインプラントは、炭化タングステン（WC）をマトリックス（85～92 重量％）とし、Co（6～10 重量％）または Ni（6～12 重量％）をバインダー相として用い、粉末冶金（ボールミル、CIP、HIP 焼結）によって製造されます。高硬度（1600～2000HV）、優れた耐摩耗性（摩耗体積<0.02mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01mm/y、pH 68、NaCl、タンパク質含有）、高い生体適合性（ISO 109935、細胞毒性<5％）、耐疲労性（>10⁷倍、ISO 72064）を備えています。表面には PVD/CVD コーティング（TiN、DLC、ZrN など、13μm、摩擦係数<0.2）または生体活性コーティング（ハイドロキシアパタイト、HA、510μm など）が施されており、耐摩耗性、抗菌性（抗菌率>99％、ISO 22196）、骨統合性（骨統合率>80％、ISO 109936）が向上しています。インプラントは、整形外科（股関節/膝関節、骨釘）、歯科（インプラント）、心血管（ステント）で使用され、高負荷（500～2000 N）、体液腐食、周期的疲労（> 10⁷回）にさらされます。耐用年数は従来の材料（チタン合金、CoCr 合金、300～600 HV など）の 35 倍で、表面粗さは Ra 0.05～0.2μm です。

この記事では、標準規格 (GB/T 7997、ASTM G65、ISO 10993、ISO 7206) に基づいて、セメント炭化物バイオメディカルインプラントの製造、処理、性能、応用、最適化に関する提案を示します。

セメント炭化物生体医療インプラントの特性

セメント炭化物生体医療インプラントの材料構成

マトリックス:

WC: 85 - 92 wt%、超微粒子（D50 0.10.4 μm）、硬度 1600-2000 HV。

Co: 6 - 10 wt%、高靱性（KIC 1015 MPa·m^{1/2}）、疲労耐性が 10％増加。

Ni: 6 - 12 wt % (オプション)、耐腐食性 (NaCl、タンパク質 <0.01 mm/y)、低毒性 (ISO 109935)。

添加剤: TaC (0.1～0.3 重量％)、抗酸化能力が 10％増加。ZrC (0.2～0.5 重量％)、生体適合性が 5％増加。

コーティング:

TiN (PVD): 硬度 2000 ～ 2400 HV、耐熱性 800℃、耐摩耗性、高い生体適合性。

DLC (PVD) : 硬度 2500～3000HV、摩擦係数<0.1、抗菌率>99%。

ZrN (PVD) : 硬度 2200～2600 HV、耐腐食性、骨統合率が 15％向上。

HA (プラズマ溶射) : 厚さ 510μm、骨統合率>80％、高い生物学的活性。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

傾斜構造：表面は低 Co/Ni（68 wt %）、中心部は高 Co/Ni（1012 wt %）、耐摩耗性は 20% 向上、耐亀裂性は 15% 向上。

表面改質：ナノ多孔質構造（細孔径 50~200nm）、細胞付着率が 30% 増加。

1.2 セメント炭化物生体医療インプラントの性能パラメータ

硬度：1600~2000 HV（GB/T 79972017）。

曲げ強度：1.8~2.5 GPa（GB/T 38512015）。

破壊靱性：10 - 15 MPa·m^{1/2}（Co ベース 1215、Ni ベース 1012）。

耐摩耗性：摩耗速度<0.02 mm³/h（ASTM G65）。

耐食性：pH 68、<0.01 mm/y（ISO 1099310）。

疲労耐性:>10⁷ 回（500~2000 N、ISO 72064）。

生体適合性：細胞毒性 <5%、非感作性（ISO 109935）。

抗菌性：抗菌率>99%（DLC/ZrN、ISO 22196）。

オッセオインテグレーション：オッセオインテグレーション率>80%（HA、ISO 109936）。

摩擦係数:<0.2（コーティング）、付着防止性が 25% 向上。

表面粗さ:Ra0.05~0.2μm、細胞付着が 20% 増加。

1.3 セメントカーバイド生体医療インプラントの利点

高い耐摩耗性：超微粒子 WC+ コーティング、摩耗 <0.02 mm³/h、寿命が 35 倍延長。

耐腐食性：Ni ベース + DLC/ZrN、液体腐食に対する耐性が CoCr 合金よりも優れています。

高い生体適合性：TiN / HA コーティング、無毒性、骨統合率> 80%。

疲労耐性：靱性の高い Co/Ni は、チタン合金よりも高い負荷 (>10⁷ 倍) に耐えます。

抗菌：DLC/ZrN コーティング、抗菌率 99% 以上、感染リスク 30% 低減。

セメント炭化物生体医療インプラントの製造プロセス

2.1 粉末の調製

原材料：WC（D50 0.10.4 μm、純度>99.95%）、Co/Ni（D50 0.51 μm）、TaC / ZrC（D50 0.51 μm）。

ボールミル処理：遊星ボールミル（ZrO₂ ボール、15: 1）、400 rpm、1620 時間、粒子サイズ偏差<±0.03μm、均一性>99%。

2.2 形成

方法：冷間等方圧成形（CIP）または精密成形。

パラメータ：250~300MPa、保持圧力 60 秒、タングステン鋼鑄型（偏差<±0.02mm）、ピ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

レット密度 8.5~10.0g/cm³。

結果: 寸法偏差 <±0.03 mm、亀裂率 <0.3%。

2.3 焼結

方法: 真空焼結+HIP。

パラメータ:

脱蠟: 200~500°C、2°C/分、H₂ 雰囲気 (O₂ <2 ppm)、10⁻³ Pa。

焼結: 1350~1400°C、10⁻⁵ 10⁻⁶ Pa、22.5 時間。

HIP: 1350°C、120MPa (Ar)、11.5 時間。

結果: 密度 14.815.0 g/cm³、多孔度 <0.0003%、硬度 1600-2000 HV。

2.4 精密機械加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール (13μm)、5000rpm、送り 0.003~0.01mm/パ

ス、幾何偏差<±0.005mm、Ra 0.05~0.2μm。

EDM: 放電加工、微細穴/スロット (Ø 0.1-0.5 mm)、偏差 <±0.003 mm。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (0.30.5 μm)、1200 rpm、Ra <0.05 μm、細胞付着が 15% 増加。

2.5 コーティング

方法: PVD/CVD (Ti/Zr/C ターゲット、>99.99%) またはプラズマ スプレー (HA)。

パラメータ: TiN /DLC/ ZrN (13 μm)、10⁻⁵ Pa、200 - 400°C、バイアス 80 V、堆積速度 0.51 μm/h、HA (510 μm)、スプレー温度 8000°C、速度 400 m/s。

結果: 接着力>80N、摩擦係数<0.2、骨癒合率>80%。

2.6 表面改質

方法: レーザーマイクロマシニング (波長 1064 nm) によりナノ多孔質構造 (細孔サイズ 50 ~ 200 nm) を生成します。

パラメータ: 電力 1020 W、周波数 50 kHz、スキャン速度 500 mm/s。

結果: 細胞付着率は 30% 増加し、骨結合時間は 20% 短縮されました。

2.7 検出

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4μm)、EBSD (粒界応力<2%)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性能: 硬度偏差 $< \pm 30$ HV (ISO 6508)、摩耗 < 0.02 mm³/h、耐腐食性 (< 0.01 mm/y)。
ジオメトリ: CMM (偏差 $< \pm 0.003$ mm)、レーザー スキャン (表面偏差 $< \pm 0.002$ mm)。
非破壊検査: X 線 (欠陥 < 0.005 mm)、超音波 (亀裂 < 0.003 mm)。
生物学的試験: 細胞毒性 $< 5\%$ (ISO 109935)、骨結合 $> 80\%$ (ISO 109936)、抗菌率 $> 99\%$ (ISO 22196)。
機械試験: 疲労耐性 $> 10^7$ 回 (ISO 72064)、せん断強度 > 20 MPa (ASTM F1044)。

セメント炭化物生体医療インプラントの応用シナリオ

炭化物インプラントは、高い耐久性と生体適合性の要件、プロセス、テスト、および選択の提案を提供します。

3.1 セメント系超硬合金製生体医療用インプラント人工股関節（寛骨臼カップ/大腿骨頭）

条件: 1000~2000 N、体液 (pH 7.4)、 10^7 サイクル、37°C。

デザイン

タイプ: 寛骨臼カップ (Ø 50 mm) + 大腿骨頭 (Ø 28 mm)。

材質: WC10%Ni (D50 0.10.4µm、ZrC 0.5wt%)、硬度 1800HV。

コーティング: DLC (2 µm、PVD、摩擦係数 < 0.1) + HA (5 µm、プラズマ溶射)。

形状: 球面偏差 $< \pm 0.002$ mm、Ra < 0.05 µm、開口部 100 ~ 200 nm。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD DLC (250°C)、プラズマ スプレー HA、レーザー微細加工。

パラメータ: 荷重 1500 N、振動周波数 1 Hz、体液 pH 7.4。

テスト:

寿命: 2×10^7 回 (チタン合金は 5×10^6 回、4 倍)。

摩耗率: < 0.01 mm³/h、耐腐食性 < 0.01 mm/y。

生体適合性: 細胞毒性 $< 3\%$ 、骨統合率 $> 85\%$ 。

抗菌性: 抗菌率 $> 99\%$ (S.aureus)、摩擦係数 < 0.1 。

選択: WCNi+DLC+HA、高負荷体液および定期的な画像検査に適しています。

利点: 耐摩耗性と抗菌性、強力な骨の統合、術後の回復時間の 20% 短縮。

3.2 セメント系超硬合金生体医療インプラント 歯科インプラント（歯根）

条件: 500~1000 N、唾液 (pH 6.7)、 10^7 咀嚼、37°C。

デザイン

タイプ: ねじ付きインプラント (Ø 4 mm、長さ 10 mm)。

材質: WC8%Co (D50 0.1 - 0.4 µm、TaC 0.3 wt%)、硬度 1900 HV。

コーティング: ZrN (2 µm、PVD、硬度 2600 HV) + HA (5 µm、プラズマ溶射)。

形状: ねじ偏差 $< \pm 0.003$ mm、Ra < 0.1 µm、開口部 50150 nm。

プロセス: ボールミル処理 18 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD ZrN (300°C)、プラズマ スプレー HA、レーザー微細加工。

パラメータ: 荷重 800 N、咀嚼周波数 2 Hz、唾液 pH 6.5。

テスト:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

寿命: 1.5×10^7 倍 (CoCr 合金 4×10^6 倍、3.8 倍長い)。

摩擦率: $<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $<0.01 \text{ mm/y}$ 。

生体適合性: 細胞毒性 $<4\%$ 、骨統合率 $>80\%$ 。

抗菌性: 抗菌率 $>99\%$ (P.gingivalis)、インプラント成功率が 15% 増加しました。

選択: WCCo+ZrN+HA、咀嚼負荷と定期的な口腔検査に適しています。

利点: 耐腐食性、骨への迅速な統合、インプラントの安定性の 20% 向上。

3.3 セメント系超硬合金製生体医療インプラント心血管ステント

条件: 100~200 N、血液 (pH 7.4)、心拍数 10^8 、温度 37°C 。

デザイン

タイプ: メッシュステント ($\varnothing 3 \text{ mm}$ 、長さ 15 mm)。

材質: WC10%Ni (D50 0.1 - 0.4 μm 、ZrC 0.5 wt%)、硬度 1700 HV。

コーティング: TiN (1 μm 、PVD、硬度 2400 HV) + DLC (1 μm 、PVD)。

形状: メッシュ偏差 $\leq \pm 0.002 \text{ mm}$ 、Ra $< 0.05 \mu\text{m}$ 、孔径 50100 nm。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、EDM、PVD TiN+DLC (250°C)、レーザー微細加工。

パラメータ: 負荷 150 N、脈動周波数 1 Hz、血液 pH 7.4。

テスト:

寿命: 3×10^8 回 (CoCr 合金 1×10^8 回、3 倍長い)。

摩擦率: $<0.01 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $<0.01 \text{ mm/y}$ 。

生体適合性: 細胞毒性 $<2\%$ 、血栓形成率 $<1\%$ 。

抗菌性: 抗菌率 $>99\%$ (大腸菌)、ステント開存率が 20% 向上。

選択: WCNi+TiN+DLC、血液環境および定期的な超音波検査に適しています。

利点: 疲労防止、血栓防止、血管再狭窄率が 15% 減少します。

セメント炭化物生体医療インプラントの性能比較

パラメータ	超硬合金 (WCCo/Ni)	チタン合金 (Ti6Al4V)	CoCr 合金
硬度 (HV)	1600 年 - 2000 年	300~400	400~600
曲げ強度 (GPa)	1.8~2.5	0.9~1.2	1.5~2.0
靱性 (KIC、 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	10~15 歳	40~60 歳	20~30 歳
耐摩擦性 (mm^3/h)	<0.02	0.10.3	0.050.1
耐食性 (mm/y 、pH 68)	<0.01	0.02~0.05	0.01 ~ 0.03
疲労耐性 (倍、2000 N)	$>10^7$	$10^6 - 10^7$	$10^6 - 10^7$
生体適合性 (毒性%)	<5	<5	10 未満
オッセオインテグレーション (%)	80 歳以上	6070	50~60 歳
抗菌性 (%)	>99	50~70	60~80

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パラメータ	超硬合金 (WCCo/Ni)	チタン合金 (Ti6Al4V)	CoCr 合金
寿命倍数 (チタン合金と比較)	35	1	1.52

セメントカーバイドバイオメディカルインプラントのハイライト:

耐摩耗性: WC 基板、摩耗 $<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、寿命が 35 倍に増加。

耐腐食性: Ni ベース + DLC/ZrN、液体腐食に対する耐性が CoCr 合金よりも優れています。

生体適合性: TiN/HA コーティング、骨結合率 $>80\%$ 、チタン合金より優れています。

抗菌性: DLC/ZrN コーティング、抗菌率 $>99\%$ 、感染リスクが低い。

セメント炭化物バイオメディカルインプラントの最適化推奨事項

材料の選択:

股関節: WC10%Ni+DLC+HA、耐摩耗性骨統合が 20% 向上。

歯科インプラント: WC8%Co+ZrN+HA、耐腐食性と骨結合性が 15% 向上。

心血管ステント: WC10%Ni+TiN+DLC、抗血栓効果が 20% 向上。

添加剤: ZrC 0.5 wt%、TaC 0.3 wt%、生体適合性が 5% 増加。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1350°C、120 MPa、気孔率 $<0.0003\%$ 、耐摩耗性が 15% 向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール (13 μm)、偏差 $<\pm 0.005 \text{ mm}$ 、Ra $<0.05 \mu\text{m}$ 。

コーティング:

DLC (2 μm 、PVD)、摩擦係数 10% 低減。

ZrN (2 μm 、PVD)、抗菌率が 15% 増加しました。

HA (5 μm 、プラズマ溶射) 骨結合率が 20% 増加しました。

レーザーマイクロマシニング: 細孔サイズ 50 ~ 200 nm、細胞付着が 30% 増加。

設備の最適化 =

焼結炉: 温度制御 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、 10^{-6} Pa 。

5 軸 CNC: 偏差 $<\pm 0.003 \text{ mm}$ 。

コーティング装置: 堆積速度 0.51 $\mu\text{m}/\text{h}$ 、偏差 $<\pm 0.03 \mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

股関節: WCNi+DLC+HA、1000~2000 N、体液、 10^7 回。

歯科インプラント: WCCo+ZrN+HA、500~1000 N、唾液、 10^7 回。

心血管ステント: WCNi+TiN+DLC、100~200 N、血液、 10^8 回。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4 μm)、EBSD (粒界応力 $<2\%$)。

性能: ASTM G65 ($<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 ($<0.01 \text{ mm}/\text{y}$)、耐疲労性 ($>10^7$ 回)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

生物学的: ISO 109935 (毒性 <5%)、ISO 109936 (骨結合 >80%)、ISO 22196 (抗菌率 >99%)。
ジオメトリ: CMM (偏差 <±0.003 mm)、レーザー スキャン (表面偏差 <±0.002 mm)。

規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 <0.01%。

GB/T 38502015: 密度偏差<±0.1 g/cm³。

GB/T 38512015: 強度 1.82.5 GPa 。

GB/T 79972017: 硬度 1600-2000 HV。

ASTM G65: 摩耗率 <0.02 mm³/h。

ISO 109935: 生体適合性 (毒性 <5%) 。

ISO 109936: オッセオインテグレーション試験。

ISO 22196: 抗菌特性。

ISO 72064: 疲労耐性試験。

炭化物バイオメディカルインプラントは、超微粒子 WC (0.1~0.4μm)、Co/Ni 結合相 (6~12wt%)、PVD/CVD コーティング (TiN/DLC/ZrN、13μm)、HA コーティング (5~10μm) を最適化することで、高硬度 (1600~2000 HV)、耐摩耗性 (<0.02 mm³/h)、耐腐食性 (<0.01 mm/y)、高生体適合性 (毒性<5%)、耐疲労性 (>10⁷倍) を実現します。インプラントは股関節、歯科インプラント、心血管ステントに適しており、寿命は 35 倍、Ra は 0.05~0.2μm、骨統合率は>80%、感染リスクは 30%低減します。粒径、コーティング厚、レーザー微細加工を最適化することでコストを削減できますが、超精密加工 (コスト増加率 10%) と長期生体内試験 (10 倍以上) が課題となります。超硬合金はチタン合金や CoCr 合金よりも優れており、バイオメディカル (ISO 10993、ISO 7206) の高い信頼性要件を満たしています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

付録:

超硬インテリジェントモールド

超硬合金スマートモールドは、炭化タングステン(WC)をマトリックス(88~94 重量%)とし、Co(6~10 重量%)またはNi(6~12 重量%)を結合相として用い、粉末冶金(ボールミル、CIP、HIP 焼結)によって製造されます。高硬度(1800~2200 HV)、優れた耐摩耗性(摩耗量<0.03 mm³/h、ASTM G65)、耐腐食性(<0.01 mm/y、pH 212、HCl、SO₄²⁻含有)、および耐高温性(>1000°C、抗酸化性)を備えています。表面には PVD/CVD コーティング(TiAlN、AlCrN、DLC、25μm、摩擦係数<0.15 など)を施し、耐摩耗性と耐凝着性を高め、インテリジェントセンサー(MEMS、ひずみゲージ)を統合してリアルタイムモニタリング(温度±0.5°C、圧力±0.1MPa、ひずみ±1με)を実現しています。この金型は、インテリジェント製造(自動車、航空、電子など)に使用され、高応力(100~500MPa)、高温(600~1200°C)、周期的な熱衝撃(ΔT 500~800°C)にさらされます。耐用年数は従来の金型鋼(H13、400~600 HV)の 35 倍で、表面粗さは Ra 0.1~0.3μm です。

この記事では、標準規格(GB/T 7997、ASTM G65、ISO 17879、ISO 9001)に基づいて、セメント炭化物スマート金型の技術、性能、アプリケーション、および最適化の提案を示します。

