

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（ VII ）

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP

の紹介

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 7 章 超硬合金の機械的特性制御

超硬合金（WC-Co）は、その優れた高硬度（HV 1200-1800）、良好な破壊靱性（ K_{Ic} 8-16 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）、高い圧縮強度（4000-6000 MPa）、優れた耐摩耗性（摩耗率 $< 0.1 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ）により、航空工具（切削寿命 > 15 時間）、鉋業ドリルビット（掘削 $> 1200 \text{ m}$ ）、耐摩耗ダイス（押し出し $> 10^6$ 回）に広く使用されています。ただし、高衝撃（周波数 $> 500 \text{ Hz}$ ）、周期的負荷（ $> 10^5$ 回）、高温（ $> 800^\circ\text{C}$ ）、研磨摩耗（硬度 $> 800 \text{ HV}$ ）などの極端な作業条件下では、超硬合金の総合的な性能は依然として課題に直面しています。硬度、靱性、耐疲労性、耐摩耗性といった相乗的な要件を、単一の最適化戦略で同時に満たすことは困難です。マイクロ組織制御（WC 粒径 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 、Co 含有量 6~15%）、破壊メカニズムの詳細な解析（亀裂成長速度 $\sim 10^{-6} \text{ mm/サイクル}$ ）、そして高度な強化技術（添加剤 VC 0.2~0.5%、イオン注入量 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 、レーザークラディング厚さ $50 \sim 150 \mu\text{m}$ ）を適用することで、総合的な性能の飛躍的な向上を実現できます。

本章では、硬度と靱性のバランス、耐疲労性と耐衝撃性、故障メカニズムの分析と性能向上戦略という 4 つの側面から、超硬合金の機械的特性、長所と短所、制御技術と条件について体系的に考察します。さらに、将来の AI 技術と産業用 IoT（IIoT）エコシステムにおける超硬合金の開発動向を展望し、産業用途により高い効率性と信頼性を提供します。

超硬合金の利点は、硬度と耐摩耗性が高く、過酷な作業条件下でも高荷重と摩擦に耐えられることです。しかし、硬度と靱性の間に矛盾が生じるという欠点があります。高硬度（HV > 1600 ）は通常、靱性（ $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）の低下を招き、脆性破壊が発生しやすくなります。さらに、超硬合金の耐疲労性は、高周波サイクリックロード下では依然として改善が必要です（亀裂成長速度を $< 10^{-7} \text{ mm/サイクル}$ に制御する必要があります）。この章の分析を通じて、読者は超硬合金の機械的特性と実際のアプリケーションでの性能を制御する方法を包括的に理解できるようになります。

7.0 超硬合金の機械的性質

超硬合金（WC-Co）は、その優れた機械的特性により、航空、鉋業、金型製造において広く使用されています。以下では、その主要な機械的特性について、定義、測定方法、影響要因、用途の背景を含めて詳しく説明します。

7.0.1 超硬合金の高硬度

7.0.1.0 超硬合金の硬度はどれくらいですか？

超硬合金（WC-Co）の硬度は、その表面が外部物体（圧子など）によるへこみや傷に抵抗

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

する能力を指し、塑性変形および摩耗に対する材料の耐性を反映しています。複合材料である超硬合金は、炭化タングステン（WC、硬度約 HV 2000～2500）の硬質相とコバルト（Co、硬度約 HV 300）の結合相で構成されています。超硬合金の硬度は通常 HV 1200～1800 ですが、表面改質（浸炭、レーザークラディングなど）によって HV 2000～2500 までさらに高めることができます。硬度レベルは、切削、穴あけ、金型製造などの高負荷・高摩擦環境における超硬合金の耐久性を直接的に決定します。

硬度の物理的性質は材料の微細構造と密接に関係しており、これは主に WC 相の高い硬度と粒界強化効果によるもので、Co 相は塑性変形を通じてエネルギーの一部を吸収し、全体的な性能を調整します。

7.0.1.1 超硬合金の硬度測定方法

超硬合金の硬度はさまざまな試験方法で測定できますが、さまざまなシナリオや精度要件に応じてさまざまな方法が適しています。

ピッカース硬度（HV）

範囲: HV 1200-1800、表面改質後は最大 HV 2000-2500。

原理: ピッカース硬度計とダイヤモンド四角錐圧子（対角角 136°）を用い、標準荷重（通常 30kg）をかけて、圧痕の対角線の長さを測定することで硬度値を算出します。計算式は以下のとおりです。

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

ここで、FFF は荷重 (kg)、ddd はへこみの対角線の長さ (mm) です。

利点: 測定範囲が広く、精度が高く、セメント炭化物の硬度試験に適しており、最も一般的に使用される方法です。

用途: バルク硬度、および粒子やコーティングなどの微細領域の硬度を評価するために使用されます。

ロックウェル硬度（HRA）

範囲: HRA 80～94（A スケール）。

原理: ダイヤモンドコーンインデント（コーン角度 120°）を備えたロックウェル硬度計を使用し、60kg の荷重を加えて圧痕の深さを測定します。

利点: テストが高速で、大規模なテストに適しています。

制限事項: 予備評価に使用されることが多い超硬材料（セメント炭化物など）では精度が若干低くなります。

ブリネル硬度（HB）

範囲: HB 1000～1600。

原理: 直径 10mm の超硬合金球圧子を使用し、大きな荷重（例えば 3000kg）をかけて、圧痕面積を通して硬度を計算します。計算式は以下のとおりです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

7.0.1.2 硬度に影響を与える要因

超硬合金の硬度は、様々な微細構造とプロセスパラメータの影響を受けます。主要因の詳細な分析は以下の通りです。

(1) WC の粒径

效应: 晶粒尺寸越小, 硬度越高, 遵循 Hall-Petch 关系 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$), 其中 σ_y 为屈服强度, d 为晶粒尺寸, k 为常数 (约 $0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。硬度与屈服强度近似正比 ($HV \approx 3\sigma_y$)。

データ: 粒径が $2\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ に減少すると、硬度は HV 1200 から HV 1600 に増加し、約 25%~30%増加します。粒径がさらに $0.2\mu\text{m}$ 未満に減少すると、硬度は HV 1800 に達しますが、粒界すべりにより靱性が低下する可能性があります。

メカニズム: 小さな粒子は粒界密度 ($>10^{13} \text{ m}^{-2}$) を増加させ、転位の動きを妨げ、硬度を増加させます。

(2) Co 含有量

効果: Co は軟質相 (硬度約 HV 300) であり、その含有量を増やすと超硬合金の硬度が低下します。

データ: Co 含有量が 6% ~ 8% の場合、硬度は HV 1600 ~ 1800 です。Co 含有量が 12% ~ 15% の場合、硬度は HV 1200 ~ 1400 に低下します。

メカニズム: Co 含有量が多いと WC 体積分率が減少し (WC 比率が 90% から 70% に低下)、硬質相の変形抵抗が減少します。

(3) 添加物

効果: VC (炭化バナジウム) や Cr_3C_2 などの添加剤は、粒成長を抑制し、硬度を高めることができます。

データ: 0.2%~0.5%の VC を添加すると、硬度が 5%~10%増加し、HV 2000 までになります。添加量が 0.8%を超えると、脆い相 (VCx など) が形成される可能性があり、性能が低下します。

メカニズム: VC は固溶強化と析出強化 (厚さ $<20 \text{ nm}$ の薄い VCx 層の形成) を通じて粒成長を抑制し、粒界移動速度 ($<10^{-10} \text{ m/s}$) を低減します。

(4) 表面改質

効果: 浸炭、イオン注入、レーザークラッディングなどの技術により表面硬度を向上させます。

データ: 浸炭処理では、硬度が最大 HV 2000 ~ 2200 の WC を多く含む層 (厚さ 10 ~ $30 \mu\text{m}$) が形成されます。レーザークラッディングでは、硬度が最大 HV 2500 の高硬度層 (厚さ 50 ~ $100 \mu\text{m}$) が形成されます。

メカニズム: 表面改質により、高硬度相 (WC、CrN など) と残留圧縮応力 ($>400 \text{ MPa}$) が導入され、変形耐性が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（5）焼結工程

影響：焼結温度と雰囲気は粒成長と微細構造に影響します。

データ：焼結温度が 1400～1500℃、真空度が $<10^{-2}$ Pa の場合、粒径を $<0.8\mu\text{m}$ に制御でき、硬度は HV1600 に達します。温度が $>1550^\circ\text{C}$ 、粒径が $>2\mu\text{m}$ の場合、硬度は 10%～15%減少します。

メカニズム：高温により粒成長が起こり、粒界強化効果が低下します。

7.0.1.3 硬度の微視的メカニズム

超硬合金の硬度の微視的メカニズムは、主に以下の側面に基づいています。

（1）WC 相の高硬度

WC（炭化タングステン）は、その共有結合構造（WC 結合エネルギー 約 800 kJ/mol）と高弾性率（ $E \approx 700 \text{ GPa}$ ）に由来する、最大 HV 2000～2500 の硬度を有する超硬材料です。WC 相は、超硬合金中の体積分率の 70%～90%を占め、硬度の主な源となっています。

（2）粒界強化（ホールペッチ効果）

晶粒尺寸减小増加晶界密度，晶界通过钉扎位错（Orowan 强化， $\tau \sim Gb/\lambda$ ， $\lambda < 1\mu\text{m}$ ）阻碍位错运动，提高硬度和强度。晶界迁移速率（ $<10^{-10} \text{ m/s}$ ）受添加剂和烧结温度控制，迁移能障约为 80-120 kJ/mol。

（3）Co 相の調整効果

Co 相（低硬度、 $\text{HV} \approx 300$ ）は塑性変形（ひずみ速度約 10^{-3}s^{-1} ）によりエネルギーの一部を吸収し、応力集中を軽減しますが、Co 含有量が多いと WC 相の割合が減少し、全体の硬度が低下します。

（4）界面効果

WC と Co 間の界面結合強度（ $> 50 \text{ MPa}$ ）は硬度に重要な影響を及ぼします。Co は WC に対して濡れ性が高いため（接触角 $<15^\circ$ ）、界面エネルギーは低く（ $< 1.5 \text{ J/m}^2$ ）、Co の分布が不均一（偏差 $>1\%$ ）な場合、Co プール（サイズ $>5\mu\text{m}$ ）が形成され、硬度が低下する可能性があります。

（5）熱力学的安定性

細粒 WC の熱力学的安定性は、ギブス自由エネルギー（ $\Delta G < 0$ ）によって評価されます。粒径が $0.5\mu\text{m}$ 未満の場合には、界面エネルギー（ $>1.5 \text{ J/m}^2$ ）が特性変化を支配し、微小亀裂（長さ $0.05 \sim 0.1\mu\text{m}$ ）を誘発して硬度に影響を与える可能性があります。

7.0.1.4 硬度の応用上の意義

超硬合金の高い硬度は、特に以下のシナリオにおいて産業用途における主な利点です。

航空ツール

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

要件:切断速度 > 800 m/分、高負荷および高摩擦。

性能:硬度 HV 1600 の WC-10Co 工具の切削寿命は 15 時間に達し、これは硬度 HV 1200 の材料の切削寿命よりも 25% 長くなります。

メカニズム: 高硬度により工具の摩耗率 ($<0.1 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) が低下し、工具寿命が延びます。

鉋山用ドリルビット

要件:硬岩掘削 (岩石硬度 > 800 HV)、高い摩擦および耐衝撃性が必要。

性能: 硬度 HV 1700 の WC-8Co ドリルビット、掘削距離 >1200 m、40% 増加。

メカニズム: 高硬度により摩耗が低減し (溝幅 $<10\mu\text{m}$)、耐久性が向上します。

耐摩耗性金型

要件:高周波押し出し ($>10^6$ 回)、摩耗および変形に対する耐性。

性能: 硬度 HV 1600 の WC-12Co ダイ、押し出し回数 $>10^6$ 回。

メカニズム: 高硬度により、金型表面のへこみに対する耐性が向上し、金型寿命が長くなります。

高温条件

需要: 航空機タービンブレード加工などの高温切断 ($>800^\circ\text{C}$)。

性能: 硬度 HV 2000 (浸炭処理後) の炭化物では、耐用年数が 20 時間となり、30% 増加します。

メカニズム: 高硬度と酸化物層 (WO_3 、厚さ約 $2\mu\text{m}$) が相まって高温摩耗を低減します。

硬度と靱性のトレードオフ

-超硬合金の硬度と靱性 (K_{IC}) の差:

硬度が高い ($\text{HV} > 1600$) と、靱性が低い ($K_{\text{IC}} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) のが一般的で、微細粒子 ($<0.2 \mu\text{m}$) や Co 含有量の低さ ($<6\%$) が原因で脆性破壊を起こしやすくなります。

高い靱性 ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を得るには、Co 含有量 ($>12\%$) または粒径 ($1-2 \mu\text{m}$) を増やす必要がありますが、硬度が低下し ($\text{HV} < 1400$)、耐摩耗性に影響を与えます。

最適化戦略には次のものが含まれます。

選択された粒径は $0.5-1\mu\text{m}$ 、Co 含有量は $8\%-12\%$ 、硬度は $\text{HV } 1500-1600$ 、 $K_{\text{IC}} 12-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。

VC/TaC ($0.2\%-0.5\%$) を添加すると、靱性を維持しながら硬度を $3\%-5\%$ 増加させることができます。

傾斜構造 (表面 Co 6% 、内部 12%) を採用し、表面硬度 $\text{HV } 1600$ 、内部 $K_{\text{IC}} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.0.1.6 要約

超硬合金の硬度は、変形や摩耗に対する耐性を示す中核的な指標であり、通常は HV1200～1800、最大 HV2500 の範囲にあります。硬度は主に WC 相の高硬度と粒界強化によってもたらされ、粒径、Co 含有量、添加剤、表面改質などの要因によって影響を受けます。微細構造とプロセスパラメータを最適化することで、超硬合金は航空、鉦業、金型製造などの分野で優れた耐久性と信頼性を発揮できます。将来的には、AI や産業用 IoT（IIoT）技術を活用することで、硬度の一貫性と性能最適化の効率をさらに向上させることができます。

7.0.2. 超硬合金の破壊靱性

超硬合金（WC-Co）の破壊靱性は、き裂の伝播と破壊に対する抵抗力であり、高応力または衝撃条件下における材料の信頼性を評価するための重要な指標です。以下では、その定義、測定方法、影響要因、微視的メカニズム、そして応用上の意義について詳しく説明します。

7.0.2.1. 超硬合金の破壊靱性の定義

破壊靱性（ K_{Ic} ）とは、超硬合金が亀裂や欠陥が存在する場合に亀裂の伝播に抵抗する能力であり、単位は $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ です。超硬合金の破壊靱性範囲は通常 $8\sim16\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ であり、高荷重または衝撃環境下における脆性破壊に対する耐性を反映しています。破壊靱性は主に結合相 Co の塑性変形能力と WC 相の粒界強化効果に依存し、超硬合金の硬度と靱性のバランスを反映しています。

7.0.2.2. 超硬合金の破壊靱性測定方法

破壊靱性は通常、標準化された試験方法によって測定されます。一般的な方法は以下の通りです。

片端ノッチ梁（SENB）

原理：試験片に V 字型または直線型のノッチを予め作製し、3 点曲げ荷重を用いて、き裂が拡大する前の最大応力を測定します。式は以下のとおりです。

原理：在试样上预制 V 型或直边缺口，采用三点弯曲加载，测量裂纹扩展前的最大应力。公式为：

$$K_{Ic} = \frac{P \cdot S}{B \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中 P 为载荷， S 为支座间距， B 和 W 分别为试样厚度和宽度， a 为裂纹长度， $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何修正因子。

条件：試験片サイズは通常 $55\times10\times10\text{mm}$ 、ノッチ深さは約 2mm です。

利点：工業規格で広く使用されている超硬合金の正確な測定に適します。

インデント法

亀裂成長に関する経験式に基づき、ピッカース硬さ圧痕の亀裂長さから K_{Ic} を算出します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

利点: 複雑なサンプル準備が不要なので、迅速なテストに適しています。

制限事項: 精度が低いため、予備評価に適しています。

ダブルカンチレバービーム法 (DCB) やコンパクトテンション法 (CT) などの他の方法は、特定の研究シナリオに適しています。

SENB 法は、その高い精度と標準化により、超硬合金の破壊靱性試験の主流の方法となっています。

7.0.2.3. 超硬合金の破壊靱性に影響を及ぼす要因

破壊靱性のレベルは、次のようにさまざまな微細構造およびプロセスパラメータによって影響を受けます。

共同コンテンツ

効果: Co は強靱相として、塑性変形によって亀裂エネルギーを吸収します。含有量が多いほど、靱性が向上します。

データ: Co 含有量が 6% の場合、 K_{Ic} は約 $8-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。Co 含有量が 12%-15% の場合、 K_{Ic} は $14-16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に達します。

メカニズム: Co 含有量の増加 (> 10%) により塑性散逸が向上します (ひずみ速度 $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) が、硬度は低下します (HV < 1400)。

粒度

効果: 粒度は靱性に二重の効果をもたらし、適度な粒度はパフォーマンスを最適化します。

粒子が粗い場合 ($1 \sim 2 \mu\text{m}$ など)、 $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、粒子が細かすぎる場合 (< $0.2 \mu\text{m}$ など)、粒界滑り (速度 $\sim 10^{-9} \text{ m/s}$) により、 $K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ になります。

メカニズム: 粗い粒子は粒界密度 ($< 10^{13} \text{ m}^{-2}$) を低下させ、ひび割れ伝播に対する抵抗を低下させます。一方、過度に細かい粒子は粒界欠陥を増加させ、微小亀裂を引き起こしやすくなります。

添加剤

効果: 添加剤は粒界を強化したり、微細構造を最適化して靱性を向上させることができます。

データ: TaC の追加 (0.2 % ~ 0.5 %) を添加すると、 K_{Ic} が約 5 % ~ 10 % 増加します。VC (> 0.8 %) を添加すると脆い相が形成され、靱性が低下する可能性があります。

メカニズム: TaC は粒界結合強度 (> 150 MPa) を高め、粒界破壊を低減します。

焼結プロセス

影響: 焼結温度と時間は、Co の分布と粒界の安定性に影響します。

データ: 焼結温度が $1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ 、焼結時間が 1 ~ 3 時間の場合、 K_{Ic} は $12 \sim 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$1/2$ で安定します。 $>1550^{\circ}\text{C}$ の場合、Co 偏析率は $>1\%$ となり、 K_{Ic} は $5\%\sim 10\%$ 減少します。

メカニズム：高温により Co プール（サイズ $>5\mu\text{m}$ ）が形成され、靱性が低下します。

7.0.2.4. 超硬合金の破壊靱性の微視的メカニズム

破壊靱性の微視的メカニズムには、主に以下の側面が含まれます。

Co 相の塑性変形 Co 相は塑性変形（ひずみ約 $0.05\%\sim 0.1\%$ ）によって亀裂エネルギーを吸収し、亀裂の伝播を遅らせます。Co

含有量が 10% の場合、塑性分散が顕著になり、 K_{Ic} は $12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に達することがあります。

WC 粒界における亀裂の偏向

WC 粒界（ $0.5\sim 1\mu\text{m}$ ）は、亀裂の偏向（角度 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ）によって亀裂伝播経路長を増加させ、亀裂伝播速度（ $<10^2\text{m/s}$ ）を低下させます。この偏向効果は、粗粒（ $>1\mu\text{m}$ ）においてより顕著になります。

界面接合

WC と Co 間の界面接合強度（ $>50\text{MPa}$ ）は、Co の濡れ（接触角 $<15^{\circ}$ ）によって達成され、界面エネルギーは $<1.5\text{J/m}^2$ です。界面欠陥が多い場合（ $>0.5\%$ ）、靱性は低下します。

微小亀裂抑制添加剤（

TaC など）は、固溶体強化（粒界間隔 $<0.2\mu\text{m}$ ）を通じて微小亀裂の発生（長さ $<0.05\text{mm}$ ）を抑制し、 K_{Ic} を $5\%\sim 10\%$ 増加させます。

7.0.2.5. 超硬合金の破壊靱性の応用上の意義

破壊靱性は、特に高衝撃および周期的な荷重がかかる状況において、セメント炭化物の実際の用途において非常に重要です。

航空ツール

要件：切断速度 $>800\text{m/分}$ 、高い衝撃と周期的な負荷に耐える必要がある。

$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の WC-8Co ツール、寿命 >15 時間。

メカニズム：高い靱性により、亀裂の成長（速度 $<10^{-6}\text{mm/サイクル}$ ）が低減され、耐用年数が延長されます。

鉱山用ドリルビット

要件：硬岩掘削（周波数 $>500\text{Hz}$ ）、高い耐衝撃性が必要。

$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の WC-10Co ドリルビット、掘削距離 $>1200\text{m}$ 。

メカニズム：高い靱性が衝撃エネルギー（ $>18\text{J}$ ）を吸収し、破損のリスクを軽減します。

耐摩耗性金型

要件：高周波押し出し（ $>10^6$ 回）、疲労破壊耐性が必要です。

特性： $K_{Ic} 14\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の WC-12Co ダイ、押し出し時間 $>10^6$ 。

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

メカニズム：高い靱性により、微小亀裂（長さ < 0.1 mm）の成長が遅くなります。

深海の状況

要件：圧力 > 80 MPa、応力腐食耐性が必要。

K_{Ic} 14 MPa·m^{1/2}の傾斜構造炭化物、寿命は 4 年以上。

メカニズム：高い靱性と表面保護により、腐食亀裂の伝播が抑制されます。

7.0.2.6. 超硬合金の破壊靱性の最適化と将来の開発

破壊靱性を向上させるには、次の戦略を使用できます。

微細構造の最適化：粒径 0.5 ~ 1 μm、Co 含有量 10% ~ 12% を選択、 K_{Ic} は 12 ~ 14 MPa·m^{1/2}に達します。

添加剤による制御：0.2%~0.5% の TaC を追加すると、 K_{Ic} が 5%~10% 増加します。

表面強化：TiN コーティング（厚さ 1~ 3 μm）を施して表面亀裂の発生を抑え、 K_{Ic} を 5%~10%増加させます。

AI と IIoT：AI を使用して Co の分布と粒界安定性を予測し（誤差<0.2%）、IIoT と組み合わせることで亀裂の伝播をリアルタイムで監視し（精度±0.02 mm）、靱性の一貫性を向上させます（偏差<0.5 MPa·m^{1/2}）。

破壊靱性は、特に過酷な作業条件下における超硬合金の性能最適化において重要な課題です。微細構造とプロセスパラメータを最適化することで、超硬合金は航空、鉱業、深海といった需要の高い用途のニーズを満たすことができます。将来的には、AI と産業用 IoT 技術の融合により、靱性の向上と用途拡大がさらに促進されるでしょう。

7.0.3. 超硬合金の圧縮強度

超硬合金（WC-Co）の圧縮強度は、圧縮荷重下における損傷耐性を示す重要な機械的特性指標であり、材料の圧縮変形および脆性破壊に対する抵抗力を反映しています。以下では、その定義、測定方法、影響要因、微視的メカニズム、応用意義、最適化、将来の発展について詳細に説明します。さらに詳細なデータを追加することで、分析を深めます。

7.0.3.1. 超硬合金の圧縮強度の定義

圧縮強度は、超硬合金の一方向圧縮荷重下で材料が破損する前の最大応力であり、MPa で測定され、典型的な範囲は 4000~6000 MPa です。圧縮強度は、高荷重条件下での超硬合金の重要なパラメータであり、主に硬質相の炭化タングステン（WC）の超高弾性率（約 700 GPa）と粒界強化効果によって支えられ、結合相のコバルト（Co）の塑性特性によって制御されます。圧縮強度のレベルは、極圧環境（深海や高速切削など）における超硬合金の信頼性と耐久性を直接決定します。たとえば、WC-10Co 合金の圧縮強度は通常 4500 ~ 5000 MPa ですが、具体的な値は微細構造とプロセスパラメータによって異なります。

7.0.3.2. 超硬合金の圧縮強度の測定方法

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

圧縮強度は標準化された圧縮試験によって決定されます。具体的な方法と詳細は次のとおりです。

圧縮試験

原理：万能材料試験機または専用圧縮試験機を用いて、円筒形または立方体の試験片に一方方向の圧縮荷重を加え、試験片が塑性変形または脆性破壊を起こすまでの最大応力を記録します。式は以下のとおりです。

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

其中 σ_c 为抗压强度 (MPa), F 为破坏时的最大载荷 (N), A 为试样初始截面面积 (mm²)。

テスト条件:

試験片の形状: 円筒形 (直径 10 mm、高さ 20 mm) または立方体(10×10×10 mm)。バレル効果を回避するために、直径と高さの比は通常 1:2 です。

荷重速度: 0.5 ~ 1 mm/分、均一な応力分散を確保するためにゆっくりと荷重をかけます。

環境条件: 室温 (20 ~ 25°C)、湿度 <50%、環境要因による干渉を避けてください。

利点: 圧縮下の材料の支持限界を直接反映し、テスト結果は実際のアプリケーション シナリオと高い相関性があります。

制限事項: サンプルには初期欠陥があってはなりません (例: 多孔度 < 1%)。そうでない場合、結果は低くなります。サンプルの形状と摩擦の影響によりエラーが発生する可能性があります。

補足技術: 横方向および縦方向のひずみを測定し、ポアソン比 ($\nu \approx 0.2-0.25$) を計算するためのひずみゲージの組み合わせにより、圧縮性能がさらに検証されます。

圧縮試験法は、超硬合金の圧縮強度を測定するための標準的な方法であり、産業界や科学研究で広く使用されています。

7.0.3.3.超硬合金の圧縮強度に影響を及ぼす要因

圧縮強度は、微細構造、組成比、製造プロセスなど、複数の要因の影響を受けます。具体的な分析は以下の通りです。

WC 粒度

効果: 結晶粒微細化により、粒界密度が増加し、圧縮抵抗が向上します。

データ: 粒径が 2 μm から 0.2~0.5 μm に微細化されると、圧縮強度は 4000 MPa から 4500 MPa 以上、または 5000 MPa まで増加します。粒径が 2 μm を超えると、圧縮強度は 3500~4000 MPa に低下します。

ホール・ペッチ関係式による微粒子 (< 0.5 μm)

机理: 细小晶粒 (< 0.5 μm) 依据 Hall-Petch 关系 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$, $k \approx 0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

降伏強度が向上し、粒界密度 > 10^{13} m^{-2} が転位の移動を効果的に妨げます。

制限事項: 粒子が細かすぎると (< 0.2 μm)、粒界欠陥 (> 0.5%) が増加するために微小

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

亀裂が発生し、圧縮強度が 5% ～ 10% 低下する可能性があります。

共同コンテンツ

影響: Co 含有量が高すぎると圧縮強度が弱くなります。

データ: Co 含有量が 8% ～ 12% の場合、圧縮強度は 4500 ～ 5000 MPa で安定します。Co 含有量が 15% を超えると、圧縮強度は <3500 MPa に低下します。Co 含有量が 6% 未満の場合は、圧縮強度は 5000 ～ 6000 MPa に達しますが、靱性が低下します ($K_{1c} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。

メカニズム: Co は軟質相（硬度 HV ≈ 300）です。含有量が多い (> 15%) と WC の体積率 (< 70%) が低下し、材料が軟化して圧縮支持力が低下します。Co 含有量が少ないと WC 相の割合は増加しますが、脆性破壊が発生しやすくなります。

圧縮抵抗と靱性のバランスをとるには、Co 含有量 10% が最適な値であると考えられます。

微細構造

効果: 均質な微細構造により圧縮特性が大幅に向上します。

データ: 粒界密度が $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$ で、気孔率が < 1% の場合、圧縮強度は > 5000 MPa です。粒界欠陥率が > 2% または気孔率が > 2% の場合、圧縮強度は 10% ～ 15% 低下します。

机理: 均匀分布的 WC 相和 Co 相减少应力集中, 晶界通过 Orowan 强化 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$) 钉扎位错, 增强抗压能力; 孔隙或缺陷 (如尺寸 $> 5 \mu\text{m}$) 成为应力集中源, 降低强度。

プロセスの影響: 冷間等方圧プレス (CIP、圧力 200 ～ 300 MPa) により密度を 99% 以上に高めることができ、圧縮耐性が大幅に向上します。

7.0.3.4. マイクロメカニズム 超硬合金の圧縮強度

圧縮強度の微視的メカニズムには次の側面が含まれます。

WC 相の高弾性率

WC 相の弾性率 ($E \approx 700 \text{ GPa}$) は、高い圧縮強度の基盤を提供し、圧縮変形に抵抗します。

70% ～ 90% の WC 体積分率が圧縮強度の主な源であり、その共有結合構造 (WC 結合エネルギー $\sim 800 \text{ kJ/mol}$) は優れた圧縮性能を保証します。

粒界強化

高い粒界密度 ($> 10^{13} \text{ m}^{-2}$) は、オロワン強化機構による転位の移動を阻害します。粒径が $< 0.5 \mu\text{m}$ の場合、強化効果は顕著であり、圧縮強度は 20% ～ 30% 向上します。粒界移動速度 ($< 10^{-10} \text{ m/s}$) は、焼結温度 (1400 ～ 1500°C) によって制御されます。

Co

相の塑性制御 Co 相（硬度 HV ≈ 300）は、塑性変形（ひずみ速度約 10^{-3} s^{-1} ）を通じて圧縮エネルギーを吸収し、脆性破壊を防止します。Co 含有量が 10% の場合、塑性分散により圧縮強度と靱性のバランスが最適化されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

界面安定性

WC と Co 間の界面接合強度 ($> 50 \text{ MPa}$) は、Co の濡れ性 (接触角 $< 15^\circ$) と界面エネルギー $< 1.5 \text{ J/m}^2$ によって達成されます。Co プール (サイズ $> 5 \mu\text{m}$) などの界面欠陥 ($> 0.5\%$) が多い場合、圧縮強度は 10%~15% 低下します。

熱応力の影響:

焼結時の冷却速度 ($3 \sim 5^\circ\text{C}/\text{分}$) によって熱応力 ($< 100 \text{ MPa}$) が制御されます。冷却速度が速すぎると ($> 10^\circ\text{C}/\text{分}$)、微小亀裂が発生し、圧縮強度が 5~10% 低下する可能性があります。

7.0.3.5. 超硬合金の圧縮強度の応用上の意義

高い圧縮強度を持つ超硬合金は、高荷重や過酷な環境で広く使用されています。以下は具体的なシナリオの詳細な分析です。

航空ツール

要件: 切断中に 4000 MPa を超える局所圧力に耐え、エッジの完全性を維持するために高い圧縮抵抗が必要です。

性能: 圧縮強度が 5000 MPa の WC-10Co ツールは、切削速度が 800 m/分 を超える場合、寿命が 15 時間を超えます。これは、圧縮強度が 4000 MPa の材料よりも 25% 長いです。

メカニズム: 高い圧縮強度により、エッジの圧縮変形が低減され (ひずみ $< 0.1\%$)、切断精度と耐久性が確保されます。

深海ドリル

要件: 80 MPa を超える圧力の深海環境で作業するため、高い圧縮荷重と海水腐食に耐える必要があります。

性能: 圧縮強度 5500 MPa の WC-8Co ドリルビット、掘削距離 $> 1500 \text{ m}$ 、耐圧性が 40% 向上し、耐用年数が 5 年に延長されました。

メカニズム: 深海の高圧 ($> 80 \text{ MPa}$) に耐える高い圧縮抵抗と、腐食の影響を低減する CrN コーティング (厚さ $2 \sim 4 \mu\text{m}$) を組み合わせました。

耐圧型

要件: 変形や破損を防ぐために、高周波押し出し ($> 10^6$ 回) は局所的な高圧 ($> 5000 \text{ MPa}$) に耐える必要があります。

性能: 6000 MPa の圧縮強度を持つ WC-12Co ダイ、押し出し回数は 10^6 回を超え、 4500 MPa の圧縮強度を持つダイよりも 30% 高くなります。

メカニズム: 高い圧縮強度により、金型表面のへこみ (深さ $< 0.5 \mu\text{m}$) が減少し、耐用年数が延長されます。

高温条件

要件: 航空タービンブレードの加工など、高温切断 ($> 800^\circ\text{C}$) には熱応力に対する耐性が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

必要です。

性能: 傾斜構造超硬合金 (表面 6%Co、内部 12%)、圧縮強度 4500 MPa、寿命 850°C で 4000 時間以上、一般材料より 35% 向上。

メカニズム: 高い圧縮抵抗と酸化物層 (WO_3 、厚さ約 $2\text{ }\mu\text{m}$) を組み合わせることで、高温圧縮に耐え、熱応力 ($<150\text{ MPa}$) を軽減します。

7.0.3.6.超硬合金の圧縮強度の最適化と将来の開発

圧縮強度をさらに向上させるには、次の戦略を採用できます。

微細構造の最適化:

粒径は $0.2\sim0.5\mu\text{m}$ で、高エネルギーボールミル処理 (速度 $300\sim500\text{rpm}$ 、時間 $20\sim40$ 時間) により圧縮強度は $5000\sim6000\text{MPa}$ に達します。

($K_{Ic} > 12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) のバランスを確保するために $8\%\sim12\%$ に制御されます。

添加剤制御:

$0.2\%\sim0.5\%$ の VC または Cr_3C_2 を添加すると、粒界強度が $5\%\sim10\%$ 、圧縮強度が $3\%\sim5\%$ 増加します。

脆い相の形成を防ぐため、 0.8% を超える添加は避けてください (比率 $>0.5\%$)。

表面強化:

CrN コーティング (厚さ $2\sim4\mu\text{m}$ 、硬度 $\text{HV}3000\sim3500$) を施すことで、表面の圧縮抵抗が向上し、強度が $5\%\sim10\%$ 増加します。

レーザークラディング (出力 $1.5\sim2.5\text{kW}$ 、厚さ $50\sim100\mu\text{m}$) により高硬度層が形成され、圧縮抵抗が $10\%\sim15\%$ 向上します。

プロセス最適化:

焼結温度 $1400\sim1500^\circ\text{C}$ 、真空度 $<10^{-2}\text{Pa}$ 、密度 $>99\%$ 、多孔度 $<1\%$ 。

冷間等方圧成形 (CIP、圧力 $200\sim300\text{MPa}$) により、密度と圧縮強度が $5\sim10\%$ 増加します。

AI と IIoT :

AI を使用して粒界密度と Co 分布を予測し (誤差 $<0.2\%$)、ボールミルパラメータは履歴データに基づいて最適化されました (精度 ±0.5 時間)。

IIoT と組み合わせることで、応力分布 (精度 $\pm10\text{MPa}$) と粒径 (偏差 $<0.005\mu\text{m}$) をリアルタイムで監視し、圧縮強度の一貫性 (偏差 $<2\%$) を向上させることができます。

2025 年 6 月 1 日現在、xAI チームはディープラーニング (DNN) に基づく圧縮最適化モデルを開発しており、これにより圧縮強度の予測精度が $\pm50\text{MPa}$ まで向上し、深海ドリル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ピットの設計に役立つことが期待されています。

圧縮強度は、高負荷条件下での超硬合金の中核性能です。微細構造、プロセスパラメータ、そして新興技術を最適化することで、航空、深海、金型製造といった需要の高い用途のニーズを満たすことができます。AI と産業用 IoT（IIoT）の深層応用により、超硬合金の圧縮性能と生産効率はさらに向上し、今後 2～3 年で大きな飛躍を遂げると期待されています。

7.0.4. 超硬合金の耐摩耗性

超硬合金（WC-Co）の耐摩耗性は、表面の材料損失と摩耗に対する抵抗力であり、高摩擦または研磨環境における材料の耐久性を測定するための重要な性能指標です。以下では、その定義、測定方法、影響要因、微視的メカニズム、応用上の意義、最適化、そして将来の発展について詳細に説明します。

7.0.4.1. 超硬合金の耐摩耗性の定義

耐摩耗性とは、摩擦、研磨、または接触荷重下における超硬合金の表面摩耗に対する耐性であり、通常、摩耗速度（単位： $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ）または摩耗体積によって定量化されます。超硬合金は、その優れた耐摩耗性により、摩耗の激しい用途で広く使用されています。これは主に、硬質相である炭化タングステン（WC）の高い硬度（約 HV 2000-2500）と、結合相であるコバルト（Co）による靱性サポートによるものです。耐摩耗性は、切削、穴あけ、金型製造における超硬合金の耐用年数に直接影響します。

7.0.4.2. 超硬合金の耐摩耗性測定方法

耐摩耗性は通常、標準化された摩耗試験によって判定されます。以下に、一般的な方法と関連する詳細を示します。

砂流動摩耗試験（ASTM G65）

原理：砂の流れを研磨材として用い、荷重をかけて研磨摩耗を模擬し、摩耗後のサンプルの体積減少を測定します。摩耗率の計算式は以下のとおりです。

$$W_r = \frac{V}{F \cdot L}$$

ここで、 W_r は摩耗速度（ $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ）、 V は摩耗体積（ mm^3 ）、 F は荷重（N）、 L は摺動距離（m）です。

テスト条件：

粒子： SiO_2 （硬度 > 800 HV）。

滑走速度：1～2 m/s、持続時間 30～60 分。

環境：室温（20 ～ 25°C）、湿度 <50%。

利点：実際の摩耗条件をシミュレートし、テスト結果は産業用途に非常に関連しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

制限事項: 砂の粒子サイズと均一性を制御する必要があり、テスト結果は摩擦係数の影響を受けます。

ピンオンディスク摩耗試験 (ASTM G99)

原理: 試験片は回転ディスクと接触するピンとして機能し、荷重が加えられ、摩耗後の質量損失または深さが測定されます。

利点: 凝着摩耗や表面疲労摩耗の評価に適しています。

制限事項: ディスク材料に対する高い硬度要件と摩擦熱の影響を修正する必要性。

三体摩耗試験

原理: 3 番目の研磨剤を導入して、複雑な作業条件下での摩耗をシミュレートし、摩耗傷の幅と深さを測定します。

利点: 採掘ドリルビットの摩耗など、実際のアプリケーションシナリオに近いです。

砂流摩耗試験 (ASTM G65) は、その強力なシミュレーションと高度な標準化により、超硬合金の耐摩耗性を試験する主流の方法となっています。

7.0.4.3. 超硬合金の耐摩耗性に影響を与える要因

耐摩耗性は、微細構造、組成比、使用条件、環境要因など、複数の要因の影響を受けます。具体的な分析は以下の通りです。

硬度

效应: 硬度越高, 耐磨性越好, 遵循 Archard 磨损公式 ($V = k \cdot F \cdot L / H$, H 为硬度)。

メカニズム: 硬度が高いため、研磨切削深さと表面溝幅が減少します。

制限: 硬度が高すぎると靱性が低下し、脆性摩耗のリスクが増大する可能性があります。

粒度

効果: 結晶粒を微細化すると、一般的に耐摩耗性が向上しますが、過度の結晶粒微細化は悪影響を及ぼす可能性があります。

メカニズム: 適度な粒径は粒界密度を高め、研磨粒子の侵入を妨げます。一方、粒子が細かすぎると粒界欠陥が発生し、微小亀裂につながる可能性があります。

共同コンテンツ

効果: Co 含有量が適度であれば耐摩耗性は向上します。

メカニズム: 適切な量の Co は塑性サポートを提供し、凝着摩耗を軽減します。量が多すぎると、Co が軟化して材料損失が増加します。量が少なすぎると、靱性が欠如し、脆性摩耗が発生しやすくなります。

動作温度

影響: 高温により耐摩耗性が低下します。特に、粘着摩耗が顕著になります。

メカニズム: 高温により Co 相が軟化して、接着摩耗と物質移動が増加します。

表面粗さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

効果：表面の滑らかさにより耐摩耗性が向上します。

メカニズム：粗さが低いため、初期の摩耗点が減り、研磨剤の埋め込みが減少します。

環境腐食

影響：腐食環境により摩耗が加速されます。

メカニズム：酸性環境により Co 相が溶解し、腐食ピットが形成され、摩耗が増加します。

7.0.4.4. 超合金の耐摩耗性のマイクロメカニズム

耐摩耗性の微視的メカニズムには次の側面が含まれます。

WC 相の高硬度

WC 相の硬度 (HV 2000-2500) は研磨切削に耐え、表面材料の損失を減らし、耐摩耗性の主な源となります。

粒界強化

粒界はオロワン強化機構により研磨粒子の侵入を妨げ、適度な粒径 (0.5 ~ 1 μm) が最良の効果を発揮します。

Co 相の潤滑効果

Co 相の量が適切な場合、潤滑とプラスチックのクッションが提供され、粘着摩耗が減少します。一方、量が多すぎると、物質の移動が増加します。

表面酸化層は

高温下で WO₃ 酸化物層を形成し摩耗を低減しますが、層厚の不均一性により剥離が生じる場合があります。

摩耗タイプ

研磨摩耗：硬い粒子が表面を削り、溝を形成します。

凝着摩耗：高温で Co が軟化することで、物質の移動が発生します。

疲労摩耗：周期的な荷重下での微小亀裂の伝播により摩耗が激化します。

7.0.4.5. 超合金の耐摩耗性の応用上の意義

優れた耐摩耗性により、超合金は高摩擦条件下でも優れた性能を発揮します。具体的な用途は以下のとおりです。

航空ツール

要件：切削速度 > 800 m/分、高い摩擦と摩耗に耐える必要がある。

機構：高硬度により刃先の摩耗を軽減します。

鉱山用ドリルビット

要件：硬岩掘削 (岩石硬度 > 800 HV)、摩耗に耐える必要がある。

メカニズム：粒子の微細化により溝幅が狭くなり、耐用年数が延長されます。

耐摩耗性金型

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要件：高周波押し出し ($>10^6$ 回)、表面摩耗に耐える必要があります。

メカニズム：表面粗さが低いため、初期の摩耗点が低減します。

高温条件

需要：航空機タービンブレード加工などの高温切断($>800^{\circ}\text{C}$)。

メカニズム：表面コーティングにより高温接着摩耗を軽減します。

7.0.4.6. 超硬合金の耐摩耗性の最適化と将来の開発

耐摩耗性をさらに向上させるには、次の戦略を採用できます。

微細構造の最適化：

耐摩耗性を最適化すべく、高エネルギーボールミル処理により $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ の粒径が選択され、実現されています。

可塑性と硬度のバランスをとるために、Co 含有量は $8\% \sim 12\%$ に制御されます。

添加剤制御：

少量の VC または Cr_3C_2 を添加すると、粒界強度が向上し、摩耗が低減します。

脆い相の形成を防ぐため、過剰な添加は避けてください。

表面強化：

CrN コーティングを施して表面硬度を高め、摩耗率を低減します。

レーザークラディングにより高硬度層を形成し、耐摩耗性をさらに向上させます。

プロセス最適化：

焼結温度 $1400 \sim 1500^{\circ}\text{C}$ 、真空度 $<10^{-2} \text{ Pa}$ 、高密度を確保。

表面は低粗度に研磨されており、初期の摩耗を軽減します。

AI と IIoT :

AI を活用して摩耗挙動を予測し、微細構造設計を最適化します。

IIoT と組み合わせることで、摩擦係数と表面状態をリアルタイムで監視し、耐摩耗性の一貫性を向上させることができます。

耐摩耗性は、高摩擦条件下における超硬合金の中核性能です。微細構造、表面処理、そして新技術の最適化により、航空、鉱業、高温加工といった分野の高い要求を満たすことができます。AI と産業用 IIoT (IIoT) の深層応用により、今後 2~3 年で超硬合金の耐摩耗性と生産効率は大幅に向上すると期待されています。

7.0.5. 超硬合金の疲労抵抗

超硬合金 (WC-Co) の耐疲労性は、繰り返し荷重下における疲労破壊および亀裂伝播に対する抵抗力であり、材料の長期使用における耐久性を測る重要な機械的特性指標です。以下では、その定義、測定方法、影響要因、ミクロメカニズム、応用意義、最適化、そして将来の発展について詳細に説明します。

7.0.5.1. 超硬合金の疲労抵抗の定義

耐疲労性とは、繰り返しの荷重負荷と除荷負荷条件下での疲労き裂の発生と成長に対する

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超硬合金の耐性を指し、通常は疲労寿命（サイクル数）またはき裂成長速度（ da/dN ）によって特徴付けられます。超硬合金の耐疲労性は、主に硬質相である炭化タングステン（WC）の硬度と、結合相であるコバルト（Co）による靱性サポートによって実現されており、切削工具やドリルの長期使用など、高頻度の繰り返し荷重を受ける状況に適しています。

7.0.5.2. 超硬合金の疲労抵抗の測定方法

疲労耐性は通常、標準化された疲労試験によって判定されます。以下に、一般的な方法と関連する詳細を示します。

回転曲げ疲労試験（ASTM E466）

原理：試験片を回転状態で交番曲げ荷重にさらし、疲労破壊に至るまでのサイクル数を記録します。疲労寿命はサイクル数（N）で表されます。

テスト条件：

負荷周波数：10～50 Hz。

（ $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ）：0.1～0.3。

環境：室温（20 ～ 25℃）、湿度 <50%。

利点：実際の交番応力条件をシミュレートし、高サイクル疲労性能の評価に適しています。

制限事項：試験片の表面品質を制御する必要があり、試験結果は応力集中の影響を受けます。

軸方向疲労試験（ASTM E606）

原理：試験片に軸方向の交番荷重を加え、疲労寿命または亀裂成長速度を測定します。

利点：低サイクル疲労および亀裂成長挙動の評価に適しています。

制限事項：テスト機器には高い要件があり、応力の分布を修正する必要があります。

ひび割れ成長試験（ASTM E647）

dN ）と応力集中係数（ ΔK ）の関係を測定します。

利点：亀裂成長メカニズムに関する定量的なデータを提供します。

補助技術：光学顕微鏡（解像度 < 1 μm ）または走査型電子顕微鏡（SEM）と組み合わせて、亀裂の形態を観察します。

回転曲げ疲労試験は、その強力なシミュレーションと高度な標準化により、超硬合金の疲労耐性を試験する主流の方法となっています。

7.0.5.3. 超硬合金の疲労抵抗に影響を及ぼす要因

疲労抵抗は、微細構造、構成比、荷重条件、環境要因など、複数の要因の影響を受けます。具体的な分析は以下の通りです。

粒度

効果：結晶粒の微細化により、一般的に疲労耐性が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

メカニズム：微細粒子は粒界の密度を高め、亀裂の伝播を妨げます。一方、過度に粗い粒子は応力集中点を形成する可能性があります。

共同コンテンツ

効果：Co 含有量が適度であれば、抗疲労性能は向上します。

メカニズム：適切な量の Co は塑性緩衝材となり、応力集中を軽減します。量が多すぎると Co が軟化して疲労強度が低下します。量が少なすぎると靱性が欠如し、割れが発生しやすくなります。

応力比

影響：応力比は疲労寿命に影響します。

メカニズム：応力比が低い ($R < 0.1$) と疲労寿命が延び、応力比が高い ($R > 0.5$) と亀裂の成長が加速します。

周囲の湿度

影響：湿度が高いと疲労抵抗が低下します。

メカニズム：湿度が増加すると、Co 相がわずかに腐食し、微小亀裂が形成されて疲労破壊が加速される可能性があります。

表面欠陥

影響：表面品質は疲労耐性に影響します。

メカニズム：表面のひび割れや粗さ ($R_a > 0.2 \mu\text{m}$) が疲労亀裂の原因となり、耐用年数が減少します。

7.0.5.4. 超硬合金の疲労抵抗の微視的メカニズム

疲労抵抗の微視的メカニズムには、次の側面が含まれます。

WC 相の高硬度

WC 相の硬度 (HV 2000-2500) は疲労耐性の基礎となり、周期的な応力による塑性変形に抵抗します。

粒界強化

粒界はオロワン強化機構により亀裂伝播を妨げ、適度な粒径 ($0.5 \sim 1 \mu\text{m}$) が最良の効果を発揮します。

Co 相の塑性制御

Co 相の量が適切な場合、塑性変形によりエネルギーを吸収し、亀裂の伝播を遅らせます。一方、Co 相の量が多すぎると、疲労損傷が増加します。

亀裂偏向

WC 粒界により亀裂経路が偏向し、亀裂成長抵抗が増加します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

疲労損傷の種類

表面の発生: 周期的な応力により、表面に微小亀裂 (長さ $< 0.1 \text{ mm}$) が発生します。

内部拡張: 亀裂は粒界または Co プールに沿って拡張します。

破壊: 疲労寿命が尽きると最終的な破壊が発生します。

7.0.5.5. 超硬合金の疲労耐性の応用上の意義

優れた耐疲労性により、超硬合金は繰り返し荷重下でも優れた性能を発揮します。具体的な用途は以下のとおりです。

航空ツール

要件: 高周波切断 ($> 500 \text{ Hz}$)、繰り返し疲労に対する耐性。

メカニズム: 高い硬度により表面のひび割れの発生が抑えられ、耐用年数が延びます。

鉋山用ドリルビット

要件: 周期的な衝撃 (周波数 $> 500 \text{ Hz}$)、疲労破壊耐性が必要。

メカニズム: 粒界強化により亀裂の伝播が遅くなり、耐久性が向上します。

耐摩耗性金型

要件: 高周波押し出し ($> 10^6$ 回)、疲労耐性。

メカニズム: 表面欠陥が少ないと疲労亀裂の発生源が減ります。

機械部品

要件: 長期にわたる繰り返し荷重、疲労耐性が必要です。

メカニズム: 適切な量の Co は靱性を向上させ、疲労損傷を遅らせます。

7.0.5.6. 超硬合金の疲労抵抗の最適化と今後の開発

疲労耐性をさらに向上させるには、次の戦略を採用できます。

微細構造の最適化:

粒度は $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ が選択され、高エネルギーボールミル処理によって実現され、粒界強化が促進されます。

靱性と硬度のバランスをとるために、Co 含有量は $8\% \sim 12\%$ に制御されます。

添加剤制御:

少量の VC または TaC を添加すると、粒界強度が向上し、亀裂の伝播が抑制されます。脆い相の形成を防ぐため、過剰な添加は避けてください。

表面強化:

表面疲労耐性を向上させるために、TiN または CrN コーティングを施します。

疲労亀裂の発生源を減らすために、低粗さ ($Ra < 0.1 \mu\text{m}$) まで研磨します。

プロセス最適化:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

焼結温度 1400～1500℃、真空度 $<10^{-2}$ Pa、高密度を確保。

冷却速度（3～5℃/分）を制御して熱応力を軽減します。

AI と IIoT :

AI を使用して疲労寿命を予測し、微細構造設計を最適化します。

IIoT と組み合わせることで、応力の分布と亀裂の伝播をリアルタイムで監視し、疲労耐性の一貫性を向上させることができます。

耐疲労性は、繰り返し荷重下における超硬合金の中核性能です。微細構造、表面処理、そして新興技術の最適化により、航空、鉱業、機械製造といった分野の高い要求を満たすことができます。AI と産業用 IoT （ IIoT ） の深層応用により、今後 2～3 年で超硬合金の耐疲労性と生産効率は大幅に向上すると期待されています。

7.0.6. 超硬合金の耐衝撃性

超硬合金（WC-Co）の耐衝撃性は、高い衝撃荷重下における破壊や変形に対する抵抗力であり、動的負荷環境下における材料の信頼性を測る重要な機械的性能指標です。以下では、その定義、測定方法、影響要因、微視的メカニズム、応用上の意義、最適化、そして将来の発展について詳細に説明します。

7.0.6.1. 超硬合金の耐衝撃性の定義

耐衝撃性とは、瞬間的な高エネルギー衝撃を受けた際に、超硬合金が亀裂の発生や破壊に抵抗する能力を指し、通常は衝撃エネルギー（単位 J）または衝撃靱性によって特徴付けられます。超硬合金の耐衝撃性は、主に結合相であるコバルト（Co）による靱性と、硬質相である炭化タングステン（WC）による硬度サポートによって実現されており、鉱山用ドリルや高速切削工具などの高衝撃用途に適しています。

7.0.6.2. 超硬合金の耐衝撃性測定方法

耐衝撃性は通常、標準化された衝撃試験によって測定されます。以下に、一般的な方法と関連する詳細を示します。

シャルピー衝撃試験（ASTM E23）

原理：試験片に 3 点曲げの状態で振り子で衝撃を与え、破壊に要したエネルギー（衝撃仕事）を測定します。

テスト条件：

試験片寸法：55 × 10 × 10 mm、V ノッチ付き（深さ 2 mm）。

衝突速度：5～5.5m/秒。

環境：室温（20 ～ 25℃）。

利点：実際の衝撃条件をシミュレートし、テスト結果はアプリケーション シナリオと高

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

い相関関係にあります。

制限事項：ノッチの形状と試験片のサイズは厳密に制御する必要があり、結果はノッチの感度によって影響を受けます。

アイゾット衝撃試験（ASTM E23）

原理：サンプルを片持ち梁の形で固定し、振り子の衝撃を与えて破壊エネルギーを測定します。

利点：小さなサンプルに適しており、操作が簡単です。

制限事項：テスト結果は、試験片をクランプする方法によって影響を受けます。

落重衝撃試験

原理：重いハンマーが指定された高さから自由落下し、サンプルに衝撃を与えて材料の耐衝撃性を測定します。

利点：高エネルギー衝撃をシミュレートし、動的パフォーマンスの評価に適しています。

補助技術：高速撮影(フレームレート > 1000 fps) を組み合わせて破壊プロセスを観察したり、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用して破壊形態を分析したりします。

シャルピー衝撃試験は、その高い標準化と強力なシミュレーションにより、超硬合金の耐衝撃性を試験する主流の方法となっています。

7.0.6.3. 超硬合金の耐衝撃性に影響を与える要因

耐衝撃性は、微細構造、成分比、試験条件、環境要因など、複数の要因の影響を受けます。具体的な分析は以下の通りです。

共同コンテンツ

効果：Co 含有量が多いほど、耐衝撃性が向上します。

メカニズム：Co 相は塑性変形により衝撃エネルギーを吸収し、脆性破壊を軽減します。

Co 含有量が低すぎると、材料の脆さが増加します。

粒度

効果：適度な粒径は耐衝撃性に有利です。

メカニズム：粒径が適度(0.5～1 μm)の場合、粒界強化と靱性のバランスが取れており、粒子が細かすぎると粒界欠陥が発生する可能性があり、粒子が粗すぎると亀裂伝播に対する抵抗が低下します。

添加剤

効果：添加剤により耐衝撃性が向上します。

メカニズム：TaC または Cr₃C₂ を添加すると、粒界強度が向上し、粒界破壊が減少します。

試験温度

影響：低温により耐衝撃性が低下します。

メカニズム：低温では Co 相の靱性が低下し、脆性破壊の傾向が高まります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面欠陥

影響：表面の欠陥により耐衝撃性が低下します。

メカニズム：表面のひび割れや粗さ（ $Ra > 0.2 \mu m$ ）が応力集中点となり、衝撃エネルギーが減少します。

7.0.6.4. 超硬合金の耐衝撃性の微視的メカニズム

耐衝撃性の微視的メカニズムには、次の側面が含まれます。

Co 相の塑性吸収

Co 相は塑性変形によって衝撃エネルギーを吸収し、き裂の伝播を遅延させます。適切な量の Co は衝撃靱性を向上させます。

WC 粒界での亀裂の偏向

WC 粒界は亀裂経路の偏向を引き起こし、破壊経路の長さを増加させ、破壊速度を低下させます。

粒界強化

粒界はオロワン強化機構により亀裂伝播を妨げ、適度な粒径（ $0.5 \sim 1 \mu m$ ）が最良の効果を発揮します。

界面結合

WC と Co 間の界面結合強度は Co の濡れによって達成され、界面欠陥が亀裂の発生を引き起こす可能性があります。

衝撃骨折型

粒界破壊：WC 粒界に沿って亀裂が広がり、Co 含有量が低い場合に発生しやすくなります。

粒内破壊：亀裂は WC 粒子を貫通し、高衝撃エネルギーでより一般的に発生します。

混合破壊：粒界破壊と粒内破壊が共存し、実際の作業条件では一般的です。

7.0.6.5. 超硬合金の耐衝撃性の応用上の意義

優れた耐衝撃性により、超硬合金は高衝撃の条件下でも優れた性能を発揮します。具体的な用途は以下のとおりです。

鉋山用ドリルビット

要件：高周波衝撃（ $>500 \text{ Hz}$ ）、衝撃破壊に対する耐性。

メカニズム：高い Co 含有量により衝撃エネルギーを吸収し、破損のリスクを軽減します。

航空ツール

要件：高速切断（ $>800 \text{ m/分}$ ）、動的衝撃に対する耐性。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

メカニズム：粒界強化により、亀裂の成長が遅れ、耐用年数が延長されます。

インパクトダイ

要件：高頻度スタンピング(> 10⁶ 回)、衝撃破損に対する耐性。

メカニズム：表面欠陥が少ないため、ひび割れの発生が減ります。

深海機器

要件：深海の圧力衝撃 (>80 MPa)、動的荷重に耐える必要があります。

メカニズム：適切な量の Co と表面コーティングにより耐衝撃性が向上します。

7.0.6.6. 超硬合金の耐衝撃性の最適化と将来の開発

耐衝撃性をさらに向上させるには、次の戦略を採用できます。

微細構造の最適化：

粒度は 0.5～ 1 μ m が選択され、高エネルギーボールミル処理によって実現され、粒界強化と靱性のバランスが最適化されます。

衝撃エネルギー吸収性を向上させるため、Co 含有量は 8% ～ 12% に制御されています。

添加剤制御：

少量の TaC または Cr₃C₂ を添加すると、粒界強度が向上し、粒界破壊が減少します。

脆い相の形成を防ぐため、過剰な添加は避けてください。

表面強化：

TiN または CrN コーティングを施します。

応力集中点を減らすために、低粗さ (Ra < 0.1 μ m) まで研磨します。

プロセス最適化：

焼結温度 1400～1500°C、真空度 < 10⁻² Pa、高密度を確保。

冷却速度 (3～5°C/分) を制御して熱応力を軽減します。

AI と IIoT :

AI を使用して衝撃破壊挙動を予測し、微細構造設計を最適化します。

IIoT と組み合わせることで、亀裂の発生と伝播をリアルタイムで監視し、耐衝撃性の一貫性を向上させることができます。

耐衝撃性は、動的負荷条件下における超硬合金の中核性能です。微細構造、表面処理、そして新興技術の最適化により、鉱業、航空、深海機器などの高度な要求を満たすことができます。AI と産業用 IoT (IIoT) の深層応用により、今後 2～3 年で超硬合金の耐衝撃性と生産効率が大幅に向上すると期待されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.0.7. 超硬合金の機械的特性の総合的な分析と応用

超硬合金（WC-Co）の機械的特性には複雑な相互作用とトレードオフがあり、様々な用途シナリオのニーズを満たすには、これらを総合的に考慮する必要があります。以下では、性能トレードオフ、最適化戦略、そして将来の開発の観点から詳細に分析します。

7.0.7.1. 超硬合金の機械的特性間のトレードオフ

超硬合金の機械的特性には一定のトレードオフがあり、それは以下の側面に反映されています。

硬度と靱性

関係：硬度が高いと靱性が低くなるのが一般的で、その逆も同様です。

メカニズム：高い硬度（WC 粒子が細かく、Co 含有量が低い）は変形抵抗を高めますが、塑性と破壊靱性（ K_{Ic} ）を低下させ、脆性破壊を起こしやすくなります。また、高い靱性（Co 含有量が多い）は塑性変形によってエネルギーを吸収しますが、硬度が低下し、耐摩耗性が弱くなります。

用途への影響：航空工具は摩耗に耐えるために高い硬度を必要とし、一方、鉱山用ドリルは衝撃に耐えるために高い靱性を必要とします。これら2つの特性は、特定の作業条件に応じてバランスをとる必要があります。

疲労および衝撃耐性

関係：疲労耐性と衝撃耐性には、微細構造に対する要件が異なります。

メカニズム：疲労耐性は、亀裂の伝播を防ぐための微細構造の最適化（適度な粒径など）に依存します。一方、耐衝撃性には、エネルギー吸収能力を向上させ、瞬間的な破壊を減らすために、より高い Co 含有量が必要です。

アプリケーションの影響：高周波の周期的負荷（航空切削工具など）では疲労耐性がより重要になり、高衝撃のシナリオ（採掘ドリルビットなど）では耐衝撃性が優先されます。

耐摩耗性と環境適応性

関係：耐摩耗性は、高温や腐食などの過酷な環境では問題となることがあります。

メカニズム：高温（ $> 800^{\circ}\text{C}$ ）により Co 相が軟化して凝着摩耗が増加します。腐食環境（ $\text{pH} < 5$ ）により Co 相が溶解し、腐食ピットが形成されて摩耗が加速されます。

アプリケーションの影響：航空タービンブレードの加工では高温耐摩耗性を考慮する必要があり、深海ドリルビットでは腐食環境での性能に注意する必要があります。

7.0.7.2. 超硬合金の機械的特性の最適化戦略

超硬合金の総合的な性能を最適化するために、次の戦略を採用することができます。

微細構造制御

粒径：WC の粒径は $0.2 \sim 2\mu\text{m}$ です。微粒子（ $0.5\mu\text{m}$ 未満）は硬度と耐摩耗性を向上させ、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

粗微粒子（1~2 μm ）は靱性と耐衝撃性を向上させます。

Co 含有量：6%~15%に制御。低 Co 含有量（6%~8%）は高硬度要件に適しており、高 Co 含有量（12%~15%）は高靱性と耐衝撃性要件に適しています。

加法最適化

少量の VC または TaC を添加すると、粒界強度が強化され、靱性を維持しながら耐摩耗性および耐疲労性が向上します。

脆い相の形成を防ぐため、過剰な添加は避けてください。

表面改質技術

CrN または TiN コーティングを施すと、表面硬度と耐摩耗性が向上し、高温および腐食環境でのパフォーマンスが向上します。

レーザークラディングやイオン注入技術を用いて高硬度の表面層を形成し、耐衝撃性と耐疲労性を向上させます。

7.0.7.3. 超硬合金の機械的特性の応用シナリオ

包括的な最適化により、超硬合金は次のような厳しい用途のニーズを満たすことができます。

航空ツール

要件：切削摩耗に耐える高い硬度と耐摩耗性、周期的な負荷に耐える高い耐疲労性。

最適化戦略：粒径 0.2~0.5 μm 、Co 含有量 6%~8%、表面コーティング CrN。

鉱山用ドリルビット

要件：衝撃に耐える高い靱性と耐衝撃性、硬い岩石の摩耗に耐える高い耐摩耗性。

最適化戦略：粒径 1~2 μm 、Co 含有量 12%~15%、TaC を添加して粒界を強化します。

耐摩耗性金型

要件：押し出し摩耗に耐える高い硬度と耐摩耗性、耐用年数を延ばす高い耐疲労性。

最適化戦略：粒径 0.5~1 μm 、Co 含有量 8% ~ 12%、表面を低粗さに研磨。

7.0.7.4. 超硬合金の機械的特性の将来的な発展

将来的には、以下の技術により、超硬合金の総合的な性能と応用信頼性がさらに向上します。

AI テクノロジー: AI を使用してパフォーマンスのトレードオフを予測し、微細構造設計（粒径や Co 含有量など）を最適化します。

産業用 IoT (IIoT): 使用中の応力分布と亀裂伝播をリアルタイムで監視し、パフォーマンスの一貫性を向上させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高度な製造技術：3D プリントとナノテクノロジーを組み合わせ、表面は高硬度、内部は高靱性などの傾斜構造の超硬合金を開発し、多機能のニーズを満たします。

包括的な分析により、超硬合金の機械的特性は、特定の用途要件を満たすために慎重に評価・最適化する必要があることが示されています。微細構造、添加剤、表面改質技術を調整することで、超硬合金は航空、鉱業、金型製造など幅広い用途に活用できます。将来的には、AI と産業用 IoT （IIoT）の活用がさらに進み、その性能向上と用途拡大がさらに促進されるでしょう。

7.1 超硬合金の硬度と靱性のバランス

（1）超硬合金の硬度

超硬合金（WC-Co）の硬度は、変形や摩耗に対する耐性を指し、通常はビッカース硬度（HV）で表され、HV 1200～1800 の範囲です。硬度は以下の要因によって影響を受けます。

WC の粒径（0.2～0.5

μm など）が大きいほど、硬度が高くなり、HV 1800 に達することがあります（ホールペッチ効果）。

Co 含有量

Co 含有量が低い場合（6% ～ 8% など）、硬度は高くなります（HV 1600 ～ 1800）。Co 含有量が高い場合（12% ～ 15% など）、硬度は低くなります（HV 1200 ～ 1400）。

添加剤として使用すると、

粒成長を抑制し、硬度を 5%～10%、HV 2000 まで増加させることができます。

表面改質

により、硬度を HV 2000 ～ 2500 まで高めることができます。

超硬合金の硬度

超硬合金（WC-Co）の硬度は、試験方法や用途に応じて様々な方法で表すことができます。一般的な表示方法は以下の通りです。

超硬合金のビッカース硬度（HV）範囲

： HV 1200～1800、表面改質後最大 HV 2000～2500。

説明：ビッカース硬度計を用いて標準荷重（通常 30kg）を負荷し、圧痕面積から硬度を算出します。利点：超硬合金の幅広い測定範囲に適しており、変形抵抗を反映できます。

ロックウェル硬度（HR）

範囲：HRA 80～94（A スケール）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

説明：ダイヤモンドコーンを用いて 150kg の荷重を加え、押し込み深さを測定します。利点：試験時間が短く、大規模な試験に適しています。

ブリネル硬度 (HB)

範囲：HB 1000～1600 (3000 kg などの大きな荷重が必要)。

説明：鋼球または超硬合金球を用いて圧入し、圧痕面積を計算します。

制限事項：高硬度材料（超硬合金など）への適用は限定的であり、荷重調整が必要です。

微小硬度 (HV0.1～HV1)

範囲：HV 1200～1800 (0.1～1kg 程度の微小荷重)。

説明：微小領域の測定に使用され、特に粒子やコーティングの分析に適しています。利点：高精度で、局所的な特性評価に適しています。

これらの表示方法は、超硬合金の圧縮、変形、摩耗に対する耐性を反映しています。ピッカース硬度 (HV) は、その幅広い適用範囲から最も一般的に使用されています。実際の値は、WC の粒径、Co 含有量、添加剤（例えば、VC は HV を 5%～10% 増加させる可能性があります）の影響を受けます。

(2) 超硬合金の靱性

超硬合金 (WC-Co) の靱性は、通常、破壊靱性 (K_{Ic}) によって特徴付けられ、その範囲は $8 \sim 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。その靱性特性は以下のとおりです。

Co 含有量が

多いほど、靱性は向上します。Co 含有量が 6% の場合、 K_{Ic} は約 $8 \sim 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。

Co 含有量が 12%～15% の場合、 K_{Ic} は $14 \sim 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に達します。

粒径が粗い

場合 ($1 \sim 2 \mu\text{m}$ など) は靱性が高くなります ($K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。粒径が細かすぎる場合 ($0.2 \mu\text{m}$ 未満) は、粒界滑りにより靱性が低下する可能性があります ($K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。

TaC の追加 (0.2 %～0.5%) を添加剤として使用すると、

粒界が強化され、 K_{Ic} が約 5%～10% 増加します。

試験方法

は、片刃ノッチビーム法 (SENB 法) です。例えば、WC-10Co (粒径 $0.5 \mu\text{m}$ 、Co 10%) の K_{Ic} は約 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ で、鉱山用ドリルビットに適しています。硬度と靱性はバランスが取れている必要があり、靱性が高いと通常、硬度が低下します ($HV < 1400$)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（3）超硬合金の靱性の種類

超硬合金（WC-Co）は、主に以下の指標と方法によって特徴付けられ、破壊に耐え、エネルギーを吸収する能力を反映しています。

破壊靱性（ K_{Ic} ） 超硬合金の破壊靱性（ K_{Ic} ）とは、亀裂が存在する場合に亀裂の伝播に抵抗する超硬合金の能力であり、その単位は $MPa \cdot m^{1/2}$ です。超硬合金の K_{Ic} は通常、硬質相の炭化タングステン（WC）と結合相のコバルト（Co）の相乗効果によって決まり、材料の硬度と靱性のバランスを反映します。

K_{Ic} は、き裂伝播および破壊に対する耐性を示す重要な機械的特性指標であり、材料の信頼性と耐用年数に極めて重要な役割を果たします。以下では、重要性和影響要因に関する様々な側面について詳しく説明します。

超硬合金の破壊靱性の重要性

破壊靱性（ K_{Ic} ）は、高応力、衝撃、または欠陥条件下で構造的完全性を維持するための超硬合金の中核特性です。超硬合金は、その高い硬度（通常は WC で提供、約 HV 2000 ~ 2500）により、切削、穴あけ、金型製造に広く使用されていますが、この高い硬度はしばしば高い脆性を伴うため、動的負荷がかかったりマイクロクラックが存在すると、材料が不規則に破壊しやすくなります。 K_{Ic} は、このような脆性破壊に抵抗する材料の能力を定量化し、実際の使用時に超硬合金が予期しない衝撃や欠陥による破損に耐えられるかどうかを直接判断します。たとえば、高頻度の衝撃や周期的な負荷の環境では、 K_{Ic} が低いとマイクロクラックがすぐにマクロ破損に拡大する可能性があります。また、 K_{Ic} が高いと疲労寿命と耐衝撃性が大幅に向上します。さらに、 K_{Ic} は加工中の安全性にも影響を及ぼします。超硬合金工具の突然の破損は、生産の中断や設備の損傷につながる可能性があります。したがって、 K_{Ic} を最適化することは、特に過酷な条件（高温、高圧、腐食環境など）下における産業用途における超硬合金の全体的な性能と信頼性を向上させるための重要な目標です。

超硬合金の破壊靱性に影響を与える要因

超硬合金の破壊靱性は、次のように、さまざまな微細構造、組成比、および製造プロセスパラメータによって影響を受けます。

共同コンテンツ

機能： Co は結合相として、その塑性変形能力を通じて K_{Ic} に大きな影響を与えます。

メカニズム： Co 含有量が増加すると、材料中の靱性相の割合が増加し、塑性分散能力が向上し、亀裂伝播が抑制されます。Co 含有量が低い場合（例えば 6% 以下）、WC 相が優勢となり、硬度は高いものの、塑性緩衝材が不足し、 K_{Ic} が低下します。一方、Co 含有量が高い場合（例えば 12% ~ 15%）、塑性が向上し、 K_{Ic} が大幅に増加します。

範囲とバランス： 一般的な Co 含有量は 6% ~ 15% ですが、10% ~ 12% が靱性と硬度の最適なバランスであると考えられています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

制限事項: Co 含有量が高すぎると硬度と耐摩耗性が低下する可能性があるため、特定のニーズに応じて調整する必要があります。

粒度

効果: WC 粒径が K_{Ic} に与える影響は 2 つあります。

机制: 较细的晶粒 (如 0.2-0.5 μm) 通过 Hall-Petch 效应 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$) 增加晶界密度 ($>10^{13} \text{ m}^{-2}$)，提高强度，但可能因晶界缺陷 (如空隙或微裂纹) 降低 K_{Ic} ；适中晶粒尺寸 (0.5-1 μm) 提供最佳的晶界强化与韧性平衡；较大晶粒 ($>2 \mu\text{m}$) 减少晶界密度，增强裂纹偏转能力， K_{Ic} 随晶粒粗大而有所提升，但硬度可能下降。

プロセスの影響: 粒径は焼結温度 (1400~1500°C) と焼結時間 (1~3 時間) によって制御されます。高温または長時間の焼結は、粒成長を引き起こしやすくなります。

添加剤

効果: VC、TaC、 Cr_3C_2 などの添加剤は K_{Ic} を大幅に向上させます。

メカニズム: これらの添加剤は、固溶または析出によって粒界を強化し、WC の粒成長を抑制し (粒界移動速度 $<10^{-10} \text{ m/s}$)、界面接合強度 ($>150 \text{ MPa}$) を高めます。例えば、VC (0.2%~0.5%) は VCx 薄層を形成し、粒界の弱点を低減します。TaC は粒界靱性を向上させ、粒界破壊の傾向を低減します。

制限事項: 添加量が多すぎると (例: 0.8% 以上) 脆い相 (例: 過剰な VCx) が形成され、 K_{Ic} が減少する可能性があります。

微細構造の均一性

影響: 微細構造の均一性は K_{Ic} に直接影響します。

メカニズム: WC 相と Co 相の均一な分布は応力集中を低減し、低気孔率 ($<1\%$) および粒界欠陥の少ない ($<0.5\%$) 構造は靱性を向上させます。Co が不均一に分布している場合 (例えば、 $5\mu\text{m}$ を超える Co プールの形成)、ひび割れは弱い部分に沿って伝播しやすくなり、 K_{Ic} 減少します。

プロセスの影響: 冷間等方圧プレス (CIP、圧力 200 ~ 300 MPa) または真空焼結により、微細構造の均一性が向上します。

焼結プロセス

影響: 焼結パラメータは K_{Ic} の最終的な性能に影響します。

メカニズム: 焼結温度 (1400~1500°C) が高すぎる、または焼結時間が長すぎると、結晶粒が粗大化し、Co が偏析して K_{Ic} が低下します。適切な温度と真空度 ($<10^{-2} \text{ Pa}$) により緻密な組織が確保され、靱性が最適化されます。冷却速度 (3~5°C/分) により熱応力 ($<100 \text{ MPa}$) が抑制され、微小亀裂の形成が回避されます。

最適化: 多段階焼結 (低温予備焼結 + 高温焼結など) により、微細構造の一貫性が向上します。

表面状態

影響: 表面欠陥や残留応力は K_{Ic} に影響します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

メカニズム: 表面ひび割れ、粗さ ($Ra > 0.2 \mu m$) または残留引張応力 ($> 200 MPa$) がひび割れの発生源となり、 K_{Ic} を低下させます。残留圧縮応力 ($> 400 MPa$) は、表面改質 (ショットピーニングなど) によって K_{Ic} を増加させることができます。

プロセスの影響: 表面状態を改善するために、 $Ra < 0.1 \mu m$ に研磨するか、コーティング処理 (TiN など) を行います。

微視的メカニズム

Co 相の塑性消散: Co 相は衝撃または応力を受けて塑性変形 (ひずみ速度約 $10^{-3} s^{-1}$) を起こし、亀裂エネルギーを吸収して亀裂の拡大を遅らせます。

粒界偏向とブリッジング: WC 粒界により亀裂の偏向 (角度 $20^\circ \sim 40^\circ$) が生じ、経路長が増加します。Co 相は亀裂の先端でブリッジング効果を形成し、エネルギーを消費します。

界面の接合強度: WC-Co 界面 (接合強度 $> 50 MPa$ 、接触角 $< 15^\circ$) は亀裂伝播抵抗に影響を及ぼし、界面欠陥 (ボイド $> 0.5\%$ など) は K_{Ic} を低下させます。

マイクロクラックの抑制: 添加剤は粒界を強化し、マイクロクラックの発生 (長さ $< 0.05 mm$) を減らし、全体的な靱性を向上させます。

破壊靱性は、超硬合金の性能最適化の中核であり、さまざまな作業条件下でのニーズを満たすために、Co 含有量、粒径、添加剤、および製造プロセスを調整してバランスをとる必要があります。

(4) 超硬合金の衝撃靱性

超硬合金 (WC-Co) の衝撃靱性は、高エネルギー衝撃荷重下における破壊および変形に対する抵抗力であり、動的荷重環境下における材料の信頼性を測定するための重要な機械的特性指標です。以下では、その定義、重要性、測定方法、影響因子、そして微視的メカニズムについて詳しく説明します。

超硬合金の衝撃靱性の定義

衝撃靱性とは、瞬間的な高エネルギー衝撃下における超硬合金のエネルギー吸収能力と破壊抵抗力を指し、通常は衝撃エネルギー (単位 J) または衝撃試験における破壊エネルギーで特徴付けられます。超硬合金の衝撃靱性は、主に結合相であるコバルト (Co) の塑性変形能と硬質相である炭化タングステン (WC) の硬度によって決定され、高衝撃環境下における材料の破壊抵抗を反映しています。

超硬合金の衝撃靱性の重要性

衝撃靱性は、動的条件下での超硬合金の性能にとって非常に重要です。超硬合金は、その高い硬度 (WC で提供、約 HV 2000-2500) により、鉋業、切削、金型製造に広く使用されていますが、高硬度はしばしば一定の脆さを伴い、高衝撃荷重 (高周波衝撃や突発荷重など) 下で脆性破壊を起こしやすくなります。衝撃靱性は、超硬合金がこのような瞬間的な荷重に破損なく耐えられるかどうかを直接決定します。たとえば、鉋山のドリルビットやスタンピングダイでは、衝撃靱性が低いと、高衝撃下で材料が急速に破損し、設備の損傷や生産中断を引き起こす可能性があります。一方、衝撃靱性が高いと、耐用年数を効果的

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に延ばし、安全性を向上させることができます。さらに、衝撃靱性は、極端な環境（低温や高温など）における超硬合金の信頼性にも影響し、材料の総合的な性能を最適化するための重要な指標です。

超硬合金の衝撃靱性測定方法

衝撃靱性は通常、標準化された試験によって測定されます。以下に、一般的な方法と関連する詳細を示します。

シャルピー衝撃試験（ASTM E23）

原理: 試験片に3点曲げの状態で振り子で衝撃を与え、破壊に要したエネルギー（衝撃仕事）を測定します。

試験条件:

試験片寸法: 55 × 10 × 10 mm、V ノッチ付き（深さ 2 mm）。

衝突速度: 5 ~ 5.5m/秒。

環境: 室温 (20 ~ 25°C)。

利点: 実際の衝撃条件をシミュレートし、その結果はアプリケーション シナリオに非常に関連しています。

制限事項: ノッチの形状と試験片のサイズは厳密に制御する必要があり、テスト結果はノッチの感度によって影響を受けます。

アイゾット衝撃試験（ASTM E23）

原理: 片持ち梁の形でサンプルを固定し、振り子の衝撃を与えて破壊エネルギーを測定します。

利点: 小さなサンプルに適しており、操作が簡単です。

制限事項: 結果はクランプ方法によって影響を受けます。

落重衝撃試験

原理: 重いハンマーを指定の高さから自由落下させてサンプルに衝撃を与え、耐衝撃性を測定します。

利点: 高エネルギー衝撃をシミュレートし、動的パフォーマンスの評価に適しています。

補助技術: 高速撮影（フレームレート > 1000 fps）を組み合わせることで破壊過程を観察したり、走査型電子顕微鏡（SEM）を使用して破壊形態を分析したりします。

シャルピー衝撃試験は、その高い標準化と強力なシミュレーションにより、超硬合金の衝撃靱性を試験する主流の方法となっています。

超硬合金の衝撃靱性に影響を与える要因

超硬合金の衝撃靱性は、微細構造、組成比、試験条件、環境要因によって次のように影響を受けます。

共同コンテンツ

機能: Co 含有量は衝撃靱性に影響を及ぼす主要な要因です。Co 含有量が高いほど、衝撃靱性は向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

メカニズム: Co 相は塑性変形（ひずみ速度約 10^{-3} s^{-1} ）を通じて衝撃エネルギーを吸収し、脆性破壊の傾向を低減します。Co 含有量が低い場合（例えば 6% 以下）、材料は主に WC 相となり、硬度は高いものの塑性が不十分で衝撃靱性が低下します。一方、Co 含有量が高い場合（例えば 12%～15%）、塑性が向上し、衝撃靱性が大幅に向上します。

範囲とバランス: Co 含有量は 6% ～ 15% で、10% ～ 12% が通常、靱性と硬度の最適なバランスです。

制限事項: Co 含有量が高すぎると硬度と耐摩耗性が低下する可能性があるため、アプリケーションの要件に応じて調整する必要があります。

粒度

効果: WC 粒径が耐衝撃性に与える影響は 2 つあります。

メカニズム: 適度な粒径（ $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ ）は、粒界強化と靱性のバランスが最も良好です。粒界密度（ $>10^{13} \text{ m}^{-2}$ ）は、オロワン強化機構による亀裂伝播を阻害します。より微細な粒子（ $<0.2 \mu\text{m}$ ）は硬度を高めますが、粒界欠陥が増加し、衝撃靱性が低下する可能性があります。より大きな粒子（ $>2 \mu\text{m}$ ）は、亀裂の偏向経路を増加させ、衝撃靱性は向上しますが、硬度は低下します。

プロセスの影響: 粒径は焼結温度（ $1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ ）と焼結時間（1～3 時間）によって制御されます。温度が高すぎると結晶粒が粗くなります。

添加剤

機能: TaC や Cr_3C_2 などの添加剤は衝撃靱性を向上させることができます。

メカニズム: TaC は粒界強度（ $>150 \text{ MPa}$ ）を高め、粒界破壊を低減します。 Cr_3C_2 は粒成長（粒界移動速度 $<10^{-10} \text{ m/s}$ ）を抑制し、微細構造の安定性を向上させます。

制限事項: 添加量が多すぎると（例: 0.8% 以上）、脆い相が形成され、衝撃靱性が低下する可能性があります。

試験温度

影響: 温度は衝撃靱性に大きな影響を与えます。

メカニズム: 低温（ $<-40^\circ\text{C}$ ）では Co 相の靱性が低下し、脆性破壊の傾向が高まります。高温（ $>800^\circ\text{C}$ ）では Co 相が軟化してエネルギー吸収能力が低下する可能性があります。

環境影響: 実際の作業条件（深海低温切断や高温切断など）に応じて適切な材料配合を選択する必要があります。

微細構造の均一性

機能: 微細構造の均一性は耐衝撃性にとって非常に重要です。

メカニズム: 均一に分布した WC 相と Co 相は応力集中を低減し、低気孔率（ $<1\%$ ）および粒界欠陥の少ない（ $<0.5\%$ ）構造は衝撃靱性を向上させます。Co が不均一に分布している場合（例えば、 $5 \mu\text{m}$ を超える Co プールを形成する場合）、脆い部分に沿って亀裂が伝播しやすくなり、衝撃靱性が低下します。

プロセスの影響: 冷間等方圧プレス（CIP、圧力 200 ～ 300 MPa）または真空焼結により均一性が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面状態

影響: 表面欠陥や残留応力は衝撃靱性に影響します。

メカニズム: 表面のひび割れ、粗さ ($Ra > 0.2 \mu m$)、または残留引張応力 ($> 200 MPa$) が応力集中点となり、衝撃靱性が低下します。残留圧縮応力 ($> 400 MPa$) は、表面改質 (ショットピーニングなど) によって耐衝撃性を向上させることができます。

プロセスの影響: 表面状態を改善するために、 $Ra < 0.1 \mu m$ に研磨するか、コーティング処理 (TiN など) を行います。

(5) 超硬合金の衝撃靱性の微視的メカニズム

Co 相の塑性吸収

Co 相は塑性変形によって衝撃エネルギーを吸収し、亀裂の伝播を遅らせます。適切な量の Co は衝撃靱性を向上させます。

WC 粒界における亀裂の偏向

WC 粒界により、亀裂経路の偏向 (角度 $20^\circ \sim 40^\circ$) が発生し、破壊経路の長さが増加し、破壊速度が低下します。

粒界強化

晶界強化: 晶界通过 Orowan 强化机制 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu m$) 阻碍裂纹扩展, 适中晶粒尺寸 ($0.5-1 \mu m$) 效果最佳。

インターフェース結合

WC と Co 間の界面結合強度 ($> 50 MPa$) は Co の濡れ (接触角 $< 15^\circ$) によって達成され、界面欠陥 (例: ボイド $> 0.5\%$) によって亀裂の発生が発生する可能性があります。

衝撃骨折型

粒界破壊: WC 粒界に沿って亀裂が広がり、Co 含有量が低い場合に発生しやすくなります。

粒界破壊: 亀裂が WC 粒子を貫通し、高衝撃エネルギーでより一般的に発生します。

混合破壊: 粒界破壊と粒内破壊が共存し、実際の作業条件では一般的です。

衝撃靱性は、動的負荷環境下における超硬合金の重要な性能です。様々な作業条件の要件を満たすために、微細構造とプロセスパラメータを調整することで最適化できます。

(6) 超硬合金の硬度と靱性の関係

超硬合金 (WC-Co) の硬度と靱性 (通常はピッカース硬さ HV と破壊靱性 K_{Ic} で表されます) の間には、一定のトレードオフがあります。基本的な関係は以下のとおりです。

硬度 (HV 1200~1800) と靱性 ($K_{Ic} 8 \sim 16 MPa \cdot m^{1/2}$) は通常、逆相関を示します。高硬度 (HV 1600~1800 など) は、靱性 ($K_{Ic} 8 \sim 10 MPa \cdot m^{1/2}$) が低下する傾向があり、高靱性 ($K_{Ic} 14 \sim 16 MPa \cdot m^{1/2}$) は通常、硬度 (HV 1200~1400) の低下につながります。これは、硬度と靱性が異なるミクロメカニズムに依存しているためです。硬度は主に WC

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

相の高硬度に寄与するのに対し、靱性は Co 相の塑性変形能力に依存します。

硬度 (HV 1200-1800) と破壊靱性 (K_{Ic} 8-16 MPa·m^{1/2}) は、その中核となる機械特性であり、高負荷 (>4000 MPa)、衝撃環境 (>500 Hz)、および高温 (>800°C) における信頼性に直接影響します。

(7) 硬さと靱性のトレードオフは、超硬合金の設計における重要な課題である。

高硬度 (HV>1600) は通常、靱性 (K_{Ic} <10 MPa·m^{1/2}) の低下を伴い、脆性破壊を引き起こしやすくなります。一方、高靱性 (K_{Ic} >12 MPa·m^{1/2}) は硬度 (HV<1400) を低下させ、耐摩耗性も低下させます。この2つのバランスをとるためには、WC 粒径 (0.2~2 μm) と Co 結合相含有量 (6%~15%) を含む微細構造を最適化する必要があり、航空工具 (切削寿命>15 時間) や鉋業用ドリルビット (掘削距離>1200 m) などの厳しい用途のニーズを満たす必要があります。

本セクションでは、硬度-靱性バランスの制御メカニズムを、粒径の影響 (ホール-ペッチ関係に基づく)、Co 結合相含有量の最適化、そして先進技術 (ナノ複合技術や傾斜構造設計など) の3つの側面から考察する。本セクションでは、力学モデル (ホール-ペッチ: $\sigma_y \sim d^{-1/2}$ 、オロワン強化)、熱力学 (界面エネルギー <1.5 J/m²)、およびプロセスパラメータ (焼結温度 1400~1500°C、真空度 <10⁻² Pa) を統合する。

7.1.1 粒径効果 (ホール・ペッチ関係)

7.1.1.1 粒径効果

粒径効果とは、超硬合金などの材料の機械的特性 (硬度、強度、靱性など) が粒径の変化に伴って規則的に変化することを指します。ホール・ペッチの関係によれば、粒径が減少すると (例えば 2 μm から 0.5 μm へ)、粒界密度 (>10¹³ m⁻²) が増加し、転位運動が抑制されます。その結果、硬度 (例えば HV が 1200 から 1600 へなど、約 25%~30%) と強度が向上します。

粒径の影響原理と技術

粒径は、超硬合金の硬度と靱性を調整する重要な要素であり、ホールペッチ関係 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$ 、ここで σ_y は降伏強度、 d は粒径、 k は約 0.3 MPa·m^{1/2}) に従います。

WC の粒径 (0.2~2 μm) を小さくすると、硬度 (HV 1200~1800) と圧縮強度 (>4000 MPa) が大幅に向上します。たとえば、粒径を 2 μm から 0.5 μm に微細化すると、硬度は HV 1200 から HV 1600 に増加し、航空工具の切削寿命は 12 時間から 15 時間に増加します。しかし、結晶粒径が小さすぎると (<0.2 μm) と、粒界すべり (速度 ~10⁻⁹ m/s) による微小亀裂が発生し、靱性 (K_{Ic} <8 MPa·m^{1/2}) が低下する可能性があります。したがって、結晶粒径を最適化するには、粒界強化と界面安定性のバランスをとる必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。

粒径は、高エネルギーボールミル（回転数 300～500 rpm、時間 20～40 時間）、粒度抑制剤（VC 0.2%～0.5%、Cr₃C₂ 0.1%～0.3%）の添加、および焼結プロセス（温度 1400～1500℃、真空度<10⁻²Pa）の最適化によって調整されます。近年、超微粒子（<0.5 μm）およびナノ結晶（<100 nm）の超硬合金が研究のホットスポットとなり、その硬度は HV 2000 に達することができますが、ナノ粒界安定性の問題を解決する必要があります（粒界移動速度<10⁻¹⁰m/s）。

7.1.1.2 ホール・ペッチ機構と機械分析

ホール・ペッチ関係とは何ですか？

ホール・ペッチ関係は、材料科学における非常に重要な基本原理であり、多結晶材料の粒径と降伏強度の関係を記述します。この関係は、EO Hall (1951) と NJ Petch (1953) によって独立に発見・定式化されたため、彼らの名にちなんで名付けられました。簡単に言えば、

ホール・ペッチ関係とは：

粒子が細くなるほど、材料の強度（特に降伏強度）が高くなります。

この関係は数学的には次のように表現できます。

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$$

で：

σ_y ：材料の降伏強度。

σ_0 ：材料の単結晶の降伏強度、より一般的には、粒内の転位運動に対する抵抗（格子摩擦応力）を表します。

け： ホールペッチ勾配は定数であり、その値は材料自体（結晶構造、転位特性など）と粒界の特性（粒界エネルギー、粒界滑り抵抗など）に依存します。k 値が大きいほど、粒界強化効果が大きくなります。

の平均粒径。

コアとなる物理的メカニズム：粒界が転位の移動を妨げる

転位と塑性変形

金属材料の塑性変形は、主に結晶粒内の転位（結晶の線状欠陥）の滑りによって実現されます。

障壁としての粒界

粒界とは、隣接する粒間の界面です。隣接する粒の結晶方位が異なるため、転位が粒界を越えて一方の粒から他方の粒へ直接移動することは困難です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

転位の積み重ね

外部応力の作用下では、転位源が活性化され、転位が発生します。これらの転位は、すべり面に沿って移動し、粒界によって遮断されて、粒界の前方に「転位パイルアップ」を形成します。

隣接粒子における応力集中と転位源の活性化

蓄積された転位群は、粒界に大きな局所的な応力集中を引き起こします。この集中応力が隣接する粒内の転位源を活性化させるのに必要な応力に達すると、塑性変形が隣の粒に伝播し、材料はマクロスケールで降伏します。

粒子の精製

結晶粒が細くなるほど（ d が小さくなるほど）、単位体積あたりの粒界面積は大きくなり、転位すべりの平均自由行程は短くなります。転位が粒界障害物に遭遇する距離は短くなり、隣接する結晶粒の転位源を活性化させるには、粒内に十分に強い転位集積群（つまり十分に高い応力集中）を形成するために、より大きな外部応力が必要になります。したがって、材料の降伏強度 σ_y は、結晶粒度 d の減少とともに増加します。

ホール・ペッチ関係の重要性

最も重要な強化メカニズムの一つ

結晶粒微細化は、金属材料の強度を向上させる最も効果的で一般的に使用される方法の 1 つであり、通常は材料の靱性を大幅に低下させることはありません（靱性が向上する場合もあり、この点では固溶強化や析出強化などの他の強化メカニズムよりも優れています）。

ガイドランス資料のデザイン

材料の微細構造（特に結晶粒径）を制御することで、材料の機械的特性を最適化するための理論的根拠と定量的なツールを提供します。冶金プロセス（制御圧延、熱処理など）の中心的な目標の一つは、結晶粒を微細化することです。

サイズ効果を理解する

ナノ結晶材料が極めて高い強度を持つ理由を説明します。

ホール・ペッチ関係は、マイクロメートルからサブマイクロメートルの粒径範囲で非常に有効である。（通常、約 $1\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ ）。粒径がナノメートルスケール（ $<100\text{nm}$ ）まで小さくなると、他のメカニズム（粒界すべり、粒界での転位吸収または発光など）が支配的になる場合があり、場合によっては「逆ホールペッチ効果」、つまり粒径のさらなる縮小に伴って強度が減少する現象が観察されることもあります。

材料タイプは主に金属と合金に適用されます。セラミックや一部のポリマーでも同様の関係が見られますが、強化メカニズムは異なる場合があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hall-Petch の関係によれば、粒径が小さいほど、粒界密度が高く ($> 10^{13} \text{ m}^{-2}$)、転位運動が妨げられ、強度と硬度が大幅に向上します。硬度 (HV) は降伏強度 ($\text{HV} \sim 3\sigma_y$) にはほぼ比例します。粒径が $2 \mu\text{m}$ から $0.5 \mu\text{m}$ に減少すると、硬度は約 25%~30% 増加します (HV 1200 から 1600)。ただし、粒径が小さすぎると ($< 0.2 \mu\text{m}$)、粒界滑りが激しくなり、靱性が低下します (K_{1c} が $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ から $< 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に低下します)。このメカニズムは、粒界強化と破壊力学に基づいています。粒界は転位を固定することで性能を向上させます (オロワン強化、 $\tau \sim Gb/\lambda$ 、 $\lambda < 1 \mu\text{m}$)。しかし、粒界密度が高いと界面エネルギー ($> 1.5 \text{ J/m}^2$) が増加し、微小亀裂 (長さ $0.05\text{--}0.1 \mu\text{m}$) が発生しやすくなります。

粒界動力学解析の結果、粒界移動速度 (10^{-10} m/s) は焼結温度 ($1400 \sim 1500^\circ\text{C}$) と添加剤 (VC 0.2%~0.5%) によって制御され、移動障壁は $80 \sim 120 \text{ kJ/mol}$ であることが示されました。細粒 WC の熱力学的安定性は、ギブス自由エネルギー ($\Delta G < 0$) によって評価されます。粒径が $< 0.5 \mu\text{m}$ の場合、界面エネルギーが性能変化を支配します。例えば、WC-10Co (粒径 $0.5 \mu\text{m}$) の硬度は HV 1600、 K_{1c} は $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ であり、高速切削 ($> 800 \text{ m/min}$) に適しています。

7.1.1.3 粒度効果に影響する要因の分析

粒度効果は以下の要因の影響を受けます。

初期の粉末粒子サイズ

WC 粉末の粒子サイズは均一な精製を保証するために $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ です。粒子サイズが $2 \mu\text{m}$ を超える場合、硬度は < 1400 になります。粒子サイズが $0.2 \mu\text{m}$ 未満の場合は、凝集率は $> 15\%$ になります。

ボールミル時間

ボールミル処理を $20 \sim 40$ 時間 (回転速度 $300 \sim 500 \text{ rpm}$) 行くと、粒子を $0.5 \mu\text{m}$ まで微細化できます。15 時間未満の場合、粒子サイズは $1 \mu\text{m}$ 以上になります。50 時間を超える場合、粒子破損率は 3% 以上になります。

焼結温度

$1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ では粒成長 ($< 0.8 \mu\text{m}$) を制御できます。 1550°C を超えると粒径は $2 \mu\text{m}$ を超え、硬度は 10%~15% 減少します。

添加剤

VC を 0.2%~0.5% 添加すると、粒成長 ($< 0.5 \mu\text{m}$) を抑制し、硬度を 5%~10% 向上させることができます。VC を 0.8% 超添加すると、脆性相が形成され、 $K_{1c} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ となります。

共同コンテンツ

Co 含有量が 8% ~ 12% の場合、靱性のバランスをとることができます。6% 未満の場合

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合、 $K_{1c} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、15% 超の場合、硬度 < 1200 になります。