超硬合金インテリジェント金型の特徴

1.1 超硬合金インテリジェント金型の材料構成

マトリックス:

WC: 88~94 重量%、超微粒子(D50 0.2~0.5μm)、硬度 1800~2200 HV。

Co: 6~10 重量%、高靱性(KIC 1520 MPa·m^{1/2})、耐摩耗性が 10% 増加。

Ni: 6-12 wt% (オプション)、耐食性(HCl、SO₄²⁻<0.01 mm/y)、耐衝撃性(KIC 1215 MPa·m^{1/2})。

添加剤: Cr3C2 (0.3-0.6 wt %) は粒成長を抑制し、硬度を 6% 向上させます。TaC (0.1-0.3 wt %) は耐酸化性を 10% 向上させます。

コーティング:

TiAlN (PVD/CVD): 硬度 2800 ~ 3200 HV、耐熱性 10 ~ 50°C、高温耐摩耗性。

AlCrN (PVD): 硬度 3000 ~ 3400 HV、耐熱性 1100°C、耐酸化性。

DLC (PVD): 硬度 2500 ~ 3000 HV、摩擦係数 <0.1、耐熱性 600°C、非粘着性。

傾斜構造: 表面は低 Co/Ni (6~8 wt %)、中心部は高 Co/Ni (10~12 wt %)、耐摩耗性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

は 25% 向上、耐亀裂性は 20% 向上。

スマート コンポーネント: MEMS (シリコンベース、 $<0.5\text{ mm}$) またはひずみゲージ (NiCr、厚さ 0.01 mm)、温度、圧力、ひずみの監視、誤差 $<\pm 0.5\%$ 。

1.2 超硬合金インテリジェント金型の性能パラメータ

硬度: $1800\sim 2200\text{ HV}$ (GB/T 79972017)。

曲げ強度: $2.0\sim 2.8\text{ GPa}$ (GB/T 38512015)。

破壊靱性: $12\sim 20\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (Co 基 1520、Ni 基 1215)。

耐摩耗性: 摩耗速度 $<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)。

耐食性: pH 2~12、 $<0.01\text{ mm/y}$ (NACE MR0175)。

耐高温性: $>1000^\circ\text{C}$ 、耐酸化性 ($<0.01\text{ mg/cm}^2$ 、1000 時間)。

熱衝撃: $>10^5$ 回 ($\Delta T\ 500\sim 800^\circ\text{C}$ 、ISO 17879)。

摩擦係数: <0.15 (コーティング)、付着防止性が 30% 向上。

表面粗さ: $Ra\ 0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 、型離れ効率が 15% 向上。

監視精度: 温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、圧力 $\pm 0.1\text{ MPa}$ 、ひずみ $\pm 1\mu\epsilon$ (IEC 60751)。

1.3 超硬合金インテリジェント金型の利点

高い耐摩耗性: 超微粒子 WC+ コーティングにより、寿命が 35 倍に延長され、メンテナンス コストが 30% 削減されます。

耐高温性: TiAlN/AlCrN コーティング、酸化防止、高温成形 ($600\sim 1200^\circ\text{C}$) に適しています。

耐腐食性: Ni ベース + DLC、酸およびアルカリ/溶融耐性があり、電子機器/ガラス成形に適しています。

インテリジェント監視: MEMS/ひずみゲージ、動作条件のリアルタイムフィードバック、最適化効率が 20% 向上。

高精度: 低摩擦コーティング+精密加工、成形偏差 $<\pm 0.005\text{ mm}$ 、品質 15% 向上。

2. 超硬合金インテリジェント金型製造プロセス

2.1 粉末の調製

原材料: WC ($D_{50}\ 0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ 、純度 99.95% 以上)、Co/Ni ($D_{50}\ 1\sim 2\mu\text{m}$)、Cr₃C₂/TaC ($D_{50}\ 0.51\mu\text{m}$)。

ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO₂ ボール、12: 1)、350 rpm、18~22 時間、粒子サイズ偏差 $\leq \pm 0.05\mu\text{m}$ 、均一性 $>98\%$ 。

2.2 形成

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

方法：冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。

パラメータ：300～350MPa、保持圧力 90 秒、チタン合金型（偏差 $\leq \pm 0.03\text{mm}$ ）、ブランク

密度 $9.0 \sim 10.5\text{g/cm}^3$ 。

結果：寸法偏差 $\leq \pm 0.05\text{mm}$ 、亀裂率 $< 0.5\%$ 。

2.3 焼結

方法：真空焼結+HIP。

パラメータ：

脱蠟：200～600°C、2°C/分、H₂ 雰囲気（O₂ $< 3\text{ppm}$ ）、 10^{-3}Pa 。

焼結：1400～1450°C、 $10^{-5} \sim 10^{-6}\text{Pa}$ 、2.53 時間。

HIP:1400°C、150MPa（Ar）、1.52 時間。

結果：密度 $15.0 \sim 15.2\text{g/cm}^3$ 、多孔度 $< 0.0005\%$ 、硬度 1800～2200 HV。

2.4 精密機械加工

研削：5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール（24 μm ）、4000rpm、送り 0.005～0.02mm/パス、幾何偏差 $\leq \pm 0.01\text{mm}$ 、Ra0.10～3 μm 。

EDM：放電加工、キャピティ/穴（ $\varnothing 0.55\text{mm}$ ）、偏差 $\leq \pm 0.005\text{mm}$ 。

研磨：ダイヤモンド研磨ペースト（0.51 μm ）、1000 rpm、Ra $< 0.1\mu\text{m}$ 、抗付着性が 25%向上。

2.5 コーティング

方法：PVD/CVD (Cr/Al/Ti ターゲット、 $> 99.99\%$)。

パラメータ：TiAlN / AlCrN / DLC (25 μm)、 10^{-5}Pa 、250～450°C、バイアス 100 V、堆積速度 11.5 $\mu\text{m/h}$ 。

結果：接着力 $> 100\text{N}$ 、摩擦係数 < 0.15 、耐熱性 600 ～ 1100°C。

2.6 インテリジェントな統合

センサー：MEMS（温度、圧力、 $< 0.5\text{mm}$ ）またはひずみゲージ（NiCr、0.01 mm）、誤差 $\leq \pm 0.5\%$ 。

パッケージング：レーザー溶接（Ti シェル、気密性 $< 10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ）、耐熱性 1000°C、耐振動性 50 g。

データ転送：組み込みチップ（5G/Bluetooth、レイテンシ $< 5\text{ms}$ 、消費電力 $< 30\text{mW}$ ）、IIoT プロトコル（OPC UA、MQTT）をサポート。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.7 検出

微細構造: SEM (粒度 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$)、EBSD (粒界応力 $<3\%$)。

性能: 硬度偏差 $<\pm 40\text{ HV}$ (ISO 6508)、摩耗 $<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 ($<0.01\text{ mm/y}$)。

ジオメトリ: CMM (偏差 $<\pm 0.005\text{ mm}$)、レーザー スキャン (キャビティ偏差 $<\pm 0.003\text{ mm}$)。

非破壊検査: X 線 (欠陥 $<0.01\text{ mm}$)、超音波 (亀裂 $<0.005\text{ mm}$)。

スマートテスト: 温度 ($\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、IEC 60751)、圧力 ($\pm 0.1\text{ MPa}$ 、IEC 61298)、ひずみ ($\pm 1\mu\epsilon$ 、ASTM E251)。

環境試験: 熱衝撃 ($\Delta T 800^\circ\text{C}$ 、 $>10^5$ サイクル、ISO 17879)、塩水噴霧 (1000 時間、ISO 9227)。

3. 超硬合金スマート金型の応用シナリオ

インテリジェント製造における高精度、高信頼性の要件に応じて、セメントカーバイドインテリジェント金型は、プロセス、テスト、選択に関する提案を提供します。

3.1 超硬合金インテリジェント金型自動車用熱間鍛造金型（クランクシャフト）

作業条件: $1000\sim 1200^\circ\text{C}$ 、 300 MPa 、周期的熱衝撃 ($\Delta T 800^\circ\text{C}$)、 10^5 回成形。

デザイン

タイプ: 鍛造金型 (キャビティ $100\times 50\text{ mm}$)。

材質: WC10%Co ($D50 0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.5wt%、TaC 0.3wt%)、硬度 $2000\sim 2200\text{ HV}$ 。

コーティング: AlCrN ($5\mu\text{m}$ 、PVD、硬度 3400 HV 、耐熱性 1100°C)。

スマートコンポーネント: MEMS (温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、圧力 $\pm 0.1\text{ MPa}$)、キャビティ内に埋め込まれています。

形状: キャビティ半径 $R2\text{ mm}$ 、 $Ra < 0.2\mu\text{m}$ 、偏差 $<\pm 0.01\text{ mm}$ 。

プロセス: ボールミル処理 22 時間、CIP 350 MPa 、HIP 1400°C (150 MPa 、2 時間)、5 軸研削、PVD AlCrN (450°C)、MEMS レーザー溶接。

パラメータ: 温度 1100°C 、圧力 300 MPa 、サイクル 5000 回、サンプリング レート 1 kHz 。

テスト:

寿命: 10,000 回 (H13 鋼は 2,000 回、5 倍長い)。

摩耗率: $<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐酸化性 $<0.01\text{ mg/cm}^2$ 。

熱亀裂: 亀裂なし ($\Delta T 800^\circ\text{C}$ 、5000 回)。

監視精度: 温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、圧力 $\pm 0.1\text{ MPa}$ 、予測維持率が 20% 向上。

選択: WCCo+AlCrN+MEMS、高温、高応力、通常の NDT に適しています。

利点: 高温耐摩耗性、インテリジェント監視、成形効率が 15% 向上。

3.2 超硬合金インテリジェント金型 航空ダイカスト金型（タービンプレード）

作業条件: $700\sim 800^\circ\text{C}$ 、 150 MPa 、周期的熱衝撃 ($\Delta T 500^\circ\text{C}$)、 10^6 回成形。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

デザイン

種類: ダイカスト金型（キャビティ 200×100mm）。

材質: WC8%Co (D50 0.2~0.5 μ m、Cr3C2 0.5wt%)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: TiAlN (4 μ m、PVD、硬度 3200 HV、耐熱性 1050°C)。

スマートコンポーネント: 金型表面に埋め込まれたひずみゲージ（ひずみ $\pm 1 \mu\epsilon$ ）。

形状: キャビティ傾斜 1°、Ra <0.1 μ m、偏差 < ± 0.005 mm。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削、PVD TiAlN (400°C)、ひずみゲージ取り付け。

パラメータ: 温度 750°C、圧力 150 MPa、サイクル 10000 回、サンプリング レート 500 Hz。

テスト:

寿命: 50,000 回（H13 鋼は 10,000 回、5 倍長い）。

摩耗率: <0.02 mm³/h、付着防止性が 25%向上。

熱亀裂: 亀裂なし（ ΔT 500°C、10000 回）。

監視精度: ひずみ $\pm 1 \mu\epsilon$ 、欠陥検出率が 15%向上。

選択したタイプ: WCCo+TiAlN +ひずみゲージ、高温溶融、定期的なクリーニングに適しています。

利点: 付着防止、インテリジェントなフィードバック、鑄造品質が 10% 向上。

3.3 硬質合金インテリジェント金型電子ガラス成形金型（携帯電話画面）

作業条件: 1000~1100°C、50MPa、腐食性（pH24）、10⁵回成形。

デザイン

タイプ: ダイキャスト（ $\varnothing$ 50 mm、曲面）。

材質: WC10%Ni (D50 0.2~0.5 μ m、Cr3C2 0.6wt%)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: DLC (3 μ m、PVD、摩擦係数<0.1、耐熱温度 600°C)。

スマートコンポーネント: MEMS（温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）、モールドコアに埋め込まれています。

形状: 表面偏差 ± 0.003 mm、Ra<0.1 μ m。

プロセス: ボールミル処理 22 時間、CIP 350 MPa、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削、PVD DLC (300°C)、MEMS レーザー溶接。

パラメータ: 温度 1050°C、圧力 50 MPa、サイクル 2000 回、サンプリング レート 2 kHz。

テスト:

寿命: 8000 回（H13 鋼 1500 回、5.3 倍長い）。

摩耗率: <0.03 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

付着防止性: ガラス残留率<1%、Ra0.1 μ m。

監視精度: 温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、品質の一貫性が 20% 向上しました。

タイプを選択: WCNi+DLC+MEMS、腐食性の高温、定期的なクリーニングに適しています。

利点: 耐腐食性、インテリジェント監視、高い成形精度。

超硬合金インテリジェント金型の性能比較

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パラメータ	超硬合金（WCCo /Ni）	金型鋼（H13）	セラミック型
硬度（HV）	1800-2200	400～600	1200-1500
曲げ強度（GPa）	2.0～2.8	1.5～2.0	0.5～1.0
靱性（KIC、MPa・m ^{1/2} ）	12-20	20～30	35
耐摩耗性（mm ³ /h）	<0.03	0.1～0.3	0.05 - 0.1
耐食性（mm/y、pH 212）	<0.01	0.05 - 0.1	0.01～0.03
耐熱性（℃）	>1000	600～800	1200-1500
熱衝撃（ΔT 800℃）	10 ⁵ 回以上	10 ³ - 10 ⁴ 回	10 ² ～10 ³ 倍
寿命倍数（H13 と比較）	35	1	1.52
摩擦係数（コーティング）	<0.15	0.3～0.5	0.2 - 0.4
監視精度	±0.5%	なし	なし

超硬合金インテリジェント金型の特長:

耐摩耗性: WC 基板、摩耗 <0.03 mm³/h、寿命が 35 倍に増加。

耐高温性: TiAlN / AlCrN コーティング、酸化防止、1200℃ まで適しています。

耐食性: Ni ベース + DLC、ガラス溶融に対する耐性があり、H13 鋼よりも優れています。

インテリジェンス: MEMS/ひずみゲージ、リアルタイム監視、効率が 20% 向上。

超硬合金スマート金型の最適化提案

材料の選択:

自動車熱間鍛造: WC10%Co+AlCrN、高温耐摩耗性が 15%向上。

航空ダイカスト: WC8%Co+TiAlN、耐凝着性が 25%向上。

電子ガラス: WC10%Ni+DLC、耐腐食性が 20%向上。

添加剤: Cr3C2 0.6 wt%、TaC 0.3 wt%、硬度が 6%増加しました。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1400℃、150 MPa、気孔率 <0.0005%、耐摩耗性が 20%向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール（24μm）、偏差<±0.01mm、Ra<0.1μm。

コーティング:

TiAlN（4μm、400℃）、高温耐性が 15%向上。

AlCrN（5μm、450℃）、耐酸化性が 20%向上。

DLC（3μm、300℃）、抗付着性が 25%向上しました。

EDM: キャビティ偏差 <±0.003 mm、精度が 5% 向上。

スマート統合:

センサー: MEMS (温度、圧力)、ひずみゲージ (ひずみ)、誤差 <±0.5%。

データ処理: 組み込みチップ、IIoT のサポート、予測メンテナンス率が 20% 向上しまし

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

た。

パッケージ: Ti ケース、気密性 $<10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 、耐振動性 50g。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、 10^{-6}Pa 。

5 軸 CNC: 偏差 $<\pm 0.005 \text{ mm}$ 。

コーティング装置: 堆積速度 $11.5\mu\text{m}/\text{h}$ 、偏差 $<\pm 0.05\mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

自動車熱間鍛造: $\text{WCCo}+\text{AlCrN}$ 、 $1000\sim 1200^\circ\text{C}$ 、 $300\sim 500 \text{ MPa}$ 。

航空ダイカスト: $\text{WCCo}+\text{TiAlN}$ 、 $700\sim 800^\circ\text{C}$ 、 $100\sim 200 \text{ MPa}$ 。

電子ガラス: $\text{WCNi}+\text{DLC}$ 、 $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ 、 $50\sim 100 \text{ MPa}$ 。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$)、EBSD (粒界応力 $<3\%$)。

性能: ASTM G65 ($<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 ($<0.01 \text{ mm}/\text{y}$)、耐熱性 ($>1000^\circ\text{C}$ 、 $<0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$)。

ジオメトリ: CMM (偏差 $<\pm 0.005 \text{ mm}$)、レーザー スキャン (キャビティ偏差 $<\pm 0.003 \text{ mm}$)。

スマート: IEC 60751 (温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)、IEC 61298 (圧力 $\pm 0.1 \text{ MPa}$)、ASTM E251 (ひずみ $\pm 1 \mu\epsilon$)。

環境: ISO 17879 (熱衝撃、 $>10^5$ 回)、ISO 9227 (塩水噴霧、1000 時間)。

規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 $<0.01\%$ 。

GB/T 38502015: 密度偏差 $<\pm 0.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

GB/T 38512015: 強度 $2.0\sim 2.8 \text{ GPa}$ 。

GB/T 79972017: 硬度 $1800\sim 2200 \text{ HV}$ 。

ASTM G65: 摩耗率 $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

NACE MR0175: 硫化物応力割れに対する耐性。

ISO 17879: 熱衝撃試験。

ISO 9001: 品質管理。

IEC 60751: 温度センサーの精度。

IEC 61298: 圧力センサーの精度。

超微粒子 WC ($0.2\sim 0.5\mu\text{m}$)、Co/Ni 結合相 ($6\sim 12$ 重量%)、PVD/CVD コーティング ($\text{TiAlN}/\text{AlCrN}/\text{DLC}$ 、 $25\mu\text{m}$)、MEMS/ひずみゲージの統合を最適化することで、超硬合金スマート金型は、高硬度($1800\sim 2200\text{HV}$)、耐摩耗性($<0.03\text{mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性($<0.01\text{mm}/\text{y}$)、耐高温性($>1000^\circ\text{C}$)、高精度モニタリング(誤差 $<\pm 0.5\%$)を実現します。この金型は、自動車の熱間鍛造、航空ダイカスト、電子ガラス成形に適しており、寿命は 35 倍、Ra は $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 、生産効率は $15\sim 20\%$ 向上します。粒径、コーティング厚、そしてインテリジェントな統合を最適化することでコストを削減できますが、高精度加工(コスト増加率

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

15%)とセンサーの耐久性(10倍以上)が課題となります。超硬スマート金型は、H13 鋼やセラミック金型よりも優れており、スマート製造(ISO 9001)の高い信頼性要件を満たしています。

付録:

超硬ロボット部品

超硬合金製ロボット部品は、炭化タングステン（WC）をマトリックス（85～92 重量％）とし、Co（6～10 重量％）または Ni（6～12 重量％）をバインダー相として配合し、粉末冶金（ボールミル、CIP、HIP 焼結）によって製造されます。高硬度（1600～2000HV）、優れた耐摩耗性（摩耗量<0.02 mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01 mm/y、pH 212、HCl、SO₄²⁻含有）、耐高温性（>800℃、耐酸化性）、耐衝撃性（>10⁶倍、ISO 1791）を備えています。表面には PVD / CVD コーティング（TiN、DLC、AlCrN、13μm、摩擦係数<0.2 など）が施されており、耐摩耗性、耐腐食性、低摩擦性能が向上しています。部品は、産業用ロボット（ジョイント、グリッパー、ギア）、サービスロボット（ハウジング、トランスミッション部品）、特殊ロボット（深海、航空宇宙）に使用され、高荷重（100～1000N）、高頻度動作（10⁵~10⁷サイクル）、極限環境（40℃～800℃、塩水噴霧、砂埃）にさらされます。耐用年数は従来の材料（ステンレス鋼、アルミニウム合金、200～600 HV など）の 5～10 倍で、表面粗さは Ra 0.05～0.2μm です。

この記事では、標準規格（GB/T 7997、ASTM G65、ISO 1791、ISO 9001）に基づいて、セメントカーバイド製ロボット部品の設計、プロセス、性能、アプリケーション、最適化に関する提案を示します。

1.超硬合金機械ロボット部品の特徴

超硬合金機械ロボット部品の材料構成

マトリックス:

WC: 85 - 92 wt%、超微粒子（D50 0.1 - 0.4 μm）、硬度 1600 - 2000 HV。

Co: 6 - 10 wt%、高靱性（ K_{IC} 1015 MPa·m^{1/2}）、耐衝撃性が 10% 向上します。

Ni: 612 wt%（オブション）、耐腐食性（HCl、SO₄²⁻<0.01 mm/y）、高温耐酸化性。

添加剤: Cr3C2 (0.2 - 0.5 wt%) は粒成長を抑制し、硬度を 5% 向上させます。TaC (0.1 - 0.3 wt%) は抗酸化特性を 10% 向上させます。

コーティング:

TiN (PVD): 硬度 2000 - 2400 HV、耐熱性 800℃、耐摩耗性。

DLC (PVD): 硬度 2500 - 3000 HV、摩擦係数 <0.1、耐熱性 600℃、非粘着性。

AlCrN (PVD): 硬度 3000 - 3400 HV、耐熱性 1100℃、耐腐食性。

傾斜構造: 表面の Co/Ni が低い（6 - 8 wt%）、コアの Co/Ni が高い（10 - 12 wt%）、耐摩耗性が 20% 増加、耐亀裂性が 15% 増加。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

超硬合金機械ロボット部品の性能パラメータ

硬度：1600 - 2000 HV（GB/T 79972017）。
曲げ強度：1.8～2.5 GPa（GB/T 38512015）。
破壊靱性：1015 MPa·m^{1/2}（Co ベース 1215、Ni ベース 1012）。
耐摩耗性：摩耗速度<0.02 mm³/h（ASTM G65）。
耐食性：pH 212、<0.01 mm/y（NACE MR0175）。
耐高温性：>800°C、耐酸化性（<0.01 mg/cm²、500 時間）。
耐衝撃性：>10⁶回（ISO 1791、100 N 荷重）。
摩擦係数：<0.2（コーティング）、付着防止性が 25% 向上。
表面粗さ：Ra0.05～0.2μm、動作安定性が 20% 向上。

超硬合金製機械ロボット部品の利点

高い耐摩耗性：超微粒子 WC+ コーティングにより、寿命が 510 倍に延長され、メンテナンスが 30% 削減されます。
耐腐食性：Ni ベース + DLC/AlCrN、塩水噴霧/化学薬品に耐性があり、海洋/化学環境に適しています。
耐高温性：AlCrN コーティング、酸化防止、高温動作（800°C、溶接ロボット）に適しています。
耐衝撃性：高い靱性を持つ Co/Ni は、アルミニウム合金よりも高周波の動き（>10⁶ 回）に耐えます。
低摩擦：DLC/TiN コーティング、摩擦係数<0.2、運動効率が 15% 向上。

超硬合金機械ロボット部品の製造工程

2.1 粉末の調製

原材料：WC（D50 0.1 - 0.4 μm、純度>99.95%）、Co/Ni（D50 0.51 μm）、Cr3C2/TaC（D50 0.51 μm）。
ボールミル処理：遊星ボールミル（ZrO2 ボール、15: 1）、400 rpm、1620 時間、粒子サイズ偏差<±0.03μm、均一性>99%。

2.2 形成

方法：冷間等方圧成形（CIP）または精密成形。
パラメータ：250～300MPa、保持圧力 60 秒、タングステン鋼鑄型（偏差<±0.02mm）、ビレット密度 8.5～10.0g/cm³。
結果：寸法偏差 <±0.03 mm、亀裂率 <0.3%。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 焼結

方法：真空焼結+HIP。

パラメータ：

脱蠟：200～500℃、2℃/分、H₂ 雰囲気（O₂ <2 ppm）、10⁻³ Pa。

焼結：1350～1400℃、10⁻⁵～10⁻⁶ Pa、22.5 時間。

HIP：1350℃、120MPa（Ar）、11.5 時間。

結果：密度 14.8 - 15.0 g/cm³、多孔度 <0.0003%、硬度 1600 - 2000 HV。

2.4 精密機械加工

研削：5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール（13 μm）、5000 rpm、送り 0.003～0.01 mm/

パス、幾何学的偏差<±0.005 mm、Ra 0.05～0.2 μm。

EDM：放電加工、スロット/穴（Ø 0.21 mm）、偏差 <±0.003 mm。

研磨：ダイヤモンド研磨ペースト（0.3～0.5 μm）、1200 rpm、Ra <0.05 μm、摩擦係数が 10% 減少。

2.5 コーティング

方法：PVD/CVD（Ti/Cr/Al ターゲット、>99.99%）。

パラメータ：TiN /DLC/ AlCrN（13 μm）、10⁻⁵ Pa、200～400℃、バイアス 80 V、堆積速度 0.51 μm /h。

結果：接着力 >80 N、摩擦係数 <0.2、耐熱性 600 - 1100℃。

2.6 検出

微細構造：SEM（粒度 0.1～0.4μm）、EBSD（粒界応力<2%）。

性能：硬度偏差 <±30 HV（ISO 6508）、摩耗 <0.02 mm³/h、耐腐食性（<0.01 mm/y）。

ジオメトリ：CMM（偏差 <±0.003 mm）、レーザー スキャン（スロット偏差 <±0.002 mm）。

非破壊検査：X 線（欠陥 <0.005 mm）、超音波（亀裂 <0.003 mm）。

環境試験：ISO 9227（塩水噴霧、1000 時間）、ISO 1791（衝撃、10⁶回以上）。

超硬合金機械ロボット部品の応用シナリオ

超硬ロボット部品は、高負荷、高頻度動作、過酷な環境におけるプロセス、テスト、選択の提案を提供します。

3.1 超硬合金機械ロボット部品 産業用ロボットジョイント（溶接ロボット）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

動作条件: 800°C、500 N 荷重、 10^6 回転、乾燥環境。

デザイン

タイプ: ボールジョイント (Ø 20 mm、厚さ 5 mm)。

材質: WC8%Co (D50 0.1 - 0.4 μm 、Cr3C2 0.3 wt%、TaC 0.2 wt%)、硬度 1900 HV。

コーティング: AlCrN (2 μm 、PVD、耐熱温度 1100°C、硬度 3400 HV)。

形状: 真円度 $\leq\pm 0.002$ mm、Ra ≤ 0.1 μm 。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD AlCrN (400°C)。

パラメータ: 荷重 500 N、回転速度 100 rpm、温度 800°C。

テスト:

寿命: 2×10^6 回 (ステンレス鋼の場合は 3×10^5 回、6.7 倍長くなります)。

摩耗率: <0.01 mm³/h、摩擦係数 <0.15 。

耐高温性: 800°C、500 時間、酸化なし。

耐衝撃性: 500 N、 10^6 回、ひび割れなし。

選択: WCCo+AlCrN、高温、高負荷、通常の NDT に適しています。

利点: 高温耐摩耗性、動作安定性が 20% 向上します。

3.2 超硬合金加工ロボット部品 サービスロボットグリッパー（物流ロボット）

条件: 20°C ~ 60°C、荷重 200 N、握り 10 回、湿潤環境 (85% RH)。

デザイン

タイプ: グリッパー歯 (10×5 mm、厚さ 2 mm)。

材質: WC10%Ni (D50 0.1 - 0.4 μm 、Cr3C2 0.4 wt%)、硬度 1700 HV。

コーティング: DLC (1.5 μm 、PVD、摩擦係数 <0.1 、耐熱温度 600°C)。

形状: 歯先偏差 $\leq\pm 0.003$ mm、Ra ≤ 0.05 μm 。

プロセス: ボールミル処理 18 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、EDM、PVD DLC (250°C)。

パラメータ: 荷重 200 N、グリップ周波数 1 Hz、湿度 85% RH。

テスト:

寿命: 1.5×10^7 回 (アルミニウム合金の場合は 2×10^6 回、7.5 倍)。

摩耗率: <0.02 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

固着防止: 把持不良率 $<1\%$ 、摩擦係数 <0.1 。

耐湿性: 85% RH、1000 時間、腐食なし。

選択: WCNi+DLC、湿った環境での高頻度、定期的な清掃に適しています。

利点: 低摩擦、耐腐食性、グリップ効率が 15% 向上。

3.3 超硬合金製ロボット部品 特殊ロボットギア（深海ロボット）

条件: 40°C~100°C、1000 N 荷重、 10^6 サイクル、海水 (pH 8)。

デザイン

タイプ: 平歯車 (Ø 30 mm、モジュール 2)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

材質: WC8%Ni (D50 0.1 - 0.4 μ m、Cr3C2 0.4wt%、TaC 0.3wt%、硬度 1800HV。
コーティング: TiN (2 μ m、PVD、耐熱温度 800°C、硬度 2400 HV)。
形状: 齒形偏差 $\pm$ 0.002 mm、Ra<0.1 μ m。
プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD TiN (300°C)。
パラメータ: 荷重 1000 N、伝達速度 50 rpm、圧力 100 MPa。
テスト:
寿命: 2×10^6 回 (ステンレス鋼は 4×10^5 回、5 倍長い)。
摩耗率: <0.01 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。
耐海水性: pH 8、1000 時間、腐食なし。
耐衝撃性: 1000 N、 10^6 回、破損なし。
選択: WCNi+TiN、深海高圧、通常の NDT に適しています。
利点: 耐腐食性と耐摩耗性、伝送安定性が 20% 向上します。

超硬機械ロボット部品の性能比較

パラメータ	超硬合金 (WCCo/Ni)	ステンレス鋼 (316L)	アルミニウム合金 (7075)
硬度 (HV)	1600 年 - 2000 年	200~300	150~200
曲げ強度 (GPa)	1.8~2.5	0.5 - 0.8	0.50.7
靱性 (KIC、MPa·m ^{1/2})	10~15 歳	50~70	20~30 歳
耐摩耗性 (mm ³ /h)	<0.02	0.20.5	0.30.6
耐食性 (mm/y、pH 212)	<0.01	0.05 - 0.1	0.1~0.2
耐熱性 (°C)	>800	300~500	100~200
耐衝撃性 (100 N 倍)	> 10^6	$10^4 - 10^5$	$10^3 - 10^4$
寿命倍数 (アルミニウム合金と比較)	5~10	23	1
摩擦係数 (コーティング)	<0.2	0.3~0.5	0.4~0.6

超硬機械ロボット部品のハイライト:

耐摩耗性: WC 基板、摩耗 <0.02 mm³/h、寿命が 510 倍に増加。
耐食性: Ni ベース + DLC/ TiN 、海水/塩水噴霧に対する耐性がステンレス鋼よりも優れています。
耐高温性: AlCrN コーティング、酸化防止、アルミニウム合金より優れています。
低摩擦: DLC コーティング、摩擦係数<0.1、高い運動効率。

超硬合金機械ロボット部品の最適化提案

材料の選択:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

溶接ジョイント: WC8%Co+AlCrN、高温耐摩耗性が 15%向上。

物流グリッパー: WC10%Ni+DLC、耐付着性が 20%向上。

深海ギア: WC8%Ni+TiN、耐腐食性が 15%向上。

添加剤: Cr3C2 0.4 wt%、TaC 0.3 wt%、硬度が 5%増加。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1350°C、120 MPa、気孔率 <0.0003%、耐摩耗性が 15%向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール (13μm)、偏差<±0.005mm、Ra<0.05μm。

コーティング:

AlCrN (2μm、PVD)、耐高温性が 15%向上しました。

DLC (1.5μm、PVD)、摩擦係数 10%低減。

TiN (2μm、PVD)、耐食性が 20%向上しました。

EDM: スロット偏差 <±0.002 mm、精度が 5% 向上。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御±1°C、10⁻⁶Pa。

5 軸 CNC: 偏差<±0.003 mm。

コーティング装置: 堆積速度 0.51μm/h、偏差<±0.03μm。

作業条件の適応:

溶接ロボット: WCCo+AlCrN、800°C、500 N、乾燥環境。

物流ロボット: WCNi+DLC、20°C ~ 60°C、200 N、湿潤環境。

深海ロボット: WCNi+TiN、40°C~100°C、1000 N、海水。

超硬機械ロボット部品の検査・検証

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4μm)、EBSD (粒界応力<2%)。

性能: ASTM G65 (<0.02 mm³/h)、耐腐食性 (<0.01 mm/y)、耐熱性 (>800°C、<0.01 mg/cm²)。

ジオメトリ: CMM (偏差 <±0.003 mm)、レーザー スキャン (スロット偏差 <±0.002 mm)。

環境: ISO 9227 (塩水噴霧、1000 時間)、ISO 1791 (衝撃、>10⁶ 回)。

超硬機械ロボット部品の規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 <0.01%。

GB/T 38502015: 密度偏差<±0.1 g/cm³。

GB/T 38512015: 強度 1.8 - 2.5 GPa。

GB/T 79972017: 硬度 1600 - 2000 HV。

ASTM G65: 摩耗率 <0.02 mm³/h。

NACE MR0175: 硫化物応力割れに対する耐性。

ISO 1791: 衝撃試験。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ISO 9001: 品質管理。

超微粒子 WC (0.1~0.4 μ m)、Co/Ni 結合相 (6~12 重量%)、PVD/CVD コーティング (TiN/DLC/AlCrN、13 μ m) を最適化することで、超硬合金ロボット部品は高硬度 (1600~2000HV)、耐摩耗性 (<0.02mm³/h)、耐腐食性 (<0.01mm/y)、耐高温性 (>800°C)、耐衝撃性 (>10⁶倍) を実現します。この部品は、産業用ロボットの関節、サービスロボットのグリッパー、特殊ロボットのギアなどに適しており、寿命は 510 倍、Ra は 0.05~0.2 μ m、動作効率は 15% 向上します。粒径、コーティング厚さ、放電加工精度を最適化することでコストを削減できますが、超精密加工 (コスト増加率 10%) と極限環境試験 (10⁶倍以上) が課題となります。超硬合金はステンレス鋼やアルミニウム合金よりも優れており、ロボットの高い信頼性要件 (ISO 9001) を満たしています。

付録:

超硬航空センサー

航空用超硬合金センサーは、炭化タングステン（WC）をマトリックス（85～92 重量%）とし、Co（6～10 重量%）または Ni（6～12 重量%）を結合相として用い、粉末冶金（ボールミル、CIP、HIP 焼結）によって製造されます。高硬度（1600～2000HV）、優れた耐摩耗性（摩耗量<0.02 mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01 mm/y、pH 212、HCl、SO₄²⁻含有）、耐高温性（>800℃、耐酸化性）、耐振動性（>10⁶倍、MILSTD810G）を備えています。表面には PVD/CVD コーティング（TiN、Al₂O₃、13μm、摩擦係数<0.2 など）または機能性コーティング（Au、Ag、0.52μm、導電率>90% IACS）が施されており、耐摩耗性、耐腐食性、電気特性が向上しています。このセンサーは航空宇宙分野（エンジン監視、飛行制御、構造健全性監視など）で使用され、極限環境（55℃～800℃、10100 g 振動、10⁵ 10⁷ サイクル）に耐え、高精度データ（誤差<±0.5%）を提供し、従来の材料（ステンレス鋼、チタン合金、400～600 HV など）よりも 510 倍長い寿命を持ち、表面粗さは Ra 0.05～0.2μm です。

この記事では、標準規格（GB/T 7997、ASTM G65、MILSTD810G、AS9100）に基づいて、セメントカーバイド航空センサーの技術、性能、アプリケーション、および最適化の提案を示します。

1. 超硬合金航空センサーの特性

1.1 セメントカーバイド航空センサーの材料構成

マトリックス:

WC: 85 - 92 wt%、超微粒子（D50 0.1 - 0.4 μm）、硬度 1600 - 2000 HV。

Co: 6 - 10 wt%、高靱性（K_{IC} 10 - 15 MPa·m^{1/2}）、耐振動性が 10% 向上。

Ni: 6 - 12 wt%（オプション）、耐腐食性（HCl、SO₄²⁻<0.01 mm/y）、高温耐酸化性。

添加剤: Cr₃C₂ (0.2 - 0.5 wt %) は粒成長を抑制し、硬度を 5% 向上させます。TaC (0.10, 3 wt %) は抗酸化特性を 10% 向上させます。

コーティング:

TiN (PVD): 硬度 2000 - 2400 HV、耐熱性 800℃、耐摩耗性。

Al₂O₃ (CVD): 硬度 1800 - 2200 HV、耐熱性 1000℃、耐腐食性。

Au/Ag (PVD): 導電率 >90% IACS、耐熱性 500 - 600℃、酸化防止。

傾斜構造: 表面の Co/Ni が低く（6-8 wt %）、中心部の Co/Ni が高く（10-12 wt %）、耐摩耗性が 20% 向上し、耐亀裂性が 15% 向上します。

1.2 セメントカーバイド航空センサーの性能パラメータ

硬度: 1600 - 2000 HV（GB/T 79972017）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

曲げ強度: 1.8~2.5 GPa (GB/T 38512015)。
破壊靱性: $1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (Co ベース 1215、Ni ベース 1012)。
耐摩耗性: 摩耗速度 $<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)。
耐食性: pH 212、 $<0.01 \text{ mm/y}$ (NACE MR0175)。
耐高温性: $>800^\circ\text{C}$ 、耐酸化性 ($<0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、500 時間)。
耐振動性: $>10^6$ 回 (10100 g、MILSTD810G)。
電気伝導率: $>90\%$ IACS (Au/Ag コーティング、IEC 6051221)。
測定精度: 誤差 $\leq \pm 0.5\%$ (温度、圧力、歪み)。
表面粗さ: Ra 0.05~0.2 μm 、信号安定性が 20% 向上。

1.3 セメントカーバイド航空センサーの利点

高い耐摩耗性: 超微粒子 WC+ コーティングにより、寿命が 510 倍に延長され、故障率が 30% 減少します。
耐高温性: TiN / Al_2O_3 コーティング、酸化防止、高温環境 (800°C 、エンジン) に適しています。
耐腐食性: Ni ベース + Al_2O_3 、航空燃料/塩水噴霧に耐性があり、過酷な環境に適しています。
耐振動性: 靱性の高い Co/Ni は、チタン合金よりも優れた高周波振動 ($>10^6$ 回) に耐えます。
高精度: 低摩擦コーティング + 精密加工、データ誤差 $\leq \pm 0.5\%$ 、信号減衰が 15% 削減されます。

2. 超硬合金航空センサーの製造工程

2.1 粉末の調製

原材料: WC (D50 0.1 - 0.4 μm 、純度 $>99.95\%$)、Co/Ni (D50 0.51 μm)、Cr3C2/ TaC (D50 0.51 μm)。
ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO2 ボール、15: 1)、400 rpm、1620 時間、粒子サイズ偏差 $\leq \pm 0.03 \mu\text{m}$ 、均一性 $>99\%$ 。

2.2 形成

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。
パラメータ: 250~300MPa、保持圧力 60 秒、タングステン鋼鑄型 (偏差 $\leq \pm 0.02 \text{ mm}$)、ピレット密度 8.5~10.0 g/cm^3 。
結果: 寸法偏差 $\leq \pm 0.03 \text{ mm}$ 、亀裂率 $<0.3\%$ 。

2.3 焼結

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

方法：真空焼結+HIP。

パラメータ：

脱蠟：200～500℃、2℃/分、H₂ 雰囲気（O₂ <2 ppm）、10⁻³ Pa。

焼結：1350～1400℃、10⁻⁵ 10⁻⁶ Pa、22.5 時間。

HIP：1350℃、120MPa（Ar）、11.5 時間。

結果：密度 14.8 - 15.0 g/cm³、多孔度 <0.0003%、硬度 1600 - 2000 HV。

2.4 精密機械加工

研削：5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール（13 μm）、5000 rpm、送り 0.003～0.01 mm/

パス、幾何偏差<±0.005 mm、Ra 0.05～0.2 μm。

EDM：放電加工、微細穴/スロット（Ø 0.1-0.5 mm）、偏差 <±0.003 mm。

研磨：ダイヤモンド研磨ペースト（0.30.5 μm）、1200 rpm、Ra <0.05 μm、信号安定性が 10% 増加しました。

2.5 コーティング

方法：PVD/CVD（Ti/Al/Au/Ag ターゲット、>99.99%）。

パラメータ：TiN/Al₂O₃/Au/Ag（13 μm）、10⁻⁵Pa、200～400℃、バイアス 80 V、堆積速度 0.51 μm/h。

結果：接着力 >80 N、摩擦係数 <0.2、導電率 >90% IACS。

2.6 センサー統合

センシング要素：MEMS（シリコンベース、サイズ <0.5 mm）またはひずみゲージ（NiCr、厚さ 0.01 mm）、温度（±0.5℃）、圧力（±0.1 MPa）、およびひずみ（±1 με）を監視。

パッケージング：レーザー溶接（Ti シェル、気密性 <10⁻⁸ Pa·m³/s）、耐熱性 800℃、耐振動性 100 g。

データ転送：5G/Bluetooth モジュール、遅延 <5 ms、消費電力 <30 mW。

2.7 検出

微細構造：SEM（粒度 0.1～0.4μm）、EBSD（粒界応力<2%）。

性能：硬度偏差 <±30 HV (ISO 6508)、摩耗 <0.02 mm³/h、耐腐食性 (<0.01 mm/y)。

ジオメトリ：CMM（偏差 <±0.003 mm）、レーザー スキャン（スロット偏差 <±0.002 mm）。

非破壊検査：X 線（欠陥 <0.005 mm）、超音波（亀裂 <0.003 mm）。

環境試験：MILSTD810G（55℃～800℃、100g 振動、10⁶サイクル）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

電気特性: 導電率>90% IACS、信号誤差<±0.5% (IEC 6051221)。

3. セメントカーバイド航空センサーの応用シナリオ

超硬航空センサーは、過酷な環境や高精度の要件に応じたプロセス、テスト、選択の提案を提供します。

3.1 カーバイド航空センサーエンジン監視（温度/圧力センサー）

条件: 800°C、50 MPa、100 g 振動、航空燃料環境、 10^6 サイクル。

デザイン

タイプ: MEMS 圧力/温度センサー (Ø 10 mm、厚さ 2 mm)。

材質: WC8%Co (D50 0.1 - 0.4 μm 、Cr3C2 0.3 wt%、TaC 0.2 wt%)、硬度 1900 HV。

コーティング: Al_2O_3 (2 μm 、CVD、耐熱温度 1000°C、耐腐食性)。

形状: 平面度偏差<±0.002 mm、 Ra <0.05 μm 。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、CVD Al_2O_3 (400°C)、MEMS 統合、レーザー溶接。

パラメータ: 温度 800°C、圧力 50 MPa、振動 100 g、サンプリング レート 1 kHz。

テスト:

寿命: 2×10^6 回 (チタン合金は 3×10^5 回、6.7 倍)。

摩耗率: <0.01 mm^3/h 、耐腐食性 <0.01 mm/y。

精度: 温度誤差±0.5°C、圧力誤差±0.1MPa。

耐振動性: 100g、 10^6 回、故障なし。

選択: WCCo+ Al_2O_3 、高温高压、通常の NDT に適しています。

利点: 高温耐腐食性、高精度、エンジン効率の 10% 向上。

3.2 セメント系航空センサ（ひずみセンサ）の構造健全性モニタリング

動作条件: 55°C ~ 200°C、10 g 振動、塩水噴霧 (5% NaCl)、 10^7 サイクル。

デザイン

タイプ: ひずみゲージセンサー (5×3 mm、厚さ 0.5 mm)。

材質: WC10%Ni (D50 0.1 - 0.4 μm 、Cr3C2 0.4 wt%)、硬度 1700 HV。

コーティング: TiN (1 μm 、PVD、耐熱温度 800°C、耐摩耗性)。

形状: 表面偏差<±0.003 mm、 Ra <0.1 μm 。

プロセス: ボールミル処理 18 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、EDM、PVD TiN (250°C)、ひずみゲージ取り付け、レーザー溶接。

パラメータ: 歪み ±5000 $\mu\epsilon$ 、振動 10 g、サンプリング レート 500 Hz。

テスト:

寿命: 1.5×10^7 回 (ステンレス鋼は 2×10^6 回、7.5 倍長い)。

摩耗損失: <0.02 mm^3/h 、塩水噴霧耐性 1000 時間、耐性増加 <5%。

精度: ひずみ誤差 ±1 $\mu\epsilon$ 、信号減衰 <0.1%。

耐振動性: 10g、 10^7 回、故障なし。

選択: WCNi+TiN、低温腐食、定期的な洗浄に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

利点: 振動腐食防止、翼/胴体の監視に適しており、安全性が 15% 向上します。

3.3 カーバイド航空センサー飛行制御（磁気センサー）

動作条件: 40℃ ～ 150℃、20 g 振動、乾燥環境、10⁶ サイクル。
デザイン
タイプ: ホール効果磁気センサー (Ø 3 mm、厚さ 1 mm)。
材質: WC8%Co1%Ag (D50 0.10.4µm、Cr3C2 0.3wt%)、硬度 1800HV。
コーティング: Au (0.5 µm、PVD、導電率>95% IACS、耐熱性 600℃)。
形状: 真円度±0.002 mm、Ra<0.05 µm。
プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350℃ (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD Au (200℃)、ホール素子統合、レーザー溶接。
パラメータ: 磁場 0500 mT、振動 20 g、サンプリング レート 2 kHz。
テスト:
寿命: 2×10⁶回（チタン合金は 4×10⁵回、5 倍）。
摩耗損失: <0.01 mm³/h、接触抵抗<8 µΩ。
精度:磁場誤差±0.1 mT、信号安定性±0.5%。
耐振動性: 20g、10⁶回、故障なし。
選択: WCCo+Au、高導電性の乾燥環境、通常の抵抗検出に適しています。
利点: 高精度の導電性、ナビゲーション/姿勢制御に適しており、信頼性が 20% 向上します。

4. セメントカーバイド航空センサーの性能比較

パラメータ	超硬合金（WCCo /Ni）	チ タ ン 合 金（Ti6Al4V）	ス テ ン レ ス 鋼（316L）
硬度 (HV)	1600 年 - 2000 年	300～400	200～300
曲げ強度 (GPa)	1.8～2.5	0.9～1.2	0.5～0.8
靱性 (KIC、MPa·m ^{1/2})	10～15 歳	40～60 歳	50～70
耐摩耗性 (mm ³ /h)	<0.02	0.10.3	0.20.5
耐食性 (mm/y、pH 212)	<0.01	0.02～0.05	0.05 - 0.1
耐熱性 (℃)	>800	400～600	3005-00
振動耐性 (100g)	>10 ⁶	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵
寿命倍数（ステンレス鋼と比較）	5～10	23	1
電気伝導率 (% IACS)	90 歳以上	12	23

カーバイド航空センサーのハイライト:

耐摩耗性: WC 基板、摩耗 <0.02 mm³/h、寿命が 510 倍に増加。
耐熱性: TiN / Al₂O₃ コーティング、抗酸化性、チタン合金よりも優れています。
耐食性: Ni ベース + Al₂O₃ 、塩水噴霧/燃料に対する耐性があり、ステンレス鋼よりも優

れています。

高精度：低摩擦 + 精密加工、誤差 $< \pm 0.5\%$ 、従来の材料よりも優れています。

5. セメントカーバイド航空センサーの最適化の提案

材料の選択：

エンジンモニタリング：WC8%Co+Al₂O₃、高温耐腐食性が 15%向上。

構造ヘルスマニタリング：WC10%Ni+TiN、振動腐食耐性が 20%向上。

飛行制御：WC8%Co+Au、導電率 $>95\%$ IACS、精度が 10%向上。

添加剤：Cr₃C₂ 0.4 wt%、TaC 0.3 wt%、硬度が 5%増加。

プロセス最適化：

焼結：HIP 1350°C、120 MPa、気孔率 $<0.0003\%$ 、耐摩耗性が 15%向上。

研削：5 軸 CNC、CBN 研削ホイール（13 μ m）、偏差 $< \pm 0.005$ mm、Ra $<0.05\mu$ m。

コーティング：

Al₂O₃（2 μ m、CVD）、高温耐性が 15%向上しました。

TiN（1 μ m、PVD）、耐摩耗性が 20%向上しました。

Au（0.5 μ m、PVD）、接触抵抗が 10%削減されました。

EDM：微細穴偏差 $< \pm 0.002$ mm、精度が 5% 向上。

機器の最適化：

焼結炉：温度制御 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、 10^{-6} Pa。

5 軸 CNC：偏差 $< \pm 0.003$ mm。

コーティング装置：堆積速度 0.51 μ m/h、偏差 $< \pm 0.03\mu$ m。

作業条件の適応：

エンジン：WCCo+Al₂O₃、800 °C、50 MPa、振動 100 g。

構造モニタリング：WCNi+TiN、55°C ~ 200°C、10 g 振動、塩水噴霧。

飛行制御：WCCo+Au、40°C ~ 150°C、20 g 振動、乾燥環境。

6. 硬質合金航空センサーの試験および検証：

微細構造：SEM（粒度 0.1~0.4 μ m）、EBSD（粒界応力 $<2\%$ ）。

性能：ASTM G65 (<0.02 mm³/h)、耐腐食性 (<0.01 mm/y)、耐熱性 ($>800^\circ\text{C}$ 、 <0.01 mg/cm²)。

ジオメトリ：CMM(偏差 $< \pm 0.003$ mm)、レーザー スキャン (スロット偏差 $< \pm 0.002$ mm)。

環境：MILSTD810G（55°C~800°C、100g、 10^6 回）。

電気特性：導電率 $>90\%$ IACS、誤差 $< \pm 0.5\%$ (IEC 6051221)。

7. 硬質合金航空センサーの規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 $<0.01\%$ 。

GB/T 38502015: 密度偏差 $< \pm 0.1$ g/cm³。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 38512015: 强度 1.82.5 GPa 。

GB/T 79972017: 硬度 1600~2000 HV。

ASTM G65: 摩擦率 <0.02 mm³/h。

NACE MR0175: 硫化物应力开裂に対する耐性。

MILSTD810G: 环境适应性(振动、温度、腐蚀)。

AS9100: 航空宇宙品质管理。

IEC 6051221: 接触抵抗<10μΩ。

超微粒子 WC (0.1~0.4μm)、Co/Ni 结合相 (6~12 重量%)、PVD /CVD コーティング (TiN / Al₂O₃ / Au、13μm)、MEMS / ひずみゲージの統合を最適化することで、セメントカーバイド航空センサーは、高硬度 (1600~2000 HV)、耐摩擦性 (<0.02 mm³ / h)、耐腐食性 (<0.01 mm/y)、耐高温性 (>800°C)、高精度 (誤差<±0.5%) を実現します。このセンサーは、エンジン監視、構造健全性監視、飛行制御に適しており、寿命は 5~10 倍、Ra 0.05~0.2μm、データ信頼性は 20% 向上しています。粒径、コーティング厚、MEMS 統合を最適化することでコストを削減できますが、超精密加工 (コスト増加率 10%) と極限環境試験 (10⁶倍以上) が課題となります。超硬合金はチタン合金やステンレス鋼よりも優れており、航空宇宙産業の厳しい要件 (AS9100、MILSTD810G) を満たしています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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

付録:

インテリジェント超硬切削工具

スマートカーバイド工具は、炭化タングステン（WC）を母材（88～94 重量%）とし、Co（6～10 重量%）または Ni（6～12 重量%）を結合相として用い、粉末冶金（ボールミル、CIP、HIP 焼結）によって製造されます。高硬度（1800～2200 HV）、耐摩耗性（摩耗量 <0.03 mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01 mm/y、pH 212、HCl、SO₄²⁻含有）、および高温耐性（>1000°C、耐酸化性）を備えています。表面には PVD / CVD コーティング（DLC、TiAlN、AlCrN、25μm、摩擦係数<0.15 など）が施され、インテリジェントセンシング（温度、摩耗、応力）と適応制御（切削パラメータの最適化）が統合されており、加工効率が 20～30% 向上し、従来のツール（ステンレス鋼、400～600 HV）よりも 35 倍長い耐用年数を実現し、表面粗さは Ra 0.1～0.2μm です。このツールは、高精度加工（航空宇宙、自動車、金型）に使用され、高速切削（1000～5000 rpm）、乾式/湿式切削、難加工材料（チタン合金、ニッケル基合金）に適しています。この記事では、標準（GB/T 7997、ASTM G65、ISO 6508）に基づいて、インテリジェント超硬工具、プロセス、性能、アプリケーション、最適化の提案を提供します。

1. スマート超硬工具の特徴

1.1 インテリジェント超硬工具材料構成

マトリックス:

WC: 88 - 94 wt%、超微粒子（D50 0.2 - 0.5 μm）、硬度 1800 - 2200 HV。

Co: 6 - 10 wt%、高靱性（K_{IC} 15 - 20 MPa·m^{1/2}）、耐摩耗性が 10% 向上。

Ni: 6 - 12 wt%（オプション）、耐腐食性（HCl、SO₄²⁻ <0.01 mm/y）、耐衝撃性（K_{IC} 12 - 15 MPa·m^{1/2}）。

添加剤: Cr3C2 (0.3 - 0.6 wt%) は粒成長を抑制し、硬度を 6% 向上させます。TaC (0.1 - 0.3 wt%) は抗酸化特性を 10% 向上させます。

コーティング:

DLC (PVD): 硬度 3000 - 3500 HV、摩擦係数 <0.1、耐熱性 600°C、非粘着性。

TiAlN (PVD/CVD): 硬度 2800 - 3200 HV、耐熱性 1050°C、耐侵食性。

AlCrN (PVD): 硬度 3000 - 3400 HV、耐熱性 1100°C、高温耐摩耗性。

傾斜構造: 表面の Co/Ni が低く（6 - 8 wt%）、コアの Co/Ni が高く（10 - 12 wt%）、耐摩耗性が 25% 向上し、耐亀裂性が 20% 向上します。

1.2 インテリジェント超硬工具のインテリジェント機能

センサー: 温度（±1°C、0500°C）、摩耗（±0.01 mm）、応力（±5 MPa）を監視する組み込みマイクロセンサー（MEMS、サイズ <0.5 mm）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

データ転送: Bluetooth /5G モジュール、CNC システムへのリアルタイム転送、遅延 <10 ms。

適応制御: AI アルゴリズム (機械学習、摩耗/温度データに基づく) が切削速度 ($\pm 10\%$) と送り速度 ($\pm 15\%$) を動的に調整し、効率を 20 - 30% 最適化します。

寿命予測: 摩耗モデル (Archard モデル) に基づいて残存寿命を予測 (誤差 $\pm 5\%$) し、ダウンタイムを 30% 削減します。

1.3 インテリジェント超硬工具の性能パラメータ

硬度: 1800~2200 HV (GB/T 79972017)。

曲げ強度: 2.0~2.8GPa (GB/T 38512015)。

破壊靱性: $1220 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (Co 基 1520、Ni 基 1215)。

耐摩耗性: 摩耗速度 $< 0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)。

耐食性: pH 212、 $< 0.01 \text{ mm/y}$ (NACE MR0175)。

耐高温性: $> 1000^\circ\text{C}$ 、耐酸化性 ($< 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、1000 時間)。

摩擦係数: < 0.15 (コーティング)、付着防止性が 30% 向上。

表面粗さ: $Ra 0.10.2 \mu\text{m}$ 、加工面品質が 15% 向上。

1.4 インテリジェント超硬工具の利点

高い耐摩耗性: 超微粒子 WC+ コーティングにより、寿命が 35 倍に延長され、切削効率が 20% 向上します。

耐腐食性: Ni ベースの工具は酸やアルカリ (HCl 、 SO_4^{2-}) に耐性があり、湿式切断に適しています。

耐高温性: TiAlN / AlCrN コーティング、熱亀裂に強く、高速ドライカットに適しています。

インテリジェンス: リアルタイム監視 + 適応制御により、廃棄率を 15% 削減し、エネルギーを 1020% 節約します。

2. インテリジェント超硬工具製造プロセス

2.1 粉末の調製

原材料: WC ($D_{50} 0.2 - 0.5 \mu\text{m}$ 、純度 $> 99.95\%$)、Co/Ni ($D_{50} 12 \mu\text{m}$)、 Cr_3C_2 /TaC ($D_{50} 0.5 - 1 \mu\text{m}$)。

ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO_2 ボール、12: 1)、350 rpm、1822 時間、粒子サイズ偏差 $\leq \pm 0.05 \mu\text{m}$ 、均一性 $> 98\%$ 。

2.2 形成

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パラメータ: 300~350MPa、保持圧力 90 秒、チタン合金鋳型（偏差 $\leq \pm 0.03\text{mm}$ ）、ピレット密度 $9.0 \sim 10.5\text{g/cm}^3$ 。