焼結雰囲気：真空度 $< 10^{-2} \text{ Pa}$ で酸化を回避できます (O_2 含有量 $< 0.5 \text{ ppm}$)。Ar 雰囲気 (純度 $> 99.99\%$) を使用すると粒界欠陥を削減できます ($< 0.2\%$)。

冷却速度

冷却速度を $3 \sim 5^\circ\text{C}/\text{分}$ に制御すると、熱応力 ($< 100 \text{ MPa}$) を低減できます。 $> 10^\circ\text{C}/\text{分}$ の場合、微小亀裂率は $> 0.5\%$ になります。

ホール・ペッチ関係の利点、欠点、技術的要件

結晶粒微細化により硬度と強度が大幅に向上し ($\text{HV } 1600$ 、 $\sigma > 4500 \text{ MPa}$)、高負荷用途 (航空工具など) に適しています。

粒子が小さすぎると ($< 0.2 \mu\text{m}$)、靱性が低下し ($K_{1c} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、ナノ結晶 WC の製造コストが高くなります (約 $20\% \sim 25\%$ 増加)。

ホール・ペッチ関係の技術的条件

高精度ボールミル装置 (速度精度 $\pm 5 \text{ rpm}$)、オンライン粒子モニタリング (偏差 $< 0.02 \mu\text{m}$)、高温高压焼結炉 (温度偏差 $\pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力偏差 $\pm 10^{-3} \text{ Pa}$) が必要です。

ホールペッチ関係の最適化戦略

高い硬度 ($\text{HV } 1600$) と中程度の靱性 ($K_{1c} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を実現するには、次の戦略が推奨されます。

粒径 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ の WC 粉末を選択し、高エネルギーボールミル処理を $20 \sim 40$ 時間 (回転速度 $300 \sim 500 \text{ rpm}$) 行います。

焼結温度は $1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ に制御され、真空度は $< 10^{-2} \text{ Pa}$ 、粒径は $< 0.8 \mu\text{m}$ です。

$0.2\% \sim 0.5\%$ の VC を添加すると、粒成長を抑制し、硬度を $5\% \sim 10\%$ 増加させることができます。

$K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ を確保するために、Co 含有量は $8\% \sim 12\%$ に設定されています。

オンライン粒子サイズモニタリング (偏差 $< 0.02 \mu\text{m}$) 付き。

粒径は TEM 分析 (解像度 $< 0.1 \text{ nm}$) を使用して検証され、粒界応力 ($< 100 \text{ MPa}$) は XRD (ピーク幅偏差 $< 0.2^\circ$) を使用して評価されました。

高度な技術：ナノ複合技術を試して、ナノ WC 粒子 ($< 50 \text{ nm}$) を追加することでデュアルモード構造 (粒径分布: $0.2 \mu\text{m}$ および $1 \mu\text{m}$) を形成し、硬度が $\text{HV } 1800$ まで増加し、 K_{1c} が $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に達します。

ホールペッチ関係工学応用実践

微粒子超硬合金は、さまざまなシナリオで優れた性能を発揮します。

航空ツール

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-10Co（粒径 $0.5\mu\text{m}$ 、硬度 HV1600）は、耐用年数が 15 時間で、高速切削（ $>800\text{m/分}$ ）での性能が 25% 向上します。

鉋山用ドリルビット

WC-8Co（粒径 $0.8\mu\text{m}$ 、 $K_{IC} 13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）は、硬岩掘削で 1,200 m の耐用年数を持ち、40 % の増加となります。

耐摩耗性金型

WC-12Co（粒径 $0.5\mu\text{m}$ 、硬度 HV1600）、押し出し成形における寿命は 10^6 倍以上。

航空タービンブレード

WC-10Co（粒径 $0.4\mu\text{m}$ 、VC 0.3%）、硬度 HV 1700、 $K_{IC} 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、高温切削（ $>800^\circ\text{C}$ 、速度 $>250 \text{ m/s}$ ）では、耐用年数は 20 時間に達し、30% 増加します。

新エネルギー電池金型

WC-10Co（粒径 $0.3\mu\text{m}$ 、硬度 HV1800）、高周波押出（ $>500\text{Hz}$ ）では、寿命は 10 倍以上、50% 増加

7.1.2 超硬合金結合相含有量の最適化

超硬合金の結合相の種類、含有量と靱性の関係

超硬合金（WC-Co 系合金に代表される）の靱性は、結合相の種類と含有量、および硬質相構造と密接に関連しています。結合相含有量（特にコバルト含有量）の最適化は、材料の硬度と靱性のバランスをとるための核心的な手段であり、その典型的な制御範囲は 6% ~ 15% です。以下は、その体系的な分析です。

7.1.2.1 結合段階と技術規制の中核的役割

超硬合金の性能は、硬質相（WC などの炭化物）と金属結合相（主に Co）によって決まります。

Co のコア機能:

塑性変形キャリア: 亀裂が伝播する際（ひずみ速度は約 10^{-3}s^{-1} ）、塑性変形によりエネルギーを吸収し、靱性に直接寄与します（ $K_{IC} 8-16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）。

インターフェース接合ハブ: WC に対する優れた濡れ性（接触角 $<15^\circ$ 、インターフェースエネルギー $<1.5 \text{ J/m}^2$ ）、高強度の接合インターフェース（ $>50 \text{ MPa}$ ）を形成します。

応力コーディネーター: WC 粒子間の応力集中を緩和し、脆性破壊を防止します。

コンテンツ最適化の技術的原則

Co コンテンツは 6% ~ 15% の範囲内で正確に制御する必要があります。

低 Co ($<6\%$): 硬度は大幅に向上します（HV > 1600 ）が、靱性は急激に低下し（ $K_{IC} < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）、脆性破壊が発生しやすくなります。

高 Co ($> 15\%$): 靱性は向上します（ $K_{IC} > 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）が、硬度が不十分（HV < 1200 ）であり、Co プール（サイズ $> 5\mu\text{m}$ ）が形成されやすく、強度が 10% - 15% 低下します。

最適なバランスポイント (8% ~ 12%): 硬度 HV 1500 と靱性 $K_{IC} 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の相乗効果を実現し、航空ツールなどの需要の高いシナリオに対応します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実施技術:

高純度 Co 粉末 (>99.9%) 配合→冷間静水圧プレス (CIP、200~300MPa)→液相焼結 (1400~1500°C、1~3 時間) により、Co 分布の均一性 (偏差<0.5%) を制御。近年の画期的な技術は傾斜構造設計であり、Co 拡散速度 (<10⁻⁹cm²/s) を制御することで、表面 Co 含有量を 6% (硬度 HV 1600) に低減し、内部 Co 含有量を 12% (靱性 K_{1c} 14MPa·m^{1/2}) に増加させ、「表面硬質、内部強靱」を実現。

7.1.2.2 バインダー含有量の靱性に対する定量的な影響

Co 含有量は靱性と正の相関関係にあります。パフォーマンズの変曲点を避ける必要があります。

靱性向上メカニズム: Co 含有量の増加 (6%→12%) →金属層の厚さの増加→塑性変形空間の拡大→き裂伝播にはより厚い塑性領域を通過する必要がある、K_{1c} が 10MPa·m^{1/2}から 14MPa·m^{1/2}に増加 ($K_{1c} \propto Co^{1/2}$) 。

重大な障害リスク:

Co 含有量が 15% を超えると、硬質相の体積分率が低くなりすぎ (WC が 85% 未満)、硬度が HV 1200 を下回ります。

焼結温度が 1550°Cを超えるか、Co 分布偏差が 1%を超えると、Co ブール (>5μm) が形成され、これが亀裂源となり、靱性が 10%~15%低下します。

機械モデルのサポート:

複合材料の Voigt モデル:

$$E = V_{WC} \cdot E_{WC} + V_{Co} \cdot E_{Co}$$

定量的特性: WC-10Co 合金の理論上の硬度は HV 1500、K_{1c} 12 MPa·m^{1/2}です。

7.1.2.3 結合相の種類と靱性の階層的関係

コバルト (Co) - ゴールドスタンダード:

高い転位エネルギーにより、優れた転位滑り能力と大きな加工硬化効果が得られ、WC-Co システムは最高の靱性を備えています。

ニッケル (Ni) ベースの合金 - 耐腐食性の代替品:

TiC - Ni - Mo、Cr₃C₂ - NiCr などのシステムで使用されますが、炭化物骨格によって制約されるため、靱性は同じ含有量の WC-Co に比べて大幅に低くなります (TiC ベースの合金 K_{1c} は通常<10 MPa·m^{1/2}です)。

特殊システムの靱性の欠点:金属炭化物 (

TiC や Cr₃C₂ 連続骨格など) をベースにした合金は、Ni 含有量を増やすことで靱性をある程度まで向上させることができますが、基本的には次の点に制限されます。

炭化物の固有の脆さ。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

金属相の可塑性は骨格によって制約されます。
界面の結合強度は Co-WC に比べて弱いです。

7.1.2.4 強力なトレードオフと協調最適化戦略

矛盾した性質

Co 含有量↑→韌性↑↑、しかし硬度↓↓。従来の均質材料では、厳しい要求を満たすことが困難です。

突破口

結晶粒微細化:

WC 粒子サイズを 0.5～ 1μm に制御する（2μm を超える場合は、 K_{1c} は 5% ～ 10% 減少し、細粒強化により強度と韌性の両方が向上します。

勾配構造設計:

表面の Co 含有量が低い (6%) ため、高硬度 (HV 1600) を実現し、耐摩耗性に優れています。

内部の高 Co (12%): 高い韌性(K_{1c} 14 MPa·m^{1/2})と衝撃破壊に対する耐性を保証します。
主要技術: Co 拡散を抑制するために 0.2%～0.5%の VC を添加し、層状焼結と組み合わせることで組成勾配を制御します。

プロセス精度管理:

焼結: 1400～1500°C / 真空度<10⁻²Pa 、時間 1～3 時間 (>4 時間の場合、Co 偏析率>1%)。

成形: CIP 圧力 200～300MPa、密度>99%を確保 (<150MPa の場合は、多孔度>1%)。

品質検査: EDS/EBSD (分解能<0.5μm) を使用して Co 分布を分析し、偏差は<0.5%でした。

7.1.2.5 エンジニアリング実践の検証

最適化された結合相設計により、過酷な作業条件でも優れた性能を発揮します。

アプリケーションシナリオ	材料システム	パフォーマンスパラメータ	寿命の延長
航空仕上げツール	WC-10Co (0.5 μm)	HV 1500、 K_{1c} 12 MPa·m ^{1/2}	15 時間以上 (+25%)
深海ドリル	勾配 WC-Co(表面 6%/内部 12%)	表 HV 1600/内部 K_{1c} 14 MPa·m ^{1/2}	1500 メートル以上 (+50%)
高速鉄道ブレーキパッド金型	WC-10Co 勾配	高温摩擦 > 600°C	>4×10 ⁵ 倍 (+60%)
採掘用インパクトドリルビット	WC-8Co	K_{1c} 13 MPa·m ^{1/2}	1200 メートル以上 (+40%)

7.1.2.6 承認の締結

Co 含有量は韌性制御の核心であり、6% ～ 15% の範囲内で正確に最適化され、8% ～ 12% が強度と韌性のバランスの黄金比です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

プロセスによってパフォーマンスの上限が決まります。

高純度原材料（Co>99.9%）、精密焼結（ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の温度制御）、非破壊検査（X 線/EDS 偏差 <0.2%）を採用。

傾斜構造は強度と靱性のトレードオフを打破する革新的な技術ですが、コストが 15% ～ 20% 増加します。

アプリケーション指向設計:

高靱性シナリオ（採鉱、深海）→ 中～高 Co 含有量（10%～15%）または勾配設計。

～ 8%）+ 微粒子 WC（ $0.5\mu\text{m}$ ）+ VC 添加剤

耐食性/高温シナリオ → ニッケルベースの結合相合金では、靱性の点で妥協が必要です。

超硬合金の靱性は、本質的に結合相の含有量、種類、微細構造の相乗効果によるものです。Co 含有量（6%～15%）の科学的な最適化、傾斜革新設計、そして精密なプロセス制御により、従来の性能限界を突破し、ミクロン単位の切削から数キロメートル単位の掘削まで、極限のニーズを満たすことができます。

7.2 超硬合金の疲労および耐衝撃性

耐疲労性

超硬合金（WC-Co）の耐疲労性は、繰り返し荷重下における疲労き裂の発生および拡大に対する抵抗力を指し、長期使用における材料の耐久性を反映しています。主に、微細構造（例えば、粒径 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ ）の最適化によってき裂成長速度を低減し、適度な Co 含有量（8 ～ 12%）が塑性緩衝材として機能し、粒界強化によってき裂成長を抑制します。回転曲げ疲労試験（ASTM E466）などの測定方法によって疲労寿命を評価できます。

耐

衝撃性は、高エネルギー衝撃荷重下における超硬合金の破壊抵抗力であり、動的荷重下における信頼性を反映しています。衝撃エネルギーを吸収するためには、高い Co 含有量（10%～15%）、靱性と強度のバランスをとるために適度な粒径（ $0.5\sim 1\mu\text{m}$ ）、そして粒界を強化するために添加物（TaC など）が不可欠です。シャルピー衝撃試験（ASTM E23）は、一般的な測定方法です。

耐疲労性はミクロ組織の均一性と亀裂伝播抵抗に重点を置くのに対し、耐衝撃性は Co 相の塑性エネルギー吸収に大きく依存します。異なる使用条件の要件を満たすには、ミクロ組織の最適化を通じて両者のバランスをとる必要があります。

繰り返し荷重（ $>10^5$ 回）および高衝撃（ $>500\text{Hz}$ ）下における超硬合金の疲労および耐衝撃性は、鉱業（掘削距離 $>1200\text{m}$ ）、航空（工具寿命 >15 時間）、および金型（押し出し $>10^6$ 回）における信頼性を直接的に決定づけます。疲労耐性は亀裂成長速度（ $\text{da/dN}\sim 10^{-6}\text{mm/サイクル}$ ）によって特徴付けられ、耐衝撃性は衝撃エネルギー（ $10\sim 30\text{J}$ ）によって評価されます。最適化は、微細構造（WC 粒子径 $0.5\sim 2\mu\text{m}$ 、Co 含有量 6%～15%）および機械的特性（応力拡大係数 $\Delta K<25\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）から始める必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

本章では、疲労強度と耐衝撃性の規定メカニズムについて、繰り返し荷重下におけるき裂進展（パリスの法則に基づく）、衝撃靱性試験（シャルピー試験およびアイゾット試験）、および先進試験技術（例えば、SEM を用いた現場疲労試験）の 3 つの側面から考察する。破壊力学（パリスの法則： $da/dN = C \cdot \Delta K^m$ ）、実験基準、および適用事例を組み合わせ、疲労強度と耐衝撃性の規定メカニズムについて考察する。

7.2.1 繰り返し荷重下における超硬合金の亀裂成長（パリスの法則）

パリスの法則とは何ですか？

パリスの法則は、疲労き裂成長挙動を記述する基本的な理論モデルです。主に、繰り返し荷重下における材料のき裂成長速度と応力拡大係数範囲の関係を予測するために用いられます。金属、複合材料、および超硬合金（WC-Co など）の疲労解析において広く用いられています。

パリスの法則の表現

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

で：

$\frac{da}{dN}$ ：裂纹扩展速率（mm/循环），表示每循环裂纹长度的增量。

ΔK ：应力强度因子范围（MPa·m^{1/2}）， $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ，其中 $K_{\max}$ 和 $K_{\min}$ 分别为最大和最小应力强度因子。

C 和 m ：材料常数，依赖于材料类型、微观结构及环境条件。

超硬合金の場合、 m は通常 2 ～ 4 の範囲にあり、CCC はそれより小さくなります（約 $10^{-10} \sim 10^{-8}$ ）。

パリスの法則

パリスの法則は、疲労亀裂成長の安定段階（ステージ II）に適用され、つまり、亀裂成長速度は ΔK とべき乗法則の関係をもちます。

ステージ I（閾値領域）： $\Delta K < \Delta K_{th}$ （閾値）、亀裂は広がりません。

ステージ II（安定伸張領域）：亀裂はパリスの法則に従って伸張します。

ステージ III（急速破壊領域）： $\Delta K \rightarrow K_c$ （破壊靱性）、亀裂不安定性。

パリスの法則の超硬合金への応用

超硬合金（WC-Co）の疲労耐性はパリスの法則によって分析できます。

ミクロメカニズム：亀裂伝播は WC 粒界と Co 相の影響を受け、粒界たわみと Co 塑性吸収エネルギーにより da/dN が減少します。

パリスの法則に影響を与える要因

Co 含有量：Co 含有量が高い（10% ～ 15%）ほど可塑性が高まり、 m が減少します。

粒径：中程度の粒径（0.5 ～ 1 μm）は、粒界強化により da/dN を低減します。

環境：腐食性環境（例：pH < 5）では CCC が増加する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

測定: 亀裂成長試験 (ASTM E647) により、 d_a/d_N と ΔK の関係を記録し、CCC および mmm をフィッティングします。

意義

パリスの法則は、超硬合金の疲労寿命を予測するための理論的根拠を提供します。この法則は、微細構造（粒径や Co 含有量など）を最適化し、疲労寿命を延ばすために使用できます。航空工具や鉋山用ドリルビットなどの高サイクル負荷シナリオに適しています。

パリスの法則の原理と技術概要疲労抵抗は

、パリスの法則に従う亀裂成長速度 (da/dN 、単位: mm/サイクル) によって特徴付けられます。 $da/dN = C \cdot \Delta K^m$

ここで、 ΔK は応力集中係数の振幅 (10^{-25} MPa $m^{1/2}$)、 C は 10^{-9} - 10^{-10} 、 m は 3~4 です。

繰り返し荷重（応力比 $R=0.1$ 、周波数 5~15Hz）下において、 10^5 回以上の耐用年数を確保するには、超硬合金のき裂成長速度を 10^{-6} mm/サイクル未満に制御する必要があります。最適化は、結晶粒微細化（WC 0.5~1 μm ）、Co 含有量（8%~12%）、および表面改質（イオン注入など）によって実現されます。

疲労試験は、三点曲げ（荷重 500~1000 N）下でのき裂長さ（精度 ± 0.02 mm）の測定に基づいています。近年、き裂伝播経路（粒内 / 粒界比 <30%）と微細欠陥（気孔径 <2 μm ）をリアルタイムで観察できる、その場 SEM 疲労試験（分解能 <0.2 μm ）が研究のホットスポットとなっています。

パリスの法則 - メカニズムと機械的解析

パリスの法則は、安定した亀裂成長（ステージ II）の挙動を説明します。

ΔK 計算: $\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$ 、ここで $\Delta \sigma$ は応力振幅、 a は亀裂長さ（約 0.1~0.5 mm）です。

$\Delta K < 20$ MPa $m^{1/2}$ の場合、 $da/dN < 10^{-7}$ mm/サイクルとなります。

C および m パラメータ: C は 10^{-9} - 10^{-10} 、 m は 3.2-3.8 で、材料の耐亀裂性を反映します。Co 含有量が 10% の場合、 C は 15%-20% 減少します。

マイクロメカニズム: Co 相は塑性変形（ひずみ約 0.05%~0.1%）を通じて亀裂エネルギーを消散させ、WC 粒界（0.5 μm ）が亀裂伝播を妨げます（速度 < 10^{-6} mm/サイクル）。

高温疲労: 800°C では、亀裂成長速度は < 10^{-5} mm/サイクルであり、酸化物層（ WO_3 、厚さ ~2 μm ）によって da/dN が約 5%~10% 減少します。

その場 SEM 分析の結果、亀裂伝播経路は主に粒内破壊（比率 >50%）であり、粒界偏向角が 20°~40° の場合、 da/dN は 10%~15% 減少することが示されました。例えば、WC-10Co ($\Delta K = 15$ MPa $m^{1/2}$) の亀裂成長速度は約 10^{-7} mm/cycle であり、航空工具の要件を満たしています。

亀裂伝播に影響を与える要因の分析

亀裂伝播は、以下の要因によって影響を受けます。

粒径: 0.5~1 μm では da/dN (< 10^{-7} mm/サイクル) を低減できます。>2 μm の場合は、 $da/dN > 10^{-6}$ mm/サイクルになります。

Co 含有量: 10% の場合、 K_{Ic} (>12 MPa $m^{1/2}$) を最適化できます。<6% の場合、 da/dN が 20%~30% 増加します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応力比: $R=0.1$ の場合、 $da/dN < 10^{-7}$ mm/サイクル、 $R>0.5$ の場合、 da/dN は 40%~50% 増加します。

添加剤: VC を 0.2% ~ 0.5% 添加すると、粒界強度 (> 150 MPa) が向上します。0.8% を超えると、脆性相の比率は 0.5% を超えます。

$Ra < 0.1 \mu m$ の場合、亀裂発生時間は 10^4 倍以上になります。 $Ra > 0.2 \mu m$ の場合、耐用年数は 15%~20% 減少します。

微小欠陥: 気孔率が 1% 未満の場合は da/dN は 10^{-7} mm/サイクル未満、2% を超える場合は da/dN が 30%~40% 増加します。

周囲湿度: 相対湿度が 50% 未満の場合は da/dN は 10^{-7} mm/サイクル未満になります。

相対湿度が 80% を超える場合は、腐食疲労により da/dN が 20%~25% 増加します。

超硬合金は優れた耐疲労性（寿命 $> 10^5$ 倍）を有し、高頻度の繰り返し荷重（鉋山用ドリルビットなど）に適しています。腐食環境（湿度 $> 80\%$ ）では、疲労寿命が 15%~20% 低下するため、耐食性を向上させるには表面コーティング（TiN など、厚さ $1 \sim 3 \mu m$ ）が必要です。高精度疲労試験装置（周波数偏差 < 0.2 Hz）、in-situ SEM（分解能 $< 0.2 \mu m$ ）、環境制御ボックス（湿度精度 $\pm 2\%$ ）が必要です。

パリスの法則最適化戦略

亀裂成長速度 ($< 10^{-7}$ mm/サイクル) を低減するには、次の戦略が推奨されます。

WC 粒径は $0.5 \sim 1 \mu m$ に選択され、Co 含有量は 10% です。

0.2%~0.5% の VC を添加すると、粒界強度が向上し、 da/dN が約 15%~20% 減少します。

表面は $Ra < 0.1 \mu m$ に研磨されており、亀裂発生時間は 10^4 回以上です。

$MPa \cdot m^{1/2}$ を確保するために応力比 $R=0.1$ を制御します。

オンライン亀裂モニタリング（精度 ± 0.02 mm）を使用して、テストの一貫性（ da/dN 偏差 $< 5\%$ ）を確保します。

焼結密度 $> 99.5\%$ 、多孔度 $< 1\%$ 、疲労試験機と組み合わせる（周波数偏差 < 0.2 Hz）。

高度な技術: TiN コーティング（厚さ $1 \sim 3 \mu m$ 、硬度 HV2500~3000）の適用により、腐食疲労の影響が軽減され、 da/dN が 10%~15% 削減されます。

パリ法のエンジニアリング応用における

最適化後の耐疲労性セメント炭化物の性能は優れています。

鉋山用ドリルビット: WC-10Co（亀裂成長率約 10^{-7} mm/サイクル）、周期的衝撃での寿命は 10^5 回以上、掘削距離は 1200 m 以上。

航空工具: WC-8Co（ $K_{Ic} 13 MPa \cdot m^{1/2}$ ）、疲労寿命 $> 10^5$ 回、切削寿命 > 15 時間。

耐摩耗性金型: WC-12Co（ $\Delta K < 15 MPa \cdot m^{1/2}$ ）、押し出し回数 $> 10^6$ 回、25% 増加。

高速鉄道歯車: WC-10Co（粒径 $0.5 \mu m$ 、TiN コーティング（ $2 \mu m$ ）では、高周波サイクル（ > 100 Hz）での亀裂成長率は約 10^{-8} mm/サイクルとなり、寿命は 10^6 倍以上、40% 増加します。

7.2.2 超硬合金の衝撃靱性試験（シャルピーおよびアイゾット）

超硬合金の衝撃靱性試験の原理と技術の概要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

衝撃靱性は、高エネルギー衝撃荷重下における硬質合金（WC-Co）の破壊抵抗能力であり、動的荷重環境（高周波衝撃荷重や過渡荷重など）における信頼性の重要な指標です。衝撃靱性は衝撃エネルギー吸収能力によって特徴付けられ、通常は衝撃エネルギー（単位: J）で表されます。これは主に、結合相であるコバルト（Co）の塑性変形能力と硬質相である炭化タングステン（WC）の硬度によって決まります。衝撃靱性試験は、実際の作業条件（鉱山用ドリルビットの高周波衝撃や航空工具の動的荷重など）をシミュレートし、高応力環境下における材料の破壊抵抗を評価するように設計されています。

試験方法の概要:

超硬合金の衝撃靱性は、主にシャルピー試験とアイゾット試験という 2 つの標準化された試験方法で測定されます。どちらの試験方法も振り子を用いて試験片に衝撃を与え、破壊に必要なエネルギー（衝撃仕事）を記録しますが、試験片の固定方法、荷重モード、応力分布には大きな違いがあります。

試験機器:

振り子エネルギー: 標準装備の振り子エネルギーは 300 J です。

衝突速度: 4~5m/秒。

環境制御: 室温（20~25℃）が標準的な試験条件です。低温または高温での試験には、特別な温度制御装置が必要です。

高ひずみ速度試験:

近年、高ひずみ速度試験（ひずみ速度 $>10^3 \text{ s}^{-1}$ ）が研究のホットスポットとなっており、爆発衝撃（速度 $>50 \text{ m/s}$ ）や高速切断といった過酷な作動条件をよりリアルにシミュレートできます。高ひずみ速度下では、材料のひずみ速度に対する感受性が顕著になり、衝撃靱性が低下する可能性があるため、性能向上のためには微細構造の最適化が必要となります。

シャルピー衝撃試験の詳細

概念と原理:

シャルピー衝撃試験（ASTME23）は、古典的な衝撃靱性試験法です。三点曲げ負荷法を用いて、振り子で試験片に衝撃を与え、破壊に必要なエネルギーを測定します。試験片は長方形の断面を持ち、通常は V ノッチが設けられており、実際の使用条件で発生する可能性のある応力集中点をシミュレートします。衝撃エネルギーは、材料がエネルギーを吸収し、亀裂の伝播に抵抗する能力を反映しており、超硬合金の耐衝撃性を示す重要な指標です。

試験片および荷重方法:

サンプル仕様:

標準サイズ: 55×10×10mm（縦×横×高さ）。

ノッチタイプ: V ノッチ、深さ 2mm、ノッチ底半径 0.25mm、ノッチ角度 45°。

ノッチ効果: ノッチの先端に応力集中が形成され、亀裂の発生を誘発し、材料の欠陥に対する感受性の定量化を容易にします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

载荷方法:

試料を2つの支点に水平に設置し、振り子を一定の高さから自由落下させ、4~5m/sの速度で試料の中心（ノッチの奥）に衝突させます。試料には3点曲げ応力が作用し、ノッチの先端から亀裂が発生し、破断に至るまで拡大します。

応力分布:

3点曲げモードでは、試験片のノッチ部に引張応力が発生し、最大引張応力はノッチ底部に集中し、応力集中係数（ K_t ）は約2~3になります。衝撃エネルギーには、亀裂発生エネルギーと亀裂伸展エネルギーが含まれており、そのうち亀裂伸展エネルギーが支配的です。

テストプロセス:

試験片加工: 試験片は標準寸法に従って加工され、ノッチはワイヤーカットまたは専用工具で加工され、加工精度（ $\pm 0.02\text{ mm}$ ）が確保されます。

環境制御: サンプルは指定された温度（室温 20~25°Cまたは低温-40°Cなど）に置かれ、温度制御チャンバー内で調節されます。

衝撃荷重: 振り子を解放し、試験片に衝撃を与え、振り子の振動の高さの差を記録し、衝撃仕事を計算します。

$$\text{冲击功} = m \cdot g \cdot (h_{\text{初}} - h_{\text{终}})$$

m は振り子の質量、 g は重力加速度、 h は初期値です。そして h_{final} はそれぞれ初期の高さと最終の高さです。

特徴と適用範囲:

シャルピー試験は、実際の作業条件における3点曲げの応力状態（ドリルビットが岩に衝突したときの局所応力など）をシミュレートします。

高衝撃環境下における超硬合金の破壊抵抗、特に欠陥（ノッチ）がある場合の靱性性能を評価するのに適しています。

試験結果はノッチの形状、サンプルサイズ、温度に大きく影響されるため、実験条件を厳密に管理する必要があります。

アイゾット衝撃試験の詳細

概念と原理:

アイゾット衝撃試験（ASTME23）は、もう一つの標準化された衝撃靱性試験法です。片持ち梁に荷重をかけ、振り子で試験片の自由端に衝撃を与え、破壊に必要なエネルギーを測定します。試験片には通常、ノッチが付けられ、応力集中と亀裂伝播に対する材料の靱性を評価します。シャルピー試験と比較して、アイゾット試験の力のモードは、実際の使用条件（片持ち梁構造への衝撃など）に近いです。

試験片および荷重方法:

サンプル仕様:

標準サイズ: 75×10×10mm（縦×横×高さ）。

ノッチタイプ: Vノッチ、深さ 2mm、ノッチ底半径 0.25mm、ノッチ角度 45°。

ノッチの位置: ノッチは試験片の固定端の近くにあり、クランプ端から約 22 mm 離れて

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

います。

荷重負荷方法:

試験片の一端を固定具に固定し、他端を吊り下げて片持ち梁構造を形成する。振り子を試験片の自由端（ノッチの奥）に 4~5m/s の速度で衝突させる。試験片は曲げとせん断の複合応力を受ける。き裂はノッチの先端から始まり、破断するまで拡大する。

応力分布:

片持ち梁モードでは、ノッチは引張応力とせん断応力の重なりを生じます。最大引張応力はノッチ底部に位置し、せん断応力は試験片の厚さ方向に沿って分布します。応力集中係数 (K_t) は約 2.5~3.5 で、シャルピー試験よりもわずかに高くなります。亀裂の伝播経路はせん断応力の影響を受け、WC-Co 界面に沿って伝播したり、結晶粒を貫通して伝播したりする可能性があります。

テストプロセス:

試験片加工: 試験片は標準寸法に従って加工され、ノッチ加工精度は $\pm 0.02\text{mm}$ 以内に管理されます。

試験片のクランプ: 試験片は固定具に固定され、クランプ端が滑ったり緩んだりしないようになります。

衝撃荷重: 振り子を解放して試験片の自由端に衝撃を与え、振り子の高さの差を記録し、衝撃エネルギーを計算します（計算式はシャルピー試験と同じです）。

特徴と適用範囲:

アイゾット試験は、片持ち梁構造（横方向の衝撃を受ける機械部品など）の応力状態をシミュレートします。

これは、特にせん断応力が支配的なシナリオにおいて、複雑な応力状態における超硬合金の耐衝撃性を評価するのに適しています。

試験片の固定方法が複雑で応力分布も複雑なため、試験結果はシャルピー試験よりもわずかに低くなる可能性があり、締め付け条件に敏感になります。

シャルピー試験とアイゾット試験の比較

応力モード:

シャルピー試験は主に引張応力の影響を受ける 3 点曲げ試験です。アイゾット試験は片持ち梁試験であり、引張応力とせん断応力が重なり、亀裂の伝播経路はより複雑です。

試験片の固定:

シャルピー試験片は両端で支えられるため固定が簡単です。アイゾット試験片は片端でクランプされるため固定具に高い要件が課せられます。

衝撃エネルギーの違い:

アイゾット試験のせん断応力成分が大きいため、より多くの亀裂成長エネルギーが消散し、衝撃エネルギーは通常、シャルピー試験よりもわずかに低くなります。

適用シナリオ:

シャルピー試験は対称的な衝撃(ドリルビットが正面から当たるなど)のシミュレーションに適しています。アイゾット試験は横方向の衝撃(機械的なカンチレバー部品など)のシミュレーションに適しています。

理論的根拠とメカニズム分析

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

は破壊力学の原理に基づいています。衝撃エネルギーは破壊靱性 (K_{Ic}) と関連しており、エネルギー解放率 (G_c) を通じて間接的に推定できます。

$$K_{Ic} \approx \sqrt{E \cdot G_c}$$

ここで、 E は弾性係数 (WC-Co の場合約 550~650 GPa)、 G_c は破壊エネルギー (Co 相の可塑性と亀裂成長抵抗によって寄与される) です。

シャルピー試験のメカニズム:

試験片に 3 点曲げ衝撃を与えると、応力がノッチ部に集中し、ノッチ先端に沿って亀裂が伝播します。WC 粒界 (粒径 0.5~1 μm) は亀裂経路を曲げることで伝播抵抗を高め (曲げ角 20~40°)、Co 相は塑性変形 (ひずみ 0.05~0.1%) によりエネルギーを吸収します。

アイゾット試験のメカニズム:

片持ち梁力モードでは、亀裂伝播経路はせん断応力の影響を受け、WC-Co 界面に沿って、または結晶粒を貫通して伸びる場合があります。Co 相の塑性消散と WC 粒界の阻害効果はシャルピー試験と同様ですが、せん断応力によって亀裂の偏向はより複雑になります。

微視的メカニズム:

Co 相の塑性散逸: Co 相は塑性変形によって衝撃エネルギーを吸収し、き裂の伝播を遅らせます。Co 含有量が 10% の場合、ひずみ速度は約 10^{-3}s^{-1} となり、塑性散逸は顕著になります。

WC 晶界阻碍: WC 晶界通過 Orowan 強化機制 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$) 阻碍裂纹扩展, 适中晶粒尺寸 (0.5-1 μm) 效果最佳。

破壊形態: SEM 分析により、破壊は主にデインプル (サイズ $< 2 \mu\text{m}$) で構成されていることが確認され、塑性破壊が支配的であり、Co 相の塑性変形が主なエネルギー吸収メカニズムであることを示しています。

環境への影響:

低温特性: -40°C では、Co 相の靱性はわずかに低下しますが、適切な Co 含有量 (10%) により、塑性消失を通じて衝撃靱性が維持されます。

高いひずみ速度: ひずみ速度が 10^3s^{-1} を超えると、材料が完全に塑性変形する時間がないため、亀裂成長速度が増加します (約 15% ~ 20%)。

影響要因の分析

衝撃靱性は次の要因によって影響を受けます。

共同コンテンツ:

効果: Co 含有量を増やすと (>10%)、塑性変形能力が向上するため、衝撃靱性が向上します。

メカニズム: Co 含有量が 6% 未満の場合、材料の脆さが増加します。15% を超える場合、硬度が低下して耐摩耗性に影響します。

推奨事項: Co 含有量が 10% ~ 12% のとき、靱性と硬度のバランスが取れます。

粒度:

機能: 適度な粒径 (0.5~1 μm) により衝撃靱性が最適化されます。

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

メカニズム: 粒子が細かすぎると($<0.2\mu\text{m}$)、粒界欠陥が増加するため靱性が低下します。粒子が粗すぎると($>2\mu\text{m}$)、粒界密度が低下し、亀裂伝播抵抗が低下します。

添加剤:

機能: VC または TaC を添加すると衝撃靱性が向上します。

メカニズム: VC (0.2%-0.5%) は粒成長を抑制し、粒界を強化します。過剰量 ($>0.8\%$) は脆い相を形成し、靱性が低下します。

ノッチ深さ:

影響: ノッチの深さが増し、応力集中が激しくなります。

メカニズム: ノッチ深さが 3mm を超えると、応力集中係数が増加し、衝撃靱性が低下します。

標準: 2mm が標準テスト深度です。

焼結密度:

機能: 高密度により衝撃強度が向上します。

メカニズム: 密度が 98% 未満になると、気孔率が上昇し ($>2\%$)、気孔が亀裂の原因となり、靱性が低下します。

推奨: 密度 $>99\%$ 、多孔度 $<1\%$ 。

試験温度:

影響: 低温により衝撃強度が低下します。

メカニズム: 温度が -60°C 未満になると、Co 相の靱性が大幅に低下し、脆性破壊の割合が増加します。

ひずみ速度:

影響: 高いひずみ速度により衝撃靱性が低下します。

メカニズム: ひずみ速度が 10^3 s^{-1} を超えると、材料の塑性変形に十分な時間がなく、亀裂の伝播が加速されます。

最適化戦略

超硬合金の衝撃靱性を向上させるには、次の戦略を採用できます。

微細構造の最適化:

Co 含有量は 10%~12%、WC 粒径は $0.5\sim1\mu\text{m}$ で、靱性と硬度のバランスが取れています。

添加剤制御:

0.2%~0.5%の VC または TaC を添加すると、粒界強度が高まり、衝撃靱性が向上します。

プロセス制御:

焼結密度 $>99\%$ 、多孔度 $<1\%$ 、真空焼結 ($1400\sim1500^\circ\text{C}$ 、真空 $<10^{-2}\text{ Pa}$)により達成。

テスト精度:

ノッチ深さの加工精度は $\pm 0.02\text{ mm}$ 、振り子エネルギー偏差は $<0.5\text{ J}$ です。

低温性能の向上:

補助結合相として Ni (1% ~ 3%) を添加すると、低温靱性が向上し、 -60°C でも高い衝撃靱性が維持されます。

破面分析:

SEM (解像度 $<0.2\mu\text{m}$) による観察。ディンプルサイズは $<2\mu\text{m}$ であり、塑性破壊が支配

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

的であったことを示している。

エンジニアリング応用実習

耐衝撃性に富んだ超硬合金は、さまざまなシナリオで優れた性能を発揮します。
鉋山用ドリルビット：WC-10Co（Co 含有量 10%）、高周波衝撃要件（>500 Hz）を満たすように最適化された微細構造を備えています。
航空工具：WC-8Co、高速切削（>800 m/分）での動的負荷に適しています。
耐摩耗性ダイ：WC-12Co、高周波スタンピング（>10⁶ 回）に耐えます。
深海バルブ：WC-10Co、深海の高圧（>80 MPa）衝撃にも優れた性能を発揮します。
風力タービンブレードモールド：WC-10Co（Ni2%）、低温（-60℃）および高ひずみ速度（>10³ s⁻¹）で安定。

超硬合金の衝撃靱性試験（シャルピーおよびアイゾット） - 表比較

以下は、セメント炭化物（WC-Co）のシャルピー衝撃靱性試験法とアイゾット衝撃靱性試験法を表形式で直接比較したもので、概念、試験片の仕様、荷重方法、応力分布、試験プロセス、特性と適用性、微細メカニズム、影響要因を網羅しています。

プロジェクト	シャルピー衝撃試験（ASTM E23）	アイゾット衝撃試験（ASTM E23）
コンセプト	三点曲げ荷重法を採用し、振り子を試験片に衝突させ、破壊に必要なエネルギー（衝撃仕事）を測定します。試験片には V ノッチを設け、応力集中を模擬することで破壊抵抗を評価します。	片持ち梁荷重法を採用し、振り子を試験片の自由端に衝突させて破壊エネルギーを測定します。試験片に V ノッチを設け、応力集中および亀裂伝播に対する抵抗性を評価します。
サンプル仕様	- 寸法：55×10×10 mm（長さ × 幅 × 高さ）。 - ノッチ：V 字型、深さ 2 mm、底部半径 0.25 mm、角度 45°。	- 寸法：75×10×10 mm（長さ × 幅 × 高さ）。 - ノッチ：V 字型、深さ 2 mm、底半径 0.25 mm、角度 45°、クランプ端から約 22 mm。
荷重方法	サンプルを 2 つの支点到に水平に配置し、振り子をサンプルの中心（ノッチの裏側）に 4~5m/s の速度で衝突させ、3 点の曲げ力を発生させます。	サンプルの一端は固定具に固定され、他端は片持ち梁となるように吊り下げられます。振り子はサンプルの自由端（ノッチの裏側）に 4~5 m/s の速度で衝突します。
ストレイン分散型	が発生し、最大引張応力はノッチ底部に集中し、応力集中係数（K _t ）は約 2~3 となる。衝撃エネルギーは主に亀裂伸展エネルギーによって寄与される。	は引張応力とせん断応力が重畳します。最大引張応力はノッチ底部に位置し、せん断応力は板厚方向に分布します。応力集中係数（K _t ）は約 2.5 ~ 3.5 です。
テストプロセス	1. 試験片とノッチを加工する（精度±0.02 mm）。2. 指定された温度（例：20~25℃または-40℃）。3. 振り子で衝撃を与え、高さの差を記録して衝撃エネルギーを計算する：衝撃エネルギー = m · g · (h _{initial} - h _{final})。	1. 試験片とノッチを加工します（精度±0.02 mm）。2. 試験片の一端を固定し、緩んでいないことを確認します。3. 振り子で自由端を衝突させ、高さの差を記録して衝撃エネルギーを計算します（計算式はシャルピー衝撃試験と同じです）。
特徴適用性	- 3 点曲げ応力（ドリルの前面衝突など）をシミュレートします。 - 対称衝撃下における超硬合金の破壊抵抗を評価します。	- 片持ち梁の力（機械部品への横方向の衝撃など）をシミュレートします。 - 複雑な応力状態における超硬合金

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロジェクト	シャルピー衝撃試験（ASTM E23）	アイゾット衝撃試験（ASTM E23）
	るのに適しています。 - 結果はノッチ形状と温度に大きく影響されます。	金の耐衝撃性を評価するのに適しています。 - 結果はクランプ条件に敏感です。
マイクロ機構	- Co 相の塑性消散: Co 相は塑性変形（ひずみ 0.05% ~ 0.1%）によってエネルギーを吸収し、亀裂の伝播を遅らせます。 - WC 粒界障害: 亀裂は WC 粒界障害: 粒界（0.5 ~ 1 μm）は亀裂を偏向させ、経路はより複雑で、剪断応力の影響下で WC-Co 界面を（角度 20° ~ 40°）ことで抵抗を増加させます。 - 破壊に沿って、または粒内を延びる場合があります。 - 破壊形態: デンプル（サイズ < 2 μm）が支配的で、塑性破壊形態: 主にデンプルですが、剪断応力によって粒界を示します。	- Co 相の塑性消散: シャルピーと同様に、Co 相は塑性的にエネルギーを吸収します。 - WC 粒界障害: 亀裂は WC-Co 界面を（角度 20° ~ 40°）ことで抵抗を増加させます。 - 破壊に沿って、または粒内を延びる場合があります。 - 破壊の割合が増加する場合があります。
影響要素	- Co 含有量: 10% ~ 12% で靱性と硬度のバランスを保ちます。 - 粒径: 0.5 ~ 1 μm が最適で、細かすぎても粗すぎると好まず。 - 添加剤: VC (0.2% ~ 0.5%) は粒界を強化し、過剰 (> 0.8%) は脆い相を形成します。 - ノッチ深さ: 深さ: 3 mm を超えると靱性が低下します。 - 焼結密度: > 99%、多孔度 < 1%。 - 温度: < -60°C 靱性が低下します。 - ひずみ速度: 10^{-3} s^{-1} を超えると亀裂は加速され、せん断応力によりシャルピーより（約 15% ~ 20%）。	- Co 含有量: シャルピーと同じで、10% ~ 12% が良いです。 - 粒径: 0.5 ~ 1 μm が最適です。 - 添加剤: VC (0.2% ~ 0.5%) で同じ効果があります。 - ノッチ深さ: 深さ: 3 mm を超えると靱性が低下します。 - 焼結密度: > 99%、多孔度 < 1%。 - 温度: < -60°C 靱性が低下します。 - ひずみ速度: 10^{-3} s^{-1} を超えると亀裂は加速され、せん断応力によりシャルピーより（約 15% ~ 20%）。

7.3 超硬合金の破壊メカニズムの解析

超硬合金は、過酷な作業条件（高摩擦 > 800 MPa、衝撃 > 500 Hz、高温 > 800°C）下では、摩耗破壊（摩耗速度 > 0.1 mm³/N·m）や亀裂剥離（亀裂長 > 0.05 mm）が発生しやすく、航空工具（寿命 < 10 時間）、採掘ドリル（掘削 < 1000 m）、金型（押し出し < 10⁶ 回）の故障につながります。故障メカニズム解析では、摩耗モデル（アーチャードの式）、破壊力学（応力集中係数 $K_{t} > 1.5$ ）、高度な解析技術（X 線マイクロトモグラフィーなど）を通じて性能低下の原因を明らかにし、最適化の基盤を提供します。

このセクションでは、摩耗破壊（アブレシブ摩耗、凝着摩耗）、破壊と剥離（応力集中と微小亀裂）、環境の影響（高温、腐食）の 3 つの側面から破壊メカニズムを考察します。顕微鏡分析（SEM、X 線マイクロトモグラフィー）、力学モデル（ K_{Ic} 10-14 MPa·m^{1/2}）、および事例を組み合わせます。

7.3.1 超硬合金の摩耗破壊（研磨摩耗、凝着摩耗）

超硬合金の摩耗破壊原理と技術概要

摩耗破壊は超硬合金の主な破壊形態であり、アブレシブ摩耗（硬質粒子の切削、摩耗速度約 0.1 mm³/N·m）と凝着摩耗（材料移動、摩耗深さ > 5 μm）が含まれます。アブレシブ摩耗は鉱業（岩石硬度 > 800 HV）でよく見られ、凝着摩耗は切削（温度 > 600°C）でより一般的です。アーチャードの式（ $V = k \cdot F \cdot S / H$ ）に基づくと、最適化には硬度（HV 1500）と表面品質（Ra < 0.1 μm）の向上が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

摩擦試験は、砂の流量 200~400g/分、荷重 100~150N で行われます。近年、摩擦傷の形態を 3 次元（溝幅<10 μ m）で再現できる X 線マイクロトモグラフィー（解像度<1 μ m）が研究のホットスポットとなっています。

超硬合金の摩擦破壊メカニズムと解析

摩擦

硬質粒子（SiO₂、硬度 HV>800）が WC（深さ 0.5~ 2 μ m）を切削し、溝（幅 5~15 μ m）を形成します。硬度が HV1500 の場合、摩擦率は<0.1 mm³/N·m です。硬度が<1200 の場合、摩擦率は 20%~30%増加します。

粘着摩擦

高温（> 600°C）では、Co 相が軟化（HV~300）し、材料が接合面（厚さ 2~5 μ m）に転移します。WC 粒径が 0.5 μ m の場合、密着性が低下します（摩擦率 <0.12 mm³/N·m）。

高温摩擦

800°C では摩擦率は <0.15 mm³/N·m となり、酸化物層（WO₃、厚さ ~2 μ m）が形成され、摩擦が 5% - 10% 減少します。

腐食と摩擦

酸性環境（pH<5）では、摩擦率が 15% ~ 20% 増加しますが、その主な原因は Co 相の溶解（速度 ~10⁻¹⁰ g/cm²·s）です。

X 線マイクロトモグラフィーでは、研磨摩擦は主に溝状摩擦であり、凝着摩擦はティアビット（直径約 5~10 μ m）を伴うことが示されています。例えば、WC-10Co（粒径 0.5 μ m）の摩擦率は 0.1mm³/N·m 未満であり、鉋業の要件を満たしています。

超硬合金の摩擦破壊に影響を及ぼす要因の分析

摩擦破壊は、以下の要因によって影響を受けます。

硬度:HV 1500 の場合、摩擦率は <0.1 mm³/N·m です。 <1200 の場合、摩擦率は 20%~30% 増加します。

粒径: 0.5~1 μ m の場合、摩擦率は低くなります。2 μ m を超えると、摩擦率は 15%~20% 増加します。

Co 含有量: 10% の場合、凝着摩擦は少なくなりますが、15% を超えると摩擦率は 10% ~ 15% 増加します。

表面粗さ: Ra<0.1 μ m の場合、摩擦率は低くなります。Ra>0.2 μ m の場合、摩擦率は 20% ~25% 増加します。

動作温度:>600°C、粘着摩擦が 40%~50% 増加します。

研磨粒子サイズ:<50 μ m の場合、摩擦率は<0.1 mm³/N·m です。 >100 μ m の場合、摩擦率は 30%~40%増加します。

環境腐食:pH<5 の場合、摩擦率は 15% ~ 20% 増加します。pH>7 の場合、摩擦率は 5% 未満に変化します。

摩擦率を低減するには（<0.1 mm³/N·m）、次の戦略が推奨されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC 粒径は 0.5 ~ 1 μm に選択され、硬度は HV 1500 です。

凝着摩耗を低減するために Co 含有量は 10% です。

表面は $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ まで研磨されており、摩耗率は 15%~20%低減されます。

0.2%~0.5%の VC を追加すると、硬度が 3%~5%増加します。

冷却剤（温度 $< 500^\circ\text{C}$ ）を使用すると、凝着摩耗が 20% ~ 30% 減少します。

Cr_3C_2 （0.1 %~0.3%）は高温条件下で Cr_2O_3 層（厚さ約 $1 \mu\text{m}$ ）を形成し、摩耗率は 5% ~ 10 %減少します。

コーティング保護： CrN コーティング（厚さ 2~ 4 μm 、硬度 HV3000~3500）を施すことで、摩耗率が $0.08 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 未満に低減します。

超硬合金の摩耗破壊工学応用の実践

低摩耗セメント超硬合金の性能は優れています：

鉱山用ドリルビット： WC-10Co（摩耗率 $< 0.1 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ）、掘削距離 $> 1200 \text{m}$ 、40%増加。

航空工具： WC-8Co（硬度 HV 1500）、低粘着摩耗、寿命 > 15 時間。

耐摩耗ダイス： WC-12Co（ $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ ）、摩耗率 $< 0.12 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、押し出し回数 $> 10^6$ 回。

航空タービンブレード： WC-10Co（粒径 $0.5 \mu\text{m}$ 、CrN コーティング（ $3 \mu\text{m}$ ））、高温摩耗（ $> 800^\circ\text{C}$ ）では摩耗率 $< 0.08 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、寿命 > 4000 時間、40%増加。

7.3.2 超硬合金の破壊と剥離（応力集中と微小亀裂）

原理と技術概要

破壊と剥離は、応力集中（ $K_t > 1.5$ ）と微小亀裂（長さ $> 0.05 \text{mm}$ ）によって引き起こされます。これらは、航空工具（切削寿命 < 10 時間）や鉱業用ドリルビット（掘削距離 $< 1000 \text{m}$ ）によく見られます。破壊は破壊力学（ K_{Ic} $10\text{--}14 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）に基づいており、剥離は界面破壊（結合強度 $< 40 \text{MPa}$ ）を伴います。最適化には、 K_{Ic} と界面エネルギー（ $< 1.5 \text{J/m}^2$ ）の向上が必要です。

故障解析 クラックは、SEM（解像度 $< 0.2 \mu\text{m}$ ）、CT スキャン（精度 $\pm 0.02 \text{mm}$ ）、およびアコースティックエミッション技術（周波数範囲 $20 \text{kHz} \sim 500 \text{kHz}$ ）によって検出されました。例えば、WC-10Co 工具は、微小クラックによる剥離により、寿命が 10 時間未満でした。

メカニズムと分析

破壊： 応力集中（ K_t は 1.8-2.0）により亀裂成長（速度 10^{-2}m/s ）が引き起こされ、 $K_{Ic} < 10 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ （亀裂長さ $> 0.5 \text{mm}$ ）になると破壊が発生します。

剥離： 界面応力（ $> 80 \text{MPa}$ ）により Co 相（深さ約 $5\text{--}10 \mu\text{m}$ ）が裂け、接合強度は $< 40 \text{MPa}$ になります。

亀裂経路： 粒内破壊（WC 粒の破断、粒径 $0.5 \mu\text{m}$ ）と粒界破壊（粒界剥離、幅 $0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ）が併存する。亀裂の屈曲角が $20^\circ \sim 40^\circ$ の場合、亀裂拡大率は 5%~10%減少する。

環境影響： 腐食環境（NaCl 濃度 3.5%）では、亀裂成長率が 20%~25%増加し、応力腐食（SCC）が主な原因となります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

例えば、WC-10Co (K_{Ic} 12 MPa·m^{1/2}) の破損率は 0.2% 未満であり、工具の要件を満たしています。

影響要因の分析

破損と剥離は、次の要因によって影響を受けます。

K_{Ic} : $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ の場合、破壊率は $< 0.2\%$ になります。 $< 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ の場合、破壊率は 40%~50% 増加します。

粒径: 0.5~1 μm の場合、亀裂はゆっくりと伝播します。2 μm を超えると、破壊率は 20%~30% 増加します。

Co 含有量: 10% の場合、剥離率は低くなります。6% 未満の場合、剥離率は 15% ~ 20% 増加します。

表面欠陥: 亀裂長さが 0.05 mm を超えると、破損率が 40% ~ 50% 増加します。

応力集中: $K_t > 2$ の場合、剥離率は 30% ~ 40% 増加します。

環境腐食: NaCl 濃度が 3.5% を超えると、亀裂成長率が 20% ~ 25% 増加します。

温度: 600°C を超えると、熱応力 ($> 150 \text{ MPa}$) により剥離率が 15% ~ 20% 増加します。

最適化戦略

破損や剥離 ($< 0.2\%$) を減らすために、次の戦略が推奨されます。

Co 含有量は 10%、WC 粒径は 0.5~1 μm で、 $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ を実現します。

0.2%~0.5% の VC を添加すると、粒界強度が 5%~10% 増加します。

表面は $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ まで研磨されており、ひび割れの発生が 20%~25% 減少します。

丸い角 (半径 $> 0.5 \text{ mm}$) を $K_t < 1.5$ となるように設計します。

微小亀裂を検出するために、CT スキャン (精度 $\pm 0.02 \text{ mm}$) とアコースティック エミッション (周波数範囲 20 kHz ~ 500 kHz) が使用されました。

腐食防止: Al_2O_3 コーティング (厚さ 1-3 μm 、硬度 HV 2500-3000) を施すことで、応力腐食の影響が軽減され、破損率が 0.1% 未満に低下します。

エンジニアリングアプリケーションの実践:

破壊率が低い超硬合金は優れた性能を発揮します。

航空工具: WC-10Co (K_{Ic} 12 MPa·m^{1/2})、破損率 $< 0.2\%$ 、寿命 > 15 時間。

採掘ドリルビット: WC-8Co (剥離率 $< 0.2\%$)、掘削距離 $> 1200 \text{ m}$ 、40% 増加。

耐摩耗性金型: WC-12Co ($K_t < 1.5$)、押し出し回数 $> 10^6$ 回、25% 増加。

PCB ドリルビット: WC-10Co (粒子 0.5 μm 、 Al_2O_3 コーティング 2 μm)、高応力ドリル加工 ($> 10^4$ 穴) において破損率は $< 0.1\%$ 、寿命は $> 10^5$ 穴で 80% 向上しました。

7.4. 超硬合金の性能向上戦略

7.4.1 超硬合金の性能向上戦略 - 超硬合金の結晶粒微細化

超硬合金の結晶粒微細化原理と技術の概要

超硬合金 (WC-Co) の結晶粒微細化は、炭化タングステン (WC) の粒径を 0.5 μm 未満に精密に制御する微細構造最適化技術です。このプロセスにより、材料の硬度と強度が大幅

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

に向上し、過酷な作業条件下での超硬合金の適用のための強固な基盤が築かれます。結晶粒微細化はホールペッチ効果（ $\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$ ）に依存しており、粒径が小さくなると粒界密度が大幅に増加する（最大 $>10^{13} \text{ m}^{-2}$ ）ため、材料の塑性変形および亀裂成長に対する耐性が向上します。この精製技術により、硬度は HV 1600 ～ 1800、強度は 4500 MPa 以上にまで高められ、超硬合金は高強度工具や耐摩耗部品に最適です。

結晶粒微細化を実現する核心工程は、高エネルギーボールミル処理（20～40 時間）です。

高速回転する粉碎媒体（炭化タングステンボールなど）を用いて原料を機械的に粉碎・均一混合した後、真空焼結（温度範囲 1400～1500℃、真空度を 10^{-2} Pa 未満に厳密に制御）を行い、結晶粒度の安定性を確保し、過度の成長を抑制します。近年、技術の進歩により、多成分添加剤（VC+TaC+ ZrC など）の導入が進み、結晶粒微細化効果をさらに最適化しています。これらの添加剤は 0.1%～0.3%の低い割合で添加され、粒径を 0.2～0.5 μm の超微細範囲に維持できるため、硬度は HV 1800～2000 に押し上げられ、破壊靱性（ K_{Ic} ）は $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に増加し、ハイエンドアプリケーションの可能性が広がります。

超硬合金の結晶粒微細化のメカニズムと解析

、WC 粒子径を 0.5 μm 未満に縮小することで、超硬合金の機械的特性を大幅に向上させます。そのメカニズムは、微視的レベルで詳細に分析することができます。

粒界強化

の粒径が 0.5 μm 未満になると、粒界密度が大幅に増加します（ 10^{13} m^{-2} 以上）。ホールペッチ効果によれば、材料の硬度は 25%～30%（HV 1600～1800 に達する）増加し、強度は約 20%～25%増加します。この高密度粒界ネットワークは、転位の移動を効果的に阻害し、材料の変形抵抗を高めます。

オロワン強化

粒間距離 λ が 0.5 μm 未満に減少すると、強化係数 $\tau \sim Gb / \lambda$ （G はせん断弾性率、b はバーガースベクトル）が大幅に増加し、転位が粒界に「固定」されるため、滑り止め性能がさらに向上します。このメカニズムは、特に微細粒において顕著です。

微視的均一性

微細粒子が均一に分散されているため、局所的な応力集中点が減少し、硬度と靱性のバランスが向上し、高応力下でも脆性破壊が起こりにくくなります。

WC-10Co 合金を例に挙げると、粒径を 0.5 μm 未満に微細化することで、硬度は HV 1700 に達し、破壊靱性 K_{Ic} は約 12～13 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ となります。これらの特性の組み合わせにより、鉱山用ドリルビットや航空用切削工具などの高強度工具に特に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

影響要因の分析

結晶粒微細化の効果は、次のようなプロセスパラメータと材料組成の組み合わせによって影響を受けます。

粒度

粒径を $0.5\ \mu\text{m}$ 未満に制御すると、硬度は $1600\ \text{HV}$ を超えることができますが、粒径が $1\ \mu\text{m}$ を超えると、粒界密度が低下し、硬度が $1500\ \text{HV}$ 未満に低下し、性能上の利点が徐々に失われます。

ボールミル時間

高エネルギーボールミル処理を $20 \sim 40$ 時間行くと、粒径を $0.5\ \mu\text{m}$ 未満に効果的に微細化できます。ボールミル処理時間が 15 時間未満の場合、粒径が $1\ \mu\text{m}$ を超える可能性があり、微細化効果が不十分になります。

焼結温度

$1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ の温度範囲では、粒子を安定させ、過度の成長を回避できます。温度が 1550°C を超えると、粒子が $1\ \mu\text{m}$ を超えて成長し、性能が低下する可能性があります。

共同コンテンツ

Co 含有量が 10% の場合、破壊靱性 K_{IC} は $>12\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に達し、十分な塑性緩衝作用が得られます。Co 含有量が 6% 未満の場合、靱性が大幅に低下し ($K_{IC} < 10\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)、材料の適用範囲が制限されます。

最適化戦略

高性能目標 (硬度 $\text{HV } 1700$ 、破壊靱性 $K_{IC} > 12\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) を達成するには、次の最適化戦略が推奨されます。

WC 粒径 $< 0.5\ \mu\text{m}$ が選択され、 $20 \sim 40$ 時間の高エネルギーボールミル処理によって実現され、原材料が完全に粉碎され均一に混合されることが保証されます。

焼結温度は $1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ に厳密に制御され、真空は $10^{-2}\ \text{Pa}$ 未満に維持され、粒成長と酸化反応を防ぎます。

Co 含有量を 10% に保ち、その比率を調整することで靱性と硬度のバランスを最適化しています。

レーザー粒度分布分析装置 (測定偏差 $< 0.02\ \mu\text{m}$) を使用して均一な分布を確保し、局所的に大きすぎる粒子が性能に影響するのを回避します。

エンジニアリング応用実習

粒子を微細化した超硬合金は、さまざまなエンジニアリング用途で優れた性能を発揮します。

鉋山用ドリルビット

WC-10Co (粒径 $< 0.5\ \mu\text{m}$)、硬度 $\text{HV } 1700$ により、掘削距離を 1500m 超まで大幅に延長できます。これは従来のプロセスに比べて 50% の増加であり、採掘効率を効果的に向上させます。

航空ツール

WC-8Co (粒径 $< 0.5\ \mu\text{m}$) は、粒子の微細化により、耐用年数が 15 時間以上に延長され、 25% 増加し、高精度切断のニーズを満たします。

耐摩耗性金型

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-12Co（粒径 $<0.5\mu\text{m}$ ）、押し出し時間は10⁶倍を超え、性能は25%向上し、高周波スタンピング操作に適しています。

7.4.2 超硬合金の性能向上戦略、超硬合金添加剤（VC、TaC）

原理と技術概要

超硬合金の性能は、添加剤（VC、TaC など）を導入することで向上します。添加剤は微細構造を最適化し、粒界強度を大幅に高め、WC 粒の成長を抑制し、材料の総合的な性能を向上させます。VC と TaC の添加量は通常 0.2%～0.5%に制御されます。固溶強化と粒界改質により、硬度は HV 1600～1800 に増加し、破壊靱性（ K_{Ic} ）は $10\sim 14\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に増加します。プロセスフローには、高エネルギーボールミル処理が含まれ、添加剤を原料と均一に混合し、その後、1400～1500℃の真空焼結環境で凝固させます。近年、マルチ添加剤（VC + TaC + ZrC など、比率 0.1%～0.3%）の開発が研究のホットスポットとなっています。これらの添加剤の相乗効果により、硬度は HV 1800 ～ 2000、 K_{Ic} は $13\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ まで向上し、過酷な作業条件下での超硬合金の応用に新たな可能性をもたらします。

メカニズムと分析

添加剤は、以下の特定のメカニズムを通じて超硬合金の性能を向上させます。

VC 追加

VCx 相（厚さ $<20\text{nm}$ ）が形成され、WC 粒の成長（成長速度 $<10^{-10}\text{m/s}$ ）が抑制され、微細構造の安定性が維持され、硬度が約 10%～15%向上します。

TaC 添加

0.2%～0.5%の TaC を添加すると、粒界強度（ $>150\text{MPa}$ ）が大幅に向上し、固溶強化により破壊靱性 K_{Ic} が 5%～10%増加し、材料の亀裂成長に対する耐性が効果的に向上します。

複合添加剤

VC+TaC+ZrC（総比率 0.1%～0.3%）は、粒界間隔 $<0.2\mu\text{m}$ で固溶強化することにより、さらに 3%～5%の硬度増加を達成でき、 K_{Ic} は $13\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に達し、硬度と靱性の二重の最適化を実現します。

機械モデル

オロワン強化（ τ 約 Gb/λ ）と粒界強化により、転位運動が効果的に抑制され、変形抵抗が大幅に向上します。例えば、VC+TaC を 0.3%添加すると、WC-10Co 合金の硬度は HV 1700、 K_{Ic} は $13\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に達し、高性能ドリルビットの要件を満たします。

影響要因の分析

添加剤によるパフォーマンス向上への影響は、多くの要因によって制限されます。

添加物含有量

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VC と TaC は 0.2%~0.5%で、この範囲内で性能が最適になります。0.8%を超えると脆性相の比率が 0.5%を超え、韌性が低下する可能性があります。

多成分添加比率

VC:TaC:ZrC=1:1:1 の場合、硬度の増加は最大になります(>1800)。比率が不均衡な場合(1:2:1 など)、脆性相の比率が 1%を超える可能性があり、材料の安定性に影響します。

ボールミル時間

20 ~ 40 時間のボールミル処理により、添加剤が均一に分散されます。15 時間未満の場合、添加剤が不均一に分散され、効果が制限されます。

焼結温度

1400~1500°Cでは添加剤の化学的安定性と粒界強化効果が維持されますが、1550°Cを超えると添加剤が揮発したり副反応を起こしたりして性能が低下する可能性があります。

最適化戦略

高性能目標 (硬度 HV 1700、破壊靱性 K_{IC} 13 MPa·m^{1/2})を達成するには、次の最適化戦略が推奨されます。

VC/TaC/ZrC (合計比率 0.1%~0.3%、比率 1: 1: 1) を添加すると、固溶強化により硬度が 3%~5%増加します。

高エネルギーボールミリングは 20 ~ 40 時間続き、添加剤と原材料が完全に混合され、均一に分散されることを保証します。

焼結温度は 1400~1500°Cに制御され、真空度は添加剤の揮発を防ぐために 10⁻² Pa 未満に保たれます。

透過型電子顕微鏡 (TEM、解像度 <0.1 nm) を使用して、粒界改質効果を検証し、添加剤の微視的分布を確認しました。

エンジニアリング応用実習

添加剤を最適化したセメント炭化物はエンジニアリング用途で優れています。

鉋山用ドリルビット

WC-10Co (VC+TaC 0.3%) は、掘削距離を 1500m 以上まで延長でき、50%増加し、採掘効率が大幅に向上します。

航空ツール

WC-8Co (TaC 0.3%)、寿命が 15 時間以上に延長され、25%増加し、高精度の切断ニーズを満たします。

新しいエネルギー電解装置

WC-10Co (VC+TaC+ZrC 0.2%) は硬度が 1800 を超え、電気化学的衝撃(>10³回) 下での耐用年数が 10³時間を超え、 40%増加しました。

7.4.3 超硬合金の性能向上と超硬合金表面の強化戦略

超硬合金表面強化の原理と技術の概要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

クラッディングなどの方法により、表面硬度と耐摩耗性が大幅に向上し、高摩耗および動的負荷環境における超硬合金の長期使用が保証されます。浸炭プロセスでは、CH₄雰囲気下で 850～950℃で WC を豊富に含む層（厚さ 10～30μm、硬度>2000）が形成され、イオン注入では N⁺イオン（線量 10¹⁶～10¹⁷cm⁻²、エネルギー80～120 keV）によって残留圧縮応力（>400 MPa）が導入され、レーザークラッディングでは 1.5～2.5kW のレーザー出力を使用して高硬度層（厚さ 50～100μm、硬度>2500）が生成されます。これらの技術を組み合わせることで、摩耗率は<0.08 mm³/N·m に低減します。近年、プラズマイオン注入（PIII、線量 10¹⁷-10¹⁸ cm⁻²）が研究のホットスポットとなっています。その深部強化効果は 0.5 μm を超え、表面耐久性を大幅に向上させます。

超硬合金の表面強化のメカニズムと解析

表面強化の具体的なメカニズムは次のとおりです。

炭化

炭素原子は拡散し（拡散速度約 10⁻¹¹ cm²/s）、表面に 2000 HV を超える硬度を有する WC リッチ層（厚さ 10～30 μm）を形成します。摩耗速度は 0.08 mm³/N·m 未満に低減され、表面耐摩耗性が効果的に向上します。

イオン注入

N⁺イオンの注入深さは 0.1～ 0.3μm で、残留圧縮応力が 400MPa を超える固溶強化構造を形成し、破壊靱性 K_{1c} が 5%～10% 増加し、表面亀裂成長耐性が向上します。

レーザークラッディング

1.5～2.5kW のレーザー出力で表面材料を溶融することで、厚さ 50～ 100μm の高硬度層（硬度>2500）が形成され、摩耗率はさらに 0.07mm³/N·m 未満に低減され、耐疲労性も向上します。例えば、WC-10Co 合金の場合、浸炭層の厚さが 20μm の条件下で硬度は HV 2000 に達し、摩耗率は 0.08mm³/N·m 未満となり、航空工具の高性能要件を十分に満たします。

超硬合金の表面強化に影響を与える要因の分析

表面強化効果は、さまざまなプロセスパラメータと材料特性によって影響を受けます。

浸炭温度

850 ～ 950℃ では、炭素層の厚さは 10 ～ 30 μm で安定していますが、温度が 1000℃ を超えると炭素層が厚くなりすぎ（>50 μm）、剥離のリスクが高まります。

イオン注入線量

10¹⁶ cm⁻²および 10¹⁷ cm⁻²では、残留応力は 400 MPa を超えます。線量が 10¹⁸ cm⁻²を超えると、表面損傷率が 5%を超え、耐用年数に影響を与える可能性があります。

レーザー出力

1.5～2.5kW ではクラッド層は均一かつ緻密ですが、出力が 3kW を超えると熱応力が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

200MPa を超え、微小亀裂が発生する可能性があります。

粒度

粒径が $0.5\ \mu\text{m}$ 未満の場合は表面強化効果が最も高くなります。 $2\ \mu\text{m}$ を超える場合は硬度の増加が 10% 未満となり、強化効率が低下します。

表面粗さ

$Ra < 0.1\ \mu\text{m}$ の場合、強化層は基材にしっかりと結合します。 $Ra > 0.2\ \mu\text{m}$ の場合、摩耗率は 15% ~ 20% 増加する可能性があります。

超硬合金表面強化の最適化戦略

高い硬度と耐摩耗性の目標（硬度 HV2000、摩耗率 $< 0.08\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）を達成するには、次の最適化戦略が推奨されます。

浸炭温度は $850\sim 950^\circ\text{C}$ に制御され、炭素層の厚さは $10\sim 30\ \mu\text{m}$ に正確に維持され、均一な表面硬化が保証されます。

安定した残留圧縮応力を生成するために、イオン注入線量は $10^{16}\sim 10^{17}\ \text{cm}^{-2}$ に設定され、エネルギーは $80\sim 120\ \text{keV}$ に設定されました。

レーザークラッディング出力は $1.5\sim 2.5\ \text{kW}$ に調整され、クラッディング層の厚さは $50\sim 100\ \mu\text{m}$ に制御された。

摩耗源を減らすために、粒径が $0.5\ \mu\text{m}$ 未満の WC を選択し、表面を $Ra\ 0.1\ \mu\text{m}$ 未満に研磨します。

X 線回折分析（解像度 $< 1\ \mu\text{m}$ ）を使用して、一貫した応力分布と厚さを確保します。

超硬合金表面強化工学応用の実践

表面硬化されたセメント炭化物はエンジニアリング用途で優れた性能を発揮します。

航空ツール

WC-10Co（浸炭層 $20\ \mu\text{m}$ ）、硬度は HV2000 に達し、寿命は 15 時間以上に延長され、25% 増加し、高精度切断のニーズを満たします。

鉱山用ドリルビット

WC-8Co（イオン注入 $N^{+}10^{17}\ \text{cm}^{-2}$ ）、摩耗率 $< 0.08\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、掘削距離が $1500\ \text{m}$ を超え、50% 増加し、採掘効率が大幅に向上します。

耐摩耗性金型

WC-12Co（レーザークラッド層 $80\ \mu\text{m}$ ）、硬度 > 2500 、押し出し回数 10^6 回以上、25% 増加、高周波スタンピング操作に適しています。

7.4.4 超硬合金の性能向上戦略 - 超硬合金先進製造技術（3D プリンティング）

超硬合金先進製造技術の原理と技術概要

選択的レーザー溶融（SLM）またはバインダージェット成形プロセスを使用して、材料の分布を正確に制御し、硬度（HV 1500~1800）、靱性（ $K_{Ic}\ 10\sim 14\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）、疲労抵抗（ $> 10^5$ 回）を最適化します。 SLM プロセスでは、 $200\sim 300\ \text{W}$ のレーザー出力

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

と 20~50 μm の層厚を使用します。バインダージェット成形技術は、バインダージェッティングにより高解像度 (<50 μm) の印刷を実現します。近年、ナノ 3D 印刷技術 (層厚<10 μm) は最先端のホットスポットになり、高精度の傾斜構造を製造でき、硬度が>1800、 K_{1c} が 13 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ を超え、複雑な部品の設計に新しい道を提供しています。

超硬合金の先進製造技術のメカニズムと分析

3D プリントによってパフォーマンスが向上するメカニズムは次のとおりです。

勾配構造

材料分布を調整することで、表面硬度 ($\text{HV}>1800$) を高めながら内部靱性 ($K_{1c}>13 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) を維持し、応力集中を効果的に低減して全体的な信頼性を向上させます。

マイクロコントロール

層の厚さが 50 μm 未満の場合、密度は 99% 以上となり、多孔性は 0.5% 未満に減少し、材料の亀裂成長に対する耐性が向上します。

熱処理効果

800~1000 $^{\circ}\text{C}$ の後処理温度により残留応力 (<100 MPa) が除去され、耐疲労性と構造安定性がさらに向上します。

例えば、SLM で製造された WC-10Co 合金は、硬度 HV 1700、 K_{1c} 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、疲労寿命は 10^5 倍以上と、優れた総合性能を示します。

超硬合金の先進製造技術に影響を与える要因の分析

3D プリントの結果は、さまざまなプロセス パラメータの影響を受けます。

レーザー出力

200~300W では溶融プールが安定して形成され、材料が均一に溶融されます。350W を超えると熱応力が 150MPa を超え、部品の品質に影響を与える可能性があります。

層の厚さ

20~50 μm では密度は 99%以上になります。層の厚さが 100 μm を超えると、多孔性が 1% 以上まで上昇し、性能が低下する可能性があります。

印刷速度

10 ~ 20 mm/s で層間接着強度が確保されます。速度が 30 mm/s を超えると層間接着力が低下し、全体の強度に影響します。

後処理温度

800 ~ 1000 $^{\circ}\text{C}$ で微細構造が最適化されます。1100 $^{\circ}\text{C}$ を超えると、粒子が成長して性能が低下する可能性があります。

超硬合金先進製造技術の最適化戦略

高性能目標 (硬度 HV 1700、破壊靱性 $K_{1c}>12 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) を達成するには、次の最適化戦略が推奨されます。

溶融プールの安定性と密度を確保するために、レーザー出力は 200 ~ 300 W に制御され、層の厚さは 20 ~ 50 μm に設定されました。

印刷速度は 10~20 mm/s に維持され、残留応力を除去するために後処理温度は 800~

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1000°C に維持されました。

Co 含有量を 10% に最適化し、靱性と硬度のバランスを改善します。

コンピュータ断層撮影 (CT、解像度 $<10\mu\text{m}$) を使用して内部欠陥を検出し、印刷品質を確保します。

超硬合金の先端製造技術の工学応用実習

3D プリントされた炭化物はエンジニアリング用途に優れています。

航空ツール

WC-8Co (SLM プロセス)、硬度 HV 1700、寿命が 15 時間以上に延長され、25% 増加し、高精度加工のニーズを満たします。

耐摩耗性金型

WC-12Co (バインダー噴射プロセス)、押し出し時間は 10^6 倍を超え、25% 増加し、複雑な形状の金型に適しています。

複雑な部品

WC-10Co (ナノ 3D プリント)、破壊靱性 $K_{Ic} > 13\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、疲労寿命 $> 10^5$ 倍、30% 増加、カスタマイズされた高性能部品に適しています。

セメント炭化物の性能最適化における AI+IIoT の応用

人工知能 (AI) と産業用 IIoT (IIoT) は、超硬合金 (WC-Co) の性能最適化と産業応用に革新的な変化をもたらしました。AI のデータ駆動型モデリング機能と IIoT のリアルタイム認識・制御機能により、超硬合金は微細構造設計、性能監視、故障予測、プロセス最適化においてインテリジェントなアップグレードを実現しました。以下では、最新の研究とデータに基づき、微細構造最適化、リアルタイム性能監視、故障予測とインテリジェントメンテナンス、プロセス最適化、インテリジェント製造という 4 つの側面から、AI+IIoT の超硬合金性能最適化への応用展望を体系的に考察します。

7.5.1 微細構造最適化: AI 駆動型精密設計

AI 技術は、機械学習 (ML)、ディープラーニング (DL)、強化学習 (RL) などのアルゴリズムとビッグデータ分析を組み合わせることで、超硬合金の微細構造パラメータ (粒径、Co 含有量、添加剤比率など) と性能 (硬度、靱性) 間の複雑な関係を正確に予測し、微細構造の最適設計を実現します。

粒度最適化

サポートベクターマシン (SVM) やディープニューラルネットワーク (DNN) などの AI アルゴリズムは、過去のプロセスデータ (ボールミル処理時間、焼結温度など) に基づいて粒径が硬度に与える影響を、92% ~ 96% の予測精度で予測できます (フラウンホーファー研究所、ドイツ、2024 年)。

2024 年、ドイツのフラウンホーファー研究所は、デジタルツインに基づく AI 粒度最適化

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

システムを開発しました。WC-Co 微細組織（モンテカルロ法）をシミュレーションした結果、粒径の偏差を $\pm 0.01\mu\text{m}$ に制御し、硬度の一貫性を12%~15%（HV 1650~1800）向上させました。例えば、粒径を $0.5\mu\text{m}$ から $0.3\mu\text{m}$ に最適化すると、硬度が10%（HV 1700~1870）増加し、靱性（ K_{Ic} ）は12~13 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ を維持しました（ピッカース硬度計および片刃ノッチビーム法試験）。

Co 含有量と分布の最適化

2024 年、マサチューセッツ工科大学（MIT）は、ベイズ最適化とモンテカルロシミュレーションを組み合わせ、Co 分布偏差を0.1%未満（蛍光 X 線分光分析）に制御し、パフォーマンスの一貫性を15%~18%向上させた AI 支援 Co 含有量最適化システムを開発しました。

AI は強化学習（RL）を通じて、Co 含有量（6%~10%）を動的に調整し、破壊靱性（ K_{Ic} ）の偏差を $0.4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 未満に制御し、靱性の一貫性（ K_{Ic} 20%、試験範囲12~14 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）を向上させました。最適化後、WC-10Co 超硬合金の硬度は HV 1680~1750 で安定し、靱性は10%向上しました（ K_{Ic} は12.5~13.8 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）。

添加剤比率の最適化

TaC など）の比率が性能に与える影響を解析し、VC 添加量（0.2%~0.4%）を95%の精度で最適化することで、硬度を5%~8%（HV 1750~1850）向上させました。2025 年にスウェーデンのウプサラ大学が行った研究では、AI が VC+TaC 比率（1:1、総添加量0.3%）を最適化した後、粒成長速度が6%減少（ $<10^{-9}\text{m/s}$ 、TEM 測定）、硬度が HV 1900~1950 に達したことが示されました。

7.5.2 リアルタイムパフォーマンス監視： IIoT の高精度認識

IIoT により、組み込みセンサー、エッジ コンピューティング、5G ネットワークを通じてセメントカーバイドのパフォーマンス パラメータをリアルタイムで監視できるようになり、プロセスの安定性とパフォーマンスの一貫性が確保されます。

主要パラメータの監視

粒度

レーザーナノ粒子サイズ分析装置（精度 $\pm 0.005\mu\text{m}$ ）は、粒径の変化をリアルタイムで監視し、偏差は $0.01\mu\text{m}$ 未満に制御されます（RWTH アーヘン大学、ドイツ、2024 年）。

共同コンテンツ

X 線メタ分析センサー（精度 $\pm 0.05\%$ ）は、Co 拡散速度（ $<10^{-10}\text{cm}^2/\text{s}$ ）を監視し、分布の均一性（偏差 $<0.3\%$ ）を保証します。

応力分布

ひずみセンサー（精度 $\pm 0.5\text{MPa}$ ）は、 ΔK_{Ic} 偏差 $<0.4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ および硬度変動 $<\pm 1.8\%$ （HV 1650-1680）で熱応力の変化を監視します。

動的プロセス調整

IIoT は、5G ネットワーク（遅延 $<5\text{ms}$ ）を介してクラウドプラットフォームにリアルタ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

イムデータを送信し、AI アルゴリズムと組み合わせることで、ボールミル処理時間（偏差 ± 0.3 時間）と焼結温度（偏差 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ）を動的に調整します。例えば、粒径の偏差は $0.05\mu\text{m}$ から $0.02\mu\text{m}$ に低減し、性能の安定性は 15%向上します（硬度の偏差 $<0.5\%$ ）。

表面強化モニタリング

レーザークラディングプロセス、IIoT は赤外線温度センサー（精度 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ）を使用して熱応力の変化（偏差 $<8\text{MPa}$ ）を監視し、被覆層の品質を最適化します。2024 年、ドイツのアーヘン工科大学は AI+IIoT を開発しました。レーザークラディングシステムは、レーザ出力（ $1.5\sim 2.5\text{kW}$ ）をリアルタイムで調整し、クラディング層の硬度を HV 2600 $\sim$ 2700 に高め、厚さ偏差を $<5\mu\text{m}$ （SEM 測定）にします。

7.5.3 故障予測とインテリジェントメンテナンス： AI+IIoT の連携アプリケーション

AI と IIoT により、超硬合金の故障予測とインテリジェントなメンテナンス機能が大幅に向上し、耐用年数が延び、故障率が低減します。

亀裂成長と疲労破壊予測

AI はリカレントニューラルネットワーク（RNN）を使用して、92%を超える精度で亀裂成長速度（ da/dN ）を予測します（東京大学、日本、2024 年）。

IIoT にはアコースティックエミッションセンサー（周波数精度 $\pm 1.5\text{ kHz}$ ）が搭載されており、5G ネットワークを介して亀裂開始信号をリアルタイム（ 10^3 倍以上前進）で監視します。

2024 年、日本の東京大学は、亀裂成長速度（精度 $\pm 10^{-10}\text{mm/サイクル}$ ）を予測する AI 疲労寿命予測システムを開発し、採掘ドリルビットの寿命を 15% $\sim$ 20%（掘削距離 1500 メートルから 1800 メートルまで）延長しました。

故障率は 0.15% から 0.08% 未満に減少しました（現場テスト データ）。

衝撃靱性予測

）を組み合わせた AI 予測システムを開発し、衝撃靱性（ K_{Ic} ）を $\pm 0.2\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の精度で予測しました。最適化後、採掘用ドリルビットの耐衝撃性は 22%向上し（ K_{Ic} は $12.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ から $14.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）、耐用年数は 20% $\sim$ 25%延長されました（フィールドテスト）。

摩耗故障予測

摩耗痕の形態をリアルタイムでモニタリングすることで（溝幅予測精度 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 、顕微鏡下で測定）、鉱山用ドリルビットの耐摩耗性を 20% $\sim$ 25%向上させます。摩耗率は $0.1\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ から $0.075\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ に低減します（ASTM G65 試験）。

ひび割れ検出と故障時間予測

2024 年、英国ケンブリッジ大学は、アコースティックエミッション（AE）と CT データ（解像度 $<5\mu\text{m}$ ）を組み合わせた AI ひび割れ検出システムを開発し、故障予測精度を ± 0.8 時間に向上させました。予測リードタイムは 10^3 倍から 10^4 倍に短縮され、予期せぬダウ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンタイム率は 30%削減されました（産業応用データ）。

7.5.4 プロセス最適化とインテリジェント製造： AI+IIoT の効率的な連携

セメントカーバイド製造における AI と IIoT により、プロセス効率、パフォーマンスの安定性、生産インテリジェンスが大幅に向上しました。

添加剤比率の最適化

TaC / ZrC 添加剤の比率（総添加量 0.1%～0.3%）を誤差<0.04%、硬度一貫性偏差<1.5%で最適化します（ソウル国立大学、韓国、2024 年）。2024 年、韓国のソウル国立大学は、粒成長速度（ $<10^{-10}$ m/s、TEM 測定）をリアルタイムで監視することにより、硬度を HV 1900-2000 に増加させ、靱性を K_{IC} 12-13 MPa·m^{1/2}に維持する AI 添加剤最適化システムを開発しました。

プロセスパラメータの最適化

IIoT はセンサー（粒径精度 $\pm 0.004\mu\text{m}$ ）を用いてボールミル粉碎および焼結プロセスをリアルタイムで監視し、AI は勾配降下アルゴリズムを用いてボールミル粉碎時間（20～40 時間、偏差 ± 0.4 時間）や焼結温度（1400～1450°C、偏差 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）などのパラメータを調整します。生産効率は 18%～22%向上しました（1 バッチあたりの生産量が 100 個/時間から 120 個/時間に増加、業界データ）。

表面強化の最適化

の厚さ（10～30 μm 、誤差 $<4\mu\text{m}$ ）とイオン注入量（ $10^{16} \sim 10^{17} \text{cm}^{-2}$ 、誤差<5%）を予測し、硬度の均一性は $<1.8\%$ （HV 2000～2500）に向上しました。IIoT は浸炭温度をリアルタイム（850～950°C、偏差 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ ）で監視し、浸炭層の品質を最適化します。

品質検査とインテリジェントメンテナンス

AI+IIoT は、表面性能データ（硬度、摩耗率）を用いて自動品質検査を実現し、合格率は 98.5%（産業データ）です。AI は故障時間を予測し（誤差 4 時間未満）、IIoT はメンテナンス戦略を最適化し、ダウンタイムを 32%～35%、事故率を 30%～35%削減します（フィールドテスト）。

7.5.5 中国のタングステン産業における AI 元年

CTIA GROUP LTD は 2025 年を「中国タングステン産業における AI 元年」と定義し、中国の超硬合金産業が本格的にインテリジェント製造へと移行する新たな段階を迎えたことを示しています。この概念は、タングステン産業における AI と産業用 IoT（IIoT）技術の深層応用を反映しているだけでなく、世界の超硬合金産業における技術主導という中国の戦略目標を浮き彫りにしています。以下では、その実用的意義、超硬合金の高エントロピー性、そして超硬合金グレードのバッチ処理の重要性について詳しく説明していきます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.5.5.1 「中国タングステン産業における AI 元年」という概念の実際の意義

CTIA GROUP LTD は 2025 年 1 月 3 日に初めて「2025 年は中国のタングステン産業における AI 元年」という概念を提唱し、世界のセメント炭化物市場における中国のタングステン産業の技術変革ニーズと競争圧力を反映しました。

業界のアップグレードニーズ

中国は世界最大の超硬合金生産国であり、2024 年には世界生産量の 60%以上を占めると予想されています（中国タングステン工業協会のデータ）。しかし、長い間伝統的な製造プロセス（プレスや焼結など）に依存しており、生産効率と性能の一貫性において欧米諸国（サンドビックやケナメタルなど）との差があります（硬度一貫性の偏差 5%~8% 対 2%~3%）。AI + IIoT の導入により、データ駆動型でプロセスパラメータ（焼結温度偏差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ など）を最適化し、生産効率を 18%~22%向上させ（単一バッチ出力を 100 個/時間から 120 個/時間に増加）、硬度一貫性の偏差を 2%未満にまで低減し、国際先進レベルとの差を縮めました。

テクノロジーの自律性

これまで、中国の超硬合金製造は輸入設備と技術（ドイツのレーザークラディングシステムなど）に依存していました。2025 年に CTIA GROUP LTD と清華大学は共同で国産 AI 最適化システムを開発し、遺伝的アルゴリズム（GA）を通じて添加剤比率（VC/TaC 比率 1: 1、誤差 $<0.03\%$ ）を最適化し、硬度を HV 1950-2000 に高め、技術の自主制御を実現しました。AI 元年の提唱は、中国が技術追随者から技術リーダーへと転換することを示しています。国産設備の適用率は 2024 年の 40%から 2026 年には 65%に増加すると予想されています（業界予測）。

国際競争力の向上

AI+IIoT は、超硬合金の性能最適化（ K_{1c} が $13\sim 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に向上するなど）を促進し、中国の超硬合金製品の航空宇宙分野（航空工具など）や鉱業分野（ドリル寿命が 20%向上）における競争力を高めます。2025 年には、中国の超硬合金輸出は 15%増加（商務省の予測では約 50 億米ドル）し、世界市場での地位をさらに強化すると予想されています。

7.5.5.2 超硬合金の高エントロピー処理の意義

CTIA GROUP LTD が提案する高エントロピーハードメタルとは、複数の元素（W、Ti、Ta、Nb、Cr など）を導入して高エントロピー合金（HEA）ベースのハードメタルを形成し、性能の多様性と安定性を向上させることを指します。

パフォーマンスの飛躍的進歩

従来の WC-Co 超硬合金は、硬度と靱性に矛盾があります（硬度 HV 1800 の場合、 K_{1c} は通常 $10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 未満です）。高エントロピーは、複数の元素の相乗効果により、全体的な性能を大幅に向上させます。2025 年には、CTIA GROUP LTD は、硬度 HV 2100-2200、靱性 K_{1c} $14\sim 16\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ （片面ノッチビーム法テスト）の高エントロピー超硬合金（W-Ti-Ta-Nb-Co）を開発する予定です。これは、従来の WC-Co より 20%-30%高くなります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微細構造最適化

高エントロピー処理では、AI アルゴリズム（ディープラーニング、DL など）を用いて元素比（W:Ti:Ta:Nb=1:1:1:1、誤差<0.05%）を予測し、均一な高エントロピー相（粒径 0.3~0.5 μ m、TEM 測定）を形成し、粒界欠陥（<0.1%）を低減します。粒界結合強度は 25% 向上（>180MPa、ナノインデンテーション試験）、耐疲労性も大幅に向上（寿命>1.5 $\times 10^5$ 回、回転曲げ疲労試験）します。

アプリケーション開発

高エントロピー超硬合金は優れた耐高温性（800 $^{\circ}$ C で硬度 HV1800 以上）を有し、航空機エンジンのタービンブレードの切削工具に適しています。寿命は 30% 向上（12 時間から 15.6 時間、フィールドテスト）しています。耐腐食性は 20% 向上（酸性環境 pH<4、腐食速度<0.05mm/年、電気化学テスト）しており、深海採掘設備に適しています。

7.5.5.3 炭化物グレードのバッチ処理の重要性

CTIA GROUP LTD が提案する超硬合金グレードバッチ処理とは、AI + IIoT テクノロジーによって超硬合金製品のライフサイクル全体にわたってデジタル管理し、グレードバッチ番号データベースを確立し、性能のトレーサビリティとカスタマイズされた生産を実現することを意味します。

パフォーマンスのトレーサビリティ

超硬合金製品の各バッチは、IIoT センサーを介して製造パラメータ（焼結温度 1400 $^{\circ}$ C、Co 含有量 10% など）を記録し、固有のバッチ番号を生成してクラウドプラットフォーム（データ容量>1TB、2025 年）に保存します。ユーザーはバッチ番号を通じて性能データ（硬度 HV 1750、 K_{IC} 13 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ など）を照会し、性能の一貫性（偏差<1.5%）を確保できます。

カスタマイズ生産

K_{IC} >14 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ が必要など）に応じて、グレード配合（WC-12Co+0.3% TaC など）を自動調整し、生産サイクルを 25% 短縮（8 日から 6 日）します。バッチナンバリングにより、小ロットカスタマイズをサポートし、航空宇宙（高靱性工具）や新エネルギー（バッテリー金型）などの多様なニーズに対応します。

品質管理の改善

ブランドバッチングでは、AI を活用して履歴データ（10 万バッチ以上）を分析し、異常工程（例えば、粒度偏差>0.02 μ m）を特定し、パラメータを最適化して合格率を大幅に向上させます。故障解析の効率は 30% 向上し、バッチ番号トレーサビリティにより問題バッチを迅速に特定（1 時間未満）できるため、リコールコストを 20%~25% 削減します。

7.5.6 超硬合金の性能向上の将来展望と課題

超硬合金の性能向上の将来展望

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

インテリジェント製造

AI+IIoTにより超合金製造のスマートファクトリー化がさらに促進され、2027年には生産効率が30%~40%向上すると予想されています（マッキンゼー予測）。

マルチマテリアル最適化

、硬度がHV 2000を超え、靱性が $K_{Ic} 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に達すると予想される多相複合セメント炭化物（WC-Co-TiCなど）の性能を予測できます。

完全なライフサイクル管理

IIoTにより、原材料からアプリケーションまでのパフォーマンス追跡が可能になり、故障予測が 10^5 倍に向上します。

超合金の性能向上の課題

データ品質

AIモデルは高品質なデータに依存します。現在の産業用データはノイズが多く（偏差が10%以上）、センサーの精度向上が必要です。

料金

IIoTデバイス（センサー、5Gモジュール）は導入コストが高く、短期的にはROIが低くなります（<5%）。

安全

5Gネットワーク伝送ではデータ漏洩のリスクがあり、暗号化技術を強化する必要がある（AES-256規格）。

AI+IIoTは、超合金の性能最適化に新たな道を切り開きます。微細構造最適化（粒径偏差<0.01 μm 、硬度均一性15%向上）、リアルタイム性能モニタリング（硬度偏差<1.8%）、故障予測（前進量> 10^4 倍、故障率<0.08%）、プロセス最適化（生産効率18%~22%向上）などにより、超合金の性能均一性、信頼性、生産効率が大幅に向上します。今後、AI+IIoTは、超合金製造のインテリジェント化とライフサイクル全体にわたる管理に向けた発展をさらに推進し、航空、鉱業、新エネルギーなどの分野に、より効率的で信頼性の高いソリューションを提供します。

7.6 関連する国内および国際規格

以下は、読者が試験と評価の基礎を十分に理解できるように、セメント炭化物の機械的特性に関する国内および国際規格であり、中国、ISO、米国、欧州の規格を網羅しています。

超合金の機械的特性に関するもの：

「超合金の特性に関する規格」では、硬度（HV）、破壊靱性（ K_{Ic} ）、圧縮強度の試験方法を規定しています。

GB/T 3849-2008 超合金のピッカース硬度試験方法：硬度試験（HV 1200-2000）に適用。

GB/T 7997-2010 超合金の破壊靱性試験方法：片側ノッチビーム法（SENB）に基づいて K_{Ic} を試験します。

GB/T 3488-2008 「超合金の微細構造試験方法」：粒径および微細構造の分析に使用されます。

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

超硬合金の機械的特性に関するもの：

ISO 28079:2009「炭化物掌状試験片の破壊靱性試験方法」：試験 K_{Ic} ($8-16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) 。
ISO 6507-1:2018「金属材料のビッカース硬度試験」：セメント炭化物の硬度試験に適用可能。

ISO 3327:2009 超硬合金の圧縮強度試験方法：圧縮強度を試験する ($4000\sim 6000 \text{ MPa}$)。

ISO 3738-1:2010 超硬合金の摩耗試験方法：研磨摩耗試験に基づく (ASTM G65 に類似)。

超硬合金の機械的特性に関する米国規格：

ASTM E399-20 金属材料の破壊靱性試験方法：試験 K_{Ic} 、セメント炭化物に適用。

ASTM E647-15「疲労き裂成長速度試験方法」：き裂成長速度 (da/dN) を試験します。

ASTM E23-18「ノッチ付き試験片衝撃試験方法」：シャルピー試験およびアイゾット試験の衝撃エネルギー。

ASTM G65-16 乾式砂/ゴムホイール摩耗試験方法：セメント炭化物の耐摩耗性を試験します (摩耗率 $< 0.1 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) 。

超硬合金の機械的特性に関する欧州規格：

EN ISO 6507-1:2018「ビッカース硬度試験」：ISO 6507-1 に準拠。

EN 843-1:2006 先進セラミックスの破壊靱性試験方法：セメント炭化物の K_{Ic} 試験に適用可能。

EN 1071-3:2005「セラミック材料の摩耗試験方法」：セメント炭化物の耐摩耗性試験に適用可能。

EN ISO 6892-1:2019「金属材料の引張試験」：セメント炭化物の強度試験に使用できます。

参考文献

- [1] 国家規格 GB/T 18376-2001「超硬合金の特性試験方法」。
- [2] 国家規格 GB/T 7997-2010「超硬合金の破壊靱性試験方法」。
- [3] 国家規格 GB/T 3488-2008「超硬合金の微細構造試験方法」。
- [4] Li Ming 他 (2020). 「焼結温度が超硬合金の微細構造に及ぼす影響」, 「金属の熱処理」, 45(3), 12-18.
- [5] Zhang Wei 他 (2021). 「VC 添加剤が超硬合金の特性に及ぼす影響」, 「粉末冶金技術」, 39(4), 45-50.
- [6] Liu Yang 他 (2021). 「VC 添加剤が超硬合金の特性に及ぼす影響」, 「粉末冶金技術」, 39(4), 45-50.
- (2022). 「Co 含有量が超硬合金の機械的性質に及ぼす影響」, 「材料研究ジャーナル」, 36(5), 321-327.
- [7] Chen Lei, et al. (2023). 「焼結雰囲気が超硬合金の粒界欠陥に及ぼす影響」, 中国非鉄金属学会誌, 33(6), 89-95.
- [8] Zhao Gang, et al. (2024). 「冷却速度が超硬合金の熱応力に及ぼす影響」, 材料科学技術, 52(2), 101-108.
- [9] Wang Qiang, et al. (2023). 「高エネルギーボールミリングが WC の粒微細化に及ぼす影響」, 材料科学技術ジャーナル, 41(3), 234-240.
- [10] Li Qiang, et al. (2025). 「航空タービンブレード用セメント炭化物の性能最適化」 航空材料ジャーナル, 45(1), 15-22.
- [11] ISO 3327:2009. 硬質金属-圧縮強度の測定方法。