結果: 寸法偏差 $\leq \pm 0.05\text{mm}$ 、亀裂率 $< 0.5\%$ 。

2.3 焼結

方法: 真空焼結+HIP。

パラメータ:

脱蠟: $200 \sim 600^\circ\text{C}$ 、 2°C/分 、 H_2 雰囲気 ($\text{O}_2 < 3\text{ppm}$)、 10^{-3}Pa 。

焼結: $1400 - 1450^\circ\text{C}$ 、 $10^{-5} - 10^{-6}\text{Pa}$ 、2.53 時間。

HIP: 1400°C 、150MPa (Ar)、1.52 時間。

結果: 密度 $15.0 - 15.2\text{g/cm}^3$ 、多孔度 $< 0.0005\%$ 、硬度 $1800 - 2200\text{HV}$ 。

2.4 精密機械加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール ($24\mu\text{m}$)、4000rpm、送り $0.005 \sim 0.02\text{mm/パス}$ 、幾何偏差 $\leq \pm 0.01\text{mm}$ 、 $\text{Ra} 0.10.2\mu\text{m}$ 。

EDM: 放電加工、スロット/穴 ($\varnothing 0.52\text{mm}$)、偏差 $\leq \pm 0.005\text{mm}$ 。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト ($0.51\mu\text{m}$)、1000 rpm、 $\text{Ra} < 0.1\mu\text{m}$ 、抗付着性が 25%向上。

2.5 コーティング

方法: PVD/CVD (Cr/Al/Ti ターゲット、 $> 99.99\%$)。

パラメータ: DLC/ TiAlN / AlCrN ($25\mu\text{m}$)、 10^{-5}Pa 、 $250 - 450^\circ\text{C}$ 、バイアス 100 V、堆積速度 $11.5\mu\text{m/h}$ 。

結果: 接着力 $> 100\text{N}$ 、摩擦係数 < 0.15 、耐熱性 $600 - 1100^\circ\text{C}$ 。

2.6 インテリジェントな統合

センサー埋め込み: レーザー微細加工 (溝深さ 0.51mm)、MEMS センサーの埋め込み (温度、応力、摩耗)、エポキシ樹脂シーリング (耐熱性 500°C)。

回路統合: 薄膜回路 (厚さ 0.1mm)、5G/Bluetooth モジュール、消費電力 $< 50\text{mW}$ 。

ソフトウェア: AI アルゴリズム (Python、TensorFlow)、切削パラメータのリアルタイム最適化、クラウドでのデータ保存 (暗号化、AES256)。

2.7 検出

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微細構造: SEM (粒度 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$)、EBSD (粒界応力 $<3\%$)。
性能: 硬度偏差 $<\pm 40\text{ HV}$ (ISO 6508)、摩耗 $<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 (pH 212、 $<0.01\text{ mm/y}$)。
ジオメトリ: CMM (偏差 $<\pm 0.005\text{ mm}$)、レーザー スキャン (エッジ半径 $<\pm 0.003\text{ mm}$)。
スマート機能: センサー精度 (温度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、摩耗 $\pm 0.01\text{ mm}$)、伝送遅延 $<10\text{ ms}$ 。
非破壊検査: X 線 (内部欠陥 $<0.01\text{ mm}$)、超音波 (亀裂 $<0.005\text{ mm}$)。

3. インテリジェント超硬工具のインテリジェント応答アプリケーションシナリオ

インテリジェントな超硬工具は、高精度の加工、プロセス、テスト、選択の提案を提供します。

3.1 航空宇宙 (チタン合金加工)

作業条件: Ti6Al4V、2000 rpm、 200°C 、ドライカット、切削深さ 12 mm 。
タイプ: フライスカッター ($\varnothing 20\text{ mm}$ 、4 枚刃)。
材質: WC8%Co (D50 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.5 wt%)、硬度 $2000\sim 2200\text{ HV}$ 。
コーティング: TiAlN ($4\mu\text{m}$ 、硬度 3200 HV 、摩擦 0.12 、耐熱性 1050°C)。
インテリジェンス: MEMS センサー (温度、摩耗)、AI 最適化 (切断速度 $\pm 10\%$)。
形状: 切れ刃角度 15° 、切れ刃半径 $<0.01\text{ mm}$ 、 $R_a<0.1\mu\text{m}$ 。
プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa 、HIP 1400°C (150 MPa)、5 軸研削、PVD TiAlN (400°C)、センサーレーザー埋め込み。
パラメータ: 速度 2000 rpm、送り 0.1 mm/r 、切削深さ 1.5 mm 。
テスト:
寿命: 800 時間 (従来のツールでは 200 時間、その 4 倍)。
摩耗損失: $<0.02\text{ mm}^3/\text{h}$ 、表面品質 $R_a 0.2\mu\text{m}$ 。
効率: 処理時間が 25% 削減され、廃棄率が 15% 削減されました。
インテリジェント: 温度制御 $<200^\circ\text{C}$ 、摩耗予測 $\pm 5\%$ 。
選択: WCCo+TiAlN、高温、高硬度、乾式切断、および通常の NDT に適しています。
利点: 耐高温性、インテリジェントな最適化、効率の 20% 向上。

3.2 自動車用金型 (高速度鋼加工)

作業条件: H13 鋼、3000 rpm、 150°C 、湿式切削 (エマルジョン 5%)、切削深さ 0.51 mm 。
タイプ: 旋削工具 (片刃、ISO 規格)。
材質: WC10%Co (D50 $0.2 - 0.5\mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.5 wt%)、硬度 $2000 - 2200\text{ HV}$ 。
コーティング: DLC ($3\mu\text{m}$ 、硬度 3500 HV 、摩擦 <0.1 、耐熱性 600°C)。
スマート: MEMS センサー (摩耗、応力)、AI が送り速度を調整します ($\pm 15\%$)。
形状: 切れ刃角度 20° 、切れ刃半径 $<0.01\text{ mm}$ 、 $R_a<0.1\mu\text{m}$ 。
プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa 、HIP 1400°C (150 MPa)、5 軸研削、PVD DLC (250°C)、センサー埋め込み。
パラメータ: 速度 3000 rpm、送り 0.08 mm/r 、切削深さ 0.8 mm 。
テスト:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

寿命: 1200 時間 (従来のツールでは 300 時間、その 4 倍)。
摩耗率: $<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $<0.01 \text{ mm/y}$ 。
表面品質: $\text{Ra}0.15\mu\text{m}$ 、精度 $\pm 0.005\text{mm}$ 。
インテリジェンス: 応力制御 $<500 \text{ MPa}$ 、ダウンタイムが 30% 削減されます。
選択: WCCo+DLC、湿式切断、高精度、定期洗浄に適しています。
利点: 低摩擦、非粘着、加工精度 15% 向上。

3.3 ニッケル基合金加工（ガスタービンプレード）

作業条件: インコネル 718、1500 rpm、400°C、乾式切削、切削深さ 13 mm。
タイプ: ドリルビット ($\varnothing 10 \text{ mm}$ 、両刃)。
材質: WC8%Ni (D50 0.2 - 0.5 μm 、TaC 0.3 wt%)、硬度 2000 - 2200 HV。
コーティング: AlCrN (5 μm 、硬度 3400HV、摩擦 0.15、耐熱性 1100°C)。
インテリジェンス: MEMS センサー (温度、摩耗)、AI が切断パラメータを最適化します。
形状: 切れ刃角度 30°、切れ刃半径 $<0.01 \text{ mm}$ 、 $\text{Ra} < 0.1 \mu\text{m}$ 。
プロセス: ボールミル処理 22 時間、CIP 350 MPa、HIP 1400°C (150 MPa)、EDM (穴偏差 $<\pm 0.005 \text{ mm}$)、PVD AlCrN (450°C)、センサー埋め込み。
パラメータ: 速度 1500 rpm、送り 0.05 mm/r、切削深さ 2 mm。
テスト:
寿命: 600 時間 (従来のツールでは 150 時間、4 倍長い)。
摩耗率: $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐酸化性 $<0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 。
効率: 処理時間が 20% 短縮され、廃棄率が 10% 削減されました。
スマート: 温度制御 $<400^\circ\text{C}$ 、寿命予測 $\pm 5\%$ 。
選択: WCNi+AlCrN、高温、難削材、乾式切断、および通常の NDT に適しています。
利点: 耐熱性が高く、インテリジェント制御により熱割れが 15% 減少します。

4. インテリジェント超硬工具の性能比較

パラメータ	スマートカーバイド(WCCo/Ni)	従来の超硬合金	ステンレス製ナイフ
硬度 (HV)	1800 年 - 2200 年	1600 年 - 2000 年	400~600
曲げ強度 (GPa)	2.0~2.8	1.8~2.5	1.5~2.0
靱性 (KIC、 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	12 -- 20	10~15 歳	50100
耐摩耗性 (mm^3/h)	<0.03	0.05 - 0.1	0.1~0.3
耐食性 (mm/y 、pH 212)	<0.01	0.02~0.05	0.05 - 0.1
耐熱性 ($^\circ\text{C}$)	>1000	800~1000	400~800
寿命倍数 (ステンレス鋼と比較)	3 - 5	23	1
摩擦係数 (コーティング)	<0.15	0.2~0.3	0.3~0.5
スマート機能	リアルタイム監視 + 自己	なし	なし

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パラメータ	スマートカーバイド(WCCo/Ni)	従来の超硬合金	ステンレス製ナ이프
	適応		

スマートカーバイドツールのハイライト:

インテリジェント機能: リアルタイム監視+ AI 最適化により、効率が 2030%向上し、スクラップ率が 15%削減されます。

耐摩耗性: 超微粒子 WC+ コーティング、摩耗 <0.03 mm³/h、寿命が 35 倍に増加。

コーティング: DLC 耐付着性（湿式切削）、TiAlN / AlCrN 耐高温性（乾式切削）。

耐食性: Ni ベースは Co ベースよりも優れており、湿式切断に適しています (pH 212)。

5. インテリジェント超硬工具のためのインテリジェントな最適化提案

材料の選択:

チタン合金: WC8%Co+TiAlN、耐高温性が 15%向上。

金型鋼: WC10%Co+DLC、耐付着性が 25%向上。

ニッケル基合金: WC8%Ni+AlCrN、耐食性が 20%向上。

添加剤: Cr3C2 0.6 wt%、TaC 0.3 wt%、硬度が 6%増加しました。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1400°C、150 MPa、気孔率 <0.0005%、耐摩耗性が 20%向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール (24μm)、偏差<±0.01mm、Ra<0.1μm。

コーティング:

DLC (3μm、250°C)、抗付着性が 25%向上しました。

TiAlN (4μm、400°C)、高温耐性が 15%向上。

AlCrN (5μm、450°C)、耐侵食性が 20%向上。

スマート統合: MEMS センサー（精度 ±1°C）、5G 伝送（遅延 <10 ms）。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御±2°C、10⁻⁶Pa。

5 軸 CNC: 偏差<±0.005 mm。

コーティング装置: 堆積速度 11.5μm /h、偏差<±0.05μm。

レーザー加工: センサースロット偏差 <±0.01 mm。

作業条件の適応:

航空宇宙: WCCo+TiAlN、2000~5000 rpm、ドライカット。

自動車用金型: WCCo+DLC、1000~3000rpm、湿式切削。

ニッケル基合金: WCNi+AlCrN、1000~2000rpm、乾式切削。

テストと検証:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

微細構造: SEM (粒度 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$)、EBSD (粒界応力 $<3\%$)。

性能: ASTM G65 ($<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 (pH 212、 $<0.01\text{ mm/y}$)、耐熱性 ($>1000^\circ\text{C}$ 、 $<0.01\text{ mg/cm}^2$)。

ジオメトリ: CMM (偏差 $<\pm 0.005\text{ mm}$)、レーザー スキャン (エッジ偏差 $<\pm 0.003\text{ mm}$)。

スマート: センサー精度 (温度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、摩耗 $\pm 0.01\text{ mm}$)、AI 予測誤差 $<5\%$ 。

6. インテリジェント超硬工具の規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 $<0.01\%$ 。

GB/T 38502015: 密度偏差 $<\pm 0.1\text{ g/cm}^3$ 。

GB/T 38512015: 強度 $2.0\text{-}2.8\text{ GPa}$ 。

GB/T 79972017: 硬度 $1800\text{ - }2200\text{ HV}$ 。

ASTM G65: 摩耗率 $<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$ 。

NACE MR0175: 硫化物応力割れに対する耐性。

ISO 6508: 硬度偏差 $<\pm 40\text{ HV}$ 。

ISO 1832: ツールジオメトリの標準。

スマート超硬工具は、超微粒子 WC ($0.2\text{ - }0.5\mu\text{m}$)、Co / Ni 結合相 ($6\text{ - }12\text{ wt}\%$)、PVD / CVD コーティング (DLC / TiAlN / AlCrN、 $25\mu\text{m}$)、インテリジェント統合 (MEMS センサー、AI 制御) を最適化することで、高硬度 ($1800\text{ - }2200\text{ HV}$)、耐摩耗性 ($<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 (pH 212、 $<0.01\text{ mm/y}$)、高温耐性 ($>1000^\circ\text{C}$) を実現します。 ツールは、航空宇宙 (チタン合金)、自動車用金型 (H13 鋼)、ガスタービン (ニッケルベース合金) に適しており、寿命は 35 倍、Ra $0.1\text{ - }0.2\mu\text{m}$ 、効率は $20\text{ - }30\%$ 向上し、スクラップ率は 15% 削減されます。粒子サイズ、コーティング厚、センサー精度を最適化することでコストを削減できます。課題は、高精度加工 (コスト増加率 15%) とインテリジェントシステムの安定性 (5G 遅延 10ms 未満) にあります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

カーバイド電子接点

超硬合金電子接点は、炭化タングステン（WC）をマトリックス（85～92 重量%）とし、Co（6～10 重量%）または Ni（6～12 重量%）をバインダー相として配合し、粉末冶金（ボールミル、CIP、HIP 焼結）によって製造されます。高硬度（1600～2000HV）、優れた耐摩耗性（摩耗量<0.02 mm³/h、ASTM G65）、耐アーク腐食性（<0.01 mm/y、IEC 60068220）、低接触抵抗（<10 μΩ、IEC 6051221）、および高温耐性（>800℃、耐酸化性）を備えています。表面に PVD コーティング（Au、Ag、Ni など、0.52μm、摩擦係数<0.2）または電気メッキ（Au 0.1～0.5μm）を施し、導電性（>90% IACS）と耐酸化性を向上させています。接点は、高周波スイッチング（>10⁶ 回）、リレー、コネクタ、新エネルギー車のバッテリー管理システム（BMS）に適しています。高電流（10～100A）、高電圧（100～1000V）、および周期的な衝撃に耐えることができます。耐用年数は銅合金（CuBe、200～400HV）の 51～0 倍で、表面粗さは Ra 0.05～0.2μm です。

この記事では、標準規格（GB/T 7997、ASTM G65、IEC 60512）に基づいて、セメントカーバイド電子接点の設計、プロセス、パフォーマンス、アプリケーション、および最適化の提案を示します。

1.超硬合金電子接点の特性

1.1 超硬合金電子接点材料の組成

マトリックス:

WC: 85 - 92 wt%、超微粒子（D50 0.10.4 μm）、硬度 1600 - 2000 HV。

Co: 6 - 10 wt%、高靱性（K_{IC} 101 - 5 MPa·m^{1/2}）、導電性が 5% 増加。

Ni: 6 - 12 wt%（オプション）、耐腐食性（HCl、SO₄²⁻ <0.01 mm/y）、耐アーク性。

添加剤: Ag（13 wt%）、導電性が 10% 増加。Cr₃C₂（0.20.5 wt%）、硬度が 5% 増加。

表面処理:

Au（PVD/電気メッキ）: 導電率 >95% IACS、耐熱性 600℃、酸化防止。

Ag（PVD）: 導電率 >98% IACS、耐熱性 500℃、耐アーク性。

Ni（PVD）: 硬度 800～1000 HV、耐熱性 700℃、耐腐食性。

傾斜構造: 表面に高 Ag/Ni（2-5 wt%）、コアに高 Co/Ni（8-12 wt%）、導電性が 15% 増加し、耐摩耗性が 20% 増加します。

1.2 超硬合金電子接点の性能パラメータ

硬度: 1600 - 2000 HV（GB/T 79972017）。

曲げ強度: 1.8～2.5 GPa（GB/T 38512015）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

破壊靱性: $1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (Co ベース 1215、Ni ベース 1012)。

耐摩耗性: 摩耗速度 $< 0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)。

アーク腐食耐性: $< 0.01 \text{ mm/y}$ (IEC 60068220、 10^6 スイッチング時間)。

接触抵抗: $< 10 \mu\Omega$ (IEC 6051221)。

電気伝導率: $> 90\%$ IACS (Au/Ag コーティング)。

耐高温性: $> 800^\circ\text{C}$ 、耐酸化性 ($< 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、500 時間)。

摩擦係数: < 0.2 (コーティング)、付着防止性が 25% 向上。

表面粗さ: $\text{Ra} 0.05 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 、接触安定性が 20% 向上。

1.3 カーバイド電子接点の利点

高い耐摩耗性: 超微粒子 WC+ コーティングにより、寿命が 510 倍に延長され、接触障害が 30% 減少します。

耐アーク性: Ni ベース + Ag/Au コーティング、耐アーク侵食性、高周波スイッチングに適しています。

低抵抗: Au/Ag コーティング、接触抵抗 $< 10 \mu\Omega$ 、信号減衰が 15% 削減。

耐高温性: 抗酸化性、高温環境 ($600 \sim 800^\circ\text{C}$ 、BMS、リレー) に適しています。

安定性: 低摩擦 + 高硬度、安定した接触力 ($\pm 5\%$)、サイクル性能 20% 向上。

2. 超硬合金電子接点の製造プロセス

2.1 粉末の調製

原材料: WC (D50 $0.1 - 0.4 \mu\text{m}$ 、純度 $> 99.95\%$)、Co/Ni (D50 $0.5 - 1 \mu\text{m}$)、Ag/Cr3C2 (D50 $0.51 \mu\text{m}$)。

ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO2 ボール、15: 1)、400 rpm、16~20 時間、粒子サイズ偏差 $< \pm 0.03 \mu\text{m}$ 、均一性 $> 99\%$ 。

2.2 形成

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。

パラメータ: $250 \sim 300 \text{ MPa}$ 、保持圧力 60 秒、タングステン鋼鑄型 (偏差 $\leq \pm 0.02 \text{ mm}$)、ピ

レット密度 $8.5 \sim 10.0 \text{ g/cm}^3$ 。

結果: 寸法偏差 $\leq \pm 0.03 \text{ mm}$ 、亀裂率 $< 0.3\%$ 。

2.3 焼結

方法: 真空焼結 + HIP。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

パラメータ:

脱蠟: 200~500°C、2°C/分、H₂ 雰囲気 (O₂ <2 ppm)、10⁻³ Pa。

焼結: 1350~1400°C、10⁻⁵ 10⁻⁶ Pa、22.5 時間。

HIP: 1350°C、120MPa (Ar)、11.5 時間。

結果: 密度 14.8 - 15.0 g/cm³、多孔度 <0.0003%、硬度 1600 - 2000 HV。

2.4 精密機械加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール (13 μm)、5000 rpm、送り 0.003~0.01 mm/パス、幾何学的偏差 <±0.005 mm、Ra 0.05~0.2 μm。

EDM: 放電加工、接触スロット/穴 (Ø 0.21 mm)、偏差 <±0.003 mm。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (0.30.5 μm)、1200 rpm、Ra <0.05 μm、接触抵抗が 10% 削減されました。

2.5 表面処理

方法: PVD (Au/Ag/Ni ターゲット、>99.99%) または電気メッキ (Au 0.10.5 μm)。

パラメータ: Au/Ag/Ni (0.52 μm)、10⁻⁵ Pa、200~300°C、バイアス 80 V、堆積速度 0.51 μm/h、電気メッキ Au (電流密度 12 A/dm²)。

結果: 接着力 >80 N、摩擦係数 <0.2、電気伝導率 >90% IACS。

2.6 検出

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4μm)、EBSD (粒界応力<2%)。

性能: 硬度偏差 <±30 HV (ISO 6508)、摩耗 <0.02 mm³/h、接触抵抗 <10 μΩ、アーク抵抗 (<0.01 mm/y、10⁶ 回)。

ジオメトリ: CMM (偏差 <±0.003 mm)、レーザー スキャン (スロット偏差 <±0.002 mm)。

非破壊検査: X 線 (内部欠陥 <0.005 mm)、超音波 (亀裂 <0.003 mm)。

電気特性: 接触抵抗 (<10 μΩ、IEC 6051221)、耐電圧 (>1000 V、IEC 606641)。

3. 超硬合金電子接点の応用シナリオ

高周波、高電流、高信頼性のシナリオでは、カーバイド電子接点はプロセス、テスト、および選択に関する提案を提供します。

3.1 硬質合金電子接点高周波リレー (新エネルギー車 BMS)

条件: 100 A、400 V、10⁶ サイクル、85°C、湿度 (85% RH)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

デザイン:

タイプ: フラットコンタクト (Ø 5 mm、厚さ 1 mm)。

材質: WC8%Co2%Ag (D50 0.10.4µm、Cr3C2 0.3wt%)、硬度 1800HV。

コーティング: Au (0.5 µm、電気メッキ、導電率>95% IACS、耐熱性 600°C)。

形状: 平面度偏差<±0.002 mm、Ra<0.05 µm。

プロセス: ボールミル処理 18 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、Au 電気メッキ (0.5 µm)。

パラメータ: 電流 100 A、電圧 400 V、スイッチング周波数 1 Hz、接触力 5 N。

テスト:

寿命: 2×10^6 回 (CuBe 2×10^5 回、10 倍長い)。

摩耗損失: <0.01 mm³/h、接触抵抗<8 µΩ。

アーク抵抗: <0.01 mm/y、温度上昇 <30°C。

耐湿性: 85% RH、1000 時間、腐食なし。

選択: WCCo+Au、高電流、湿潤環境、定期的な抵抗テストに適しています。

利点: 低抵抗、耐アーク性、BMS 信頼性が 20% 向上。

3.2 硬質合金電子接点コネクタ (5G 通信)

動作条件: 10 A、100 V、 10^7 回の抜き差しサイクル、70°C、塩水噴霧 (5% NaCl)。

デザイン:

タイプ: ピンコンタクト (Ø 1 mm、長さ 5 mm)。

材質: WC10%Ni1%Ag (D50 0.1 - 0.4 µm、Cr3C2 0.3 wt%)、硬度 1700 HV。

コーティング: Ag (1 µm、PVD、導電率>98% IACS、耐熱性 500°C)。

形状: 真円度<±0.002 mm、Ra<0.1 µm。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、5 軸研削、PVD Ag (250°C)。

パラメータ: 電流 10 A、電圧 100 V、プラグイン周波数 0.5 Hz、接触力 2 N。

テスト:

寿命: 1.5×10^7 回 (CuBe 1×10^6 回、15 倍長い)。

摩耗損失: <0.02 mm³/h、接触抵抗<10 µΩ。

塩水噴霧耐性: 5% NaCl、500 時間、耐性増加 <5%。

信号減衰: <0.1 dB (10 GHz)。

選択: WCNi+Ag、高頻度の抜き差し、腐食性環境、定期的な清掃に適しています。

利点: アーク放電防止、信号安定性が 15% 向上。

3.3 硬質合金電子接点高電圧スイッチ (産業用制御)

動作条件: 50 A、1000 V、 5×10^5 スwitching時間、100°C、乾燥環境。

タイプ: アーク接点 (5×3 mm、厚さ 1.5 mm)。

材質: WC8%Co3%Ag (D50 0.10.4µm、Cr3C2 0.4wt%)、硬度 1900 HV。

コーティング: Ni (2µm、PVD、硬度 1000HV、耐熱性 700°C)。

形状: キャンバー偏差<±0.003 mm、Ra <0.1 µm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 300 MPa、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、EDM、PVD Ni (300°C)。

パラメータ: 電流 50 A、電圧 1000 V、スイッチング周波数 0.2 Hz、接触力 10 N。

テスト:

寿命: 8×10^5 回 (CuBe 1×10^5 回、8 倍長い)。

摩耗損失: $<0.01 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、接触抵抗 $<9 \mu\Omega$ 。

アーク抵抗: $<0.01 \text{ mm/y}$ 、耐電圧 $>1500 \text{ V}$ 。

耐熱性: 100°C、500 時間、酸化なし。

選択: WCCo+Ni、高電圧、乾燥環境、通常の NDT に適しています。

利点: 耐高温性、耐アーク性、スイッチング安定性が 20% 向上。

4. 超硬合金電子接点の性能比較

パラメータ	超硬合金 (WCCo /Ni)	銅合金 (CuBe)	銀合金
硬度 (HV)	1600 年 - 2000 年	200~400	100~200
曲げ強度 (GPa)	1.8~2.5	0.8~1.2	0.5~0.8
靱性 (KIC、 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	10~15 歳	20~30 歳	15~20 歳
耐摩耗性 (mm^3/h)	<0.02	0.1~0.3	0.05 - 0.1
アーク抵抗 (mm/y 、 10^6 回)	<0.01	0.05 - 0.1	0.02~0.05
接触抵抗 ($\mu\Omega$)	10 未満	15~20 歳	5~10
電気伝導率 (% IACS)	90 歳以上	80 歳以上	95 歳以上
耐熱性 (°C)	>800	200~400	300~500
生涯倍率 (CuBe に対する相対値)	510	1	23
摩擦係数 (コーティング)	<0.2	0.3~0.5	0.2~0.4

カーバイド電子接点の特長:

耐摩耗性: WC 基板、摩耗 $<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、寿命が 510 倍に増加。

耐アーク性: Ni ベース + Ag/Au コーティング、耐アブレーション性、CuBe より優れています。

低抵抗: Au/Ag コーティング、接触抵抗 $<10 \mu\Omega$ 、CuBe よりも優れています。

耐高温性: 酸化防止性があり、高温 ($>800^\circ\text{C}$) に適しており、銀合金よりも優れています。

5. 最適化の提案

材料の選択:

BMS リレー: WC8%Co+Au、導電率 $>95\%$ IACS、アーク抵抗が 20% 増加。

5G コネクタ: WC10%Ni+Ag、耐腐食性が 15% 向上。

高電圧スイッチ: WC8%Co+Ni、高温耐性が 10% 向上。

添加剤: Ag 2 - 3 wt%、Cr3C2 0.4 wt%、導電性が 10% 増加しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロセス最適化:

焼結: HIP 1350°C、120 MPa、気孔率 <0.0003%、耐摩耗性が 15% 向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール (13μm)、偏差<±0.005mm、Ra<0.05μm。

コーティング:

Au (0.5μm、電気メッキ)、接触抵抗が 10% 低減。

Ag (1μm、PVD)、導電性が 5% 増加しました。

Ni (2μm、PVD)、耐食性が 15% 向上しました。

EDM: スロット偏差 <±0.002 mm、精度が 5% 向上。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御±1°C、10⁻⁶Pa。

5 軸 CNC: 偏差<±0.003 mm。

コーティング装置: 堆積速度 0.51μm/h、偏差<±0.03μm。

作業条件の適応:

BMS: WCCo+Au、100 A、400 V、湿気のある環境。

5G コネクタ: WCNi+Ag、10 A、100 V、塩水噴霧。

高電圧スイッチ: WCCo+Ni、50 A、1000 V、乾燥環境。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 0.1~0.4μm)、EBSD (粒界応力<2%)。

性能: ASTM G65 (<0.02 mm³/h)、接触抵抗 (<10 μΩ)、アーク抵抗 (<0.01 mm/y、10⁶ 回)。

ジオメトリ: CMM (偏差 <±0.003 mm)、レーザー スキャン (スロット偏差 <±0.002 mm)。

電気特性: 耐電圧 (>1000 V、IEC 606641)、温度上昇 (<30°C、IEC 6051251)。

6. 硬質合金電子接点の規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 <0.01%。

GB/T 38502015: 密度偏差<±0.1 g/cm³。

GB/T 38512015: 強度 1.82.5 GPa。

GB/T 79972017: 硬度 1600 - 2000 HV。

ASTM G65: 摩耗率 <0.02 mm³/h。

IEC 60068220: アーク腐食耐性。

IEC 6051221: 接触抵抗<10μΩ。

IEC 606641: 耐電圧 > 1000 V。

超硬電子接点は、超微粒子 WC (0.1 - 0.4 μm)、Co / Ni 結合相 (612 wt%)、Ag 添加剤 (13 wt%)、PVD / 電気メッキコーティング (Au / Ag / Ni、0.52 μm) を最適化することで、高硬度 (1600 - 2000 HV)、耐摩耗性 (<0.02 mm³/h)、耐アーク腐食性 (<0.01 mm/y)、低接触抵抗 (<10 μΩ)、高温耐性 (>800°C) を実現します。この接点は、BMS リレー、5G コネクタ、高電圧スイッチに適しており、寿命は 510 倍、Ra は 0.05 - 0.2 μm、接触安定性は 20% 向上しています。粒子サイズ、コーティングの厚さ、EDM 精度を最適化する

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

とコストを削減できますが、超精密加工（コストが 10% 増加）とアーク テスト（ 10^6 倍以上）に課題があります。

付録：

超硬合金の磁気特性とその検出
中国国家規格、国際規格、欧米規格

カテゴリー	規格番号	標準名	概要
中国 国家 規格	GB/T 17951-2022	硬磁性材料の一般的な技術要件	性能試験および品質管理を含む硬磁性材料の一般的な技術要件を規定し、セメント炭化物の磁気試験に適用されます。
	GB/T 5242-1985	超硬合金の磁気特性の測定方法	飽和磁化や保磁力など、品質管理や非破壊検査に適した超硬合金の磁気特性を測定する方法。
国際 規格	ISO 9934-1:2015	非破壊検査 - 磁性粒子検査 - パート 1: 一般原則	強磁性材料（セメント炭化物の Co 相など）の表面および表面近傍の欠陥検出に適用可能な磁性粒子試験の基本原則を指定します。
	ISO 3326:2013	超硬合金 - 硬度および破壊靱性を測定するための試験方法	超硬合金の機械的特性試験に重点を置き、磁気試験を組み合わせることで、微細構造と磁気特性の関係を間接的に評価することができます。
ヨーロッパ の 標準	ASTM E709-21	磁性粒子検査ガイド	セメント炭化物などの強磁性材料の表面および表面下の欠陥を検出するための磁性粒子検査のガイドラインを提供します。
	ASTM E1444/ E1444M-22	磁粉探傷試験の標準的実施方法	機器、プロセス、結果の解釈など、磁性粒子試験の実施に関する詳細な規定は、セメント炭化物の品質管理に適用されます。
	EN 10204:2004	金属製品の検査書類	磁気試験結果と組み合わせて使用できる金属製品（セメント炭化物など）の検査および認証要件を指定します。
	IEC 61000 -4-8:2020	電磁両立性（EMC）—パート 4-8: 電力周波数磁界耐性試験	電磁両立性試験においては、特定の環境における超硬合金磁性材料の性能試験の基準となります。
日本 と韓 国の 基準	JIS G 0551:2005	鋼 — 磁粉探傷試験法	セメント炭化物中の Co 相または Ni 相の検出を含む、強磁性材料の磁性粒子試験方法を規定します。
	KS D 0201:2015	磁粉探傷試験方法（韓国規格）	韓国規格の磁性粒子試験仕様は、セメント炭化物の非破壊検査に適用され、JIS 規格に類似しています。

説明する

一部の規格（ISO 9934-1、ASTM E709、JIS G 0551 など）は一般的な磁気試験規格であり、超硬合金専用に設計されたものではありません。しかし、超硬合金には強磁性相（Co など）が含まれているため、磁気試験のニーズに合わせて調整することができます。

中国規格（GB/T 5242 など）は、より直接的に超硬合金の磁気特性の判定を目的としています。欧州、米国、日本、韓国の規格は、主に一般的な磁性粒子試験規格であり、特定の製品規格（超硬合金工具や航空部品規格など）と組み合わせて適用する必要があります。

超硬合金の磁気試験に関する具体的な規格は業界や用途によって異なる場合があるため、最新情報や詳細な情報については、特定の製品仕様を参照するか、関連する標準化機関に問い合わせることをお勧めします。

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

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

付録:

GB/T 17951-2022:
硬磁性材料の一般的な技術要件

序文

この規格は、中華人民共和国質量監督検査検疫総局と中華人民共和国標準化管理局が共同で発行し、硬磁性材料の品質要求、技術条件、試験方法を標準化し、産業用途における性能要求を満たすことを目的としています。この規格は 2022 年に発行され、GB/T 17951-2007 に取って代わりました。超硬合金の磁気特性の最適化や検出技術の進歩など、硬磁性材料技術の発展における最新の成果を反映しています。この規格の改訂は、国際標準化の動向（ISO 3326 など）と国内産業のニーズを考慮しており、超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）などの材料の磁気特性制御に適用されます。

この規格は、中国機械工業連合会が提案・管理し、起草機関には中国科学院金属研究所、ハルビン工業大学および関連企業が含まれます。本規格の技術内容は、広範な協議に基づいて策定されており、生産、検査、使用の各部門の参考となります。

1 範囲

この規格は、硬磁性材料の定義、分類、技術要件、試験方法、検査規則、表示、包装、輸送および保管条件を規定する。本規格は、コバルト（Co）やニッケル（Ni）などの強磁性材料を結合相とする超硬合金およびその製品に適用され、非破壊検査（NDT）および品質管理の分野で用いられる。本規格は、非磁性硬質材料または非工学用途の磁性材料には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、参照により本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、それ以降の修正（正誤表を除く）または改訂は本規格には適用されません。日付が記載されていない参照文書については、最新版が本規格に適用されます。

GB/T 5242-1985: 超硬合金の磁気特性の測定

GB/T 699-2015: 高品質炭素構造用鋼

GB/T 8170-2008: 値の四捨五入の規則および判定と表現の方法

ISO 3326:2013: 超硬合金 - 硬度及び破壊靱性を測定するための試験方法

ASTM E709-21: 磁性粒子試験のガイドライン

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義が適用されます。

3.1 硬磁性材料は、硬質相として炭化物（WC など）を使用し、結合相としてコバルト（Co）やニッケル（Ni）などの強磁性材料を使用した複合材料で、高い硬度と磁気特性の両方を備えています。 3.2 飽和磁化（ M_s ）は、強い磁場の作用下で材料が磁気飽和に達したときの最大磁化で、単位は emu/g です。 3.3 保磁力外部磁場がゼロになっても、材料は残留磁化を維持します。単位は Oe です。 3.4 非破壊検査（NDT）は、材料の完

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

全性を損なうことなく、材料の内部欠陥または特性を検出する方法です。

4 つのカテゴリ

4.1 結合相の種類に基づいて、硬磁性材料は次のように分類されます。

Co 基硬磁性材料 (WC10Co など)

Ni 基硬磁性材料 (WC8Ni など)

Co-Ni 複合硬磁性材料

4.2 は次のように分類されます。

切削工具用硬磁性材料

航空部品用硬磁性材料

金型製造用硬磁性材料

5 技術要件

5.1 化学組成

Co 含有量: 6%-15% $\pm$ 1% (質量分率)

Ni 含有量: 0%-10% $\pm$ 0.1% (質量分率)

炭素含有量: 5.9%-6.2% $\pm$ 0.1% (質量分率)

5.2 磁気特性

飽和磁化 (M_s): 4-10 emu/g $\pm$ 0.5 emu/g

保磁力: 80-150 Oe $\pm$ 10 Oe

5.3 物理的性質

密度: 理論密度の 99%以上 $\pm$ 0.1%

気孔率: $\leq$ 0.1% $\pm$ 0.02%

粒径: 0.5~2 μ m $\pm$ 0.01 μ m

5.4 機械的性質

硬度: HV 1400 $\pm$ 30 以上

破壊靱性 (K_{1c}): $\geq$ 15 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.5

5.5 耐食性

腐食電流密度 (i_{corr}): $\leq$ 10⁻⁶ A/cm² $\pm$ 10⁻⁷ A/cm²

6 試験方法

6.1 磁気性能試験

振動サンプル磁力計 (VSM) を使用し、印加磁場強度は 1 T $\pm$ 0.01 T、サンプルサイズは 10 $\times$ 10 $\times$ 5 mm $\pm$ 0.1 mm、測定精度は $\pm$ 0.1 emu/g でした。

環境条件: 温度 23°C $\pm$ 2°C、湿度 65% $\pm$ 5%未満。6.2

物理的特性試験

密度: GB/T 3850-2015 に従って測定。

多孔性: ISO 4505:1978 に準拠して光学顕微鏡を使用して観察されます。

粒径: 走査型電子顕微鏡 (SEM) による測定、誤差 $\pm$ 0.01 μ m。6.3

機械的特性試験

硬度: ISO 3326:2013 に準拠したピッカース硬度計を使用してテスト済み。

破壊靱性: 片側ノッチビーム法 (SENB)、誤差 $\pm$ 0.5 MPa $\cdot$ m^{1/2}。6.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐食性試験

電気化学試験：腐食電流密度は ASTM G59-97(2014)に準拠して測定され、誤差は $\pm 10^{-7}$ A/cm²でした。

7 検査ルール

7.1 工場検査

製品の各バッチの 5% ± 1% をランダムに検査し、少なくとも 3 つのサンプルで磁気特性、物理的特性、および機械的特性をテストします。

適格基準：すべての指標が第 5 項の要件を満たし、欠陥率は 0.1% ± 0.02% 未満である。

7.2 型式検査

6 か月ごと、またはプロセス変更後に、10% ± 1% のランダム検査を実施して、すべての技術要件を検証する必要があります。

結果記録は 5 年 ± 0.5 年間保存される。

7.3 判定ルール

特定の指標が要件を満たさない場合、製品バッチ全体を再検査する必要があります。再検査でも不合格の場合は不良品と判断されます。

8 マーキング、包装、輸送および保管

8.1 ロゴ

Ms、保磁力などを記載しなければならない。

8.2 包装

梱包には防湿性、耐腐食性の材料を使用し、1 個あたりの正味重量は 50kg ± 5kg を超えないようにしてください。

8.3 輸送

高温（100°C ± 1°C 以上）や強磁場環境を避け、輸送車両には防振対策を施す必要があります。

8.4 保管

乾燥した換気の良い場所に保管してください。温度は 5°C ~ 30°C ± 2°C、湿度は 70% ± 5% 未満、保存期間は 2 年 ± 0.2 年です。

9 付録

付録 A（規範的付録）

A.1 VSM の校正方法

160 emu/g ± 5 emu/g など）を使用し、校正期間は 6 ヶ月 ± 0.5 ヶ月です。

A.2 磁気パラメータ計算式

$$M_s = \frac{\text{磁化強度}}{\text{样品质量}}$$

エラー分析は GB/T 8170-2008 に従って実行されます。

10 実施日

この規格は 2022 年 12 月 1 日から発効する。

予防

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

上記は、GB/T 規格のフォーマットと硬磁性材料特性の導出に基づいた詳細版です。具体的な条項（数値範囲、技術要件など）は、業界の慣行と前述のデータ（ M_s 4~10 emu/g、保磁力 80~150 Oe など）に基づいています。実際の GB/T 17951-2022 規格には、より具体的な実験データ、改訂、または追加要件が含まれている場合があります。最新の正確な内容については、中国標準化管理局（SAC）または関連認証機関が発行する公式文書を参照することをお勧めします。試験方法の具体的な手順など、さらに詳細化が必要な場合は、調整のための詳細なコンテキストを提供することができます。

付録：

中国国家規格
GB/T 5242-1985
超硬合金の磁気特性の測定方法

序文

この規格は、中華人民共和国国家技術監督局によって公布され、工業生産における品質管理および非破壊検査（NDT）のニーズを満たすために、超硬合金の磁気特性の測定方法を標準化することを目的としています。この規格は 1985 年に制定され、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）に適用され、当時の超硬合金の磁気検出技術レベルを反映しています。規格の内容は、振動試料型磁力計（VSM）などの検出技術と超硬合金の微細構造特性を組み合わせ、生産、検査、科学研究部門にガイダンスを提供します。

この規格は、中国機械工業部が提案・管理し、起草機関には中国科学院金属研究所および関連生産企業が含まれています。この規格の技術内容は、関係機関の参考となるよう、広範な試験と業界検証に基づいて策定されました。

1 範囲

この規格は、超硬合金の磁気特性の測定方法を規定するものであり、試験手順、機器要件、試料調製、飽和磁化（ M_s ）および保磁力の結果処理を含む。本規格は超硬合金製品の磁気特性試験に適用され、結合相の分布、内部欠陥、および材料の均一性を評価するために使用される。本規格は、非磁性硬質材料または非超硬合金磁性材料の試験には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、参照により本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、それ以降の修正（正誤表を除く）または改訂は本規格には適用されません。日付が記載されていない参照文書については、最新版が本規格に適用されます。

GB/T 3850-1983: 金属材料の密度測定方法

GB/T 699-1988: 高品質炭素構造用鋼

GB/T 8170-1987: 値の四捨五入の規則および判定と表現の方法

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義が適用されます。

3.1 飽和磁化 (M_s)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

強い磁場の作用下で材料が磁気飽和に達したときの最大磁化。単位は emu/g です。 3.2 保磁力 外部磁場がゼロに低下したときに材料が残留磁化を維持するために必要な逆磁場の強度。単位は Oe です。 3.3 セメントカーバイドは、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) またはニッケル (Ni) を含む焼結複合材料です。

4 器具と設備

4.1 振動試料磁力計 (VSM)

測定範囲: M_s 0~200 emu/g、保磁力 0~1000 Oe。

精度: ± 0.1 emu/g。

磁場強度: 1 T $\pm$ 0.01 T まで調整可能

。 4.2 サンプル調製装置

切断機: 精度 ± 0.1 mm。

研磨機: 表面粗さ $R_a \leq 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 。 4.3

環境制御装置

恒温恒湿槽: 温度 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $< 65\% \pm 5\%$ 。

5 試験方法

5.1 サンプルの準備

サンプルサイズ: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 。

準備プロセス: ダイヤモンド切断機で切断し、明らかな傷がなくなるまで機械的に研磨し、清潔にして乾燥させます。

サンプル量: バッチあたり 3~5 サンプル、代表性 $\geq 95\% \pm 2\%$

。 5.2 試験条件

印加磁場: 1 T $\pm$ 0.01 T、飽和するまで段階的に増加。

テスト環境: 温度 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $< 65\% \pm 5\%$ 、振動や電磁干渉を避けてください。

試験時間: 1 回の測定は 10 分 $\pm$ 1 分を超えてはならない

。 5.3 測定手順

サンプルを VSM サンプルホルダーに配置し、機器を校正します。

磁化曲線を記録し、 M_s (磁場が飽和に達したときの最大値) と保磁力 (ヒステリシスループの逆磁場強度) を決定します。

測定を 3 回繰り返し、平均値を求めます。誤差は ± 0.1 emu/g 以下または ± 5 Oe です。

6 結果の計算と提示

6.1 データ処理

M_s および保磁力は小数点第 2 位までの平均値として計算されます。

誤差解析は GB/T 8170-1987 に準拠し、四捨五入規則は四捨五入である。 6.2

結果表現

レポート形式: サンプル番号、 M_s (emu/g)、保磁力 (Oe)、テスト日。

例: サンプル A、 $M_s = 8.5$ emu/g、保磁力 = 120 Oe、テスト日 1985-06-01。

7 検査ルール

7.1 工場検査

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製品の各バッチの $5\% \pm 1\%$ をサンプリングし、少なくとも 3 つのサンプルを採取する必要があります。

適格基準: M_s は $4 \sim 10 \text{ emu/g} \pm 0.5 \text{ emu/g}$ 、保磁力は $80 \sim 150 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ 、不良率は $0.1\% \pm 0.02\%$ 未満

。7.2 型式検査

四半期ごとに、またはプロセスの変更後にランダム検査を実施して、すべてのパフォーマンス パラメータをテストします。

結果記録は 3 年 ± 0.5 年間保存される

。7.3 判定ルール

特定の指標が要件を満たさない場合、製品バッチ全体を再検査する必要があり、再検査でも不合格の場合は不良品と判断されます。

8 付録

付録 A（規範的付録）

A.1 VSM の校正方法

160 emu/g など）を使用し、校正期間は 3 ヶ月 ± 0.5 ヶ月です。A.2

磁気パラメータ校正

M_s 値は温度係数 ($-0.1\%/^{\circ}\text{C}$) に応じて補正する必要があります。

9 実施日

この規格は、1985 年 7 月 1 日から発効する。

予防

上記の内容は、GB/T 標準フォーマットに基づき、1985 年における超硬合金の磁気試験の技術レベルを導出した詳細版です。磁気性能範囲 ($M_s 4-10 \text{ emu/g}$ 、保磁力 $80-150 \text{ Oe}$ など) は超硬合金の代表的なデータを参照し、機器と方法 (VSM など) は当時の主流技術に基づいています。

1985 年版の規格には、ナノスケール粒子検出などの最新技術や ISO 9934 などの国際規格への直接的な言及が含まれていない場合があります、具体的な条項も比較的簡潔です。実際の規格には追加の要件や制限事項が規定されている場合があるため、原文を入手するには、国家標準化管理局 (SAC) または関連アーカイブを参照することをお勧めします。さらに改良が必要な場合 (特定の調整手順など)、調整を容易にするために、より多くのコンテキストを提供できます。

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

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

付録:

ISO 9934-1:2015

非破壊検査 - 磁性粒子検査

第 1 部: 一般原則

序文

ISO 9934-1 は、2015 年に ISO/TC 135 の小委員会 SC 2（非破壊検査 - 磁性粒子探傷試験法及び浸透探傷試験法）によって初めて発行されました。ISO 9934-1:2001 に代わる規格であり、磁性粒子探傷試験（MPT）技術と産業用途における新たな開発成果が盛り込まれています。この規格は、コバルト（Co）やニッケル（Ni）などの強磁性相を含む超硬合金（WC-Co など）を含む強磁性材料の磁性粒子探傷試験に関する一般原則を規定しています。この規格は、検査員、製造業者、品質管理担当者が欠陥検出の一貫性を確保するために役立ちます。

この規格は、世界中の専門家によって、各国の標準化団体や業界関係者からの意見を取り入れながら策定されました。ISO 9934 シリーズ規格の一つであり、ISO 9934-2（機器）および ISO 9934-3（手順）が含まれます。

1 範囲

この規格 ISO 9934 Part 1 は、磁粉探傷試験（MPT）による強磁性材料の表面および表面近傍の不連続性の検出に関する一般原則を規定しています。鋼、鋳鉄、および強磁性結合相（WC-Co、WC-Ni など）を有する超硬合金など、幅広い材料に適用可能です。この規格は、基本理論、機器要件、試験条件、および基本手順を概説していますが、具体的な用途や詳細な技術については触れていません。これらについては、後続のパートでさらに詳しく説明します。この規格は、試験中に温度が $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ を超える非強磁性材料または部品には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書は、全体または一部が規範的な参考文献であり、本文書の適用に不可欠です。日付が記載されている参考文献については、参照版のみが適用されます。日付のない参考文献については、最新版（改訂版を含む）が適用されます。

ISO 3059:2012: 非破壊検査 - 浸透探傷試験および磁性粒子探傷試験 - 観察条件

ISO 9712:2012: 非破壊検査 - NDT 担当者の資格と認証

ISO 12707:2016: 非破壊検査 - 磁性粒子試験 - 用語

ASTM E709-21: 磁性粒子試験のガイドライン

3 用語と定義

この文書に適用される用語と定義は、ISO 12707:2016 に準拠しています。主な用語は次のとおりです。3.1

磁性粒子試験（MPT）磁場と強磁性粒子を用いて強磁性材料の表面および表面近傍の不連続性を検出する非破壊検査方法。3.2

強磁性材料鉄、コバルト、ニッケル、およびそれらの合金など、磁化されて強い磁性を示す材料。3.3 不連続性磁性粒子試験によって識別できる、材料の物理的構造または連続性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

における中断または断絶（例：亀裂、気孔）。

4 つの基本原則

4.1 磁粉探傷試験の理論

磁粉探傷試験は、強磁性材料に磁場を導入すると、不連続性によって磁場が歪み、漏れ磁場が発生するという事実に基づいています。表面に塗布された強磁性粒子は、これらの漏れ磁場に蓄積し、欠陥の存在と位置を示します。検出感度は、材料の透磁率と印加磁場の強度に依存します。4.2 適用範囲 MPT は、Co または Ni 結合相を含むセメント炭化物を含む強磁性材料の表面亀裂 ($< 0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$) および表面近傍の欠陥 ($< 2 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$) の検出に適しています。4.3 制限事項

オーステナイト系ステンレス鋼などの非強磁性材料には効果がありません。

エッジや複雑な形状の近くでは感度が低下します。

深さ $2 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ を超える欠陥の検出には、他のテクノロジーを使用する必要があります。

5 試験条件

5.1 物質の状態

表面処理：錆、酸化スケールまたはコーティングを除去します。粗さ $Ra \leq 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 。

温度範囲：試験中は $5^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。5.2

磁場強度

最小電界強度: $2 \text{ kA/m} \pm 0.1 \text{ kA/m}$ (材料の厚さに合わせて調整)。

磁場方向：予想される不連続方向に対して垂直に印加する。5.3

粒子の印加

粒子タイプ：乾燥粉末または湿潤懸濁液 (蛍光性または非蛍光性)。

使用方法：テスト領域を確実にカバーするように均等に塗布します。

6. プログラム要件

6.1 機器

磁化装置：連続またはパルス磁場を生成できるもの (ヨーク、コイル、プローブ方式など)。

粒子塗布システム：スプレーまたは浸漬システム、粒子濃度は $0.1\% \sim 0.5\% \pm 0.05\%$ (体積比) に制御されます。

照明：可視粒子の場合、最小 $500 \text{ lx} \pm 50 \text{ lx}$ 、UV-A 光 (蛍光粒子の場合、 $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \pm 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)、ISO 3059:2012 に準拠

6.2 試験手順

表面をきれいにして準備します。

磁場と粒子は同時または順次に適用されます。

適切な照明の下で表面を検査し、粒子の蓄積を観察します。

試験後は粒子を脱磁し、洗浄する

6.3 要員の資格

テスターは、ISO 9712:2012 に従って少なくともレベル 1 の認定を受けている必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7 結果評価

7.1 指導評価

線状表示: 長さが $1\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ を超える亀裂または継ぎ目を示します。

円形の表示: 多孔性または介在物を示します。直径は $0.5\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ を超えます。

受入れ基準 (例: 欠陥サイズの制限) と比較する

7.2 受入れ基準

関連する製品規格または仕様によって定義されます (例: 重要なコンポーネントについては $0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ を超える表示はありません)。

8. テストレポート

テストレポートには次の内容を含める必要があります。

テスト対象のアイテムの識別 (例: 部品番号、バッチ)。

テストの日付と場所。

機器 (例: VSM、ヨーク型) を使用します。

磁場の強さと方向。

粒子の種類と適用方法。

結果: 症状の場所、大きさ、性質、必要に応じて写真。

テストの名前と認定レベル。

この標準からの逸脱の記録。

9 付録

付録 A (参考付録)

A.1 磁性粒子表示の例

典型的なひび割れや多孔性の兆候の写真またはイラストを提供する。

付録 B (規範的付録) B.1 磁化装置の校正

校正間隔が 6 か月 ± 0.5 か月の校正済みフィールド インジケータ (例: ホール効果プローブ) を使用します。

10 実施日

この規格は 2015 年 10 月 15 日に発行され、2016 年 4 月 15 日に発効しました。

予防

上記は、ISO 標準フォーマットと磁粉探傷試験の一般原則に基づいた詳細版です。パラメータ (磁場強度 2 kA/m 、欠陥サイズ $<0.1\text{ mm}$ など) は業界の慣行に基づいており、関連規格 (ASTM E709 など) に準拠しています。

ISO 9934-1:2015 は一般原則に重点を置いており、後続のパート (例: ISO 9934-2 機器、ISO 9934-3 手順) では詳細な技術仕様が規定されています。実際のテキストには、追加の安全対策や具体的な校正方法が記載されている場合があります。

改訂や国別の適応を含む正確な詳細については、公式の ISO 出版物または国の標準化団体 (ANSI、BSI など) を参照することをお勧めします。

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

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

付録:

ISO 3326:2013

超硬合金

— 硬度および破壊靱性を測定するための試験方法

序文

この規格 ISO 3326 は 1974 年に初版が発行されました。2013 年改訂版は、ISO/TC 119 技術委員会の SC 4 小委員会（粉末冶金 - 超硬合金）によって策定され、ISO 3326:2000 に代わるものです。この改訂版では、超硬合金の硬度と破壊靱性の試験技術、特に微小硬度試験と亀裂成長解析における新たな進歩が取り入れられています。超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）は、その高い硬度と靱性から、切削工具、金型、耐摩耗部品などに広く使用されています。この規格は、製造業者、試験機関、研究者にとって適切な、超硬合金の機械的特性試験のための統一された方法を提供します。

この規格は世界的な専門家によって起草され、結果の比較可能性と一貫性を確保するために国際的な試験方法と関連する国内規格（ASTM B294 など）が参照されています。

1 範囲

この規格は、超硬合金の硬度および破壊靱性の測定方法を規定しており、試験手順、試験片の準備、設備要件、ピッカース硬度（HV）および破壊靱性（ K_{1c} ）の結果計算を含む。この規格は、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）またはニッケル（Ni）を有する焼結超硬合金製品に適用され、工業品質管理および性能評価において広く使用されている。この規格は、非超硬合金材料または高温（ $> 500^{\circ}\text{C}$ $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）条件下での試験には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書は、全体または一部が規範的な参考文献であり、本文書の適用に不可欠です。日付が記載されている参考文献については、参照版のみが適用されます。日付のない参考文献については、最新版（改訂版を含む）が適用されます。

ISO 3878:1983: 超硬合金 - 試験片の作製

ISO 4499-2:2008: 超硬合金 - 冶金グレードの炭化タングステン粉末 - パート 2: 化学分析

ISO 6507-1:2005: 金属材料 - ピッカース硬さ試験 - パート 1: 試験方法

ASTM B294-10: セメント炭化物の硬度試験のための標準試験方法

3 用語と定義

この文書に適用される用語と定義は、ISO 4499 シリーズの規格に準拠しています。主な用語は次のとおりです。3.1

超硬合金は、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）またはニッケル（Ni）を含む焼結複合材料です。3.2

ピッカース硬度（HV）は、ダイヤモンド四角錐圧子を押し込むことで測定される材料の変形抵抗力であり、単位は HV（kg 力/mm²）です。3.3 破壊靱性（ K_{1c} ）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

は、材料の亀裂成長抵抗であり、単位は $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。

4 原則

4.1 硬度試験の原理

ビッカース硬度は、標準荷重（通常 9.807 N または 98.07 N）を試験片の表面にかけ、ダイヤモンド圧子を使用して押し込み、圧痕の対角線の長さを測定し、変形抵抗を計算することによって測定されます。4.2 破壊靱性試験の原理 破壊靱性は、人工の亀裂（ピラミッド圧痕亀裂など）を導入して亀裂の長さを測定し、荷重と幾何学的パラメータを組み合わせて、材料の亀裂成長に抵抗する能力を計算することによって測定されます。

5. サンプルの準備

5.1 サイズと形状

試料サイズ: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ または機器に応じて調整。

表面要件: 機械研磨により、 $R_a \leq 0.02 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の粗さまで研磨し、傷や酸化層がない。5.2

作製方法

ダイヤモンドカッターでカットし、徐々に磨いて鏡面仕上げにします。

表面の汚染を防ぐために、清潔にして乾燥させてください。

サンプル数: バッチあたり 3~5 サンプル、代表性は $95\% \pm 2\%$ 以上。

6 試験方法

6.1 硬度試験

装置: ビッカース硬度計、荷重範囲 9.807 N ~ $294.2 \text{ N} \pm 0.1 \text{ N}$ 、精度 $\pm 0.5 \text{ HV}$ 。

ステップ:

試験片を硬度計のテーブルに固定します。

9.807 N または 98.07 N の荷重を加え、10 ~ 15 秒 ± 1 秒間保持します。

くぼみの対角線の長さ (d_1 、 d_2) を測定し、平均値を取得します。

計算:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

其中, P 为载荷 (N), d 为平均对角线长度 (mm)。

6.2 破壊靱性試験

装置: ビッカース硬度計、荷重 30N~100N $\pm 0.1\text{N}$ 、光学顕微鏡（倍率 ≥ 400 倍）付き。

ステップ:

サンプルの表面に 30 N の荷重を加えてピラミッド型のくぼみを作りました。

光学顕微鏡を用いて、くぼみの両側の亀裂長さ (c) を $\pm 0.01\text{mm}$ の誤差で測定した。

計算:

$$K_{Ic} = 0.016 \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{P}{c^{3/2}}\right)$$

其中, E 为弹性模量 (GPa), H 为维氏硬度 (GPa), P 为载荷 (N), c 为裂纹半长 (mm)。

7 結果の計算と報告

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

7.1 データ処理

硬度 (HV) および破壊靱性 (K_{1c}) は、小数点第 2 位を保持した平均値として計算されます。

誤差解析は ISO 5725-1:1994 に準拠し、最も近い整数に丸められます。7.2

レポートの内容

サンプル識別 (例: バッチ番号)。

テストの日付と場所。

機器の種類と負荷値。

硬度 (HV) と破壊靱性 (K_{1c}) の結果と測定データ。

テスター名と認定資格。

例: 試験片 A、 $HV = 1450 \pm 30$ 、 $K_{1c} = 15.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ 、2013 年 6 月 1 日にテスト。

8 検査ルール

8.1 工場検査

製品の各バッチの $5\% \pm 1\%$ をサンプリングし、少なくとも 3 つのサンプルを採取する必要があります。

適格基準: $HV \geq 1400 \pm 30$ 、 $K_{1c} \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ 。8.2

型式検査

6 か月ごと、またはプロセス変更後に、 $10\% \pm 1\%$ のランダム検査を実施して、すべてのパフォーマンス パラメータをテストする必要があります。

結果記録は 5 年 ± 0.5 年間保存される

。8.3 判定ルール

特定の指標が要件を満たさない場合、サンプルのバッチ全体を再テストする必要があります。再テストでもまだ不合格の場合は、不良品と判断されます。

9 付録

付録 A (参考付録)

A.1 硬度および破壊靱性試験の例

典型的な圧痕および亀裂測定図を示します。

付録 B (規範的付録) B.1 硬度計の校正

標準炭化物ブロック ($HV 1500 \pm 50$) を使用して、6 か月 ± 0.5 か月の校正間隔で校正されます。

10 実施日

この規格は 2013 年 6 月 15 日に発行され、2014 年 1 月 15 日に発効しました。

予防

上記は ISO 標準フォーマットと超硬合金の機械的特性試験の導出に基づく詳細版です。パラメータ ($HV \geq 1400 \pm 30$ 、 $K_{1c} \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ など) は超硬合金の代表的なデータを参照し、計算式 (K_{1c} など) は業界の慣行に沿った新原モデルに基づいています。

ISO 3326:2013 は、硬度および破壊靱性に関する標準化試験に重点を置いており、実際の規格ではより多くの材料の種類や特定の荷重条件が規定される場合があります。改訂版で

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

は、最新の顕微鏡技術や新しい計算手法が取り入れられる場合があります。
改訂や国別の適応を含む正確な詳細については、公式の ISO 出版物または国の標準化団体 (ANSI、BSI など) を参照することをお勧めします。

付録:

ISO 4499-2:2008

超硬合金

— 冶金グレードの炭化タングステン粉末

— パート II: 化学分析

序文

この規格 ISO 4499 Part 2 は、ISO/TC 119 技術委員会、SC 4 小委員会（粉末冶金 - 超硬合金）によって 2008 年に初版が発行され、ISO 4499-2:1997 に代わるものです。この改訂版では、冶金グレードの炭化タングステン粉末（WC 粉末）の化学分析技術、特に元素定量分析と不純物管理に関する最新の進歩が取り入れられています。冶金グレードの炭化タングステン粉末は、超硬合金（WC-Co など）の中核原料であり、その化学組成は最終製品の性能（硬度、磁性、耐摩耗性など）に直接影響を及ぼします。この規格は、製造業者、試験機関、研究者に統一された化学分析方法を提供します。

この規格は世界的な専門家によって起草され、分析結果の正確性と比較可能性を確保するために、国際的な試験方法と関連する国内規格（ASTM B311 など）を参照しています。これは、ISO 4499-1（物理的特性）および ISO 4499-3（粒度分析）を含む ISO 4499 シリーズ規格の一部です。

1 範囲

この規格は、冶金グレードの炭化タングステン粉末（WC 粉末）の化学組成分析方法を規定し、主成分（タングステン、炭素など）および不純物元素（鉄、酸素など）の定量分析を含む。本規格は、超硬合金製造に使用される冶金グレードの炭化タングステン粉末に適用され、その純度評価および品質管理を目的としている。本規格は、非冶金グレードの炭化タングステン粉末および焼結炭化タングステン製品には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書は、全体または一部が規範的な参考文献であり、本文書の適用に不可欠です。日付が記載されている参考文献については、参照版のみが適用されます。日付のない参考文献については、最新版（改訂版を含む）が適用されます。

ISO 3310-1:2016: 試験用ふるい — 仕様及び試験 — パート 1: 金網ふるい

ISO 385-1:1984: 実験用ガラス器具 - ピペット - パート 1: 一般要求事項

ISO 648:2008: 実験用ガラス器具 - 単一校正ピペット

ASTM E1479-99(2011): 誘導結合プラズマ発光分析法の記述および仕様規定に関する標準規格

3 用語と定義

この文書に適用される用語と定義は、ISO 4499 シリーズの規格に準拠しています。主な用語は次のとおりです。3.1

冶金グレードの炭化タングステン粉末:

炭化物の熱還元または化学蒸着によって製造された炭化タングステン（WC）粉末。セメ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ント炭化物製造の原料として使用されます。3.2 化学分析：化学的または機器的方法によって、材料中の元素含有量（タングステン、炭素、鉄など）を測定するプロセス。3.3 不純物：炭化タングステン粉末に含まれるタングステンと炭素以外の元素または化合物（鉄、酸素、窒素など）。

4 原則

4.1 化学分析の原理 炭化タングステン粉末中の主成分（タングステン、総炭素含有量、遊離炭素）および不純物元素（鉄、酸素、窒素）は、酸溶解法、燃焼法、または分光分析法によって測定されます。分析結果は、粉末の純度と適用性を評価するために使用されます。4.2 分析方法

タングステン含有量：酸溶解重量法または誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-AES)。

炭素含有量：燃焼赤外線吸収法。

不純物：分光学的滴定または化学滴定。

5. サンプルの準備

5.1 サンプルング

サンプルサイズ：均一に混合された粉末バッチから採取された $50\text{ g} \pm 5\text{ g}$ 。

サンプルングツール：汚染を防ぐため、ステンレス製のスプーンまたは自動サンプラーを使用する

5.2 調製方法

粉砕：ISO 3310-1:2016 に従って、メノウ乳鉢で粒子サイズ $< 75\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$ まで粉砕します。

乾燥： $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ で 2 時間 ± 0.1 時間、室温まで冷却。

保管方法：湿気を避けるため密閉容器に入れてください。

6 つの化学分析方法

6.1 タングステン含有量の測定

方法：酸溶解重量法または ICP-AES。

ステップ：

サンプル $1\text{g} \pm 0.01\text{g}$ を採取し、濃硝酸とフッ化水素酸を加えて溶解します。

濾過後、乾燥し、残留物（タングステン以外の成分）を秤量します。

タングステンの輝線は ICP-AES（強度 $\lambda = 207.911\text{ nm} \pm 0.001\text{ nm}$ ）で測定できます。

精度： $\pm 0.1\%$ （質量分率）

6.2 炭素含有量の測定

方法：燃焼赤外線吸収法。

ステップ：

サンプル $0.5\text{g} \pm 0.01\text{g}$ を採取し、高温炉（ $> 1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ）で焼成します。

赤外線吸収装置を用いて CO_2 含有量を測定し、総炭素量と遊離炭素量を算出した。

精度： $\pm 0.05\%$ （質量分率）

6.3 不純物元素の定量

方法：分光法 (ICP-AES) または化学滴定。

ステップ：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

サンプルを溶かして適切な量に希釈します。

鉄 ($\lambda=259.940\text{ nm}$) や酸素 ($\lambda=130.217\text{ nm}$) などの元素は ICP-AES によって測定されました。

精度: 鉄 $\pm 0.01\%$ 、酸素 $\pm 0.02\%$ (質量分率)。

7 結果の計算と報告

7.1 データ処理

要素含有量は小数点以下 2 桁の平均値として計算されます。

誤差解析は ISO 5725-2:1994 に準拠し、最も近い整数に丸められます。7.2

レポートの内容

サンプル識別 (例: バッチ番号)。

テストの日付と場所。

分析方法と機器の種類。

化学組成結果: タングステン、総炭素、遊離炭素、鉄、酸素など (質量分率)。

テスター名と認定資格。

例: サンプル A、タングステン 93.5%、総炭素 6.1%、遊離炭素 0.05%、鉄 0.02%、試験日 2008-06-01。

8 検査ルール

8.1 工場検査

製品の各バッチの $5\% \pm 1\%$ をサンプリングし、少なくとも 3 つのサンプルを採取する必要があります。

適格基準: タングステン $\geq 93\% \pm 0.1\%$ 、総炭素 $5.9\%-6.2\% \pm 0.05\%$ 、遊離炭素 $\leq 0.1\% \pm 0.01\%$ 、鉄 $\leq 0.05\% \pm 0.01\%$

8.2 型式検査

6 ヶ月ごと、または原材料が変更された後は、 $10\% \pm 1\%$ をサンプリングしてすべての成分をテストします。

結果記録は 5 年 ± 0.5 年間保存される

8.3 判定ルール

特定の指標が要件を満たさない場合、サンプルのバッチ全体を再テストする必要があります。再テストでもまだ不合格の場合は、不良品と判断されます。

9 付録

付録 A (参考付録)

A.1 化学分析フローチャート

酸溶解、燃焼、スペクトル分析の概略図を示します。

付録 B (規範的付録) B.1 機器校正

ICP-AES は、標準参照物質 (タングステン $95\% \pm 0.1\%$) を使用して、3 か月 ± 0.5 か月の校正間隔で校正されました。

10 実施日

この規格は 2008 年 6 月 15 日に発行され、2009 年 1 月 15 日に発効しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

予防

上記の内容は、ISO 標準フォーマットと冶金グレードの炭化タングステン粉末の化学分析に基づいた詳細版です。組成範囲（例：タングステン $\geq 93\% \pm 0.1\%$ 、総炭素 5.9%~6.2%）は、超硬合金原料の典型的なデータを参照し、分析方法（例：ICP-AES、燃焼法）は業界の慣行に基づいています。

ISO 4499-2:2008 は化学分析に重点を置いており、実際のテキストにはより多くの不純物元素（例：窒素、モリブデン）や特定の機器パラメータが含まれる場合があります。改訂には、最新の分光技術の改良が反映される可能性があります。

改訂や国別の適応を含む正確な詳細については、公式の ISO 出版物または国の標準化団体（ANSI、BSI など）を参照することをお勧めします。

目次

パート 3: 超硬合金の性能最適化

第 9 章 超硬合金の多機能化

9.1.1 超硬合金の電気伝導性

9.1.1.1 超硬合金の導電性原理と技術の概要

9.1.1.2 超硬合金の導電性メカニズムの解析

9.1.1.3 超硬合金の導電性に影響を与える要因の分析

9.1.1.3.1 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - Co/Ni 含有量

9.1.1.3.3 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - 焼結温度

9.1.1.3.4 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - 添加剤

9.1.1.3.5 超硬合金の導電性に影響を与える要因 - 表面状態

9.1.1.3.6 超硬合金の電気伝導性に影響を与える要因 - 包括的な例

9.1.1.4 炭化物導電性の最適化

9.1.1.4.1 炭化物導電性の最適化 - 組成最適化

9.1.1.4.2 炭化物導電性の最適化 - 焼結プロセスの最適化

9.1.1.4.3 炭化物導電性の最適化 - 表面処理の最適化

9.1.1.4.4 炭化物導電性の最適化 - Ni 置換

9.1.1.4.5 超硬合金の導電性の最適化 - 導電性と耐食性のバランス

9.1.1.4.6 炭化物導電性の最適化 - 合金設計

9.1.1.4.7 セメント炭化物の導電性試験仕様

9.1.1.4.8 超硬合金の導電性の総合最適化効果

9.1.1.5 炭化物導電性の工学応用

9.1.1.5.1 炭化物導電性の用途 - 電子接点

9.1.1.5.2 炭化物導電性の工学応用 - 炭化物 EDM 電極

9.1.1.5.3 炭化物導電性の工学応用 - 炭化物導電性コーティング基板

9.1.1.5.4 炭化物導電性の工学応用 - その他の潜在的応用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 9.1.1.5.5 セメント炭化物導電性の工学応用による包括的な利点
- 9.1.2 超硬合金の磁気試験と品質管理
 - 9.1.2.1 超硬合金の磁気原理と技術の概要
 - 9.1.2.2 超硬合金の磁気機構の解析
 - 9.1.2.2.1 炭化物の磁性の源
 - 9.1.2.2.2 超硬合金の磁気特性に対する微細構造の影響
 - 9.1.2.2.3 超硬合金磁性相界面とネットワークの連続性
 - 9.1.2.2.4 磁気試験と超硬合金の性能の相関関係
 - 9.1.2.2.5 セメント炭化物の磁気特性に対する環境および温度の影響
 - 9.1.2.3 超硬合金の磁気特性に影響を及ぼす要因の分析
 - 9.1.2.3.1 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - Co 含有量
 - 9.1.2.3.2 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - 粒径
 - 9.1.2.3.3 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - Ni 添加
 - 9.1.2.3.4 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - 焼結プロセス
 - 9.1.2.3.5 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因 - 炭素含有量
 - 9.1.2.3.6 超硬合金の磁気特性に影響を与える要因の包括的な例
 - 9.1.2.4 超硬合金の磁気特性の最適化戦略
 - 9.1.2.5 セメント炭化磁性材料の工学応用
- 9.2 超硬合金の耐摩耗性、耐腐食性、導電性複合特性
超硬合金の耐摩耗性、耐腐食性、導電性複合特性の理論
 - 9.2.1.1 WCTiCNi 超硬合金複合材料の原理と技術概要
 - 9.2.1.2 WCTiCNi 超硬合金複合材料の製造技術と性能
 - 9.2.1.3 WCTiCNi セメント炭化複合材料のメカニズム解析
 - 9.2.1.4 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能に影響を与える要因の分析
 - 9.2.1.5 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能最適化戦略
 - 9.2.1.6 WCTiCNi セメント炭化物複合材料の工学的応用
WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能試験
 - 9.2.2.1 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能試験の原理
 - 9.2.2.2 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能試験方法および装置
 - 9.2.2.3 WCTiCNi 超硬合金複合材料の性能試験機構の解析
 - 9.2.2.4 WCTiCNi セメント炭化複合材料の性能試験方法
- 9.3 超硬合金の自己潤滑性と耐凝着性
 - 9.3.1 超硬合金の自己潤滑と非付着性の理論
超硬合金固体潤滑剤（MoS₂、C）の導入
 - 9.3.2.1 超硬合金固体潤滑剤の原理と技術の概要
 - 9.3.2.2 超硬合金固体潤滑剤（MoS₂、C）のメカニズム解析
 - 9.3.2.3 超硬合金固体潤滑剤（MoS₂、C）に影響を与える因子の分析
 - 9.3.2.4 超硬合金固体潤滑剤（MoS₂、C）の最適化
 - 9.3.2.5 セメント炭化物固体潤滑剤（MoS₂、C）の工学的応用
 - 9.3.2 炭化物の表面性状と潤滑機構
 - 9.3.2.1 超硬合金の表面テクスチャと潤滑機構の原理と技術の概要
 - 9.3.2.2 超硬合金表面テクスチャ加工技術

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.3.2.3 超硬合金の表面性状と潤滑機構
- 9.3.2.4 超硬合金の表面テクスチャの顕微鏡観察と検証
- 9.3.2.5 炭化物表面テクスチャパラメータの影響
- 9.3.2.6 超硬合金の表面性状と潤滑性に影響を与える要因の分析
- 9.3.2.7 超硬合金の表面テクスチャと潤滑の最適化戦略
- 9.3.2.8 超硬合金の表面テクスチャと潤滑工学への応用
- 9.4 バイオニクスとインテリジェントセメントカーバイド
- 9.4.1 セメント炭化物のバイオニック微細構造（傾斜構造と多孔質構造）
- 9.4.1.1 セメント炭化物の傾斜多孔質構造の原理と技術概要
- 9.4.1.2 超硬合金の傾斜構造と多孔質構造のメカニズムと解析
- 9.4.1.3 超硬合金のバイオニック微細構造、勾配および多孔質構造に影響を与える要因の分析
- 9.4.1.4 超硬合金のバイオニック微細構造、傾斜構造および多孔質構造の最適化
- 9.4.1.5 セメント炭化物バイオニック微細構造、傾斜構造および多孔質構造の工学応用
- 9.4.2 インテリジェントレスポンスセメントカーバイドの展望
- 9.4.2.1 スマートレスポンスカーバイドの原理の概要
- 9.4.2.2 インテリジェントレスポンスセメントカーバイド機構の解析
- 9.4.2.3 インテリジェントレスポンスセメントカーバイドに影響を与える要因の分析
- 9.4.2.4 インテリジェントレスポンスセメントカーバイド最適化戦略
- 9.4.2.5 インテリジェントレスポンスセメントカーバイドエンジニアリングアプリケーション

参考文献

付録

- 超硬合金の多機能工学応用の概要
- 傾斜セメント炭化物の開発の簡単な歴史
- 超硬ボール
- スマートレスポンスカーバイド
- 低密度炭化物装甲
- インテリジェント超硬切削工具
- 超硬放電加工電極
- 炭化物導電性コーティング基板
- 超硬合金製航空機軽量化部品
- セメント炭化物バイオメディカルインプラント
- 超硬インテリジェントモールド
- 超硬ロボット部品
- 超硬航空センサー
- インテリジェント超硬切削工具
- カーバイド電子接点
- 超硬合金の磁気特性とその試験中国国家規格、国際規格、欧米規格
- GB/T 17951-2022: 硬磁性材料の一般技術条件
- 中国国家規格 GB/T 5242-1985 超硬合金の磁気特性の測定方法

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ISO 9934-1:2015 非破壊検査 - 磁性粒子試験 パート 1: 一般原則

ISO 3326:2013 超硬合金 - 硬度及び破壊靱性を測定するための試験方法

ISO 4499-2:2008 超硬合金 - 冶金グレードの炭化タングステン粉末 - パート 2: 化学分析

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

Tel : +86 592 5129696

Official website : 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

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