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

- [12] ASTM E647-15. 疲労き裂成長速度の測定のための標準試験方法。
- [13] ASTM G65-16. 乾いた砂/ゴムホイール摩耗試験の標準試験方法。
- [14] Upadhyaya, GS (1998) . セメント炭化物：製造、特性および試験。ワイリープレス。
- [15] Konyashin , I., et al. (2015). 「WC-Co セメント炭化物の微細構造と特性」 国際耐火金属・硬質材料誌、 49、203-211 。
- [16] Prakash, LJ(2016).「セメント炭化物の表面改質: レビュー」 *Journal of Materials Science*、51 (10)、 4657-4671。
- [17] ホール、EO (1951)「軟鋼の変形と老化: III 結果の考察」 *物理学会報*、 64 (381) 747- 753 年。
- [18] Schiotz, J., et al. (1998) . 「非常に小さな粒径における金属の軟化」 *Nature* , 391 (6667) , 561-563. RM (1996). 焼結理論と実践. Wiley Press.
- [20] サンドビックコロマント。
(2023) . 「高速切削工具の性能データ」

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

スケジュール:

超硬合金の硬度と靱性のバランス：主な性能パラメータ

パフォーマンス	パラメータ範囲	アプリケーションシナリオ	述べる
硬度 (HV)	15002500±30	航空工具、鉋業用ドリルビット、耐摩耗性金型	硬度が高い場合 (HV>2000±30) は靱性の低下につながりやすいため、バランスと最適化が必要です。
靱性 (K _{ic})	820 MPa·m ^{1/2} ±0.5	航空工具、鉋業用ドリルビット、耐摩耗性金型	靱性が高い (K _{ic} >15 MPa·m ^{1/2} ±0.5) と、硬度が低下することが多く、耐摩耗性に影響します。
圧縮強度	>4000 MPa±100 MPa	高負荷条件	それは粒径と Co 含有量に密接に関係しています。
命を削る	20 時間以上±1 時間	航空工具 (高速切削 > 1000 m/分)	微粒子 WCCo (0.5µm±0.01µm、Co 10%±1%)、硬度 HV 1800±30、長寿命。
掘削距離	>1500m±100m	鉋山用ドリルビット	Co 8%±1% は靱性を最適化し、掘削効率を向上させます。
圧迫回数	>10 ⁶ 回 ±10 ⁵ 回	耐摩耗性金型	結晶粒微細化 (0.5µm±0.01µm) により耐久性が向上します。

超硬合金の硬度と靱性のバランスに及ぼす粒径の影響

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
初期の粉末粒子サイズ	0.51µm±0.01µm	粒子サイズが 1µm 未満の場合、硬度は増加します (HV>1800±30)。2µm を超える場合、硬度は <1500±30 になります。	均一な精製を確実にするために、0.51µm±0.01µm の粉末を使用してください。
ボールミル時間	40 時間±1 時間 (400 rpm±10 rpm)	40 時間後にはサイズが 0.5µm±0.01µm に減少し、硬度が 30%±5% 増加します。20 時間未満ではサイズが 1µm を超え、性能が低下します。	ボールミル処理は 40 時間±1 時間実施し、回転速度は 400rpm±10rpm に制御した。
焼結温度	1450°C±10°C	1450°C では粒径は <0.7µm±0.01µm ですが、1500°C を超えると粒径は >2µm となり、硬度は 10%±2% 減少します。	粒成長を避けるために 1450°C±10°C に制御します。
添加剤 (VC)	0.3%±0.01%	0.3% では粒成長が抑制され、硬度が 5%±1% 増加します。0.5% を超えると脆い相が形成され、K _{ic} <8 MPa·m ^{1/2} ±0.5 になります。	VC 0.3%±0.01% を添加し、粒径を <0.5µm±0.01µm に制御します。
共同コンテンツ	10%±1%	10% は硬度 (HV 1800±30) と靱性 (K _{ic} >12 MPa·m ^{1/2} ±0.5) のバランスが取れており、<6% は靱性が不十分です。	バランスの取れたパフォーマンスを確保するには、Co を 10%±1% に設定します。
焼結雰囲気	真空度 <10 ⁻³ Pa ± 10 ⁻⁴ Pa	真空により酸化 (O ₂ <0.1 ppm±0.01 ppm) が防止され、粒界欠陥 (<0.1%±0.02%) が減少します。	真空または高純度 Ar 雰囲気 (純度>99.99%±0.01%) を使用してください。

超硬合金の硬度と靱性のバランスに対する結合相含有量の最適化の影響要因

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
Co 比率	8%10%±1%	±30) および靱性 (K _{ic} 12 MPa·m ^{1/2} ±0.5) ; <6% K _{ic} <10 MPa·m ^{1/2} ±0.5 。	を確保するには、Co 8%10%±1% を選択します。
焼結温度	1450°C±10°C	1450°C では Co の均一な分布が保証されます (偏差 <1%±0.2%)。	制御 1450°C±10°C、Co 分布偏差

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
		1500℃ 以上では Co プールが形成されます ($>10\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$)。	$<1\%\pm 0.2\%$ 。
WC 粒子サイズ	$0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$	$0.51\mu\text{m}$ では界面結合が強化され、 $>2\mu\text{m}$ では K _{1c} が $5\%\pm 1\%$ 減少します。	WC $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を選択します。
添加剤 (VC)	$0.3\%\pm 0.01\%$	0.3% では Co の拡散 (速度 $<10^{-10}\text{cm}^2/\text{s}\pm 10^{-11}\text{cm}^2/\text{s}$) が制御され、 $>0.5\%$ では脆い相 ($>1\%\pm 0.2\%$) が形成されます。	VC $0.3\%\pm 0.01\%$ を添加すると Co の拡散を抑制できます。
成形圧力	$250\text{MPa}\pm 5\text{MPa}$	250MPa では密度が増加します ($>99.5\%\pm 0.1\%$); $<200\text{MPa}$ では多孔度が $2\%\pm 0.5\%$ 増加します。	$250\text{MPa}\pm 5\text{MPa}$ で冷間等方圧プレスを使用します。
焼結時間	2 時間 ± 0.1 時間	2 時間の Co 濡れを制御 (接触角 $<5^\circ\pm 1^\circ$)。3 時間以上で Co 偏析率 $>0.5\%\pm 0.1\%$ 。	Co の均一性を確保するために、焼結は 2 時間 ± 0.1 時間行われました。

超硬合金の耐疲労性と耐衝撃性の主な性能パラメータ

パフォーマンス	パラメータ範囲	アプリケーションシナリオ	述べる
ひび割れ成長速度 (da/ dN)	$<10^{-6}\text{mm}/\text{サイクル}\pm 10^{-7}\text{mm}/\text{サイクル}$	鉱山用ドリルビット、航空用切削工具、耐磨耗性金型	亀裂成長速度が低い (例: $10^{-7}\text{mm}/\text{サイクル}\pm 10^{-8}\text{mm}/\text{サイクル}$) ため、疲労寿命が延びます ($>10^5$ 倍 $\pm 10^4$ 倍)。
衝撃エネルギー	$1050\text{J}\pm 1\text{J}$	鉱山用ドリルビット、航空用切削工具、耐磨耗性金型	シャルピー衝撃エネルギー $20\text{J}\pm 1\text{J}$ は、高衝撃要件を満たします (例: $>10^3\text{Hz}\pm 100\text{Hz}$)。
疲労寿命	$>10^5$ 回 $\pm 10^4$ 回	鉱山用ドリルビット、耐磨耗性金型	結晶粒微細化 ($0.5\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$) と Co 最適化 ($10\%\pm 1\%$) により、疲労耐性が大幅に向上します。
インパクトライフ	掘削 $>1500\text{m}\pm 100\text{m}$ 、押し出し $>10^6$ 回 $\pm 10^5$ 回	鉱山用ドリルビット、耐磨耗性金型	高 K _{1c} ($12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$) により、衝撃に対する信頼性が保証されます。

超硬合金の疲労抵抗における亀裂成長に影響を与える要因

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
粒度	$0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$	$0.51\mu\text{m}$ da/ dN $<10^{-7}\text{mm}/\text{サイクル}\pm 10^{-8}\text{mm}/\text{サイクル}$ 、 $>2\mu\text{m}$ da/ dN $>10^{-6}\text{mm}/\text{サイクル}\pm 10^{-7}\text{mm}/\text{サイクル}$ 。	WC $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を選択します。
共同コンテンツ	$10\%\pm 1\%$	10% K _{1c} $>12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ 、低 da/ dN 、 $<6\%$ da/ dN の増加は $30\%\pm 5\%$ です。	Co を $10\%\pm 1\%$ に設定します。
応力比 (R)	0.1 ± 0.01	$R=0.1$ da/ dN $<10^{-7}\text{mm}/\text{サイクル}\pm 10^{-8}\text{mm}/\text{サイクル}$ 、 $R>0.5$ da/ dN は $50\%\pm 5\%$ 増加しました。	対照 $R=0.1\pm 0.01$ 。
添加剤 (VC)	$0.3\%\pm 0.01\%$	0.3% では粒界強度が増加します ($>200\text{MPa}\pm 20\text{MPa}$)。 $>0.5\%$ では脆相が $>1\%\pm 0.2\%$ になります。	VC を $0.3\%\pm 0.01\%$ 添加します。
表面粗さ	$Ra<0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$	$Ra<0.05\mu\text{m}$ 、亀裂発生時間 $>10^4$ 回 $\pm 10^3$ 回; $>0.1\mu\text{m}$ 、寿命は $20\%\pm 5\%$ 減少します。	$Ra<0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ まで研磨します。
微細な欠陥	気孔率 $<0.5\%\pm 0.1\%$	多孔度 $<0.5\%$ da/ dN $<10^{-7}\text{mm}/\text{サイクル}\pm 10^{-8}\text{mm}/\text{サイクル}$ 、 $>1\%$ da/ dN の増加は $40\%\pm 5\%$ です。	多孔度は $0.5\%\pm 0.1\%$ 未満に制御され、CT スキャンによって

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
			検出されます。

超硬合金の衝撃靱性に影響を与える要因

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
共同コンテンツ	10%±1%	10% 衝撃エネルギー >20 J±1 J; <6% 衝撃エネルギー <10 J±1 J。	Co 10%±1%を選択します。
粒度	0.51μm±0.01μm	0.51μm K _{1c} >12 MPa·m ^{1/2} ±0.5; >2μm では、衝撃エネルギーが 20%±5%減少します。	WC 0.51μm±0.01μm を選択します。
添加剤（VC）	0.3%±0.01%	0.3% の衝撃エネルギーは 10%±2% 増加します。0.5% を超える脆性相は 1%±0.2% を超えます。	VC を 0.3%±0.01%添加します。
ノッチの深さ	2mm±0.01mm	2 mm 標準テスト、3 mm を超える衝撃エネルギーは 30%±5% 減少します。	ノッチの深さを 2 mm ± 0.01 mm に制御します。
焼結密度	>99.5%±0.1%	衝撃エネルギー >99.5%、20 J±1 J 以上、多孔度 <99%、2%±0.5% 以上。	焼結密度が 99.5%±0.1%以上であることを確認します。
試験温度	40°C±1°C	40°C では衝撃エネルギーは >15J±1J です。60°C 未満では衝撃エネルギーは 20%±5% 減少します。	低温テストにより性能を検証します (40°C ± 1°C)。

超硬合金の破壊メカニズムの主な性能パラメータ

パフォーマンス	パラメータ範囲	失敗のシナリオ	述べる
摩耗率	<0.06 mm ³ /N·m ± 0.01 mm ³ /N·m	鉋山用ドリルビット、航空用切削工具、耐摩耗性金型	摩耗率が高い (>0.06 mm ³ /N·m ± 0.01 mm ³ /N·m) ため、工具寿命が短くなります (例: 工具 <10 時間 ± 1 時間)。
亀裂長さ	<0.1 mm±0.01 mm	航空工具、鉋業用ドリルビット	微小亀裂 (>0.1 mm ± 0.01 mm) は剥離を引き起こし、信頼性を低下させます。
骨折率	<0.1%±0.02%	航空工具、耐摩耗性金型	高い K _{1c} (12 MPa·m ^{1/2} ± 0.5) により、破損のリスクが軽減されます。
剥離速度	<0.1%±0.02%	鉋山用ドリルビット、耐摩耗性金型	界面エネルギー >1 J/m ² ± 0.1 J/m ² により剥離が減少します。

超硬合金の摩耗破壊に影響を与える要因

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
硬度	高圧 1800±30	HV 1800±30: 摩耗率 <0.06 mm ³ /N·m ± 0.01 mm ³ /N·m、<1500±30: 30%±5% の増加。	硬度 HV1800±30 を確保する。
粒度	0.51μm±0.01μm	0.51μm: 摩耗率が低い; >2μm: 20%±5% 増加。	WC 0.51μm±0.01μm を選択します。
共同コンテンツ	10%±1%	粘着摩耗が 10% 減少し、摩耗率が 12% を超えると 15%±3% 増加します。	Co を 10%±1%に設定します。
表面粗さ	Ra<0.05μm±0.01μm	Ra<0.05μm では摩耗率は低く、>0.1μm では 25%±5%増加します。	Ra<0.05μm±0.01μm まで研磨します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
動作温度	<800°C±10°C	>800°C では凝着摩耗が 50%±5% 増加します。	冷却剤を使用して温度を 600°C±10°C 未満に制御します。
研磨粒子サイズ	<50µm±5µm	<50µm: 摩耗率<0.06 mm ³ / N・m ± 0.01 mm ³ / N・m; >100µm: 摩耗率は 40%±5%増加します。	研磨粒子のサイズを<50µm±5µm に制御します。

超硬合金の破壊と剥離に影響を与える要因

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
靱性（ K _{1c} ）	>12 MPa・m ^{1/2} ± 0.5	K _{1c} >12 MPa・m ^{1/2} ± 0.5 の場合、破壊率は <0.1%±0.02% です。<10 MPa・m ^{1/2} ± 0.5 の場合、破壊率は 50%±5% 増加します。	K _{1c} >12 MPa・m ^{1/2} ± 0.5であることを確認します。
粒度	0.51µm±0.01µm	0.51µm の亀裂成長速度は遅く、2µm を超えると破壊率が 30%±5% 増加します。	WC 0.51µm±0.01µm を選択します。
共同コンテンツ	10%±1%	剥離が 10%減少、剥離率が 6%未満の場合、20%±5% 増加します。	Co を 10%±1%に設定します。
表面欠陥	ひび割れ <0.1 mm±0.01 mm	亀裂が 0.1 mm を超える場合、破損率は 50% ± 5% 増加します。	CT スキャンを使用してひび割れを検出し、表面を研磨しました。
応力集中係数（ K _t ）	<2±0.1	K _t >3 の場合、剥離率は 40%±5%増加します。	丸い角（半径> 0.5 mm ± 0.01 mm）、 K _t <2 ± 0.1。
インターフェースエネルギー	>1 J/m ² ± 0.1 J/m ²	>1 J/m ² の場合、剥離率は 20%±5%減少します。<0.5 J/m ² の場合、剥離率は 30%±5%増加します。	最適化された界面エネルギー >1 J/m ² ± 0.1 J/m ² 。

超硬合金の性能向上の主な性能パラメータ

パフォーマンス	パラメータ範囲	アプリケーションシナリオ	述べる
硬度（HV）	18002500±30	航空工具、鉦業用ドリルビット、耐摩耗性金型	超微粒子（<0.2µm±0.01µm）および表面強化（レーザークラディングなど）は、>3000±50 に達することができます。
靱性（ K _{1c} ）	1015 MPa・m ^{1/2} ± 0.5	鉦山用ドリルビット、耐摩耗性金型	添加剤（VC、 TaC ）と Co の最適化（10%±1%）により、 K _{1c} が 12 MPa・m ^{1/2} ± 0.5 以上に増加します。
疲労寿命	>10 ⁵ 回 ±10 ⁴ 回	耐摩耗性金型、鉦山用ドリルビット	PIII (10 ¹⁸ cm ⁻² ± 10 ¹⁶ cm ⁻²) は寿命を 10 ⁶ 倍 ± 10 ⁵ 倍以上延長します。
摩耗率	<0.06 ± 0.01 m ³ / N・m	航空工具、鉦業用ドリルビット	イオン注入およびレーザークラディングは、<0.04 mm ³ /N・m±0.01 mm ³ /N・m まで低減できます。

超硬合金の性能向上に影響する粒子の微細化と添加剤

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
粒度	<0.5µm±0.01µm	<0.5µm 硬度>2000±30; >1µm 硬度<1800±30。	WC<0.5µm±0.01µm を選択し、ボールミルで 40 時間±1 時間処理します。
添加剤（ VC/ TaC ）	0.3%±0.01%	0.3% 硬度は 5%±1% 増加し、 K _{1c} は 10%±2% 増加します。>0.5% 脆性相は>1%±0.2% です。	VC/ TaC を 0.3%±0.01%添加します。
ボールミル時間	40 時間±1 時間	40 時間後、粒径は <0.5µm±0.01µm になります。20 時間後、	ボールミルで 40 時間 ±1 時間

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
		粒径は $>1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ になります。	(500rpm $\pm$ 10rpm)。
焼結温度	1450°C $\pm$ 10°C	1450°C では粒子は安定しており、1500°C を超えると粒子は $1\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を超えます。	1450°C $\pm$ 10°C、圧力 $<10^{-3}\text{Pa}\pm 10^{-4}\text{Pa}$ に制御されます。
共同コンテンツ	10% $\pm$ 1%	10% K _{1c} $>12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$; $<6\%$ K _{1c} $<10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$ 。	Co を 10% $\pm$ 1%に設定します。
ZrC 添加	0.2% $\pm$ 0.01%	0.2% 硬度 $>2500\pm 50$; $>0.5\%$ K _{1c} は 10% $\pm$ 2% 減少します。	超微粒子 WC の場合は ZrC 0.2% $\pm$ 0.01%を追加します。

超硬合金の表面強化による性能向上に影響する要因

要素	パラメータ範囲	パフォーマンスへの影響	最適化の提案
浸炭温度	900°C $\pm$ 10°C	900°C で WC 層 (1050 $\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 、HV $>2500\pm 50$) が形成され、1000°C 以上で亀裂率は $>1\%\pm 0.2\%$ となります。	制御温度: 900°C $\pm$ 10°C、CH ₄ 流量: 10 L/分 $\pm$ 0.1 L/分。
イオン線量	$10^{17}\text{cm}^{-2}\pm 10^{16}\text{cm}^{-2}$	10^{17}cm^{-2} 硬度 $>2200\pm 30$; $>10^{18}\text{cm}^{-2}$ 損傷 $>1\%\pm 0.2\%$ 。	、線量 $10^{17}\text{cm}^{-2}\pm 10^{16}\text{cm}^{-2}$ 、エネルギー 100keV $\pm$ 1keV を使用。
粒度	0.51 $\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$	0.51 μm は最高の強化効果があり、2 μm を超えると硬度の増加は 10% $\pm$ 2% 未満になります。	WC 0.51 $\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ を選択します。
共同コンテンツ	10% $\pm$ 1%	10% 強化層は安定しており、6% 未満のひび割れ率は 20% $\pm$ 5% 増加します。	Co を 10% $\pm$ 1%に設定します。
表面粗さ	Ra $<0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$	Ra $<0.05\mu\text{m}$ では摩耗率は低く、 $>0.1\mu\text{m}$ では 15% $\pm$ 3%増加します。	Ra $<0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ まで研磨します。
レーザー出力	2kW $\pm$ 0.1kW	2kW クラッド層は均一です (厚さ 50 $\sim$ 100 $\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$)。3kW を超えると亀裂率が 10% $\pm$ 2% 増加します。	レーザー出力は 2kW $\pm$ 0.1kW に制御され、走査速度は 10mm/s $\pm$ 0.1mm/s に制御されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録：

ホール・ペッチ関係とは何ですか？

ホール・ペッチ関係は、材料の機械的特性（主に強度と硬度）と粒径の関係を記述する古典的な理論モデルです。金属、合金、セラミック材料（超合金 WC-Co など）に広く用いられています。この関係は、粒径が小さくなるにつれて、材料の強度と硬度が大幅に増加することを示しています。その中核となるメカニズムは、粒界が転位運動を阻害する効果です。ホール・ペッチ関係は、1951 年に EO Hall、1953 年に NJ Petch によって初めて提唱され、主に多結晶材料の機械的挙動の研究に用いられています。

基本的な概念と公式

ホール・ペッチ関係は次の数式で表すことができます。

$$\sigma_y = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

或对于硬度：

$$HV = HV_0 + k' d^{-1/2}$$

其中：

- σ_y ：材料的屈服强度（单位：MPa）。
- HV ：材料的硬度（例如维氏硬度，单位：HV）。
- σ_0 或 HV_0 ：单晶材料的屈服强度或硬度（晶粒尺寸趋于无穷大时的极限值），反映晶粒内部的固有阻力。
- k 或 k' ：Hall-Petch常数，与材料类型和晶界特性相关（单位：MPa·m^{1/2} 或 HV·m^{1/2}）。
- d ：平均晶粒尺寸（单位：m，通常为μm量级）。
- $d^{-1/2}$ ：晶粒尺寸的倒数平方根，表示晶界密度的增加。

直观解释：晶粒尺寸越小（ d 越小）， $d^{-1/2}$ 越大，晶界密度越高，位错运动受阻越明显，因此材料的强度和硬度（ σ_y 或 HV ）越高。

微視的メカニズム

ホール・ペッチ関係の物理的根拠は、粒界が転位の運動を阻害する効果にあります。多結晶材料の機械的特性は、主に以下のメカニズムによって影響を受けます。

粒界は転位の運動を妨げる：

多結晶材料において、粒界は転位の移動に対する自然な障害物となります。転位は材料の塑性変形の媒介物です。転位が粒界に移動すると、粒界の配向差（粒界偏向角は通常 20°～40°）と粒界エネルギー（>1.5 J/m²）により、転位は容易に粒界を越えることができま

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

せん。

転位は粒界に蓄積し、転位パイルアップを形成し、局所的な応力集中を引き起こします。粒界を越えるにはより高い応力が必要となり、降伏強度の増加として現れます。

粒界密度の増加:

が小さくなると（例えば $2\text{ }\mu\text{m}$ から $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ）、粒界密度は大幅に増加します（約 10^{12} m^{-2} から 10^{13} m^{-2} 超）。粒界密度が高いほど、単位体積あたりの転位運動に対する障害物が増え、材料の強度と硬度もそれに応じて増加します。

$2\text{ }\mu\text{m}$ から $0.5\text{ }\mu\text{m}$ に減少すると、粒界密度は約 4 倍に増加し、硬度の増加は 25%~30% に達することがあります（例: HV 1200 から HV 1600 に）。

オロワン強化メカニズム:

粒界は転位を固定することで材料特性を強化します（オロワン強化メカニズムに似ています）。

晶界通过钉扎位错（类似Orowan强化机制）增强材料性能。位错绕过晶界的剪应力 (τ) 与晶界间距 (λ) 相关: $\tau \sim Gb/\lambda$, 其中 G 为剪切模量, b 为伯氏矢量, λ 与晶粒尺寸 d 成正比 ($\lambda \sim d$)。晶粒尺寸越小, λ 越小, 剪应力越高, 材料越强硬。

粒界移動と安定性:

粒界の熱力学的安定性は、ホール・ペッチ関係に重要な影響を与えます。粒界移動速度（通常 $<10^{-10}\text{ m/s}$ ）は、焼結温度（ $1400\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ）と添加剤（VC 0.2%~0.5% など）によって制御され、移動障壁は $80\sim 120\text{ kJ/mol}$ です。安定した粒界（低い移動速度）は、微細粒構造を維持し、ひいては高い強度を維持するのに役立ちます。

ホール・ペッチ関係の適用範囲

Hall-Petch 関係は、特定の粒子サイズの範囲内では非常にうまく機能しますが、極端な場合には機能しません。

（大粒径、 $>0.2\text{ }\mu\text{m}$ ）:

ほとんどの超硬合金（WC-Co など）では、粒径が $0.2\text{ }\mu\text{m}$ から $10\text{ }\mu\text{m}$ の範囲にある場合、ホール・ペッチ関係が成立します。例えば、WC-10Co の粒径が $2\text{ }\mu\text{m}$ から $0.5\text{ }\mu\text{m}$ に減少すると、硬度は HV 1200 から HV 1600 に増加し、約 25% ~ 30% の増加となります。また、降伏強度も約 20%~25%（ 3500 MPa から 4500 MPa ）増加します。このとき、主な強化メカニズムは転位の動きを妨げる粒界です。

が小さすぎる、 $<0.2\text{ }\mu\text{m}$ ）:

結晶粒径がナノスケール（ $<0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、例えば $<100\text{ nm}$ ）まで微細化すると、ホール・ペッ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

チ関係が崩れ、「逆ホール・ペッチ効果」が発生することがあります。このとき、粒界すべりが主な変形機構となり、強度と硬度が低下します。

理由：粒界の割合が高すぎる ($>50\%$) ため、界面エネルギーが性能を支配し ($>1.5\text{J/m}^2$)、粒界滑りと拡散 (コーブルクリープなど) が激しくなり、靱性が低下します (K_{Ic} が $12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ から $<8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に低下します)。

例えば、WC 粒径が $0.5\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ に減少すると、硬度は HV 1600 から HV 1400 に低下し、靱性は大幅に低下します ($K_{Ic} < 8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)。

高温条件：

高温 (800°C 超) では、粒界移動速度が増加し (10^{-9}m/s 超)、結晶粒が異常に成長 ($2\mu\text{m}$ 超) し、ホールペッチ効果が弱まる可能性があります。例えば、 1000°C では、WC-10Co の結晶粒径は $0.5\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ に成長し、硬度は $10\% \sim 15\%$ 低下します (HV 1600 から HV 1400)。

ホールとペッチの関係に影響を与える要因

Hall-Petch 関係のパフォーマンスは、次の要因によって影響を受けます。

粒径 (d) :

粒径はホール・ペッチ関係の中核となる変数です。粒径が小さいほど粒界密度が高くなり、強化効果が顕著になります。例えば、WC の粒径が $1\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ に小さくなると、硬度は約 $15\% \sim 20\%$ 増加します。

ただし、粒子が小さすぎると ($<0.2\mu\text{m}$)、逆ホールペッチ効果が発生するため、粒界滑りを抑制するために添加剤 (VC $0.2\% \sim 0.5\%$ など) が必要になります。

材料の種類と粒界特性：

Hall-Petch 常数 k と材料类型和晶界特性密切相关。对于硬质合金 WC-Co, k 值通常在 $0.5-1.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 之间, 受 Co 含量和晶界强度影响。

Co 含量高 (如 15%) 时, 晶界润湿性增强 (接触角 $<15^\circ$), 晶界强度降低 ($<100\text{MPa}$), k 值减小, 强化效果减弱; Co 含量低 (如 6%) 时, 晶界强度高 ($>150\text{MPa}$), k 值增大。

3. 添加物：

結晶粒抑制剤 (VC $0.2\% \sim 0.5\%$ 、 Cr_3C_2 $0.1\% \sim 0.3\%$ など) を添加すると、結晶粒径を小さくし、ホールペッチ効果を高めることができます。例えば、VC を 0.4% 添加すると、WC の結晶粒径は $1\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ に小さくなり、硬度は $5\% \sim 10\%$ (HV 1500 から HV 1600) 増加します。

VCx 相など、比率 $>0.5\%$ が形成され、靱性 ($K_{Ic} < 8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) が低下する可能性があります。

焼結プロセス：

焼結温度 ($1400 \sim 1500^\circ\text{C}$) と真空度 ($<10^{-2}\text{Pa}$) は、粒径と粒界安定性に影響を与えます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

焼結温度が高すぎる場合 ($>1550^{\circ}\text{C}$)、粒成長 ($>2\mu\text{m}$) が発生し、硬度が 10~15% 低下します。

たとえば、WC-10Co を 1450°C で焼結すると、粒径は $0.5\mu\text{m}$ のままで、硬度は HV 1600 に達しますが、 1600°C で焼結すると、粒径は $2\mu\text{m}$ に大きくなり、硬度は HV 1400 に低下します。

共同コンテンツ:

Co 含有量は、粒界濡れ性と塑性変形能に影響を与えます。Co 含有量が低い場合 (例えば 6%)、粒界強化効果が顕著で硬度が高くなります (HV >1600)。一方、Co 含有量が高い場合 (例えば 15%)、粒界が軟化して硬度が低下します (HV <1200)。

たとえば、WC-6Co (粒径 $0.5\mu\text{m}$) の硬度は HV 1700 ですが、WC-15Co (同じ粒径) の硬度は HV 1200 しかありません。

微細な欠陥:

気孔率 ($>1\%$) およびマイクロクラック (長さ $>0.05\text{mm}$) は、粒界強化効果を弱め、硬度と強度を低下させます。例えば、気孔率が 0.5% から 2% に増加すると、硬度は約 5% (HV 1600 から HV 1520) 低下します。

超硬合金の応用

超硬合金 (WC-Co など) では、ホール・ペッチ関係は粒子サイズを制御して特性を最適化するために広く使用されています。

粒子の微細化により硬度が増加:

% $\sim 0.5\%$ など) の添加、および最適化された焼結プロセス ($1400\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 、真空 $<10^{-2}\text{Pa}$) により、粒径は $2\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ に縮小されました。

結果: 硬度は HV 1200 から HV 1600 に増加し、降伏強度は 3500 MPa から 4500 MPa に増加し、高速切断 ($>800\text{m/min}$) の要件を満たしました。

靱性のバランス:

が小さすぎる ($0.2\mu\text{m}$ 未満) と靱性 ($K_{IC} < 8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) が低下し、高衝撃環境 (鉱山用ドリルビットなど) には適しません。したがって、硬度 (HV 1600) と靱性 ($K_{IC} 12\sim 14\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) のバランスをとるためには、結晶粒径を $0.5\sim 1\mu\text{m}$ の範囲に制御する必要があります。

たとえば、WC-10Co (粒径 $0.5\mu\text{m}$) は硬度が HV 1600、 K_{IC} が $12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ であるため、航空工具に適しています。

エンジニアリングアプリケーションの最適化:

μm のホールペッチ関係により、硬度は HV 1700 に達し、切削寿命は 15 時間以上になります。

用ドリルビット: 粒径 $0.8\mu\text{m}$ 、硬度 HV 1500、 $K_{IC} 13\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、掘削距離 $>1200\text{m}$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐摩擦性金型：粒径 $0.5\mu\text{m}$ 、硬度 HV1600 、押し出し回数 $>10^6$ 回。

制限と課題

ホール・ペッチ関係は超硬合金で広く使用されていますが、次のような制限と課題もあります。

逆ホールペッチ効果：

粒径が小さすぎる ($0.2\mu\text{m}$ 未満) と、変形は粒界すべりと拡散によって支配され、強度と硬度が低下します。例えば、WC の粒径が $0.5\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ に減少すると、硬度は HV 1600 から HV 1400 に低下する可能性があります。

粒界安定性の課題：

μm) が起こり、ホールペッチ効果が低下します。粒成長を抑制するには、VC または Cr_3C_2 を添加する必要があります。

回復力の低下によるリスク：

結晶粒を微細化すると硬度は向上しますが、靱性 ($K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) が低下する可能性があるため、Co 含有量 (8%~12%) と結晶粒径 ($0.5\sim 1\mu\text{m}$) を最適化して性能のバランスをとる必要があります。

欠陥の影響：

気孔率 ($>1\%$) とマイクロクラック (長さ $>0.05\text{mm}$) は、粒界強化効果を弱める可能性があります。例えば、高気孔率 WC-10Co (気孔率 2%) の硬度はわずか HV 1520 で、期待値 (HV 1600) を大幅に下回ります。

開発動向

材料科学とインテリジェント製造の発展に伴い、超硬合金におけるホールペッチ関係の応用が深まっています。

ナノ結晶および超微細結晶技術：

超微粒子 ($<0.5\mu\text{m}$) およびナノ結晶 ($<100 \text{ nm}$) の超硬合金を開発していますが、粒界滑りの問題を解決する必要があります (粒界強度を向上させるために TaC 0.2% ~ 0.5% を追加するなど)。

勾配構造設計：

ホールペッチ関係は、微細な表面粒子 ($0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ 、硬度 HV 1700) とわずかに大きい内部粒子 ($1\sim 2\mu\text{m}$ 、 $K_{Ic} < 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を持つ傾斜構造のセメント炭化物を設計するために使用され、硬度と靱性の相乗的な最適化を実現します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

AI 支援最適化:

AI は、粒径が性能に与える影響を予測し（予測精度 90%以上）、ボールミルおよび焼結パラメータを最適化するために使用されます。例えば、機械学習を用いることで、硬度偏差が 2%未満となる最適な粒径（0.5 μm ）を予測できます。

高温性能の向上:

粒径 (<1 μm)を維持し、ホールペッチ効果を維持するために、高温安定性粒界抑制剤（ZrC 0.1%-0.3%など）を開発します。

要約すると、ホール・ペッチ関係は、結晶粒径が超合金の機械的特性に与える影響を明らかにし、結晶粒微細化と性能最適化の理論的根拠となっている。結晶粒径と粒界特性を合理的に制御することで、硬度と強度を大幅に向上させることができるが、靱性と高温安定性のバランスに注意を払う必要がある。新技術とインテリジェント製造の導入に伴い、ホール・ペッチ関係は超合金分野においてより大きな役割を果たすようになるだろう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録

傾斜構造超硬合金とは何ですか？

傾斜構造超硬合金とは、超硬合金（WC-Co）の一種で、その微細構造または組成（粒径、結合相含有量、添加剤の分布など）が材料内部の特定の方向（表面から内部など）に沿って傾斜的に変化するように設計・制御されています。この構造は、高い表面硬度と高い内部靱性など、異なる領域の性能上の利点を組み合わせることで、過酷な作業条件（航空工具や鉱山ドリルなど）の総合的な性能要件を満たすように設計されています。従来の超硬合金と比較して、傾斜構造超硬合金は性能最適化において大きな利点がありますが、従来のグレードや製造方法に新たな課題をもたらし、同時にインテリジェントな生産設計制御 AI エージェントに高い要求を課しています。

傾斜構造セメント炭化物の基本概念と原理

超硬合金は通常、硬質相（WC など、硬度は高いが脆性が高い）と結合相（Co など、靱性は良好だが硬度が低い）で構成されています。従来の超硬合金（YG6、YG8 などのグレード）は均一な微細構造を持ち、Co 含有量と粒径は材料全体で基本的に一貫しているため、高硬度と高靱性の要件を同時に満たすことは困難です。たとえば、YG6（Co 6%）は硬度が高い（HV 1600～1700）ですが、靱性は低いです（ $K_{IC} 8 \sim 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）。

YG15（Co 15%）は靱性が良好（ $K_{IC} 14 \sim 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）ですが、硬度は低下します（HV 1200～1300）。

傾斜構造セメント炭化物は、材料のさまざまな領域に性能の傾斜を導入することで、機能の相乗的な最適化を実現します。

表面

Co 含有量が低く（4%～6%など）、粒径が細かく（ $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ など）、硬度が高く（HV 1600～1800）、耐摩耗性が強く、高い摩擦や摩耗に耐えるのに適しています。

中間層

Co 含有量と粒径は徐々に変化し（Co 8%～10%、粒径 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ など）、厚さは 0.5～2mm で、界面の応力集中を緩和します（ $< 80 \text{ MPa}$ ）。

内部

Co 含有量が比較的高く（例えば 12%-15%）、粒径がやや大きく（例えば $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ）、靱性が優れ（ $K_{IC} 14 \sim 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）、耐衝撃性が強く、亀裂エネルギーを吸収して破損を防ぐことができます。

E~V_WC·E_WC+V_Co·E_Co など）と Hall-Petch 関係（ $\sigma \sim d^{-1/2}$ ）により、材料は深

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

さに応じて硬度、強度、靱性が異なる。この傾斜構造は、界面エネルギー（ $<1.5 \text{ J/m}^2$ ）と粒界ダイナミクス（移動速度 $<10^{-10} \text{ m/s}$ ）を制御することでさらに最適化できる。

勾配構造設計法

傾斜構造セメント炭化物の設計は、主に以下の点に重点を置いています。

Co 含有量勾配:

表面の Co 含有量は低く（4% ～ 6%）、中間層では 8% ～ 10% で、内部では徐々に 12% ～ 15% まで増加します。

原理：Co 含有量が低い場合、WC 体積分率が高く（ $>90\%$ ）、硬度が向上します。Co 含有量が高い場合、塑性変形能力が向上し（ひずみ速度 $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）、靱性が向上します。

実施方法：粉末の層状化（Co 粉末の層状化率を外側から内側に向かって増加させる）または焼結中の Co 拡散速度（ $<10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ ）を制御する。例えば、表面層 Co 4%、中間層 Co 8%、内層 Co 12% の 3 層の粉末を積層し、液相焼結によって勾配を形成する。

粒度勾配:

の粒子は細かく（ $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ ）、中間層は $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 、内部の粒子はやや大きめ（ $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ）です。

原理：小さな粒子はホールペッチ効果（ $\text{HV} \sim d^{-1/2}$ ）によって硬度と強度を増加させます（ $\sim 1/2$ ）；より大きな粒子は粒界滑りを低減し（粒界面積 $<10^{13} \text{ m}^{-2}$ ）、靱性を向上させます。

実施方法：表面に結晶粒抑制剤（VC 0.2% ～ 0.5%、 Cr_3C_2 0.1% ～ 0.3%）を添加するか、中間層と内部の抑制剤を減らすか、層状焼結によって結晶粒成長速度を制御する（表面 $<10^{-10} \text{ m/s}$ 、内部はわずかに高い）。

加法分布勾配:

表面に VC または Cr_3C_2 (0.2%-0.5%) を追加して粒成長を抑制し、硬度を高めます。中間層に少量の TaC (0.1%-0.3%) を追加して粒界強度（ $>150 \text{ MPa}$ ）を高めます。内部に TaC (0.2%-0.5%) を追加して靱性をさらに高めます。

実施方法：層状添加比率と焼結プロセス制御を組み合わせる。例えば、表面層に 0.4% の VC、中間層に 0.2% の TaC、内層に 0.3% の TaC を添加する。

機能勾配:

表面には耐摩耗コーティング（CrN または TiN、厚さ $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 、硬度 HV3000～3500）が施され、中間層は疲労耐性（亀裂成長速度 $\text{da}/\text{dN} < 10^{-7} \text{ mm/サイクル}$ ）を最適化し、内部部品は耐衝撃性を最適化します（衝撃エネルギー $>18 \text{ J}$ ）。

実施方法：表面改質（浸炭、イオン注入など）と内部微細構造最適化の組み合わせ。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

多相勾配:

少量の TiC (硬度 > 2000 HV、5%-10%) を追加するなどの多相構造を導入し、中間層は WC-Co 遷移層であり、内部は WC-Co 構造を維持して靱性を確保します。

実施方法: TiC 粉末を層状に添加し、焼結により多相勾配を形成します。

勾配方向の多様化:

表面から内部への放射状勾配に加えて、横方向勾配(工具の刃先の高硬度やクランプ部分の高靱性など)や多方向勾配(複雑な形状の部品に適しています)も設計できます。

実施方法: 3D プリンティング技術(選択的レーザー溶融 SLM など)を使用して、各領域の構成と構造を正確に制御します。

傾斜構造超硬合金の製造技術

傾斜構造セメント炭化物の製造は、以下のプロセスを経て達成される必要があります。

粉末配合と成形

成形体は積層粉末法によって作製され、表面、中間層、内部に、Co 含有量、粒径、または添加率の異なる WC-Co 混合粉末が用いられた。例えば、表面層(Co 4%、WC 0.5 μm)、中間層(Co 8%、WC 1 μm)、内部層(Co 12%、WC 1.5 μm)である。

冷間等方圧成形(CIP、圧力 200~300 MPa)を使用して、成形体の密度(>99%)と均一性(多孔度<0.5%)を確保します。

精度要件: 粉末比率偏差 <0.1%、層厚偏差 <0.02 mm、層間結合強度 >50 MPa。

焼結プロセス:

液相焼結(1400~1500°C、1~3 時間、真空度<10⁻² Pa)、Co 拡散速度(<10⁻⁹ cm²/s)を温度勾配と時間で制御して勾配分布を形成します。

焼結温度勾配

表面温度はわずかに低く(1400 °C)、粒成長を抑制します。中間層は 1420 °C、内部は 1450 ~ 1500 °C で、Co の拡散を促進し、粒成長を緩やかにします。

焼結雰囲気: 真空または Ar 雰囲気(純度>99.99%)、酸化を回避(O₂ 含有量 <0.5 ppm)、粒界欠陥を低減(<0.2%)。

冷却速度: 熱応力(<100 MPa)を回避するために 3 ~ 5°C/分で制御されます。>10°C/分の場合、微小亀裂率は >0.5% になります。

熱処理と表面改質

アニーリング(550~650°C、1~2 時間)により、Co 相の内部応力(<50 MPa)が減少し、

K_{IC} が約 5% 増加します。

表面浸炭処理(850~950°C、CH₄雰囲気、炭素層の厚さ 10~30 μm)またはイオン注入(N⁺、線量 10¹⁶~10¹⁷cm⁻²、エネルギー80~120keV)により高硬度層(HV1800~2000)を形成します。

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

レーザークラディング（出力 1.5~2.5kW、厚さ 50~ 100 μm ）により、超高硬度層（HV>2500）が形成されます。
プラズマイオン注入（PIII、線量 10^{17} - 10^{18}cm^{-2} ）により、深部摩耗耐性（深さ>0.5 μm ）が向上します。

オンライン監視と制御

レーザー粒度分布測定装置（偏差<0.02 μm ）を使用して粒度分布を測定し、X線回折（XRD、ピーク幅偏差<0.2°）を使用して粒界応力（<100MPa）を評価した。
は、温度センサー（精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ）、圧力センサー（精度 $\pm 10^{-3}\text{Pa}$ ）、およびオンライン顕微鏡（解像度<0.1 μm ）を使用してリアルタイムで監視され、勾配構造の一貫性（偏差<0.5%）を確保しました。
焼結プロセス中の微小亀裂（長さ>0.05 mm）を検出するために、アコースティックエミッション技術（周波数範囲 20 kHz ~ 500 kHz）が使用されました。

傾斜構造超硬合金の性能特性と利点

傾斜構造セメント炭化物は、性能の協調的な最適化により、以下の特性を発揮します。

硬さと靱性のバランス

高い表面硬度（HV 1600-1800）と優れた内部靱性（ K_{IC} 14-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）により、従来の超硬合金の硬度と靱性の矛盾を克服しました。
たとえば、表面に 4% Co、粒子が 0.5 μm の傾斜 WC-10Co は硬度 HV 1700、内部に 12% Co、 K_{IC} 14 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ を持ち、その総合的な性能は従来の YG8 (Co 8%、HV 1500、 K_{IC} 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) よりも優れています。

耐摩耗性と耐衝撃性の相乗的な向上

表面硬度が高く、Co 含有量が低いいため摩耗率が低下します (<0.08 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)。内部の Co 含有量が高いため衝撃エネルギーが増加します (18-20 J)。
従来の YG6 より 50% 長い、硬岩掘削での寿命が 1500 m を超える採掘ドリルビットなど、高摩擦および衝撃のシナリオに適しています。

優れた抗疲労性能

dN < 10^{-7} mm/サイクル）を低減することで、疲労寿命 (> 10^5 倍) が向上します。
たとえば、周期的な荷重（応力比 $R=0.1$ 、周波数 5~15 Hz）下での勾配 WC-10Co の寿命は、従来の YG10 (Co 10%) よりも 20%~30% 長くなります。

耐熱衝撃性

傾斜構造により熱応力集中 (<80 MPa) が低減され、高温 (>800 $^{\circ}\text{C}$) 条件下での耐熱衝撃性が 15%~20% 向上するため、航空工具（切削温度>800 $^{\circ}\text{C}$ ）に適しています。

耐食性

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

表面の Co 含有量が低いいため、腐食感受性が低下し（溶解速度 $<10^{-10} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ ）、酸性環境（ $\text{pH} < 5$ ）での耐食性が 10%~15% 向上し、海洋工学用途に適しています。

過酷な労働条件に適応する

高温（ $>800^\circ\text{C}$ ）、高衝撃（ $>500\text{Hz}$ ）、高応力（ $>80\text{MPa}$ ）、腐食環境（NaCl 濃度 3.5%）において、傾斜構造は効果的に耐用年数を延ばします。例えば、深海掘削ビットの寿命は 50%、高速鉄道ブレーキパッド金型の寿命は 60%向上します。

傾斜構造セメント炭化物の従来のセメント炭化物グレードに対する課題

傾斜構造セメント炭化物の導入により、従来のセメント炭化物グレード（YG シリーズや YT シリーズなど）には多くの課題が生じています。

パフォーマンスの限界が明らかに

従来の鋼種は均一な構造を有しており、複雑な作業条件のニーズを満たすことが困難です。例えば、YG6（Co 6%）は硬度（HV 1600）は高いものの、鉱業などの高衝撃環境では破損しやすいという欠点があります（ $K_{1c} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）。YG15（Co 15%）は靱性（ $K_{1c} 14\text{--}16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）は良好ですが、硬度（HV < 1300 ）が不十分で、耐摩耗性も劣ります。

傾斜構造超硬合金は、高い表面硬度（HV 1700）と高い内部靱性（ $K_{1c} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）を組み合わせることで、従来のグレードの性能限界を超えています。例えば、航空工具における傾斜構造 WC-10Co の切削寿命（15 時間以上）は、YG8 よりも 25%長くなっています。

応用分野における競争

従来のグレードは、低負荷切削における YG3（Co 3%）のように、特定の分野（低衝撃および低摩擦シナリオなど）において依然として優位性を有しています。しかし、傾斜構造超硬合金は、高負荷および多機能シナリオ（航空や深海など）においてより競争力があります。例えば、深海掘削ビットにおける傾斜構造 WC-10Co の掘削距離（ $>1500 \text{ m}$ ）は、YG8（ $<1000 \text{ m}$ ）の掘削距離をはるかに上回ります。

伝統的なブランドは、市場競争力を維持するために、配合をアップグレードするか、グラデーション構造を導入する必要があります。そうしないと、高級市場から徐々に排除される可能性があります。

生産プロセスの複雑さ

従来グレードの製造工程はシンプル（均一粉末配合＋単焼結）で、コストも低い（約 50~60 元/kg）。一方、傾斜構造超硬合金は、層状粉末混合、傾斜焼結、オンラインモニタリングといった複雑な工程を必要とし、コストが 15~20%（約 60~70 元/kg）上昇する。

従来の生産設備（通常の焼結炉など）では、傾斜構造の精度要件（Co 分布偏差 $<0.5\%$ など）を満たすことが難しく、高精度設備（温度傾斜制御精度 $\pm 2^\circ\text{C}/\text{cm}$ の傾斜焼結炉など）にア

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ップグレードする必要があります。

標準化の課題

従来のグレードは、成熟した規格（ISO K10、K20、P10 など）があり、性能パラメータが明確で、量産・適用が容易です。一方、傾斜構造超硬合金は、深さに応じて性能が変化するため、単一の規格で定義することが困難です。そのため、新たな性能評価システム（硬度と靱性の階層試験など）を確立する必要があります。

K_{1c} 14 MPa·m^{1/2})は、従来の ISO 標準に直接一致させることができないため、ユーザーが材料を選択するときに混乱を招く可能性があります。

市場の受容と促進

従来のグレードは長い歴史と高い市場認知度を誇り、ユーザーはその性能と適用範囲を熟知しています。新興技術である傾斜構造超硬合金は、長期的な適用検証（航空機工具寿命試験など）を通じて信頼を獲得する必要があります。

普及の初期段階では、実証プロジェクトを通じてその利点（採掘ドリルビットの寿命が50%延びるなど）を示すなど、コストや性能安定性に関するユーザーの懸念に対処する必要があります。

サプライチェーンと材料選択の適応性

従来のグレードのサプライチェーンは成熟しており、原材料（WC 粉末、Co 粉末など）の仕様は統一されており、調達コストも低い。一方、傾斜構造超硬合金では、様々な仕様の粉末（例えば、粒子径や Co 含有量の異なる WC 粉末）が必要となるため、サプライチェーンの複雑さとコストが増大する。

ユーザーは材料選定戦略を見直す必要があります。従来の単純なグレード選定方法（硬度や Co 含有量に基づくものなど）はもはや通用せず、多層的な性能試験とシミュレーション分析を導入する必要があります。

インテリジェント生産設計制御 AI エージェントの要件

傾斜構造超硬合金の製造では、インテリジェント製造に対する要求が高まっています。効率的、正確、かつ安定した生産を実現するために、インテリジェント生産設計制御 AI エージェントには以下の機能が必要です。

微細構造予測と最適化

能力要件: AI エージェントは、機械学習 (ML) およびディープラーニング (DL) アルゴリズム (サポート ベクター マシン SVM、ディープ ニューラル ネットワーク DNN など) を使用して、Co 含有量、粒径、添加剤比率がパフォーマンスに与える影響を予測する必要があります (予測精度 > 90%)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

特定の機能

履歴データと物理モデル（Hall-Petch 関係、Voigt モデルなど）に基づいて、最適な Co 含有量勾配が予測されます（たとえば、表面で 4%、中間層で 8%、内部で 12%、偏差 $<0.2\%$ ）。最適化された粒度分布（表面 $0.5\mu\text{m}$ 、中間層 $1\mu\text{m}$ 、内部 $1.5\mu\text{m}$ 、偏差 $<0.02\mu\text{m}$ ）により、硬度（HV 1700）と靱性（ $K_{IC} 14\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）の相乗的な向上が保証されます。推奨添加剤比率（VC 0.4%、TaC 0.2%、 Cr_3C_2 0.1%、比率偏差 $<0.05\%$ など）。傾斜構造の階層化されたパフォーマンス（表面の耐摩耗性や内部の耐衝撃性など）をシミュレートして、設計ソリューションを最適化します。

リアルタイムのプロセスパラメータ監視と制御

能力要件: AI エージェントは、産業用 IoT (IIoT) テクノロジーを組み合わせ、組み込みセンサーとエッジ コンピューティングを通じて生産パラメータをリアルタイム（偏差 $<1\%$ ）で監視および制御する必要があります。

特定の機能

粉末比率（Co 含有量精度 $\pm 0.05\%$ ）、粒径（精度 $\pm 0.005\mu\text{m}$ ）、添加剤の分布（偏差 $<0.1\%$ ）を監視します。

焼結パラメータのリアルタイム調整：温度（ $1400\sim 1500^\circ\text{C}$ 、精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）、真空度（ $<10^{-2}\text{ Pa}$ 、精度 $\pm 10^{-3}\text{ Pa}$ ）、Co 拡散速度（ $<10^{-9}\text{ cm}^2/\text{s}$ 、偏差 $<5\%$ ）。

$\%$ ）を回避するために、冷却速度（ $3\sim 5^\circ\text{C}/\text{分}$ 、偏差 $<0.2^\circ\text{C}/\text{分}$ ）を制御します。

層間結合強度（ $> 50\text{ MPa}$ ）を監視し、剥離欠陥（亀裂長さ $> 0.05\text{ mm}$ ）を回避します。

故障予測と品質管理

能力要件: AI エージェントは、ニューラル ネットワーク (RNN、LSTM など) を通じて、生産プロセスにおける潜在的な障害リスク（Co 偏析、異常な粒成長など）を予測し、事前に介入する必要があります（予測の進行時間 $> 10^3$ 倍）。

特定の機能

μm ）が Co 分布偏差（ $> 1\%$ ）によって引き起こされることを予測し、焼結時間を事前に調整しました（ $1\sim 3$ 時間、偏差 < 0.1 時間）。

異常な粒成長（ $> 2\mu\text{m}$ ）が確認され、VC 添加量（ $0.2\% \sim 0.5\%$ ）を調整することで成長を抑制した。

アコースティックエミッションセンサー（周波数精度 $\pm 2\text{ kHz}$ ）と CT スキャン（精度 $\pm 0.02\text{ mm}$ ）を組み合わせることで、微小亀裂（長さ $> 0.05\text{ mm}$ ）をリアルタイムで検出し、故障率（ $< 0.1\%$ ）を低減できます。

層間応力集中（ $K_t > 1.5$ ）を検出し、界面剥離（深さ $> 5\mu\text{m}$ ）を回避します。

プロセスの最適化とインテリジェントな意思決定

能力要件: AI エージェントは、遺伝的アルゴリズム (GA) または強化学習 (RL) を通じて生産プロセスのパラメータを最適化し、生産効率（ $15\% \sim 20\%$ の増加）とパフォーマンス

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンスの一貫性（偏差 <2%）を向上させる必要があります。

特定の機能

層状粉末比率を最適化（表面 Co4%、中間層 8%、内層 12%、偏差 <0.1%）し、傾斜構造の均一性を確保しました。

Co の拡散と粒成長を制御するために、焼結温度勾配を調整しました（表面 1400°C、中間層 1420°C、内層 1450°C、偏差 <±2°C/cm）。

添加剤比率（VC : TaC: Cr₃C₂ = 2 : 1: 0.5、偏差<0.05 %）を最適化して、硬度と靱性（HV 1700、K_{1c} 14 MPa·m^{1/2}）を向上させます。

プロセスデータ分析により、ボールミル時間（20〜40 時間、精度±0.5 時間）と回転速度（300〜500rpm、精度±5rpm）が自動的に調整され、生産効率が向上します。

データ統合とマルチソースコラボレーション

能力要件: AI エージェントは、マルチソース データ（粉末特性、焼結パラメータ、性能試験結果）を統合し、5G ネットワークとクラウド プラットフォーム（遅延 <10ms）を介してマルチデバイスのコラボレーションを実現する必要があります。

特定の機能

粉末粒子サイズデータ（レーザー粒子サイズ分析、偏差 <0.02 μm）、焼結温度データ（センサー精度 ±2°C）、および性能試験データ（硬度偏差 <2%）を統合します。

生産パラメータを最適化するためのデータ分析（例: Co 拡散速度は<10⁻⁹ cm²/s に制御されます）。

ボールミル（速度精度±5rpm）、焼結炉（温度偏差<±2°C）、検出装置（XRD ピーク幅偏差<0.2°）を協調制御します。

複数の焼結炉の温度勾配を同期調整する（偏差<±1°C/cm）など、ライン間連携を実現します。

インテリジェントなメンテナンスと適応調整

能力要件: AI エージェントは、亀裂成長データ（エラー <5 時間）を通じて機器や製品の故障時間を予測し、メンテナンス戦略を最適化（ダウンタイムを 30% ~ 35% 削減）する必要があります。

特定の機能

焼結炉の温度偏差（>±10°C）によって発生する Co 偏析（偏差>1%）を予測し、事前にパラメータを調整します。

アコースティックエミッションと CT データを組み合わせることで、使用中の傾斜構造セメント炭化物の疲労破壊を予測（10⁴ 回以上前もって）し、メンテナンスサイクルを最適化します。

リアルタイムの硬度データ (HV 偏差 > 2%) に基づいて VC 添加を調整する (0.1% ~ 0.2% 増加) など、生産パラメータを適応的に調整します。

機器の摩耗（例: ボールミルベアリングの寿命、エラー <10 時間）を予測し、事前に部品を交換してダウンタイムを削減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ユーザーの需要のカスタマイズとフィードバック学習

能力要件: AI エージェントは、ユーザーのニーズ（航空切削工具の高硬度や採掘ドリルビットの高靱性など）に応じて勾配構造設計をカスタマイズし、フィードバック学習を通じて継続的に最適化する必要があります（パフォーマンスが 5% ~ 10% 向上します）。

特定の機能

航空工具の要件（硬度 $HV > 1700$ ）に応じて、表面 Co 4%、粒径 $0.5 \mu m$ の傾斜構造が設計されました。

鉱山用ドリルビットの要件（ $K_{IC} > 14 MPa \cdot m^{1/2}$ ）に応じて、内部 Co 12%、粒径 $1.5 \mu m$ の構造が設計されています。

アプリケーションフィードバックデータ（工具寿命、ドリルの摩耗率など）を収集し、強化学習（エラー $< 0.1\%$ ）を通じて Co 含有量と粒度分布を最適化します。

ユーザの作業条件（高温 $> 800^\circ C$ など）に応じて、表面コーティングソリューション（CrN、厚さ $3 \mu m$ など）が推奨されます。

環境適応とエネルギー消費の最適化

能力要件: AI エージェントは、生産環境（温度や湿度など）とエネルギー消費要件に基づいて、プロセス パラメータを最適化し、エネルギー消費を（10% ~ 15%）削減する必要があります。

特定の機能

腐食の影響（摩耗率の増加 $< 5\%$ ）を回避するために、周囲の湿度（ $< 50\%$ ）を監視します。焼結炉のエネルギー消費を最適化し（温度制御精度 $\pm 2^\circ C$ ）、無駄な加熱時間を短縮します（5% ~ 10% の節約）。

生産バッチサイズに応じて、装置の動作電力を適応的に調整します（たとえば、小バッチ生産の場合はボールミルの速度を 300 rpm に下げます）。

傾斜構造セメント炭化物の影響要因

勾配構造のパフォーマンスと生産は、次の要因によって影響を受けます。

共同コンテンツ配信

Co 含有量の勾配は、適切な範囲内（表面 4% ~ 6%、中間層 8% ~ 10%、内部 12% ~ 15%）に制御する必要があります。表面 Co 含有量が 4% 未満の場合、 K_{IC} は $8 MPa \cdot m^{1/2}$ 未満となり、内部 Co 含有量が 15% を超える場合、硬度は 1200 未満となります。

粒度分布

表面粒径は $0.5 \mu m$ 未満、中間層は $0.5 \sim 1 \mu m$ 、内部層は $1 \sim 2 \mu m$ です。表面粒径が $1 \mu m$ を超える場合、硬度は 1500 未満です。内部粒径が $0.5 \mu m$ 未満の場合は、 $K_{IC} < 10 MPa \cdot m^{1/2}$ 。

焼結プロセス

温度偏差（ $> \pm 10^\circ C$ ）または不十分な真空（ $> 10^{-2} Pa$ ）は、Co の分布の不均一（偏差 $> 1\%$ ）、Co プールの形成（サイズ $> 5 \mu m$ ）、および靱性の 10% ~ 15% の低下につながる可能性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

があります。

添加剤

VC が多すぎると ($> 0.8\%$)、脆性相比率が 0.5% を超え、 K_{Ic} が低下します。一方、TaC が少なすぎると ($< 0.1\%$)、粒界強度が低下します ($< 100 \text{ MPa}$)。

機器の精度

ボールミルの速度精度 ($\leq \pm 5 \text{ rpm}$) および焼結炉の温度精度 ($\leq \pm 2^\circ\text{C}$) が不十分な場合、粒径の偏差 ($> 0.02 \mu\text{m}$) および Co の分布の不均一 (偏差 $> 0.5\%$) が発生する可能性があります。

環境要因

生産環境の湿度 ($> 80\%$) により、粉末の酸化 (O_2 含有量 $> 0.5 \text{ ppm}$) が発生し、傾斜構造の安定性 (硬度偏差 $> 2\%$) に影響を及ぼす可能性があります。

傾斜構造超硬合金の工学応用

傾斜構造セメント炭化物は、さまざまな厳しいシナリオで優れた性能を発揮します。

航空ツール

表面 Co 4%、硬度 HV 1700、内部 Co 12%、 K_{Ic} $14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、高速切削 ($> 800 \text{ m/min}$)、寿命 > 15 時間、従来の YG8 よりも 25% 向上。

鉱山用ドリルビット

表面粒径は $0.5 \mu\text{m}$ 、内部 Co 含有量は 12% 、硬岩掘削における耐用年数は 1500m を超え、従来の YG6 を 50% 上回ります。

深海ドリル

勾配構造 (表面 Co 4%、中間層 8% 、内層 12%)、深海衝撃 ($> 500 \text{ Hz}$ 、圧力 $> 80 \text{ MPa}$) で、 K_{Ic} は $14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に達し、掘削距離 $> 1500 \text{ m}$ 。

高速鉄道ブレーキパッド金型

表面硬度 HV 1700、内部 K_{Ic} $14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、高温摩擦 ($> 600^\circ\text{C}$) での寿命は 4×10^5 回以上、 60% 増加。

新しいエネルギー電解装置

TiC 5% を追加、硬度 HV 1800、内部 Co 12% 、 K_{Ic} $13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、電気化学的衝撃 ($> 10^3$ 回)、寿命 $> 10^3$ 時間、 40% の増加。

風力タービンブレード金型

表面 Co 4%、CrN コーティング $3 \mu\text{m}$ 、内部 Co 12% 、低温衝撃 (-60°C 、ひずみ速度 $> 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)、衝撃エネルギー $> 12 \text{ J}$ 、寿命 $> 10^6$ 回、 40% 増加。

傾斜構造セメント炭化物の利点と欠点

利点:

硬度と靱性が相乗的に最適化され、従来のグレードを上回る優れた総合性能を発揮します。

さまざまな過酷な作業条件に適応し、耐用年数を延ばします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

スマートな生産により一貫性と効率性が向上します。

デメリット:

製造工程は複雑で、高精度の設備（温度勾配制御精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の勾配焼結炉など）が必要です。

コストが高い（従来のグレードより 15% ~ 20% 高い）。

AI エージェントには高いインテリジェンス要件があり、大量のデータ サポートが必要です。

傾斜構造超硬合金の開発動向

インテリジェント製造の徹底的な発展により、傾斜構造セメント炭化物の生産と応用はよりインテリジェントになります。

AI+IIoT の深い統合

AI エージェントは、強化学習とビッグデータ分析を通じて、勾配構造設計を最適化し (Co 分布エラー $< 0.1\%$)、パフォーマンスの一貫性 (偏差 $< 0.5\%$) を向上させます。

IIoT は 5G ネットワークとクラウド プラットフォームを使用して、複数デバイスのコラボレーション (遅延 $< 10\text{ ms}$) を実現し、生産効率 ($> 20\%$) を向上します。

3D プリント技術の応用

μm 、Co 分布偏差 $< 0.1\%$ のより複雑な勾配構造 (多層、多相勾配など) を実現できます。

新しい勾配構造

TiC-Co 複合傾斜相など) と多機能傾斜相 (表面耐腐食性、内部高靱性など) を開発します。

標準化と推進

傾斜構造超硬合金の性能評価基準 (層状硬度、靱性試験など) を確立し、世界市場での普及を推進します。

グリーン製造

AI を活用してエネルギー消費を最適化 (10%~15%削減) し、リサイクル可能な傾斜構造超硬合金 (Co 含有量層別リサイクルなど) を開発して持続可能な開発を実現します。

要約すると、傾斜構造超硬合金は、微細構造の傾斜設計により、硬度、靱性、耐摩耗性の相乗的な向上を実現し、従来の超硬合金グレードの性能限界に挑戦しています。インテリジェント生産設計制御 AI エージェントの導入により、生産精度と効率がさらに向上し、超硬合金の高性能化とインテリジェント化に向けた開発が促進され、航空、鉱業、新エネルギーなどの分野に、より効率的で信頼性の高いソリューションを提供します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録：

超硬合金浸炭の様々な概念と機能

超硬合金（WC-Co）の浸炭技術は、高温熱化学処理によって材料表面に炭素元素を導入し、表面特性を向上させるプロセスです。超硬合金における浸炭の応用は、主に内部靱性を維持しながら、硬度、耐摩耗性、耐腐食性、耐疲労性を向上させることに重点を置いています。本稿では、浸炭の性質、プロセス形態、作用メカニズム、主要な影響要因、そして実際の適用効果について解説し、超硬合金の性能を最適化する独自の価値を明らかにします。

浸炭処理の本質：炭素の表面拡散と反応

浸炭処理の核心は、高温での炭素原子の拡散と反応にあります。超硬合金は、炭化タングステン（WC）の硬質相とコバルト（Co）の結合相で構成されています。Co相は炭素の溶解度が高く（900℃で約0.2～0.3重量%）、炭素拡散の主な経路になります。浸炭処理中に、炭素原子は外部炭素源（CH₄、CO、固体炭素粉末など）から分解され、Co相格子を通して表面に拡散し、WCと反応してより高密度の炭化物構造を形成するか、既存のWC粒子を厚くします。この拡散反応メカニズムにより、表面に炭素に富む領域が形成され、通常は厚さ10～50μmのWCに富む層として現れます。

浸炭温度は通常850～950℃の範囲で、超硬合金の焼結温度（1400～1500℃）よりも低く設定され、結晶粒の粗大化やマトリックスの性能低下を防ぎます。炭素拡散速度（約10⁻¹¹ cm²/s）は浸炭層の厚さと品質を決定し、温度、炭素ポテンシャル、時間によって精密に制御する必要があります。

浸炭プロセス：伝統から現代へ

浸炭プロセスは、炭素源とエネルギー供給方法に応じて様々な形態をとります。それぞれの形態は、セメント炭化物における適用シナリオと効果が異なります。

ガス浸炭：

炭化水素（CH₄など）または一酸化炭素（CO）を炭素源として使用し、850～950℃で制御された雰囲気で行います。CH₄は活性炭素原子（C）とH₂に分解し、炭素原子は表面に拡散します：
$$\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$$
 ガス浸炭は、均一な浸炭層の厚さ（10～30μm）と最大HV 2000～2200の硬度で大量生産に適していますが、

過剰浸炭または脱炭を回避するために炭素ポテンシャル（0.8～1.2wt %）を正確に制御する必要があります。

固体浸炭法：

炭化物試料を炭素粉末（グラファイトなど）に埋め込み、900～950℃で加熱し、炭素を直接接触させて拡散させる。固体浸炭法は装置が簡便で小規模実験に適しているが、浸炭層

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

の均一性が悪く（厚さ偏差 $\pm 5\mu\text{m}$ ）、効率が低い。

プラズマ浸炭:

700~900°Cのプラズマ環境下で、電界を用いて炭素源（ CH_4 など）を活性化し、高活性炭素イオンを生成します。プラズマは炭素拡散を加速し（速度は約 $10^{-10}\text{cm}^2/\text{s}$ まで増加）、低温で 20~40 μm の浸炭層を形成し、硬度は HV 2200~2500 です。同時に、エネルギー消費量も（約 20~30%）削減します。

レーザー浸炭:

レーザー（出力 1~2kW）を用いて表面を局所的に加熱し、炭素源（カーボン粉末コーティングなど）と組み合わせて浸炭を実現します。レーザー浸炭は処理時間が短く（1時間未満）、浸炭層の厚さを制御可能（5~20 μm ）で、複雑な形状の部品にも適していますが、熱影響部に微小亀裂が生じる可能性があります。

これらのプロセス形態にはそれぞれ重点があります。ガス浸炭は工業生産に適しており、プラズマ浸炭は高効率と低消費電力を重視し、レーザー浸炭は高精度な局所強化に適しています。

浸炭処理の役割: 多面的な性能向上

炭化が超硬合金の性能に与える影響は多面的であり、主に次の重要な効果に反映されます。

硬度と耐摩耗性の向上: 浸炭処理によって形成される

WC リッチ層（厚さ 10~30 μm ）は、表面硬度（HV 2000~2500）を大幅に向上させます。これは、母材硬度（HV 1500~1800）よりもはるかに高い値です。高硬度炭化物層は、耐摩耗性と耐滑り摩耗性を高め、摩耗速度を $0.08\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 未満に低減します。例えば、切削工具用途において、浸炭処理された超硬合金工具は、より高い切削速度（ $>1000\text{m}/\text{min}$ ）に耐えることができ、寿命を 20~30%向上させます。

耐食性の向上:

WC を豊富に含む層は Co 相の露出を低減し、酸性（ $\text{pH} < 5$ ）または酸化性環境（ $>600^\circ\text{C}$ ）における表面安定性を向上させます。浸炭処理後、Co 相の表面に Co_3C または Co_2C の薄い層が形成される場合があり、腐食反応をさらに抑制し、腐食環境（深海バルブなど）における材料の耐用年数を延ばします。

耐疲労性の向上:

浸炭処理によって導入される残留圧縮応力（ $>400\text{MPa}$ ）は体積膨張によって生成され、表面き裂の発生と伝播を効果的に抑制します。これにより、疲労寿命は 10^5 倍以上に延長されます。特に、高サイクル負荷が要求される用途（航空機部品など）においては、浸炭層によって信頼性が大幅に向上します。

微細構造の最適化:

浸炭処理中に炭素原子が WC 格子または炭化物粒子に埋め込まれ、粒界結合強度が向上し（ $>150\text{MPa}$ ）、粒界破壊の傾向が減少します。SEM 分析によると、浸炭処理後の破面

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は主に小さなデインプル（ $< 1 \mu\text{m}$ ）で構成されており、塑性破壊の割合が増加していることがわかります。

熱安定性の向上:

浸炭層により表面の高温軟化耐性が向上し、 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ で高い硬度 ($>1800 \text{ HV}$) を維持できるため、高温切断やスタンピング金型の用途に適しています。

浸炭処理は全ての特性にプラスの影響を与えるわけではないことに注意が必要です。浸炭層が厚すぎる（ $50 \mu\text{m}$ を超える）と、表面の脆性が増し、破壊靱性（ K_{Ic} ）が $5 \sim 10\%$ 低下する可能性があります。硬度と靱性のバランスをとるには、プロセスの最適化が必要です。

主な影響要因：パフォーマンス最適化のためのコア制御ポイント

浸炭効果は、プロセスパラメータ、材料特性、および外部条件の複合的な影響によって左右されます。主な要因は以下のとおりです。

温度と時間:

最適な温度範囲は $850 \sim 950^\circ\text{C}$ です。浸炭層の厚さは時間（ $2 \sim 10$ 時間）とともに直線的に増加します（厚さ $10 \sim 50 \mu\text{m}$ ）。温度が高すぎる（ 1000°C 超）と、Co 相が軟化したり、結晶粒が粗大化（ $2 \mu\text{m}$ 超）したりし、硬度が $15 \sim 20\%$ 低下します。時間が長すぎる（ 12 時間超）と、内部脱炭が発生し、マトリックスの性能に影響を与える可能性があります。

カーボンポテンシャル制御：カーボンポテンシャル（炭素含有量）は $0.8 \sim$

$1.2\text{wt}\%$ に維持する必要があります。低すぎる場合（ $0.6\text{wt}\%$ 未満）、浸炭層が不完全となり、硬度が不十分になります。高すぎる場合（ $1.5\text{wt}\%$ 超）、過剰炭素層（遊離炭素など）が形成され、脆性が増大します。

材料の微細構造:

Co 含有量: Co 含有量が $8\% \sim 12\%$ の場合、炭素拡散経路として最適です。Co 含有量が低すぎる（ 6% 未満）と炭素拡散が制限され、高すぎる（ 15% 超）と表面軟化を引き起こします。

WC 粒径: 粒径が $0.5 \mu\text{m}$ 未満の場合は、浸炭層の結合力が強くなり、硬度が大幅に増加します。粒径が $2 \mu\text{m}$ を超える場合は、炭素の拡散が不均一になり、硬度が 10% 未満増加します。

表面状態:

初期粗さ R_a が $0.1 \mu\text{m}$ 未満であれば、浸炭層の密着性が確保されます。 $0.2 \mu\text{m}$ を超えると、浸炭層に欠陥が発生する可能性があり、摩耗率が $15\% \sim 20\%$ 増加します。

後処理条件:

浸炭処理後の低温焼戻し（ $200 \sim 400^\circ\text{C}$ 、 $1 \sim 2$ 時間）により残留応力（ $<100\text{MPa}$ ）を解放できますが、温度が高すぎると（ $>500^\circ\text{C}$ ）、浸炭層の硬度が低下します。

実用化の効果：実験室からエンジニアリングの実践まで

超硬合金分野における浸炭技術の応用は比較的成熟しており、その実際の効果は多くの工学シナリオで検証されています。

切削工具:

WC-10Co 工具は浸炭処理（浸炭層 $20 \mu\text{m}$ 、硬度 $\text{HV}2000$ ）されています。高速切削（ >1000

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

m/min)において、寿命が 25%、切削効率が 20%向上します。航空アルミニウム合金の加工に適しています。

鉋山用ドリルビット:

WC-8Co ドリルビットを炭化处理 (炭化層 15 μ m) すると、摩耗率が<0.08mm³/N·m に低下し、掘削距離が>1500m に延長され、効率が 50%向上し、採掘コストが大幅に削減されます。

スタンピングダイ:

WC-12Co ダイ浸炭 (浸炭層 30 μ m、硬度>2200)、押し出し回数>10⁶回、25%増加、高周波スタンピングニーズを満たします。

深海機器:

WC-10Co 深海バルブ (浸透層 25 μ m) の耐用年数は、高圧 (>80 MPa) および腐食性環境 (pH<5) で 4 年以上に延長され、40%増加し、優れた耐腐食性を示しています。

浸炭技術の限界と改善の方向性

浸炭技術により超硬合金の性能は大幅に向上しましたが、依然として次のような制限があります。

脆化のリスク: 浸炭層が厚すぎると (>50 μ m)、表面が脆くなり、K_{1c} が 5% ~ 10% 減少して、動的荷重アプリケーションが制限される可能性があります。

プロセスの複雑さ: 炭素ポテンシャルの制御が難しく、高精度の装置 (温度偏差 <±5°C) が必要となり、生産コストが増加します (約 15% ~ 20%)。

深さ制限: 浸炭深さは通常 50 μ m 未満であり、深強化の要件を満たすことができません。

改善点は次のとおりです:

TiN コーティングなど)を組み合わせて傾斜構造を形成し、深層部の性能を向上させます。

インテリジェント制御: センサーを介して炭素ポテンシャルと浸炭層の厚さをリアルタイムで監視し、プロセスの安定性を向上させるインテリジェント浸炭システムを開発します。

低コストの炭素源: コストを削減し、持続可能性を向上させるために、バイオ炭または廃ガス回収炭素源を検討します。

超硬合金の浸炭技術は、炭素元素の表面拡散反応を通じて高硬度の WC 濃縮層を形成し、硬度、耐摩耗性、耐腐食性、耐疲労性を大幅に向上させます。ガス浸炭やプラズマ浸炭などの異なるプロセス形態により、多様な適用方法が提供され、温度、炭素ポテンシャル、微細構造を調整することで、その効果を最適化できます。脆性やコストといった課題があるにもかかわらず、浸炭技術は切削工具、鉋業、深海機器などにおいて大きな可能性を示しており、今後、複合強化やインテリジェント化によってさらなる限界突破が期待されています。

超硬合金浸炭の様々な概念と機能の比較表

プロジェクト	意図しない炭化 (製造中の炭素制御不良)	プロセス浸炭 (硬質合金の性能向上プロセス)
定義と本質	製造工程 (焼結など) 中に原料の炭素ポテンシャル	高温熱化学処理プロセスでは、炭素源、温度、時間を正確に制

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

プロジェクト	意図しない炭化（製造中の炭素制御不良）	プロセス浸炭（硬質合金の性能向上プロセス）
質	ルが制御不能になったり、炭素含有量が変動したりすることで、炭素原子が偶然に表面に拡散し、予期せぬ浸炭層が形成されます。	御することで、セメント炭化物の表面に炭素元素を導入し、性能を最適化します。
プロセスフォーム	- 焼結などの製造工程で、特別なプロセス制御なしに発生します。 - 炭素源：大気中の過剰炭素（CH ₄ 分解など）。 - 温度：焼結温度（1300～1500℃）。	- ガス浸炭：CH ₄ またはCO、850～950℃。 - 固体浸炭：炭素粉末接触、900～950℃。 - プラズマ浸炭：CH ₄ プラズマ活性化、700～900℃。 - レーザー支援浸炭：レーザー加熱、出力1～2kW。
透水性層の特性	- 厚さ：5～60μm、不均一。 - 硬度：HV 1800～2200、変動が大きい（偏差±200 HV）。 - 遊離炭素または脱炭を伴う場合があります。	- 厚さ：10～30μm、均一。 - 硬度：HV 2000～2500、安定（偏差<±50 HV）。 - WCを豊富に含む層は緻密です。
硬度と耐摩耗性	- 硬度はHV 1800～2200に増加しましたが、分布が不均一です。 - 耐摩耗性が向上し、摩耗率は<0.1 mm ³ /N・mになりましたが、局所的な過炭化により効果が低下します。	- 硬度がHV 2000～2500に均一に増加しました。 - 耐摩耗性が大幅に向上し、摩耗率は<0.08 mm ³ /N・mとなり、高負荷の摩擦シナリオに適しています。
耐食性	- 浸炭層が不均一で、局所的な過浸炭により溶解しやすい遊離炭素が形成され、Co相がより露出し、耐食性が低下します（pH<5環境など）。	- WCを豊富に含む層により、Co相の露出が低減され、耐食性が向上し、酸性（pH<5）または高温酸化環境（>600℃）に適しています。
抗疲労性能	- 残留応力が不均一な場合（局所的に200 MPa未満）、微小亀裂が発生し、疲労寿命が短くなる（10 ⁴ 倍未満）可能性があります。	- 残留圧縮応力>400 MPa、疲労寿命が10 ⁵ 倍以上に向上し、高サイクル荷重シナリオに適しています。
微細構造	- 粒界結合強度が不均一（局所的に100 MPa未満）、粒界破壊の割合が高い（50%以上）、構造安定性が悪い。	- 粒界結合強度が向上し（>150 MPa）、破壊は主にディンプル（<1μm）となり、塑性と脆性がバランスし、構造が安定します。
熱安定性	- 局所的な過炭化により、熱安定性が不均一になり、高温（>600℃）で硬度が大幅に低下します（<1500 HV）。	- 浸炭層は600～800℃で1800 HVを超える硬度を維持し、高温での切断や打ち抜き金型の用途に適しています。
破壊靱性（K _{IC} ）	- 浸炭層が厚すぎる場合（>50μm）、または浸炭層が多すぎる場合、脆さが増し、K _{IC} が10%～20%減少します（<10 MPa・m ^{1/2} ）。	- 中程度に炭化された層（<30μm）はCo相によって炭素が飽和しており、K _{IC} が5%～10%（10～14 MPa・m ^{1/2} ）増加します。
温度と時間	- 温度：1300～1500℃（焼結温度）、時間は制御できず、長すぎる場合（10時間超）、過剰炭化または脱炭化が生じる可能性があります。	- 温度：850～950℃、時間2～10時間、拡散層の厚さ10～50μm、精密制御。
炭素ポテンシャル	- 炭素ポテンシャルが制御されていない（>1.5 wt% または <0.6 wt%）ため、不完全な炭化または過剰炭化が発生します。	- 炭素ポテンシャル0.8～1.2 wt%。質量流量コントローラによって正確に制御され、均一な炭化層が確保されます。
共同コンテンツ	- Co含有量の変動は炭素の拡散に影響し、6%未満では拡散が制限され、15%を超えると軟化が生	- 8%～12%は、靱性と硬度のバランスを保ちながら、最適な拡散チャネルを提供します。

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

プロジェクト	意図しない炭化（製造中の炭素制御不良）	プロセス浸炭（硬質合金の性能向上プロセス）
	じます。	
WC 粒度	- 粒径が 2 μm を超えると炭素の拡散が不均一になり、性能が大きく変動します。	- 粒径が 0.5 μm 未満の場合は、浸炭層の結合強度が強くなり、硬度が大幅に増加します（>10%）。
表面状態	- 表面状態が管理されていないため、Ra が大きく変動し、浸炭層の密着性に影響が出る可能性があります。	- Ra<0.1 μm まで研磨すると、浸炭層の密着性が確保され、摩耗率が 15% ~ 20% 減少します。
制御性と再現性	- バッチ間で制御不能な大きなパフォーマンスの違い（偏差 >20%）。	- 制御可能、バッチ偏差 <5%、安定したパフォーマンス。
陽性の場合	- 該当なし。通常は製造上の欠陥とみなされます。	- 鉱山用ドリルビット：WC-8Co（浸透層 15 μm ）、掘削距離 >1500m、50%増加。 - スタンピングダイス：WC-12Co（浸透層 30 μm ）、押し出し回数 > 10 ⁶ 回、25%増加。 - 深海機器：WC-10Co（浸透層 25 μm ）、寿命>4 年、40%増加。
否定的なケース	- WC-10Co ドリルビットのバッチは、高い炭素ポテンシャル（>1.5wt %）、60 μm の浸炭層、K _{1c} <10 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$ 、および早期破損（寿命<10 ⁴ 回）を示しました。	- 該当なし。プロセス浸炭によりこの問題を回避できます。
改善の方向性	- 原材料の炭素含有量を最適化し（偏差 <0.1 wt %）、雰囲気制御を改善し、意図しない炭化を減らします。	- インテリジェント浸炭システムは、炭素ポテンシャルをリアルタイムで監視し、コーティング技術を組み合わせて傾斜構造を形成し、深層部の性能を向上させます。

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

付録:

超硬合金の浸炭および脱炭

超硬合金（主に炭化タングステン WC と Co、Ni などの結合相で構成され、WC 含有量は 85～94 重量%、結合相は 615 重量%）は、高硬度（1400～2200 HV）、高強度（1.8～2.8 GPa）、優れた耐摩耗性のため、採掘のつるはし、工具、シール、金型に広く使用されています。浸炭と脱炭は、超硬合金の製造と使用における炭素含有量の調整を含む 2 つの重要なプロセスであり、材料の微細構造、性能、寿命に直接影響します。浸炭は超硬合金の表面に炭素を導入し、表面硬度、耐摩耗性、耐食性を高めます。脱炭は炭素損失による性能低下を引き起こすため、多くの場合避けられます。

この記事は、国家標準（GB/T 183762014、GB/T 51692013 など）と業界の慣行を組み合わせ、超硬合金の浸炭および脱炭のメカニズム、プロセス、影響、および制御対策について詳しく説明し、CTIA GROUP LTD の浸炭プロセスの最適化と脱炭制御の能力を適度に推奨しています。

1. 超硬合金の浸炭

1.1 浸炭の定義とメカニズム

浸炭処理とは、高温雰囲気（C₂H₂、CH₄ など）または固体炭素源（グラファイトなど）を介して、セメント炭化物の表面または表面付近の領域に炭素原子を拡散させて高炭素相（WC または η 相など）を形成するプロセスです。これにより、表面硬度（10～20%増加）、耐摩耗性（摩耗損失が 20～30%減少）、耐腐食性（腐食速度<0.01 mm/y）が向上します。

浸炭メカニズム:

炭素の拡散: 炭素原子は、高温 (1000 ～ 1200°C) において、拡散係数 $D \approx 10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ で WC 粒界および Co 相を介して拡散します。

炭化相の形成:

低炭素領域: 炭素が W と反応して WC（硬度 2000～2200 HV）を形成し、耐摩耗性が向上します。

高炭素領域: 過剰な炭素により、 η 相 (Co₃W₃C など、硬度 >2500 HV、高脆性) が形成される場合があります。

表面改質: 浸炭層 (0.11 mm) は、表面 (2000～2200 HV) から中心部 (1400～1600 HV) まで硬度が変化する勾配構造を形成します。

浸炭目的:

表面硬度（最大 1015%）と耐摩耗性（摩耗率 <0.05 mm³/h、ASTM G65）が向上します。耐腐食性が向上しました (H₂SO₄/H₂S <0.01 mm/y、NACE MR0175)。

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

傾斜性能を形成し、表面摩耗抵抗とコア靱性をバランスさせます($KIC 1215 MPa \cdot m^{1/2}$)。

1.2 浸炭プロセス

蒸気浸炭:

炭素源ガス (C_2H_2 、 CH_4 など) を真空炉または雰囲気炉に導入します。

装置: 真空焼結炉 ($10^{-2} 10^{-3} Pa$ 、モリブデン発熱体)。

パラメータ:

温度: $1000 \sim 1200^\circ C$ (WC 粒子は安定しており、Co 相は液化しません)。

ガス: C_2H_2 (純度 $>99.9\%$)、流量 $510 L/分$ 、圧力 $10^2 10^3 Pa$ 。

時間: 13 時間 (炭化層 $0.1 \sim 0.5 mm$)。

雰囲気: H_2 ($510 L/分$ 、酸化防止のため)、 $O_2 < 5 ppm$ 。

結果:

浸炭層の厚さ: $0.2 \sim 0.5 mm$ 、硬度 $2000 \sim 2200 HV$ 。

量: 表面積 0.51 重量%、粒径 $0.52 \mu m$ 。

多孔度: $<0.01\%$ (GB/T 51692013)。

用途: 鉰山用ピック (表面耐摩耗性が 20% 向上)、切削工具 (切削寿命が 30% 向上)。

固相浸炭:

方法: セメント炭化物をグラファイト粉末またはカーボンブラックに入れて高温で加熱します。

設備: 高温炉 (Ar 保護、 $10^{-2} Pa$)。

パラメータ:

温度: $1100 \sim 1300^\circ C$ 。

炭素源: 黒鉛粉末 ($D_{50} 15 \mu m$ 、純度 $>99.9\%$)、充填率 $80 \sim 90\%$ 。

時間: 24 時間 (炭化層 $0.51 mm$)。

雰囲気: Ar (流量 $5 L/分$ 、 $O_2 < 10 ppm$)。

結果:

浸炭層の厚さ: $0.51 mm$ 、硬度 $1900 \sim 2100 HV$ 。

炭素含有量: 表面増加 $0.8 \sim 1.5$ 重量%、 η 相が現れる場合があります。

接着力: $>80 N$ (スクラッチテスト)。

用途: 金型 (耐摩耗性 20% 向上)、シール (耐腐食性 15% 向上)。

プラズマ浸炭:

方法: プラズマ放電により炭素原子の活性が高まり、拡散が加速されます。

装置: プラズマ浸炭炉 (グロー放電、 $10^{-1} 10^0 Pa$)。

パラメータ:

温度: $800 \sim 1000^\circ C$ (低温、基板を保護)。

ガス: CH_4 (50%) + H_2 (50%)、流量 $1020 sccm$ 。

電圧: $500 \sim 800 V$ 、電流密度 $12 mA/cm^2$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

時間：12 時間（炭化層 0.1～0.3mm）。

結果：

浸炭層の厚さ：0.10.3mm、硬度 2100～2300HV。

炭素含有量：表面増加 0.30.8 重量%、粒子安定性。

多孔度：<0.001% (高密度)。

用途：精密工具（切削精度が 10% 向上）、深海シール（H₂S 耐性 <0.005 mm/y）。

1.3 浸炭の影響

浸炭の利点：

硬度の向上：表面硬度が 10 ～ 15% 増加（2000 ～ 2200 HV）、耐摩耗性が 20 ～ 30% 増加（摩耗損失 <0.05 mm³/h）。

耐食性の向上：浸炭層は緻密で、H₂SO₄/H₂S の腐食速度は <0.01 mm/y です。

寿命の延長：ピックの寿命は 30 ～ 50%（1000 ～ 1500 時間）増加し、ツールの切削寿命は 20 ～ 30% 増加します。

浸炭処理の欠点：

η 相のリスク：過剰な炭素により Co₃W₃C（硬度 >2500 HV、KIC <8 MPa·m^{1/2}）が形成され、脆さが増し、破損の確率が 1020% 増加します。

プロセス制御の難しさ：炭素含有量の偏差が ±0.2 wt% を超えると、パフォーマンスが不均一になる可能性があります。

コスト増加：浸炭設備（5.01 億元/台）、ガス代（C₂H₂ 1020 元/m³）。

1.4 浸炭ケース

採鉱ピック：WC+8%Co（Ø20mm）、蒸気浸炭処理（1100°C、C₂H₂ 5L/分、2 時間）、表面硬度 2100HV、摩耗<0.05mm³/h、寿命 1200 時間（通常のピックの場合は 600 時間）。

切削工具：WC+6%Co（Ø12mm）、プラズマ浸炭（900°C、CH₄+H₂、1.5 時間）、浸炭層 0.2mm、硬度 2200HV、Ti 合金の切削寿命が 30%向上。

シール：YN10（WC+10%Ni、Ø 50 mm）、固相浸炭処理（1200°C、グラファイト粉末、3 時間）、H₂S 耐腐食率 <0.005 mm/y、寿命 >1000 接続。

2. 超硬合金の脱炭

2.1 脱炭素化の定義とメカニズム

脱炭とは、高温で焼結、熱処理、または使用される超硬合金のプロセスであり、炭素損失（O₂、H₂ との反応、または揮発）により表面または全体の炭素含有量が減少し、低炭素相（W₂C、Co 相の濃縮など）が形成され、それによって硬度（10～20%減少）、耐摩耗性、および強度が低下します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

脱炭素化のメカニズム:

炭素の酸化: 高温 ($> 800^{\circ}\text{C}$) では、炭素は O_2 と反応して CO/CO_2 を形成し、 WC は W_2C (硬度 $1600\sim 1800\text{ HV}$ 、耐摩耗性が低い) に分解されます。

反応: $2\text{WC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{W}_2\text{C} + \text{CO}_2$ 。

炭素の揮発: 真空焼結 (10^{-4} Pa 、 $> 1400^{\circ}\text{C}$) 中に、炭素はガス状 (C 、 CO) で失われます。

Co 相の濃縮: 炭素が失われた後、Co 相の割合が増加し ($> 20\text{ wt}\%$)、軟化層 (硬度 $< 1000\text{ HV}$) が形成されます。

低炭素相: W_2C (高脆性、 $\text{KIC} < 8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) または自由 W (硬度 $< 1200\text{ HV}$)、耐摩耗性が低下します。

何が起こるのですか:

焼結: 脱炭不十分 ($\text{O}_2 > 10\text{ ppm}$)、高温酸化。

熱処理: 不適切な雰囲気制御 (過剰な H_2 、 O_2 の漏れ)。

用途: 高温切断 ($> 1000^{\circ}\text{C}$ 、空気露出) または腐食性環境 (H_2S による炭素損失)。

2.2 脱炭素化 (非意図的)

状態:

温度: $> 800^{\circ}\text{C}$ (焼結 $1350\sim 1450^{\circ}\text{C}$ 、熱処理 $1000\sim 1200^{\circ}\text{C}$)。

雰囲気: O_2 ($> 10\text{ ppm}$)、 H_2 (流量 $> 20\text{ L/分}$ 、 C 揮発を誘発するため)。

真空度: $> 10^{-2}\text{ Pa}$ (炭酸ガス損失)。

時間: > 1 時間 (脱炭層 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$)。

結果:

脱炭層の厚さ: 0.11 mm 、硬度は $1000 \sim 1600\text{ HV}$ まで低下します。

$\text{wt}\%$ 減少し、 W_2C 比は 1030% 増加しました。

多孔性: $0.010.05\%$ 増加 (微小亀裂)。

パフォーマンス: 耐摩耗性が 2050% 減少 (摩耗速度 $> 0.1\text{ mm}^3/\text{h}$)、破損確率が 2030% 増加。

2.3 脱炭素化の影響

脱炭素化のデメリット:

硬度の低下: 表面硬度は $10 \sim 20\%$ 低下 ($1000 \sim 1600\text{ HV}$)、耐摩耗性は $20 \sim 50\%$ 低下します。

GPa) が $10 \sim 15\%$ 低下し、破損の確率が $20 \sim 30\%$ 増加します。

耐食性の低下: 脱炭層が緩み、腐食速度が $50\sim 100\%$ 増加します ($\text{H}_2\text{SO}_4 > 0.05\text{ mm/y}$)。

寿命の短縮: ピックの寿命は $30 \sim 50\%$ (< 500 時間) 短縮され、ツールの切削効率は 20% 低下します。

脱炭素化事例:

ピックの故障: $\text{WC}+10\%\text{Co}$ ($\varnothing 20\text{ mm}$)、焼結 (1450°C 、 $\text{O}_2 20\text{ ppm}$)、表面脱炭層 0.3 mm 、硬度 1400 HV 、摩耗 $0.15\text{ mm}^3/\text{h}$ 、寿命 400 時間 (通常 800 時間)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

工具摩耗: WC+6%Co (Ø 12 mm)、高温切削 (1000°C、空気)、脱炭層 0.2 mm、W2C 比 20%、切削寿命が 30% 減少。

2.4 脱炭素制御

雰囲気最適化:

H₂ 制御: 流量 515 L/分 (脱ワックス/焼結)、O₂ <5 ppm、C の揮発を防ぐ。

Ar 保護: 焼結/熱処理中、Ar 流量は 510 L/分、O₂ <10 ppm です。

真空度: 10^{-4} 10^{-5} Pa、炭酸ガスの損失を低減します。

脱炭最適化:

温度: 200~600°C、加熱速度 3°C/分、H₂ 10 L/分。

結果: 残留炭素 <0.05%、O₂ <5 ppm、脱炭層 <0.01 mm。

焼結最適化:

温度: 1350~1450°C、温度制御±3°C、過度の燃焼を避けてください。

HIP: 1350°C、120 MPa (Ar)、気孔率<0.001%、W2C を抑制。

検出と修復:

検査: SEM (W2C 比<5%)、XPS (炭素含有量偏差<±0.1 wt %)。

修復: 浸炭処理 (1100°C、C₂H₂ 5 L/分、1 時間)、硬度 2000 HV に復元。

例: WC+8%Co ピック (Ø 20 mm)、最適化された焼結 (1350°C、 10^{-5} Pa、H₂ 10 L/分)、脱炭層なし、硬度 2000 HV、寿命 1000 時間。

3. 浸炭と脱炭の比較

特性	炭化	脱炭素化
意味	炭素原子が表面に拡散し、高炭素相を形成する。	炭素損失、低炭素相の形成
機構	炭素拡散により WC/η 相が生成	炭素の酸化/揮発により W ₂ C/Co が濃縮される
温度	1000~1200°C	800°C以上
雰囲気	C ₂ H ₂ /CH ₄ 、H ₂ 、Ar	O ₂ (>10 ppm)、H ₂ 過剰
層の厚さ	0.11 ミリメートル	0.11 ミリメートル
硬度	1015%増加 (2000~2200 HV)	1020%削減 (1000~1600 HV)
耐摩耗性	20~30%増加 (<0.05 mm ³ /h)	削減率 20~50% (>0.1 mm ³ /h)
耐食性	20~50%増加 (<0.01 mm/年)	低下率 50~100% (>0.05 mm/年)
強靭さ	η 相が低すぎる (KIC <8 MPa·m ^{1/2})	W ₂ C の増加と減少 (KIC <8 MPa·m ^{1/2})
応用	ピック、カッター、シール	避け、修理後使用
コントロール	炭素源濃度、時間	大気 (O ₂ <5 ppm)、真空

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

4. 最適化の提案

浸炭最適化:

炭素源: C₂H₂ (510 L/分)、CH₄ (1020 sccm) 、純度>99.9%。
温度: 1000 ~ 1100°C (気相/プラズマ)、η 相 (<5 vol%) は避けてください。
時間: 12 時間、浸炭層 0.2~0.5 mm、硬度偏差 <±50 HV。
検査: SEM (WC 粒径 0.52μm) 、 XPS (炭素含有量±0.1wt %)。
後処理: 研磨 (Ra <0.2 μm) 、 PVD CrN (2 μm) 、耐摩耗性が 30% 向上。

脱炭素制御:

雰囲気: H₂ 10 L/分、O₂ <5 ppm、 Ar 5 L/分。
真空: 10⁻⁵ Pa、焼結/熱処理中の炭素損失が 90% 削減されます。
脱炭: 200~600°C、残留炭素<0.05%、O₂<5ppm。

HIP: 1350°C、120 MPa、気孔率<0.001%、W₂C <5%。
モニタリング: オンライン分光法 (O₂/CO 濃度)、炭素含有量偏差 <±0.1 wt %。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御±3°C、真空 10⁻⁵Pa、均一性±5°C。
ガスシステム: C₂H₂/CH₄ 流量精度 ±0.1 L/分、O₂ 検出 <5 ppm。
検査: SEM/XPS (粒子/組成)、超音波 (亀裂>0.1 mm)。

アプリケーションの適応:

浸炭処理: 採掘用ピック (高硬度岩石)、工具 (高速切削)。
(1100°C、C₂H₂、1 時間) + コーティング (CrN 、 2μm) 。

5. 標準

GB/T 183762014: 多孔度 <0.01%、均一性 >95%。
GB/T 51692013: 多孔度 A02B00C00 (真空)、A00B00C00 (HIP)。
GB/T 38502015: 密度 14.5~15.0 g/cm³、偏差 <±0.1 g/cm³。
GB/T 38512015: 曲げ強度 1.8~ 2.8GPa 。
GB/T 7997-2017: 硬度 1400-2200 HV。
NACE MR0175: H₂S/CO₂ 耐性、腐食速度<0.005 mm/y。
ASTM G65: 摩耗率 <0.05 mm³/h。
ISO 6508: 硬度偏差 <±50 HV。

6. 結論

セメント炭化物の浸炭は、気相(C₂H₂、1000~1200°C)、固相(グラファイト、1100~1300°C) またはプラズマ浸炭 (CH₄、800~1000°C) によって行われ、表面に 0.11mm の浸炭層を形成し、硬度を 2000~2200 HV に増加させ、耐摩耗性を 20~30% (摩耗損失<0.05mm³/h)

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

および耐腐食性を 20~50% ($H_2S/H_2SO_4 < 0.01\text{mm/y}$) 向上させ、ピック (1000~1500 時間)、ツールおよびシール (30~50% 増加) の寿命を大幅に延長します。脱炭は、高温 ($> 800^\circ\text{C}$) での酸化または炭素の揮発により、 W_2C/Co を主体とした層を形成し、硬度を 10~20% (1000~1600 HV)、耐摩耗性を 20~50% 低下させます。この現象を抑制するには、雰囲気 ($O_2 < 5\text{ppm}$)、真空 (10^{-5}Pa)、HIP (1350°C 、120 MPa) を最適化する必要があります。精密な浸炭プロセス (C_2H_2 510 L/min、12 時間) と厳格な脱炭防止・制御 (H_2 10 L/min、残留炭素 $< 0.05\%$) により、超硬合金の安定した性能を確保できます。

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

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

超硬合金のバインダーージェットティングとは何ですか？

超硬合金（WC-Co）のバインダーージェットティングは、液体バインダーを使用して超硬合金粉末を選択的に結合し、高性能の 3 次元構造を層ごとに構築する高度な積層造形技術です。複雑な超硬合金切削工具、鉋山用ドリル、耐摩耗性金型の製造に適しています。この技術は、1994 年にマサチューセッツ工科大学（MIT）によって開発され（参照：MIT 特許 US5340656A）、その後、ExOne、Desktop Metal などの企業によって商品化されました。近年、超硬合金の分野で広く使用されています。以下では、定義、歴史、原理、プロセスフロー、技術パラメータ、特性、適用分野、性能データ、最適化戦略について詳しく説明します。

1. 超硬合金のバインダー射出成形の定義と基本概念

バインダーージェットティング法は、粉末床をベースとした積層造形法です。バインダーを高精度に噴射することで、WC-Co などの超硬合金粉末を結合させ、徐々に積層することで立体部品を形成します。従来の超硬合金製造方法（プレス焼結など）や熔融型 3D プリント（選択的レーザー熔融法、SLM など）とは異なり、バインダーージェットティング法では粉末を直接熔融するのではなく、バインダーの物理的または化学的作用によって粒子間の初期凝固を実現します。得られた「グリーンボディ」（グリーンパーツ）は、強度と密度を向上させるために、脱脂や焼結などの後処理が必要です。

超硬合金のバインダー射出成形適合性:

超硬合金（WC-Co、Co 含有量 6%～12%）、硬度は HV 1500～1800、破壊靱性（ K_{Ic} ） 10～15MPa・m^{1/2}に達します。

内部冷却チャネルを備えたツールや多孔質構造の金型など、複雑な形状の部品に適しています。

超硬合金用バインダー射出成形技術の歴史と発展

バインダーージェットティング技術は 1994 年に MIT（マサチューセッツ工科大学）によって開発され、当初は砂型鑄造に使用されていました（特許 US5340656A）。1999 年には ExOne がこれを商品化し、最初の商用装置である ZPrinter 310 を発売しました。2016 年には Desktop Metal が Shop System をリリースし、ジェットティング精度と生産効率をさらに最適化しました。

セメントカーバイド用途の噴射技術:

2018 年、ExOne は WC-Co 粉末成形をサポートし、最大 2000cc/時の印刷速度を誇る Innovent+システムを発売しました。

2023 年、Sandvik Additive Manufacturing は、バインダーージェットティングに最適化され、密

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

度が 99.1%に向上した Osprey WC-Co 粉末（粒子サイズ 5~15 μm ）をリリースしました。

最近の進歩: 2025 年現在、GE Research は、グリーン体の強度を 30% (8 MPa から 10.4 MPa) 向上させ、印刷欠陥を大幅に削減する新しいナノ粒子バインダー（粒子サイズ <1 μm ）を開発しました。

3. バインダージェット技術の動作原理

セメント炭化物のバインダー射出成形では、次の手順で部品の構築を実現します。

粉体の散布

ビルドプラットフォーム上にセメント炭化物粉末(WC-10Co など、粒子サイズ 5~20 μm)

を均一に広げます。層の厚さは通常 50~100 μm です。

高品質の層を確保するには、粉末の流動性が高く（安息角 <30°）、粒度分布が均一である必要があります（D50 偏差 <5%）。

バインダージェット

高精度ノズル（解像度 40~ 50 μm 、ノズル数>1000）が CAD モデルデータに従って液体バインダーを選択的に噴霧します。

一般的なバインダーには、水性バインダー（粘度 5~10 mPa·s のポリビニルアルコール（PVA）など）と有機バインダー（固形分 30%~40%のフェノール樹脂など）があります。バインダーは粉末粒子間の隙間に浸透し（浸透深さ 100~ 150 μm ）、物理的結合または化学反応により固化します（硬化時間 0.5~1 秒）。

カスケード構造

ビルドプラットフォームは 1 層（層の厚さに一致）下降し、部品が完成するまで粉末の拡散と排出のプロセスが繰り返されます。

結合されていない粉末は自然なサポート構造として機能し、追加のサポートを必要とせずに部品の安定性を維持します。

後処理

グリーン体は粉末床から取り出され、バインダーを除去するために脱バインダー処理（200~400°C、2~4 時間）が行われます。

焼結（1350~1450°C、真空<10⁻² Pa、4~8 時間）により、WC-Co 粒子が結合され、密度が 98%~99.2%に増加します。

熱間静水圧プレス（HIP、1500°C、100 MPa、2 時間）は、気孔率をさらに低減する(<0.5%) オプションです。

4. バインダージェット技術のプロセスと技術的パラメータ

セメント炭化物のバインダー噴射プロセスには、次の詳細なパラメータが含まれます。

粉末特性:

材質: WC-Co 粉末（WC-8Co、WC-12Co など）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

粒子サイズ: 5 ~ 20 μm 、D50 偏差<5%、球形度>0.9 (SEM 測定)。

化学組成: WC 含有量 88%~94%、Co 含有量 6%~12%、酸素含有量<0.3 重量% (LECO 分析)。

粉末塗布と噴霧:

の厚さ: 50~100 μm 、偏差 $\pm 5 \mu\text{m}$ (レーザー距離計で検証)。

注入圧力: 0.2~0.5 MPa、一滴あたりの体積 10~20 pL (高速ビデオで測定)。

ジェット速度: 20~50 mm/秒、印刷解像度 1200 dpi。

硬化と環境制御:

接着剤の硬化時間: 1 秒未満、周囲温度 20 ~ 30 °C、湿度 40% ~ 60%。

ビルド チャンバーには不活性ガス保護装置 (窒素、酸素含有量 < 500 ppm など) が装備されている必要があります。

後処理:

脱脂: 250~350°C、加熱速度 1~2°C/分、3 時間保温、残留炭素率<0.5 重量%。

焼結: 1350~1450°C、加熱速度 5°C/分、真空度<5 $\times 10^{-3}$ Pa、6 時間保温。

収縮率: 線形収縮は 12% ~ 15% であり、事前補正設計が必要です (精度 $\pm 0.1 \text{ mm}$)。

密度: 98.5%-99.2% (アルキメデス法で測定)、多孔度 <1% (CT スキャン、解像度 <5 μm)。

装備要件:

ExOne など) Innovent +、ビルドボリューム 160 $\times$ 65 $\times$ 65 mm)。

プリントヘッド: Xaar 1003 プリントヘッド、ノズル数 1000、解像度 40 μm 。

粉末供給システム: 振動スクリーニング、均一性偏差 <3%。

温度制御: 赤外線加熱、偏差 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

バインダー射出成形技術の特徴

超硬合金のバインダー射出成形には、次のような特徴があります。

高い設計自由度:

内部冷却チャネル (直径 0.5 ~ 2 mm)、多孔質構造 (細孔サイズ 0.1 ~ 1 mm)、薄壁部品 (壁の厚さ <0.5 mm) などの複雑な形状を印刷できます。

(K_{IC} 12 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$)などの機能傾斜設計をサポートします。

低熱入力:

高温溶融 (> 3000°C) による粒子の粗大化 (> 2 μm) や Co 相の揮発を避けるため、室温 (20~30°C) で印刷してください。

熱応力は <50 MPa (X 線応力計で測定) であり、SLM (>200 MPa) よりもはるかに低くなります。

高い生産効率:

印刷速度: 2000 cc/h (ExOne データ)、1 時間あたり 50 ~ 100 個の小型部品 (体積 10 cm^3) を製造できます。

支持構造が不要で、部品を高密度に配置でき、施工効率が 30%~50%向上します。

材料の適合性:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-6Co（高硬度）、WC-12Co（高韧性）など、さまざまな WC-Co 比をサポートします。
粉末回収率は 99%を超え、5～10 回再利用できます（酸素含有量の増加は 0.1 重量%未満）。

費用対効果:

粉末コスト: WC-Co 粉末は 50 ～ 60 ドル/kg (Sandvik による見積り) で、SLM 粉末よりも 20 ～ 30% 低くなります。

装置の運転コスト: 1 ～ 2 ドル / 時間 (消費電力 <5kWh)、ユニットコスト 5 ～ 10 ドル (部品容積 10 cm³) 。

制限:

成形体は強度が低く (8～10 MPa、インストロン引張試験)、壊れやすいです。

焼結収縮率は 12%～15%、寸法偏差は±0.1mm であり、正確な事前補正が必要です。

表面粗さ: Ra4～ 6μm (焼結後)、Ra< 0.1μm にするにはショットブラストが必要です。

6. バインダージェット技術の応用分野と性能データ

セメント炭化物のバインダー射出成形は、以下の分野で独自の価値を発揮します。

切削工具:

WC-10Co ツール (層厚 50 μm)、内部冷却チャンネル (直径 1 mm) により放熱効率が 25% 向上し、切削寿命は 15 ～ 18 時間 (20% 増加)、切削速度は 1000 m/分 (航空アルミニウム合金)。

採掘ドリル:

WC-8Co ドリルビット (容積 50cm³)、格子構造 (口径 0.5mm)、15%の軽量化、掘削距離 1500～1800m (50%増加)、硬度 HV1650、K_{1c}12MPa・m^{1/2}。

耐摩耗性金型:

WC-12Co ダイ (壁厚 0.4mm)、押し出し回数>1.2×10⁶回 (25%増加)、硬度 HV 1700、摩耗率<0.09mm³/N・m (ASTM G65 試験)。

ラピッドプロトタイピング:

生産サイクルは 6～8 時間 (従来のプレスと焼結には 3～5 日かかります)、研究開発コストは 50%削減され、セメントカーバイド工具の設計検証に適しています。

パフォーマンスデータ (測定値):

硬度: HV1650～1750 (ピッカース硬度計、荷重 30kg)。

破壊靱性: K_{1c} 11-13 MPa・m^{1/2} (片側ノッチ付き梁法、ASTM E399)。

密度: 98.8%-99.2% (アルキメデス法)。

疲労寿命: >1.2×10⁶回 (回転曲げ疲労試験、500MPa)。

7. バインダージェット技術と他の技術の比較

選択的レーザー溶融法 (SLM) との比較:

バインダー ジェットリングでは、熱応力が低く (<50 MPa vs. >200 MPa)、粒径が小さくなります (0.5 ～ 1 μm vs. 1 ～ 3 μm) 。

密度はわずかに低くなります (99% 対 99.5%) が、価格は 50% 低くなります (1 個あたり 5 ドル対 10 ドル)。

従来のプレスおよび焼結と比較して:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

バインダー ジェットティングは、短い生産サイクル (8 時間 vs. 5 日) で複雑な設計をサポートしますが、収縮制御にはより高い精度 (偏差 $\pm 0.1 \text{ mm}$ vs. $\pm 0.05 \text{ mm}$) が求められます。

バインダージェットティング技術と他の成形技術を比較した包括的なリスト

次の表は、バインダー ジェットティング (BJ) 技術と、選択的レーザー溶融法 (SLM)、電子ビーム溶融法 (EBM)、熱溶解積層法 (FDM)、プレス アンド シンター法 (P&S)、および指向性エネルギー堆積法 (DED) を比較したものです。

索引	バインダージェット ティング (BJ)	選択的レーザー溶融 (SLM)	電子ビーム溶融 (EBM)	熱溶解積層法 (FDM)	従来のプレスと 焼結 (P&S)	指向性エネルギー 蒸着 (デッド)
原理	粉末はバインダーを吹き付けて結合され、層ごとに積み重ねられ、その後焼結されて固化されます。	レーザーは粉末を溶かし、層ごとに堆積させて、熔融形状に成形します。	電子ビームで粉末を溶かし、高温真空環境で層ごとに堆積させます。	ホットメルトワイヤーは押し出され、層ごとに堆積され、冷却されて固化されます。	粉末を圧縮し、高温で焼結して成形し固めます。	レーザーまたはアークによって粉末/ワイヤが溶解され、層ごとに堆積されます。
材料の適合性	金属 (WC-Co など)、セラミック、鋼砂、粉末粒径 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 。	金属 (チタン合金、鋼など)、少量のセラミック、粒子サイズ $10 \sim 45 \mu\text{m}$ 。	金属 (チタン、ニッケル基合金など)、粒子径 $20 \sim 75 \mu\text{m}$ 。	熱可塑性プラスチック、少量の複合材料、線径 $1.75 \sim 3 \text{ mm}$ 。	金属粉末 (WC-Co など)、セラミックス、粒径 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。	金属 (鋼、ニッケル合金など)、複合材料、粉末/ワイヤ $50 \sim 150 \mu\text{m}$ 。
正確さ	$\pm 0.1 \text{ mm}$ 、層厚 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 、解像度 $40 \sim 50 \mu\text{m}$ (ノズル)。	$\pm 0.05 \text{ mm}$ 、層厚 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 、解像度 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ (レーザービーム)。	$\pm 0.2 \text{ mm}$ 、層厚 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 、解像度 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ (電子ビーム)。	$\pm 0.2 \text{ mm}$ 、層厚 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 、解像度 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ (ノズル)。	$\pm 0.05 \text{ mm}$ 、金型の精度に依存し、粒子サイズは均一性に影響します。	$\pm 0.5 \text{ mm}$ 、層厚 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 、解像度 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ (熔融池)。
印刷速度	2000 cc/時 、 $50 \sim 100 \text{ 個/時}$ (10 cm^3)。	$10 \sim 20 \text{ cm}^3/\text{時}$ 、 $5 \sim 10 \text{ 個/時}$ (10 cm^3)。	$20 \sim 50 \text{ cm}^3/\text{時}$ 、 $5 \sim 15 \text{ 個/時}$ (10 cm^3)。	$50 \sim 100 \text{ cm}^3/\text{時}$ 、 $10 \sim 20 \text{ 個/時}$ (10 cm^3)。	大量生産の場合、1 個あたり $1 \sim 5$ 時間 (金型の準備には数週間かかります)。	$500 \sim 1000 \text{ cm}^3/\text{時}$ 、 $20 \sim 50 \text{ 個/時}$ (10 cm^3)。
料金	中程度 (設備および材料のコストは中程度、運用コストは低い)。	高い (設備が高価、材料費と運用コストが高い)。	高い (装置は真空環境が必要であり、材料費と運用コストが高い)。	低い (設備・材料費、運用費が低い)。	中程度 (設備費、材料費は中程度だが、金型開発費は高い)。	中程度 (設備コストは高いが、材料費と運用コストは中程度)。
表面品質	Ra $4 \sim 6 \mu\text{m}$ (焼結後)、ショットブラスト後 Ra $< 0.1 \mu\text{m}$ 。	Ra $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 、Ra $< 0.2 \mu\text{m}$ に機械加工する必要があります。	Ra $20 \sim 30 \mu\text{m}$ の場合、Ra $< 0.5 \mu\text{m}$ に機械加工する必要があります。	Ra $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、Ra $< 0.2 \mu\text{m}$ に後処理する必要があります。	Ra $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ (金型精度)、追加加工は不要です。	Ra $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 、Ra $< 0.5 \mu\text{m}$ に機械加工する必要があります。
後処理要求	脱脂 ($200 \sim 400^\circ\text{C}$ 、3 時間)。	熱処理 ($900 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、2 時間)、機械加工。	熱処理 ($1000 \sim 1300^\circ\text{C}$ 、2 時間)、機械加工。	熱処理は不要、サポートの除去と研磨。	追加処理なしで焼結 ($1300 \sim 1100^\circ\text{C}$ 、2 時間)。	熱処理 ($800 \sim 1100^\circ\text{C}$ 、2 時間)。

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

索引	バインダーージェッティング (BJ)	選択的レーザー溶融 (SLM)	電子ビーム溶解 (EBM)	熱溶解積層法 (FDM)	従来のプレスと焼結 (P&S)	指向性エネルギー蒸着 (デッド)
件	焼結 (1350 ~ 1450°C、6 時間)、HIP(オプション)。	機械加工。	機械加工。	磨は不要です。	1500°C、4~8 時間)。	機械加工。
デザイン	高い内部チャンネル (0.5~2 mm)、薄い壁 (<0.5 mm)、勾配構造。	中程度、内部チャンネル (0.3~1 mm)、サポート構造が必要。	中程度の内部チャンネル (0.5~2 mm)、サポート構造が必要。	低く、配線バスに限定され、内部構造はありません。	低い、金型設計に依存し、複雑な構造によって制限される。	高い修復または大きなピースの製作、内部チャンネル (1~5 mm)。
炭化物の性能	硬度 HV 1650-1750、K _{1c} 11-13 MPa·m ^{1/2} 、密度 98.8%-99.2%。	硬度 HV 1700-1900、K _{1c} 10-12 MPa·m ^{1/2} 、密度 99.5%。	硬度 HV 1600-1800、K _{1c} 9-11 MPa·m ^{1/2} 、密度 99.3%。	該当なし、取り扱いが難しい WC-Co。	硬度 HV 1800-2000、K _{1c} 12-15 MPa·m ^{1/2} 、密度 99.8%。	硬度 HV 1600-1700、K _{1c} 10-12 MPa·m ^{1/2} 、密度 98%-99%。
熱ストレス	<50 MPa (X 線応力計)、低入熱。	200 MPa を超える場合は、緩和するために熱処理が必要です。	300 MPa を超える場合は、緩和するために熱処理が必要です。	<20 MPa、熱入力なし。	<100 MPa、焼結中は均一。	150 MPa を超える場合は、緩和するために熱処理が必要です。
粒度	0.5 ~ 1µm (焼結後、SEM で測定)。	1 ~ 3µm (溶融後、SEM 測定)。	2 ~ 5µm (溶融後、SEM 測定)。	適用できない。	0.5 ~ 2µm (プレス後、SEM で測定)。	5 ~ 10µm (溶融プール凝固、SEM 測定)。
アプリケーション	切削工具 (WC-10Co)、採掘用ドリルビット、金型プロトタイプ。	高精度航空部品 (Ti6Al4V)、医療用インプラント。	航空タービンブレード (ニッケル基合金)、補修部品。	試作、民生用製品 (ABS 部品)。	超硬工具 (WC-Co ドリル) を大量にご用意しております。	大規模金属補修、積層造形 (鉄骨構造物)。
制限	グリーンボディは強度が低く (8~10 MPa)、収縮率は 12%~15% です。	コストが高く、支持構造が必要であり、熱応力も高い。	コストが高く、真空環境が必要で、表面が粗い。	材料の選択肢が限られており、金属成形能力がありません。	金型コストが高く、設計の自由度が低い。	精度が低く、表面品質が悪く、熱影響部が大きい。
環境への影響	粉末回収率 >99%、エネルギー消費量 5 kWh/h。	粉末回収率は 90%、エネルギー消費量は 10 kWh/h です。	粉末回収率は 85%、エネルギー消費量は 15 kWh/h です。	材料の無駄が少なく、エネルギー消費量は 2 kWh/h です。	材料廃棄率は 5% ~ 10%、エネルギー消費量は 8 kWh/h です。	材料廃棄率は 10% ~ 15%、エネルギー消費量は 12 kWh/h です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

電解装置における超硬合金の応用

超硬合金（主に炭化タングステン WC と Co、Ni などのバインダー相で構成され、WC 含有量 8594 重量%、バインダー相 615 重量%）は、高硬度（1400～2200 HV）、優れた耐磨耗性（摩耗減量<0.05 mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（H₂SO₄/H₂S <0.01 mm/y、NACE MR0175）、高温安定性(>800°C)により、新エネルギー電解装置（アルカリ電解装置 AWE、プロトン交換膜電解装置 PEM、固体酸化物電解装置 SOEC など）での重要な応用可能性を秘めています。新エネルギー電解装置は、水を電気分解して水素と酸素を生成するグリーン水素（H₂）の中核設備であり、再生可能エネルギー（風力、太陽光発電など）のエネルギー貯蔵とハード脱炭素産業（鉄鋼、化学工業など）のグリーン化をサポートしています。

本稿では、超硬合金の材料特性、国際規格（GB/T 183762014、IEC 62976 など）、業界動向に基づき、電解セルにおける超硬合金の応用、課題、最適化の方向性を分析し、CTIA GROUP LTD の高性能超硬合金部品の研究開発能力を適度に推奨します。なお、本稿の内容は超硬合金の浸炭・脱炭プロセスとは無関係であることを明確に申し上げます。

電解装置の概要

新エネルギー電解装置は、水を電気分解して（H₂O → H₂ + ½ O₂）グリーン水素を生成し、主に以下のタイプに分類されます。

アルカリ電解装置（AWE）:

原理：電解質として KOH/NaOH 溶液（25～30 重量%）を使用し、電極として Ni または Ni コーティング鋼を使用し、バイポーラプレートでカソードとアノードを分離します。

特徴:

成熟した技術、低い CAPEX（500～1000 ユーロ/kW、2030 年予測 300 ユーロ/kW）。

効率: 6080% (4050 kWh/kg H₂)。

寿命: 80,000 時間以上。

課題: 腐食性電解質（pH >14）、複雑なガスと液体の分離。

用途: 大規模水素製造 (>1 MW)、風力発電所のエネルギー貯蔵。

プロトン交換膜電解装置（PEM）:

ナフィオンなど）、Pt/Ir 触媒、Ti またはステンレス鋼バイポーラプレートを使用します。

特徴:

高効率: 7090% (3545 kWh/kg H₂)。

動的応答が高速（数秒）なので、間欠的な再生可能エネルギーに適しています。

CAPEX は高額です（1000 ～ 2000 ユーロ /kW、2030 年予測 500 ユーロ /kW）。

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

寿命:20,000~60,000 時間。

課題: 貴金属触媒は高価であり、酸性環境 ($\text{pH} < 2$) では腐食性があります。

用途: 分散型水素製造、輸送用燃料電池。

固体氧化物電解装置 (SOEC):

原理: セラミック電解質(YSZ など)、Ni またはペロブスカイト電極を高温($500 \sim 850^\circ\text{C}$)で使用します。

特徴:

超高効率: $>90\%$ ($<40 \text{ kWh/kg H}_2$)。

高額な CAPEX ($>2000 \text{ €/kW}$ 、研究段階)。

寿命:10,000~20,000 時間。

課題: 高温シール、熱サイクル安定性。

用途: 産業廃熱結合と将来の大規模水素製造。

超硬合金の応用シナリオ: 超硬合金は主に、腐食、摩耗、高温の課題に対処するためのバイポーラプレート、シール、ノズル、耐摩耗性電極コーティングなどの電解装置の主要コンポーネントに使用されます。

2. 電解セルにおける超硬合金の応用

高い硬度、耐腐食性、機械的安定性を備えた超硬合金は、電解セルにおける従来の材料(Ni、Ti、ステンレス鋼など)の代替として、部品寿命(20~50%向上)とシステム効率(メンテナンス費用を10~20%削減)の向上を実現します。具体的な用途は以下のとおりです。

2.1 硬質合金バイポーラプレート

機能:電解セルを分離し、電気を伝導し、電解質/ガスを分配します。

必要とする:

耐腐食性: AWE (KOH、 $\text{pH} > 14$)、PEM (H_2SO_4 、 $\text{pH} < 2$)。

導電率: 抵抗率 $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 。

機械的強度: 圧縮強度 $> 2 \text{ GPa}$ 、曲げ強度 $1.8 \sim 2.8 \text{ GPa}$ 。

耐摩耗性: 摩耗速度 $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)。

超硬合金の利点:

WCCo: 硬度 $1400 \sim 2000 \text{ HV}$ 、KOH/ H_2SO_4 耐腐食率 $< 0.01 \text{ mm/y}$ 。

WCNi: 非磁性、耐酸性は Co ベースより優れています ($\text{H}_2\text{SO}_4 < 0.005 \text{ mm/y}$)。

導電性: 抵抗率は $510 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ であり、Ti ($40 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) よりも優れています。

安定性: 800°C で粒子が安定し、相変化がありません。

例:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

AWE バイポーラプレート: WC10%Ni (Ø200 mm、厚さ 2 mm)、腐食速度 <0.005 mm/y、寿命 >100,000 時間 (Ni 鋼 50,000 時間)。

PEM バイポーラプレート: WC6%Co + CrN コーティング (2µm) 、耐酸性が 30% 向上し、導電性は 99% を維持。

2.2 カーバイドシール

機能: 電解液の漏れを防ぎ、気密性を確保します (H₂/O₂ 分離)。

必要とする:

耐腐食性: KOH/H₂SO₄/H₂S に耐性があります。

耐摩耗性: 耐フレッチング摩耗 (摩耗速度 <0.01 mm³/h)。

高温安定性: SOEC には 800°C 以上が必要です。

超硬合金の利点:

WCCo/Ni: 硬度 1600~2200 HV、PTFE よりも耐フレッチング摩耗性に優れています (摩耗が 50% 減少)。

耐食性: H₂S <0.005 mm/y (NACE MR0175)。

高温: WC 融点 2870°C、SOEC 環境安定性。

例:

SOEC シーリングリング: WC8%Ni (Ø50mm) 、気密性 >99.9% (800°C)、寿命 >15,000 時間 (セラミックシール <10,000 時間)。

AWE シーリング ガasket: WC10%Co (厚さ 1 mm)、KOH 環境腐食率 <0.01 mm/y、メンテナンス サイクルが 20% 増加。

2.3 超硬ノズルとパイプ

機能: 電解質、H₂/O₂ を輸送し、侵食や腐食に耐える必要があります。

必要とする:

耐侵食性: 高速ガスおよび液体の流れ (>10 m/s)。

耐腐食性: KOH/H₂SO₄ に耐性があります。

低摩擦: Ra < 0.2 µm 。

超硬合金の利点:

WCCo: 硬度 2000 HV、耐侵食寿命が 3050% 向上 (ステンレス鋼と比較)。

表面研磨: Ra0.1~ 0.2µm 、気泡付着を低減。

耐食性: H₂SO₄ <0.01 mm/y。

例:

PEM ノズル: WC6%Co (Ø10mm)、耐摩耗寿命 50,000 時間 (Ti 20,000 時間)。

AWE パイプライニング: WC10%Ni (厚さ 2 mm)、KOH 腐食率 <0.005 mm/y、メンテナンスコストが 15% 削減されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.4 炭化物電極コーティング

機能: 電極の触媒効率を高め、過電位を低減します。

必要とする:

触媒活性: 過電位 $<300\text{ mV}$ (OER/HER)。

耐腐食性: 酸/アルカリ/高温耐性。

接着力: $>80\text{ N}$ (スクラッチテスト)。

超硬合金の利点:

WC ベースのコーティング: Ni と Pt を複合し、過電圧は $200 \sim 250\text{ mV}$ で、純粋な Ni (300 mV) よりも優れています。

耐食性: $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{KOH} <0.01\text{ mm/y}$ 。

接着力: $>100\text{ N}$ (PVD プロセス)。

例:

AWE 電極: WCNi コーティング ($5\mu\text{m}$)、OER 過電圧 220 mV 、効率 5% 増加 (Ni 電極 280 mV)。

PEM 電極: WCPt コーティング ($2\mu\text{m}$)、HER 過電圧 200 mV 、寿命が 20% 増加。

3. 超硬合金の利点と課題

3.1 超硬合金の利点

耐食性:

WCCo/Ni は $<0.01\text{ mm/y}$ であり、これは Ni 鋼 (0.05 mm/y) や Ti (0.02 mm/y) よりも優れています。

$\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ 腐食に耐性があり、深海または高温電解装置に適しています。

耐摩耗性:

硬度 $1400\sim 2200\text{ HV}$ 、摩耗率 $<0.05\text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)、ステンレス鋼 (摩耗率 $0.1\text{ mm}^3/\text{h}$) よりも優れた耐侵食/フレッティング摩耗性。

高温安定性:

WC の融点は 2870°C であり、SOEC 環境 ($500 \sim 850^\circ\text{C}$) 下では相変化がなく、Ni (1455°C) よりも優れています。

電気伝導性:

抵抗率は $510\mu\Omega\cdot\text{cm}$ であり、バイポーラプレートの要件を満たし、Ti ($40\mu\Omega\cdot\text{cm}$) よりも優れています。

寿命と費用対効果:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

コンポーネントの寿命は 2050% (100,000 時間超) 増加し、メンテナンス コストは 1020% 削減されました。

初期コストは高いですが (WC 50100 \$/kg vs Ni 20 \$/kg)、ライフサイクルコストは低くなります。

3.2 課題

処理の難しさ:

超硬合金は硬度が高く (1400~2200 HV)、ダイヤモンド工具または EDM 処理が必要であり、コストが 20~30% 増加します。

複雑な形状 (バイポーラプレートのフローチャネルなど) の場合、処理サイクルは長くなります (1 個あたり 10 時間以上)。

料金:

WC 粉末 (純度 >99.9%) および焼結 (1350 ~ 1450°C、 10^{-5} Pa) は高価であり、1 個あたりの価格は Ti の 23 倍になります。

貴金属コーティング (Pt、Ir など) により、CAPEX がさらに増加します。

重さ:

密度 14.5~15.0 g/cm³ (Ti 4.5 g/cm³)、移動式電解装置には適していません。

触媒活性:

純粋な WC は触媒活性が限られているため (過電位 > 300 mV)、複合 Pt/Ni コーティングが必要となり、プロセスの複雑さが増します。

脆さ:

靱性は低く (KIC 1215 MPa·m^{1/2} vs Ni 50 MPa·m^{1/2})、耐衝撃性を最適化する必要があります。

4. 最適化の方向

材料:

WCNi ベース: Ni 含有量 (1015 wt %) を増やすと、耐酸性 (H₂SO₄ <0.005 mm/y) が向上し、Co の溶解が減少します。

ナノ WC: 粒径 0.2~0.5 μm、硬度 10% 増加 (2200 HV)、靱性 15% 増加 (KIC > 15 MPa·m^{1/2})。

複合コーティング: WC+Pt/Ni (PVD、25 μm)、過電位は 200mV まで低減し、触媒効率は 10% 向上します。

製造工程:

付加製造: 3D プリントされた WCCo バイポーラプレート、フローチャネル精度 ±0.01 mm、処理コストが 20% 削減されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HIP 焼結: 1350°C、120 MPa、気孔率 <0.001%、耐食性が 15% 増加。

表面処理: 研磨 (Ra<0.1μm) + CrN コーティング (2μm)、耐摩耗性が 30% 向上。

コスト最適化:

WC 粉末をリサイクル (回収率 >90%) し、原材料コストを 20% 削減します。

Pt/ Ir 触媒を NiFe 合金に置き換えることで、CAPEX を 10~15% 削減できます。

モジュール性:

標準化されたバイポーラプレート (200×200 mm、厚さ 2 mm) は AWE/PEM と互換性があり、生産効率が 20% 向上します。

シールの迅速な分解と組み立てにより、メンテナンス時間が 30% 短縮されます。

テストおよび検証済み:

腐食試験: NACE MR0175、H₂SO₄/KOH、腐食速度<0.005 mm/y。

耐久性: ASTM G65、摩耗 <0.05 mm³/h、サイクル >100,000 回。

電気化学: OER/HER 過電位 <250 mV、効率 >80%。

5. 規格と仕様

GB/T 183762014: セメント炭化物の多孔度 <0.01%、均一性 >95%。

GB/T 38502015: 密度 14.5~15.0 g/cm³、偏差 <±0.1 g/cm³。

GB/T 38512015: 曲げ強度 1.8~ 2.8GPa。

GB/T 7997-2017: 硬度 1400-2200 HV、偏差 <±50 HV。

バイポーラプレートの電気伝導率 (抵抗率<10 μΩ·cm) および耐食性 (腐食速度<0.01 mm/y)。

NACE MR0175: H₂S/H₂SO₄ 耐性、腐食速度 <0.005 mm/y。

ASTM G65: 摩耗率 <0.05 mm³/h。

ISO 6508: 硬度試験、偏差 <±50 HV。

6. 業界の動向と事例

傾向:

グリーン水素の生産: EU RePowerEU は 2030 年までに 20 Mt のグリーン水素を目標とし、電解装置の需要は 100 GW を超えます。

材料の代替: 超硬合金が Ti (PEM) および Ni 鋼 (AWE) を徐々に置き換え、CAPEX/OPEX を削減します。

高温電解: SOEC の需要が高まり、セメント炭化物高温部品 (シールなど) の市場が拡大します。

インテリジェンス: 腐食/摩耗のオンライン監視、超硬部品へのセンサーの統合、メンテナンス効率が 20% 向上しました。

例:

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

AWE プロジェクト：1 MW 電解装置（中国）、WC10%Ni バイポーラプレート（200×200 mm）、腐食速度 <0.005 mm/y、効率 75%、寿命 >80,000 時間、メンテナンスコスト削減 15%。

PEM プロジェクト：500 kW 電解装置（ドイツ）、WC6%Co ノズル（Ø 10 mm）、侵食寿命 50,000 時間、システム効率が 5% 向上。

SOEC パイロット：100kW 電解装置（米国）、WC8%Ni シーリングリング（Ø50mm ）、800°Cでの気密性>99.9%、寿命>15,000 時間。

7. 結論

WCCo/Ni は、高硬度（1400～2200 HV）、耐腐食性（H₂SO₄/KOH <0.01 mm/y）、耐摩耗性（摩耗量 <0.05 mm³/h）、高温安定性（>800°C）を備え、新エネルギー電解装置（AWE、PEM、SOEC）のバイポーラプレート、シール、ノズル、電極コーティングの主要材料として大きな利点を持っています。従来の Ni 鋼（寿命 50,000 時間）や Ti（腐食速度 0.02 mm/y）と比較して、超硬合金部品の寿命は 20～50%（>100,000 時間）延長され、メンテナンスコストは 10～20%削減され、グリーン水素製造の効率と経済性をサポートします。

課題は、加工の難しさ（2030%のコスト増加）、初期コスト、そして触媒活性（複合コーティングが必要）です。ナノ WC、積層造形、HIP 焼結、NiFe 触媒の最適化を通じて、CAPEX/OPEX をさらに削減し、競争力を向上させることができます。

、超硬合金分野において先進的な技術を有しています。ナノ WC 粉末（D50 0.2～0.5 μm ）、HIP 焼結（1350°C、120 MPa）、PVD コーティング（ WC/Pt/Ni、25 μm ）を駆使し、高性能バイポーラプレート（抵抗率<10 μΩ·cm ）、シール（気密性>99.9%）、ノズル（耐摩耗寿命>50,000 時間）を開発しています。AWE/PEM/ SOEC の過酷な動作条件に対応し、グリーン水素製造のための信頼性の高いソリューションを提供しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録：

超硬高速切削工具

超硬合金高速切削工具の概要

1.1 超硬合金高速切削工具の定義と特徴

定義： 超硬高速切削工具は、炭化タングステン（WC）と結合相（Co/Ni）（WC 85～94 重量%、結合相 6～15 重量%）をベースにしています。精密研削と物理蒸着（PVD）コーティング（TiN など）により、AlTiN（AlTiN）は、高硬度（1800～2200 HV）、耐摩耗性、高温安定性を実現し、500～2000 m/分の切削速度に適しています。

超硬合金高速切削工具の特長：

高硬度： 1400～2200 HV、耐摩耗性は高速度鋼（HSS、800 HV）の 5～10 倍優れています。

高温赤色硬度： 硬度は 800 ～ 1000°C で 1200 HV 以上を維持しており、乾式切削に適しています。

耐摩耗性： 摩耗 <0.05 mm³/h (ASTM G65)、工具寿命 500 ～ 2000 分。

衝撃性： 曲げ強度 1.8～2.8 GPa、破壊靱性 KIC 1015 MPa·m^{1/2}。

用途： 鋼（HRC2060）、チタン合金（Ti6Al4V）、ニッケル基合金（インコネル 718）、炭素繊維複合材（CFRP）などの加工。

超硬高速切削工具の種類

旋削工具： 外径旋削、内径穴加工、切削速度 500～1500m/分。

フライスカッター： 平面フライス加工、溝加工、切削速度 600 ～ 2000 m/分。

ドリルビット： 深穴掘削、切削速度 300～800 m/分。

ボーリング工具： 精密穴加工、切削速度 400～1000m/分。

1.3 超硬合金高速切削工具の利点

効率： 切削速度は HSS の 510 倍で、加工効率は 50～100% 向上します。

寿命： コーティング超硬工具の寿命は 500～2000 分（HSS 50～200 分）。

精度： 表面粗さ Ra0.1～0.4μm、加工精度±0.01mm。

適応性： 乾式切断、湿式切断、各種材料の加工に適しています。

2.超硬高速切削工具材料

2.1 原材料

マトリックス：

WC： 8594 重量%、粒径 0.22μm。

超微粒子（0.2～ 0.5μm）： 硬度 2000～2200HV、耐摩耗性に優れ、仕上げに適していま

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

す。

中粗粒（12 μm ）： 韌性 KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、荒加工に適しています。

Co：615 wt %、韌性と耐衝撃性を高めます。

低 Co（68 重量%）： 硬度 1800～2200 HV、耐摩耗性が強い。

高 Co（1015 重量%）： 曲げ強度 2.2～ 2.8GPa、耐衝撃性が良好。

Ni：0.5 wt %、Co を部分的に置き換えて耐食性を向上させます（ $\text{H}_2\text{SO}_4 < 0.01 \text{ mm/y}$ ）。

添加剤： $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{VC}$ （0.21 wt %）は、粒成長を抑制し、硬度を 510%向上させます。

コーティング：

錫： 硬度 2000～2300HV、摩擦係数 0.4、耐摩耗性が 20%向上。

TiAlN / AlTiN：硬度 3000～3300 HV、耐熱性 900～1100℃、寿命が 30～50%向上。

CrN： 硬度 1800～2200 HV、耐食性に優れ、ステンレス鋼加工に適しています。

DLC（ダイヤモンドライクカーボン）： 硬度 3000～4000 HV、摩擦係数<0.1、CFRP およびアルミニウム合金に適しています。

超硬合金高速切削工具の傾斜構造

表面： 低 Co（68 重量%）、超微粒子 WC（0.2～0.5 μm ）、硬度 2000～2200 HV。

コア： 高 Co（1012 wt %）、中粗粒 WC（12 μm ）、 韌性 KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

利点：

表面の耐摩耗性は 20～30% 向上し、コアの耐衝撃性は 15～20% 向上します。

勾配層（0.52 mm）により応力集中が軽減され、亀裂成長の確率が 20% 減少します。

準備： 層状粉末プレス+熱間静水圧プレス（HIP）焼結（1350℃、120 MPa）。

超硬合金高速切削工具の性能要件

硬度：1800～2200 HV (GB/T 7997-2017)。

曲げ強度：1.8～2.8 GPa （GB/T 38512015）。

破壊韌性：1015 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

耐摩耗性： 摩耗速度<0.05 mm^3/h （ASTM G65）。

耐食性： 冷却液（pH 710）腐食速度 <0.01 mm/y 。

熱伝導率：80100 W/m·K、HSS（20W/m·K）よりも放熱性に優れています。

超硬合金高速切削工具の製造工程

3.1 粉末の調製

原材料：

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

WC: D50 0.22 μm 、純度> 99.9 %。

Co/Ni: D50 12 μm 、純度>99.9%。

Cr3C2/VC: D50 0.51 μm 、純度>99.9%。

ボールミル:

装置: 遊星ボールミル (ZrO₂ ボール、ボールと材料の比率 10: 1)。

パラメータ: 速度 300 rpm、時間 16 ~ 24 時間、アルコール媒体。

の偏差 <±0.1 μm 、組成均一性 >95%。

3.2 形成

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または圧縮成形。

設備: CIP プレス (250~300MPa)。

パラメータ:

圧力: 250~300 MPa、圧力を 60 秒間保持します。

金型: 高精度鋼金型 (偏差 <±0.05 mm)、BN 潤滑。

ブランク密度: 理論密度の 60~70%(8.7~10.5 g/cm³)。

結果: ピレットサイズの偏差は±0.1 mm 未満、割れ率は 1%未満でした。

3.3 焼結

方法: 真空焼結+HIP。

装置:

真空焼結炉 (10⁻⁴ 10⁻⁵ Pa、モリブデン発熱体)。

HIP 炉 (Ar、120~150MPa)。

パラメータ:

脱蠟:

温度: 200~600°C、加熱速度 3°C/分。

雰囲気: H₂ (O₂ <5 ppm)、流量 10 L/分。

真空: 10⁻² Pa、残留炭素 <0.05%。

焼結:

温度: 1350~1450°C、加熱速度 58°C/分。

真空度: 10⁻⁴ 10⁻⁵ Pa、23 時間保温します。

ヒップ:

温度: 1350°C、圧力 120MPa (Ar)。

保温: 12 時間、冷却: 15°C/分。

結果:

密度: 14.815.0 g/cm³ (GB/T 38502015、偏差 <±0.05 g/cm³)。

多孔度: <0.001% (A00B00C00、GB/T 51692013)。

硬度: 1800~2200 HV、収縮率 15~18%。

3.4 精密機械加工

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

研削:

ホイール（粒度 510 μ m）。

パラメータ: 速度 3000 rpm、送り 0.010.05 mm/パス、冷却剤（油性）。

:切断刃半径<5 μ m 、 Ra 0.10.2 μ m 。

研磨:

ペースト（13 μ m）。

パラメータ: 速度 800 rpm、圧力 0.3 MPa。

結果: Ra <0.1 μ m 、摩擦係数が 20%減少しました。

3.5 コーティング

方法: PVD（物理蒸着法）。

装置: マグネトロンスパッタリング（Ti/Al/Cr ターゲット、純度>99.99%）。

パラメータ:

コーティング: TiAlN（35 μ m、硬度 3000 ~3300HV）。

真空度: 10⁻⁴ Pa、温度 300~400°C。

バイアス: 100 V、ガス: Ar+N₂ (50 sccm) 。

堆積速度: 1 μ m/h。

結果:

接着力: >80 N (スクラッチテスト)。

耐熱性: 900~1100°C、寿命が 30~50%増加。

摩擦係数: <0.3、耐摩耗性が 20~30%向上。

3.6 検出

微細構造: SEM（粒径 0.22 μ m） 、 XPS（組成偏差< $\pm$ 0.1wt %）。

パフォーマンス:

硬度計: 偏差 < $\pm$ 50 HV (ISO 6508)。

摩耗試験: ASTM G65、摩耗速度<0.05 mm³/h。

曲げ強度: GB/T 38512015、1.8~2.8 GPa 。

形状: CMM (座標測定機)、刃先偏差 < $\pm$ 0.005 mm。

4. パフォーマンス分析

パラメータ	超硬工具	高速度鋼 (HSS)
硬度 (HV)	18002200	800900
曲げ強度 (GPa)	1.82.8	34
靱性 (KIC、 MPa·m ^{1/2})	1015	2050
耐摩耗性 (mm ³ /h)	<0.05	0.20.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐熱性 (°C)	8001000	500600
切断速度 (m/分)	5002000	50200
寿命 (分)	5002000	50200
さ (Ra, μm)	0.10.4	0.81.2

パフォーマンスのハイライト:

摩耗性: 超微粒子 WC+TiAlN コーティング、摩耗損失<0.05mm³/h、寿命が 510 倍に増加。

高温安定性: 800~1000°C で硬度 1200 HV 以上、乾式切削に適しています（クーラント 50%削減）。

切断効率: 速度 500 ~ 2000 m/分、効率は 50 ~ 100% 増加します (HSS と比較)。

精度: Ra0.1~ 0.4μm 、加工精度±0.01mm。

5. 適用シナリオ

超硬高速切削工具は、航空宇宙、自動車製造、金型加工、エネルギー機器などに適しています。以下は、一般的な使用条件と最新の使用条件における具体的な工具、試験データ、および選定に関する推奨事項です。

航空宇宙

材質: チタン合金 (Ti6Al4V、HRC 36)、ニッケル基合金 (インコネル 718、HRC 45)、CFRP。

ナイフ:

チタン旋削加工:

外径旋削工具 (スローアウェイチップ、ISO CNMG120408)、WC6%Co (超微粒子、D50 0.2~0.5 μm 、Cr3C2 0.5 wt %)、硬度 2000~2200 HV、PVD AlTiN コーティング (4 μm 、硬度 3300 HV、耐熱性 1100 °C)。主偏向角 75°、切れ刃角 6°、切れ刃半径 0.02 mm、3D チップブレーカー。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400°C (10⁻⁵ Pa、2.5 時間)、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、研削 (エッジ半径<5 μm 、 Ra 0.1 μm) 、 PVD AlTiN (350°C、接着力>100 N)。

切断パラメータ: 速度 800 m/分、送り 0.15 mm/r、切断深さ 1.0 mm、ドライ切断。

テストデータ: 寿命 1200 分 (HSS 150 分)、Ra 0.2 μm 、精度 ±0.01 mm 、切削力 450 N (25% 削減)、摩耗 <0.05 mm³/h、ツール先端温度 850°C。

選択推奨事項: 超微粒子 WC + 低 Co (6 wt %) + AlTiN 、 CNMG120408MF、主偏向角 75°、ドライカットまたは MQL (0.1 L/h)。

高温合金掘削:

ソリッドドリル (Ø10 mm、深さ対直径比 5:1)、WC12%Co (中粗粒、D50 12 μm 、 VC 0.5 wt %)、硬度 1600~1800 HV、PVD TiAlN コーティング (4 μm 、耐熱性 1100 °C)。頂点角 135°、ねじれ角 30°、刃先半径 0.05 mm、内部クーラント穴 Ø1 mm。

プロセス: ボールミル処理 22 時間、CIP 300 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁵ Pa、3 時間)、HIP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1350°C（120 MPa、2 時間）、研削（エッジ半径 $<5\mu\text{m}$ ）、PVD TiAlN（400°C、接着 $>100\text{N}$ ）。

切削パラメータ：速度 500 m/分、送り 0.05 mm/r、穴深さ 50 mm、高压内部クーラント（20 bar、5 L/分）。

テストデータ：寿命 800 分（HSS 100 分）、Ra 0.3 μm 、穴径 $\pm 0.01\text{mm}$ 、切削力 550 N（21% 削減）、摩耗 $<0.05\text{mm}^3/\text{h}$ 、欠けなし。

選択推奨事項：中粗粒 WC + 高 Co（12 wt %）+ TiAlN、 $\varnothing 10\text{mm}$ 内部冷却ドリル、トップ角度 135°、高压内部冷却。

CFRP フライス加工：

多刃フライスカッター（径 10 mm、6 枚刃、千鳥刃）、WC8%Co（超微粒子、D50 0.2~0.5 μm 、Cr3C2 0.5 wt %）、硬度 2000~2200 HV、PVD DLC コーティング（3 μm 、硬度 3500 HV、摩擦係数 0.08）。ねじれ角 45°、刃先傾斜角+5°、刃先半径 0.01 mm。

プロセス：ボールミル処理 20 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400°C（ 10^{-5}Pa 、2.5 時間）、HIP 1350°C（120 MPa、1.5 時間）、研削（Ra 0.08 μm ）、PVD DLC（300°C、接着力 $>80\text{N}$ ）。

切削パラメータ：速度 2000 m/分、送り 0.05 mm/歯、切削深さ 2.0 mm、ドライ切削。

テストデータ：寿命 1500 分（HSS 200 分）、Ra 0.15 μm 、層間剥離なし、切削力 200 N（33% 削減）、摩耗 $<0.03\text{mm}^3/\text{h}$ 、層間剥離率 $<1\%$ 。

選択推奨事項：超微粒子 WC+DLC、 $\varnothing 10\text{mm}$ 6 エッジフライスカッター、ねじれ角 45°、ドライカット + ダスト除去。

性能：寿命 800~2000 分、効率 50% 向上、Ra 0.15~0.4 μm 。

事例：タービンブレード（Ti6Al4V）の加工、速度 1200 m/分、寿命 1500 分、精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

自動車製造：

材質：高強度鋼（HRC 4050）、鋳鉄（HB 200300）。

高張力鋼旋削加工：

WC10%Co 旋削工具（CrN 5 μm ）、速度 600~1000m/分。

性能：寿命 800~1500 分、Ra 0.1~0.3 μm 。

性能：寿命は 800 ~ 1500 分、メンテナンス コストは 20% 削減されます。

事例：クランクシャフト加工、速度 800 m/分、寿命 1200 分、効率 30% 向上。

型 処理：

材質：ダイス鋼（P20、HRC 3040）、ステンレス鋼（316L）、3D プリント 316L。

ステンレス鋼フライス加工：

エンドミル（ $\varnothing 12\text{mm}$ 、4 枚刃）、WC10%Ni（微粒子、D50 0.51 μm 、Cr3C2 0.5 wt %）、硬度 1800~2000 HV、PVD CrN コーティング（5 μm 、硬度 2200 HV、摩擦係数 0.2）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ねじれ角 40°、刃先半径 0.03 mm、研磨チップフルート (Ra < 0.1 μm) 。

テクノロジー

18 時間のボールミル処理、200MPa でのプレス、1420°C (10⁻⁴Pa、2 時間) での焼結、1350°C (120MPa、1.5 時間) での HIP、研削 (Ra 0.1 μm) 、 PVD CrN (300°C 、接着力 > 80N) 。

データの切り取り

速度 1000 m/分、送り 0.08 mm/刃、切削深さ 0.5 mm、水性クーラント (pH 8、10 L/分)。

テストデータ

寿命 1000 分 (HSS 200 分)、Ra 0.25 μm 、精度 ±0.008 mm 、切削力 300 N (25%削減)、
摩耗 < 0.04 mm³/h、構成刃先なし。

選択に関する推奨事項

WCNi (10 wt%) + CrN 、 Ø 12 mm 4 エッジフライスカッター、ねじれ角 40°、ウェットカット + 定期クリーニング。

3D プリント 316L 仕上げ:

ボールエンドミル (Ø 6 mm、2 枚刃) 、 WC8%Co (超微粒子、D50 0.2 ~ 0.5 μm 、 VC 0.5 wt%) 、硬度 2000 ~ 2200 HV、PVD TiAlN + CrN コーティング (5 μm 、硬度 3200 HV、摩擦係数 0.2) 。ボールエンド半径 3 mm、ねじれ角 35°、刃先半径 0.02 mm、研磨溝 (Ra < 0.1 μm) 。

テクノロジー

ボールミル処理 20 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400°C (10⁻⁵ Pa、2.5 時間)、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、研削 (Ra 0.1 μm) 、 PVD TiAlN + CrN (350°C、接着力 > 100 N) 。

データの切り取り

速度 1200 m/分、送り 0.03 mm/歯、切削深さ 0.2 mm、MQL (0.1 L/h)。

テストデータ

寿命 1200 分 (HSS 250 分)、Ra 0.15 μm (初期 Ra 15 μm) 、精度 ±0.005 mm、切削力 250 N (29% 削減)、摩耗 < 0.04 mm³/h、目詰まりなし。

選択に関する推奨事項

超微粒子 WC + TiAlN + CrN 、 Ø 6 mm 2 枚刃ボールエンドミル、ねじれ角 35°、 MQL + レイヤードリリング。

パフォーマンス

寿命: 1000 ~ 2000 分、精度: ±0.005 ~ 0.008 mm。

場合

加工射出成形金型 (316L)、速度 1000m/分、寿命 1800 分、 Ra 0.2 μm 。

エネルギー機器:

材質: 高温合金 (GH4169)、CFRP。

ナイフ:

CFRP フライス加工: WC8%Co フライスカッター (Ø 10 mm、DLC 3 μm) 、速度 2000 m/分、寿命 1500 分、剥離なし。

性能: 寿命は 1000 ~ 2000 分、剥離/欠けなし。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

事例：風力タービンブレード（CFRP）の加工、速度 1500m/分、寿命 2000 分。

6. 最適化の提案

材料の最適化：

チタン合金：超微粒子 WC（D50 0.2~0.5 μm ）、Co 6 wt %、AlTiN 4 μm 、耐熱温度 1100°C。

ステンレス鋼：WCNi（10 wt %）、Cr3C2 0.5 wt %、CrN 5 μm 、耐食性 <0.01 mm/y。

高温合金：中粗粒 WC（12 μm ）、Co 12 wt %、TiAlN 4 μm 、KIC >14 MPa·m^{1/2}。

CFRP：超微粒子 WC（0.2~0.5 μm ）、Co 8 wt %、DLC 3 μm 、摩擦 <0.08。

3D プリント金属：超微粒子 WC（0.2~0.5 μm ）、Co 8 wt %、TiAlN+CrN 5 μm 、精度 $\pm 0.005\text{ mm}$ 。

汎用：Cr3C2/VC 0.5 wt %、硬度が 510% 増加。

プロセス最適化：

焼結：HIP 1350°C、120 MPa、気孔率 <0.001%、一貫性が 10% 増加。

研削：CNC グラインダー、ダイヤモンド研削ホイール（58 μm ）、刃先半径 <5 μm 、Ra <0.1 μm 。

コーティング：

AlTiN（4 μm 、350 °C、バイアス 100V）、耐熱性が 20% 向上。

CrN（5 μm 、300 °C、バイアス 80V）、耐食性が 30% 向上しました。

DLC（3 μm 、300°C、バイアス 120V）、摩擦低減 50%。

3D プリント：複雑なツール（内部冷却チャネルなど）の SLM 成形、サイクル時間が 20% 短縮、精度は $\pm 0.01\text{ mm}$ 。

機器の最適化：

焼結炉：温度制御 $\pm 3^\circ\text{C}$ 、真空 10^{-5} Pa 。

CNC 研削盤：ダイヤモンド研削ホイール、偏差 $\leq \pm 0.005\text{ mm}$ 。

コーティング装置：蒸着速度 12 $\mu\text{m/h}$ 、厚さ偏差 $\leq \pm 0.1\mu\text{m}$ 。

作業条件の適応：

チタン合金：ドライカット、AlTiN コーティング、速度 800 ~ 1200 m/分、主偏向角 75°。

ステンレス鋼：湿式切削、CrN コーティング、速度 600~1000m/分、ねじれ角 40°。

高温合金：内部冷却（20 bar）、TiAlN コーティング、速度 500~800 m/分、トップ角度 135°。

CFRP：ドライカット、DLC コーティング、速度 1500 ~ 2000 m/分、千鳥歯。

3D プリント金属：MQL (0.1 L/h)、TiAlN+CrN コーティング、速度 1000~1200 m/分、ボールエンド ツール。

テストと検証：

微細構造：SEM（粒径 0.22 μm ）、EBSD（粒界応力 <5%）。

性能：ASTM G65（摩耗率 <0.030.05 mm³/h）、高温硬度 (>1200 HV、900°C)。

切断テスト：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

切断力：200550 N（2033%減少）。
寿命：800～2000 分（4.88 倍増加）。
表面：Ra 0.15～0.3 μm 、精度 $\pm 0.005\sim 0.01\text{ mm}$ 。
破損：VB <0.10.2 mm、欠け/剥離なし。

7. 規格と仕様

GB/T 183762014 :多孔度 <0.01%、均一性 >95%。

GB/T 38502015 :密度 14.5～15.0 g/ cm^3 、偏差 $\pm 0.1\text{ g/ cm}^3$ 。

GB/T 38512015 : 曲げ強度 1.8～ 2.8GPa 。

GB/T 79972017 :硬度 1400～2200 HV、偏差 < $\pm 50\text{ HV}$ 。

ASTM G 65 :摩耗率<0.05 mm^3/h 。

ISO 6508 :硬度試験、偏差 < $\pm 50\text{ HV}$ 。

ISO 1832 :工具形状、刃先偏差 < $\pm 0.01\text{ mm}$ 。

ISO 8688 :工具寿命テスト、切削時間 >500 分。

8. 結論

超硬合金高速切削工具は、材料（超微粒子 WC 0.2～0.5 μm 、低 Co 68 wt%、TiAlN / CrN /DLC コーティング 35 μm ）と高度な製造プロセス（HIP 焼結 1350°C、120 MPa、PVD コーティング 300～400°C）の最適化により、高硬度（1800～2200 HV）、耐摩耗性（摩耗損失 <0.03 ～ 0.05 mm^3/h ）、高温赤色硬度（800～1000°C）、切削安定性（寿命 800～2000 分）を実現します。この工具は、航空宇宙（チタン合金、ニッケル基合金、CFRP）、自動車（高張力鋼）、金型（ステンレス鋼、3D プリント金属）、エネルギー（CFRP）などの分野に適しており、切削速度は 500～2000 m/分、加工効率は 50～100%向上、精度は $\pm 0.005\sim 0.01\text{ mm}$ 、Ra は 0.15～0.4 μm です。超微粒子、複合コーティング、3D プリント、精密研削を最適化することで、コストをさらに削減し（1 個あたり 10 万 500 元）、性能を向上させることができます。課題は、加工の難しさ（ダイヤモンド研削コストが 20%増加）とコーティングの密着性（80 N 以上が必要）にあります。

CTIA GROUP LTD は、ナノ WC 粉末（D50 0.2～0.5 μm ）、HIP 焼結（気孔率<0.001%）、多層 PVD コーティング（TiAlN + CrN、57 μm ）を採用し、航空宇宙（寿命> 1500 分）、自動車（効率 30%向上）、金型加工（精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ）などのニーズを満たす高性能旋削工具、フライスカッター、ドリルを開発しています。製品は SEM、ASTM G65、ISO 1832 によって検証されており、安定した性能を確保しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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：

超硬ボールエンドミル

1. 概要

超硬ボールエンドミルは、タングステン系超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）をカッター本体または刃材に使用したフライス加工工具です。カッターヘッドは球面形状で、複雑な三次元面、キャビティ、金型、精密部品の加工に適しています。高硬度（HV1600～2000）、優れた耐摩耗性、高温安定性（600～800℃の保持強度）により、鋼、鋳鉄、ステンレス鋼、アルミニウム合金、耐熱合金の加工に適しており、航空宇宙、自動車、金型製造、医療業界における高精度（IT6～IT7）・高品質表面加工のニーズを満たします。

1. 材料と製造

素材構成：

炭化タングステン（WC、80～90%含有）とバインダー（Co、Ni など、5～15%含有）を主成分とし、耐摩耗性を向上させるために TiC や TaC が添加されています。Co 含有量が多い（WC-10Co など）と靱性が向上し、断続切削に適しています。Ni 基合金は耐食性に優れ、湿式加工に適しています。

製造工程：

粉末冶金

WC と Co の粉末（粒径 0.4～ 1.5 μ m ）を混合し、金型をプレス（圧力 300～500MPa）し、1350～1450℃で真空焼結して硬度 HV1700～1900 を実現します。

精密研削

球状カッターヘッドと螺旋溝はダイヤモンド砥石で加工され、刃先の鋭さは<5 μ m、表面粗さ Ra<0.2 μ m で、切削精度とスムーズな切削片除去を保証します。

コーティング技術

TiAlN など）の適用 厚さ 2～ 4 μ m の超硬合金（AlCrN 、 DLC）を使用すると、摩擦係数を 0.15～0.3 に低減し、工具寿命を 50～100%延長できます。

利点

ハイスボールエンドミルと比較すると、超硬ボールエンドミルは切削速度が 2～3 倍（50～200 m/分）高く、寿命は 3～5 倍長くなります。

3. 種類と用途

標準ボールエンドミル

直径 2～20mm、2～4 枚刃、自動車ランプ金型などの金型キャビティおよび曲面加工に適しています（精度 IT7）。

ロングネックボールエンドミルカッター

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

高アスペクト比（ $L/D > 5$ ）、航空機ブレード金型（深さ 50～100mm）などの深いキャビティ加工に使用されます。

マイクロボールエンドミル

直径 0.1～2mm、医療用インプラントなどの精密加工に適しています（表面粗さ $Ra < 0.2\mu m$ ）。

高硬度ボールエンドミルカッター

加工硬度 HRC50～65 の材料で、金型鋼や高温合金に適しています。

アプリケーション例:

航空宇宙：チタン合金タービンブレードの加工、切断速度 80 m/分、許容差 $< 5\mu m$ 。

自動車産業：プラスチック金型の表面をフライス加工します。年間生産量は 500 万個以上、工具寿命は 1 刃あたり 20,000 個です。

医療業界：整形外科用インプラントの加工、表面粗さ $Ra < 0.1\mu m$ 、精度 IT6。

4. 技術的特徴

高効率：切削速度 50～200 m/分、送り速度 0.02～0.2 mm/歯、加工効率が 30～50% 向上します。

高精度：寸法公差 $< 5\mu m$ 、表面粗さ $Ra 0.2 \sim 0.4\mu m$ 、ISO 1832 規格に準拠。

耐久性：コーティングされたボールエンドミルの寿命は 5,000 ～ 10,000 個で、工具交換頻度は 50% 削減されます。

リサイクル性：廃棄工具は亜鉛溶解または化学的方法によってリサイクルでき、タングステン回収率は 90% 以上、コストは 30 ～ 40% 削減されます。

5. 開発動向

インテリジェントな最適化

AI と組み合わせることでツールヘッド半径（R0.5～R10）と切削パスを最適化し、加工誤差を 25% 削減します。

グリーン製造

環境への影響を軽減するために、低 Co（ $< 5\%$ ）セメントカーバイドの研究開発を行い、電気化学リサイクル技術を推進して廃液排出量を 60% 削減します。

高度なコーティング

TiAlN /DLC などを開発し、耐摩耗性を 60% 向上させ、耐用年数を 2 倍に延ばします。高性能設計

最適化されたねじれ角（ $30 \sim 40^\circ$ ）とチップ溝により切削力が 20% 低減し、高速・ドライ加工に適しています。

超硬ボールエンドミルは、高硬度、耐摩耗性、高精度を特長としており、複雑な表面加工や精密加工の中核ツールとなっており、航空宇宙、自動車、金型、医療業界で広く使用されています。今後、インテリジェントな最適化、グリーンリサイクル、先進的なコーティ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ング技術を通じて、超硬ボールエンドミルは加工効率をさらに向上させ、コストを削減し、持続可能な発展を支え、中国のハイエンド製造業の競争力強化に貢献していくでしょう。

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

en.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

超硬エンドミル

1. 概要

超硬エンドミルは、WC-Co、WC-Ni などのタングステン系超硬合金を刃体または刃材とした垂直フライス工具です。複数の刃先を有し、平面、溝、段差、キャビティ、複雑な曲面などの加工に用いられます。高硬度（HV1600～2000）、優れた耐摩耗性、高温安定性（600～800℃の保持強度）を特徴とし、鋼、鋳鉄、ステンレス鋼、アルミニウム合金、耐熱合金などの加工に適しており、航空宇宙、自動車、金型製造、精密機械産業における高精度（IT6～IT8）・高効率加工のニーズを満たしています。

2. 材料と製造

材料構成

炭化タングステン（WC、80～90%含有）とバインダー（Co、Ni など、5～15%含有）を主成分とし、耐摩耗性を向上させるために TiC や TaC が添加されています。Co 含有量が多い場合（WC-10Co など）は靱性が向上し、断続切削に適しています。Ni 基合金は耐食性に優れ、湿式加工に適しています。

製造工程

粉末冶金: WC と Co の粉末（粒径 0.5～2μm）を混合し、プレス成形（圧力 300～500MPa）し、1350～1450℃で真空焼結すると、硬度は HV1700～1900 に達します。

精密研削: ダイヤモンド研削ホイールを使用してブレードと螺旋溝を加工します。エッジの鋭さは <5μm、表面粗さは Ra <0.2μm で、スムーズなチップ排出を保証します。

TiAlN など)を適用する AlCrN、厚さ 2～5μm の TiSiN)を使用することで、摩擦係数を 0.2～0.3 に低減し、工具寿命を 50～100%延長できます。

利点: 超硬エンドミルは HSS エンドミルに比べて 2～4 倍速く切削し (50 ～ 250 m/分)、3 ～ 5 倍長持ちします。

3. 種類と用途

超硬フラットエンドミル

平面・溝加工用、自動車用金型キャビティ（深さ 10～50mm、精度 IT7）に最適です。

超硬ラウンドノーズエンドミル

アークブレードは曲面や輪郭加工に適しており、IT6 の精度で航空タービンブレードに使用されます。

超硬ボールノーズエンドミル

表面粗さ Ra<0.4μm の医療用インプラント金型などの複雑な 3D 表面の加工。

超硬荒加工エンドミル

大きなねじれ角（35～45°）と波形の刃先は、アルミニウム合金の胴体部品などの材料を

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

効率的に除去するのに適しています。

アプリケーション例:

自動車産業: ギアボックスハウジングの溝加工。年間生産量 1,000 万個以上、工具寿命は 5 万個/刃。

航空宇宙: チタン合金ケーシングのフライス加工、切削速度 100 m/分、許容差 $<8\mu\text{m}$ 。

金型製造: 高硬度金型鋼 (HRC50~60) を加工すると、工具寿命が 40% 向上します。

2. 技術的特徴

高効率: 切削速度 50~250 m/分、送り速度 0.05~0.3 mm/刃、加工効率が 40~60% 向上。

高精度: 寸法公差 $<8\mu\text{m}$ 、表面粗さ $Ra0.4\sim0.8\mu\text{m}$ 、ISO 1832 規格に準拠。

耐久性: コーティングされたエンドミルの寿命は 5,000 ~ 15,000 個で、工具交換頻度は 50% 削減されます。

リサイクル性: 廃棄工具は亜鉛溶解または化学的方法によってリサイクルでき、タングステン回収率は 90% 以上、コストは 30 ~ 40% 削減されます。

5. 開発動向

インテリジェント最適化: AI と組み合わせてエッジ数 (2~6 エッジ) と切削パラメータを最適化し、加工誤差を 30% 削減します。

グリーン製造: 環境への影響を軽減するために低 Co ($<5\%$) セメントカーバイドを研究開発し、イオン液体リサイクル技術を推進して廃液排出量を 60% 削減します。

耐摩耗性を 60% 向上し、耐用年数を 2 倍に延ばすナノ複合コーティング (TiAlN/DLC など) を開発します。

高性能設計: 最適化されたねじれ角 ($30\sim45^\circ$) とチップ溝により切削力が 20% 低減され、高速加工に適しています。

超硬エンドミルは、高硬度、耐摩耗性、高精度を特徴とするフライス加工のコアツールとなり、航空宇宙、自動車、金型製造などの業界で広く使用されています。今後、インテリジェントな最適化、グリーンリサイクル、先進的なコーティング技術を通じて、超硬エンドミルは加工効率をさらに向上させ、コストを削減し、持続可能な発展を支え、中国のハイエンド製造業の競争力強化に貢献していくでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

超硬多刃フライスカッター

1.超硬多刃フライスカッター

超硬多刃フライスカッターは、WC-Co、WC-Ni などのタングステン系超硬合金をカッター本体または刃材とし、複数の刃を持つ切削工具です。平面、溝、段差、曲面、複雑な面のフライス加工に広く使用されています。高硬度（HV1600～2000）、優れた耐摩耗性、高温安定性（600～800℃の強度保持）により、鋼、鋳鉄、ステンレス鋼、アルミニウム合金、耐熱合金の加工に適しており、航空宇宙、自動車、金型製造、エネルギー産業における高精度（IT6～IT8）・高効率加工のニーズを満たしています。

超硬合金多刃フライスカッターの材料と製造

材質構成: 炭化タングステン（WC、80～90%）とバインダー（Co、Ni など、5～15%）を主成分とし、耐摩耗性を高めるために TiC と TaC を添加しています。Co 含有量が多い（WC-10Co など）と靱性が向上し、断続フライス加工に適しています。Ni 基合金は耐腐食性に優れ、湿式加工に適しています。

製造工程:

粉末冶金: WC と Co の粉末（粒径 0.5～2μm）を混合し、プレス成形（圧力 300～500MPa）し、1350～1450℃で真空焼結すると、硬度は HV1700～1900 に達します。

精密研削: CBN またはダイヤモンド研削ホイールを使用して歯と溝を加工します。エッジの鋭さは<5μm、表面粗さは Ra<0.2μm で、スムーズなチップ排出を保証します。

TiAlN など)を適用する AlCrN、厚さ 2～5μm の TiSiN)を使用することで、摩擦係数を 0.2～0.3 に低減し、工具寿命を 50～100%延長できます。

利点: 高速度鋼フライスカッターと比較すると、超硬多歯フライスカッターの切削速度は 2 ～ 4 倍 (50 ～ 250 m/分) 高く、寿命は 3 ～ 5 倍長くなります。

超硬多刃フライスカッターの種類と用途

超硬多刃エンドミル

多歯設計（4～8 歯）は、自動車用金型キャビティ（深さ 10～50mm、精度 IT7）などの側面および溝加工に適しています。

超硬多刃正面フライスカッター

効率的な平面加工が可能な大口径・多歯（6～12 歯）で、航空アルミ合金製翼パネル（表面粗さ Ra<0.8μm）に最適です。

超硬多刃丸刃フライスカッター

アークブレードは曲面加工に適しており、IT6 の精度でタービンブレードに使用されます。

超硬多刃キー溝フライスカッター

風力タービンの主軸などの高精度キー溝の加工（スロット幅 5～20mm、公差<10μm）。

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

アプリケーション例:

自動車産業: エンジンシリンダーヘッドプレーンの加工。年間生産量は 2,000 万個以上、工具寿命は 1 刃あたり 5 万個。

航空宇宙: チタン合金ケーシングのフライス加工、切削速度 100 m/分、表面粗さ $Ra < 0.4 \mu\text{m}$ 。

金型製造: 高硬度金型鋼 (HRC50~60) を加工すると、工具寿命が 40% 向上します。

超硬多刃フライスカッターの技術的特徴

高効率: 切削速度 50~250 m/分、送り速度 0.05~0.3 mm/刃、加工効率が 40~60% 向上。

高精度: 寸法公差 $< 8 \mu\text{m}$ 、表面粗さ $Ra 0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 、ISO 1832 規格に準拠。

耐久性: コーティングされたフライスカッターの寿命は 5,000 ~ 15,000 個で、工具交換の頻度は 50% 削減されます。

リサイクル性: 廃棄工具は亜鉛溶解または化学的方法によってリサイクルでき、タングステン回収率は 90% 以上、コストは 30 ~ 40% 削減されます。

超硬合金多刃フライスカッターの開発動向

インテリジェントな最適化

AI による歯数 (4~12 歯) と切削パラメータの最適化と組み合わせることで、加工誤差を 30% 削減します。

グリーン製造

環境への影響を軽減するために低 Co ($< 5\%$) の超硬合金を開発し、イオン液体リサイクル技術を推進して廃液排出量を 60% 削減します。

高度なコーティング

TiAlN/Si3N4 などを開発し、耐摩耗性を 60% 向上させ、耐用年数を 2 倍に延ばします。

モジュラー設計

スローアウェイチップとカッターヘッドの標準化 (ISO 1832) を推進し、在庫コストを 20% 削減します。

超硬多刃フライスカッターは、高硬度、耐摩耗性、高精度を特徴とし、フライス加工の中核ツールとなっており、航空宇宙、自動車、金型製造などの業界で広く使用されています。今後、インテリジェントな最適化、グリーンリサイクル、先進的なコーティング技術を通じて、超硬多刃フライスカッターは加工効率をさらに向上させ、コストを削減し、持続可能な発展を支援し、中国のハイエンド製造業の競争力強化に貢献していくでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

超硬ソリッドドリル

超硬ソリッドドリルの概要

超硬ソリッドドリルは、タングステン基超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）を主材料とする穴あけ工具で、穴あけ、リーマ加工、リーミングなどの穴加工に広く使用されています。高硬度（HV1600～2000）、優れた耐摩耗性、高温安定性（600～800℃でも強度を維持）を備え、鋼、鋳鉄、ステンレス鋼、アルミニウム合金、耐熱合金の加工に適しており、航空宇宙、自動車、金型製造、エネルギー産業における高精度（IT7～IT9）・高効率穴加工のニーズを満たしています。

超硬合金ドリルビットの材料と製造

材料構成

炭化タングステン（WC、85～95%含有）とバインダー（Co など、5～12%含有）を主成分とし、耐摩耗性を向上させるために TiC や VC が添加されています。Co 含有量が多い（WC-10Co など）と靱性が向上し、断続切削に適しており、Co 含有量が少ない（WC-6Co など）と硬度が向上し、高速加工に適しています。

製造工程

粉末冶金: WC と Co の粉末（粒径 0.4～1.5μm）を混合し、プレス成形（圧力 300～500MPa）し、1350～1450℃で真空焼結すると、硬度は HV1800～2000 に達します。

精密研削: ダイヤモンド研削ホイールを使用してドリルビットのエッジと螺旋溝を加工します。エッジの鋭さは<5μm、表面粗さ Ra は<0.2μm で、スムーズなチップ排出を保証します。

TiAlN などの適用 厚さ 2～4μm の AlCrN 系コーティングにより、摩擦係数は 0.2～0.3 に低減し、耐摩耗性は 50～80%向上します。

利点

ハイスドリルと比較すると、超硬ソリッドドリルは切削速度が 2 ～ 3 倍（30 ～ 150m/分）高く、寿命は 4 ～ 6 倍長くなります。

超硬ソリッドドリルビットの種類と用途

超硬ソリッドツイストドリル

標準スパイラル設計、自動車エンジンシリンダーブロック穴（直径 5～50mm、精度 IT8）などの一般的な穴加工に適しています。

超硬ソリッドセンタードリル

航空部品の位置決め、下穴あけ、センター穴加工に使用。精度 IT7。

超硬ソリッド深穴ドリル

高アスペクト比（L/D>5）、内部冷却チャネルを備え、油圧バルブボディの深穴（深さ 100

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

〜500mm）を加工します。

超硬一体型ステップドリル

多段階の穴加工を一度に完了し、金型部品に適しており、効率が 30% 向上します。

超硬合金一体型ドリルの応用事例：

自動車産業：ギアボックスハウジングの穴加工。年間生産量は 1 億個以上、ドリル寿命は 1 刃あたり 2 万穴。

航空宇宙：チタン合金ケーシングの穴あけ、切削速度 60 m/分、穴径許容差 $<10\mu\text{m}$ 。

エネルギー業界：風力タービンのスピンドルの穴を加工し、表面粗さ $Ra < 0.8\mu\text{m}$ 、寿命が 50% 増加しました。

超硬一体型ドリルビットの技術的特徴

高効率：切削速度 30〜150 m/分、送り速度 0.05〜0.3 mm/回転、加工効率が 40% 向上。

高精度：開口公差 $<8\mu\text{m}$ 、真円度誤差 $<5\mu\text{m}$ 、ISO 8015 規格に準拠。

耐久性：コーティングされたドリルビットの寿命は 10,000 〜 20,000 個の穴あけが可能で、工具交換頻度が 60% 削減されます。

リサイクル性：使用済みのドリルビットは、亜鉛溶解または化学的方法によってリサイクルでき、タングステン回収率は 90% を超え、コストは 30〜40% 削減されます。

超硬合金一体型ドリルの開発動向

インテリジェント設計：AI と組み合わせ、ねじれ角（25〜35°）と切削パラメータを最適化することで、加工誤差が 25% 削減されます。

グリーン製造：環境への影響を軽減するために低 Co（ $<5\%$ ）セメントカーバイドを研究開発し、電気化学リサイクル技術を推進して廃液排出量を 60% 削減します。

耐摩耗性を 60% 向上し、耐用年数を 2 倍に延ばすナノ多層コーティング（TiAlN/DLC など）を開発します。

内部クーラント技術：最適化された内部クーラントチャネル設計（圧力 10 〜 20 bar）、切削温度が 30% 低下、乾式または最小限の潤滑処理に適しています。

超硬ソリッドドリルは、高硬度、耐摩耗性、高精度という特長から、穴加工に広く利用されており、航空宇宙、自動車、エネルギー産業などで広く使用されています。今後、インテリジェント設計、グリーンリサイクル、先進的なコーティング技術により、超硬ソリッドドリルは加工効率をさらに向上させ、コストを削減し、持続可能な発展を支え、中国のハイエンド製造業の競争力強化に貢献していくでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

超硬外径旋削工具

超硬外径旋削工具の概要

超硬外径旋削工具は、工具ヘッド材料としてタングステンベースの超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）を使用した切削工具で、外径の円筒面、端面、段差、溝の旋削に広く使用されています。高硬度（HV1600-2000）、優れた耐摩耗性、高温安定性（600-800℃の強度保持）により、炭素鋼、合金鋼、ステンレス鋼、鋳鉄、高温合金の加工に適しており、自動車、航空宇宙、金型製造、一般機械産業の高精度（IT6-IT8）・高効率加工のニーズを満たしています。

超硬合金外径旋削工具の材料と製造

材質構成: 炭化タングステン（WC、80～90%を占める）とバインダー（Co、Ni など、5～15%を占める）を主成分とし、TiC や TaC を添加して耐摩耗性を高めています。Co は靱性を向上させ（荒加工の場合は WC-8Co など）、Ni は耐食性を向上させます（湿式切削に適しています）。

製造工程:

粉末冶金: WC と Co の粉末（粒径 0.5～2μm）を混合し、プレス成形（圧力 200～400MPa）し、1350～1450℃で真空焼結すると、硬度は HV1700～1900 に達します。

精密研削: ダイヤモンド研削ホイールを使用してカッターヘッドを加工します。刃先の鋭さは 5μm 未満、表面粗さは Ra 0.2μm 未満で、切断精度を保証します。

TiN など)を適用する 厚さ 2～6μm の TiCN、Al₂O₃ などのコーティングを施すことで、摩擦係数を 0.2～0.3 に低減し、工具寿命を 50～80%延長します。

利点: 高速度鋼旋削工具と比較すると、超硬旋削工具の切削速度は 2 ～ 4 倍 (50 ～ 200 m/分) 高く、寿命は 3 ～ 6 倍長くなります。

超硬合金外径旋削工具の種類と用途

超硬外径旋削工具 -インデックス可能旋削工具

ブレードは交換可能で汎用性が高く、自動車のクランクシャフト（直径 50～200mm、精度 IT7）の加工など、大量生産に適しています。

超硬外径旋削工具 -溶接旋削工具

カッターヘッドは鋼製カッター本体に溶接されており、コストが低く、ポンプ本体の外側を加工する中小規模の加工工場に適しています。

超硬外径旋削工具 -一体型旋削工具

カッターヘッドとカッター本体が一体化しており、航空タービンシャフト（直径 20～100mm、精度 IT6）などの高精度加工に適しています。

アプリケーション例:

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

自動車産業：エンジンシリンダーの加工。年間生産量は 5,000 万個以上、工具寿命は 1 刃あたり 1 万個。

航空宇宙：チタン合金タービンディスクの旋削、切削速度 80 m/分、表面粗さ $Ra < 0.8\mu\text{m}$ 。

金型製造：高硬度金型鋼（HRC50～60）を加工すると、工具寿命が 40% 向上します。

超硬合金外径旋削工具の技術的特徴

高効率：切削速度 50～200 m/分、送り速度 0.1～0.4 mm/回転、加工効率が 30～50% 向上。

高精度：寸法公差 $< 10\mu\text{m}$ 、表面粗さ $Ra 0.4 \sim 0.8\mu\text{m}$ 、ISO 1832 規格に準拠。

耐久性：コーティングされた旋削工具の寿命は 5,000 ～ 10,000 個に達し、工具交換頻度は 60% 削減されます。

リサイクル性：廃棄ブレードは亜鉛溶解または化学的方法によってリサイクルでき、タングステン回収率は 90% 以上、コストは 30～40% 削減されます。

超硬合金外径旋削工具の開発動向

インテリジェント最適化：AI と組み合わせることで切断パラメータ（主偏向角や切断深さなど）を最適化し、処理効率が 20% 向上します。

グリーン製造：環境への影響を軽減するために低 Co（ $< 5\%$ ）セメントカーバイドを研究開発し、廃液排出量を 50% 削減するために電気化学リサイクル技術を推進します。

耐摩耗性を 60% 向上させ、耐用年数を 2 倍に延ばすナノ複合コーティング（ TiAlN / Si_3N_4 など）を開発します。

モジュラー設計：インデックス可能インサートの標準化（ISO 1832）を促進し、工具在庫コストを 25% 削減します。

高硬度、耐摩耗性、高精度を特徴とする超硬合金外径旋削工具は、外径旋削加工の中核工具となり、自動車、航空宇宙、金型製造業界で広く利用されています。今後、インテリジェントな最適化、グリーンリサイクル、先進的なコーティング技術を通じて、超硬合金外径旋削工具は加工効率のさらなる向上、コスト削減、持続可能な発展を支援し、中国のハイエンド製造業の競争力強化に貢献していくでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

超硬ギアカッター

超硬ギア工具の概要

超硬歯車カッターは、タングステン基超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）を主材料とする特殊切削工具で、ホブ切り、シェーピング、シェーピング、研削などの歯車加工に広く使用されています。高硬度（HV1600～2000）、優れた耐摩耗性、高温赤色硬度（600～800℃でも高強度を維持）により、高強度鋼、合金鋼、ステンレス鋼などの材料の加工に適しており、自動車、航空宇宙、エネルギー、重機産業における高精度歯車（精度 ISO 4～6）のニーズを満たしています。

2.超硬歯車工具材料と製造

材料構成: 主に炭化タングステン（WC、80～90%）とバインダー（Co、Ni など、5～15%）で構成され、耐摩耗性を向上させるために少量の TiC と TaC が添加されています。Co 含有量が多いほど靱性が向上します（WC-10Co など）。Ni 基合金は耐腐食性に優れ、特殊な環境に適しています。

製造工程:

粉末冶金: WC、Co などの粉末（粒径 0.5～2μm）を混合し、成形（圧力 300～500MPa）し、真空または水素雰囲気中で 1350～1500℃で焼結して硬度 HV1800 を実現します。

精密研削: CBN 研削ホイールを使用して工具の歯のプロファイルを加工し、表面粗さ $Ra < 0.2\mu m$ 、刃先半径 $< 10\mu m$ で切削精度を確保します。

TiN など）を適用する TiAlN、厚さ 2～5μm の AlCrN コーティングにより、摩擦係数（0.2～0.4）を低減し、耐用年数を 50～100%延長します。

利点: 高速度鋼（HSS）と比較すると、超硬工具の寿命は 3 ～ 5 倍長く、切削速度は 2 ～ 3 倍高速です（100 ～ 300 m/分）。

超硬合金製歯車カッターの種類と用途

超硬ギアホブカッター

高い加工効率で平歯車やはすば歯車の荒加工および仕上げ加工に使用され、自動車のトランスミッションギア（モジュール 1 ～ 10）に適しています。

超硬ギアシェーピングカッター

航空ギアボックス用 ISO 5 精度の内歯車および特殊歯形状の加工。

超硬ギアシェーピングカッター

歯面は細かく加工されており、表面粗さは $Ra < 0.8\mu m$ で、高精度ギアの大量生産に適しています。

超硬ギア研削ナイフ

硬化歯面（HRC>60）は、CBN コーティングと組み合わせたセメント炭化物基板を使用して機械加工され、風力発電および高速鉄道ギア向けに ISO 3-4 の精度で加工されます。

アプリケーション例:

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

自動車産業：ギアボックスギアの加工。年間生産量は 1 億個以上、工具寿命は 1 刃あたり 10 万個。

航空宇宙：タービンエンジンギアの加工、モジュール 0.5~2、ISO 4 精度、切削抵抗 20% 削減。

超硬歯車の技術的特徴

高効率：切削速度 150~300m/分、送り速度 0.1~0.5mm/回転、加工効率が 40% 向上します。

高精度：歯形誤差 $<5\mu\text{m}$ 、歯ピッチ誤差 $<3\mu\text{m}$ 、DIN 3962 規格に準拠。

耐久性：コーティングされた超硬工具の寿命は 5,000 ~ 10,000 個に達し、工具交換頻度が 50% 削減されます。

法でリサイクルでき、タングステン回収率は 90% 以上、コストは 30~40% 削減されます。

超硬合金歯車の開発動向

インテリジェント設計：AI と組み合わせて歯の形状と切削パラメータを最適化することで、加工誤差が 30% 削減されます。

グリーン製造：環境への影響を軽減するために低 Co ($<5\%$) または Co フリーの超硬合金を開発し、イオン液体リサイクル技術を推進して廃液排出量を 60% 削減します。

耐摩耗性を 50% 向上し、耐用年数を 2 倍に延ばすナノ多層コーティング (TiAlN/DLC など) の研究開発。

付加製造：3D プリントされた超硬工具基板を検討し、複雑な歯の形状の製造コストを 20% 削減します。

超硬歯車切削工具は、その高硬度、耐摩耗性、高精度により歯車加工の中核工具となり、自動車、航空宇宙、エネルギー産業で広く利用されています。今後、インテリジェント設計、グリーンリサイクル、先進的なコーティング技術を通じて、超硬歯車切削工具はさらなる効率向上、コスト削減、持続可能な発展を支援し、中国のハイエンド製造業の国際競争力強化に貢献していくでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

超硬風力タービンギアカッター

超硬風力タービンギアカッターは、炭化タングステン（WC）ベースの超硬合金（WC 8594 重量%、Co 615 重量%）をベースにしています。精密研削と PVD / CVD コーティング（TiAlN など）により、AlCrN、46 μm は、高硬度（1800~2200 HV）、耐摩耗性（摩耗量<0.05 mm³/h、ASTM G65）、高温赤色硬度（800~1000℃、硬度>1200 HV）を実現します。風力タービンギア（42CrMo4、18CrNiMo76、HRC 5562、モジュール 1040）向けに特別に設計されており、ホブ加工、ギアシェーピング、ディスクミリング、ハードターニングに適しており、切削速度 100~500 m/分、寿命 500~2000 分、歯形精度 AGMA 1012、表面粗さ Ra 0.4~0.8 μm です。

この記事は、国家標準（GB/T 18376 2014、GB/T 7997 2017）および業界慣行に基づき、切削工具、製造プロセス、性能、用途、最適化の方向性について解説しています。CTIA GROUP LTD の高性能切削工具カスタマイズ能力を適度に推奨するものであり、新エネルギー電解セルおよび浸炭/脱炭プロセスとは一切関係ありません。

1. 超硬風力発電ギア工具の概要

1.1 超硬合金製風力タービンギアツールの定義と特性

超硬合金製風力タービンギアカッターは、超微粒子/中粗粒 WC（0.22μm）基材、PVD/CVD コーティング（TiAlN/AlCrN）、精密機械加工（歯形偏差<±0.005mm）により、風力タービンギアの高弾性率（1040）および高硬度（HRC 5562）の加工要件を満たしています。

カッターの特徴:

高硬度: 1800~2200 HV、耐摩耗性は高速度鋼（HSS、800 HV）の 5~10 倍優れています。

耐熱性: 800~1000℃、乾式・極少量潤滑（MQL）切削に適しています。

耐摩耗性: 摩耗率 <0.05 mm³/h、寿命 500 ~ 2000 分。

衝撃性: 曲げ強度 1.8~2.8 GPa、破壊靱性 KIC 1015 MPa·m^{1/2}。

用途: 風力ギア（遊星ギア、主軸ギア）、ギアボックス部品。

1.2 超硬風力タービンギアカッターの種類

ホブ: 粗/微動ホブ切り、速度 100~400 m/分。

ギアシェーピングカッター: 内歯・外歯加工、速度 150~300m/分。

ディスクミリングカッター: 歯溝ミリング、速度 200~500 m/分。

ハード旋削工具: ハード旋削（HRC 5562）、速度 80200 m/分。

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

1.3 超硬風力發電ギアツールの利点

効率：切削速度は HSS の 35 倍、効率は 30～50% 向上します。

寿命：コーティング工具の寿命は 500～2000 分（HSS 100～300 分）。

精度：歯形精度 AGMA 1012、Ra 0.4～0.8 μm 。

適応性：大きな弾性係数、ハード加工、乾式/湿式切削に適しています。

2. 超硬合金製風力発電ギア工具材料

2.1 原材料

超硬風力タービンギアツールベース：

WC：8594 重量%、粒径 0.22 μm 。

超微粒子（0.2～0.5 μm ）：硬度 2000～2200HV、微細加工可能。

中粗粒（12 μm ）：靱性 KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、荒加工。

Co：615 重量%。

低 Co（68 重量%）：硬度 1800～2200 HV、耐摩耗性が強い。

高 Co（1015 重量%）：曲げ強度 2.2～2.8GPa、耐衝撃性が良好。

添加剤：Cr₃C₂/VC（0.21 重量%）、硬度が 510% 増加しました。

超硬風力タービンギアツールコーティング：

TiAlN (PVD)：硬度 3000～3300 HV、耐熱性 900～1100°C、寿命が 30～50% 増加。

AlCrN (PVD)：硬度 3000HV、摩擦係数 0.3、ハード加工に適しています。

GC4240 (CVD)：硬度 2800HV、耐摩耗性に優れ、荒加工に適しています。

2.2 超硬合金製風力タービンギアカッターの傾斜構造

表面：低 Co（68 重量%）、超微粒子 WC（0.2～0.5 μm ）、硬度 2000～2200 HV。

コア：高 Co（1012 wt %）、中粗粒 WC（12 μm ）、KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

利点：耐摩耗性が 20～30% 向上し、耐衝撃性が 15～20% 向上し、ひび割れ確率が 20% 減少します。

準備：積層プレス+HIP 焼結（1350°C、120MPa）。

2.3 超硬合金製風力タービンギアツールの性能要件

硬度：1800～2200 HV（GB/T 79972017）。

曲げ強度：1.8～2.8 GPa（GB/T 38512015）。

破壊靱性：1015 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

耐摩耗性：摩耗速度 <0.05 mm^3/h （ASTM G65）。

熱伝導率：80100 W/m·K。

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

3. 超合金製風力タービンギアカッターの製造工程

3.1 粉末の調製

原材料: WC (D50 0.22 μm 、純度>99.9%)、Co (D50 12 μm)、Cr3C2/VC (D50 0.51 μm)。

ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO2 ボール、10:1)、300 rpm、1624 時間、粒子サイズ偏差 $\leq\pm 0.1\mu\text{m}$ 、均一性>95%。

3.2 形成

方法: 冷間等方圧プレス (CIP)。

パラメータ: 250~300 MPa、保持圧力 60 秒、鋼製鑄型 (偏差 $\leq\pm 0.05\text{mm}$)、ピレット密度 8.7~10.5 g/cm³。

結果: 寸法偏差 $\leq\pm 0.1\text{mm}$ 、ひび割れ率<1%。

3.3 焼結

方法: 真空焼結+HIP。

パラメータ:

脱蠟: 200~600°C、3°C/分、H2 雰囲気 (O2 <5 ppm)、 10^{-2}Pa 。

焼結: 1350~1450°C、 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{Pa}$ 、23 時間。

HIP: 1350°C、120MPa (Ar)、12 時間。

結果: 密度 14.815.0 g/cm³、多孔度 <0.001%、硬度 1800~2200 HV。

3.4 精密機械加工

研削: CNC グラインダー、ダイヤモンドホイール (510 μm)、3000 rpm、送り 0.01~0.05 mm/パス、歯形偏差 $\leq\pm 0.005\text{mm}$ 、Ra 0.1~0.2 μm 。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (13 μm)、800 rpm、Ra < 0.1 μm 。

3.5 コーティング

方法: PVD/CVD (Ti/Al/Cr ターゲット、>99.99%)。

パラメータ: TiAlN / AlCrN (46 μm)、 10^{-4}Pa 、300~450°C、バイアス 80~100 V、堆積速度 1 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。

結果: 接着力 >80 N、耐熱性 900~1100°C、寿命が 30~50% 増加。

3.6 検出

微細構造: SEM (粒径 0.22 μm)、XPS (偏差 $\leq\pm 0.1\text{wt}\%$)。

性能: 硬度偏差 $\leq\pm 50\text{HV}$ (ISO 6508)、摩耗量<0.05 mm³/h (ASTM G65)、曲げ強度 1.82.8

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GPa。

形状: CMM、齒形偏差 $< \pm 0.005 \text{ mm}$ (AGMA 1012)。

4. 超硬合金製風力タービンギアツールの応用シナリオ

超硬風力タービンギア切削工具は、風力タービンギア（モジュール 1040、HRC 5562）の効率的な加工のために、以下の作業条件での切削工具、プロセスパラメータ、テストデータ、および選択提案を提供します。

荒齒車ホブ加工（42CrMo4、HRC 55）：

作業条件: 材質 42CrMo4 (HRC 55)、モジュール 20、ギア径 $\varnothing 800 \text{ mm}$ 、荒加工。

ナイフ:

タイプ: ホブ ($\varnothing 200 \text{ mm}$ 、12 齒)。

マトリックス: WC12%Co (中粗粒、D50 $12 \mu\text{m}$ 、VC 0.5 wt %)、硬度 1600~1800 HV、KIC $1415 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

コーティング: CVD GC4240 ($6 \mu\text{m}$ 、硬度 2800HV、耐熱性 1000°C)。

形状: 圧力角 20° 、齒先半径 0.5 mm 、齒面研磨 ($Ra < 0.1 \mu\text{m}$)。

プロセス: ボールミル処理 22 時間、CIP 300 MPa、焼結 1450°C (10^{-5} Pa 、3 時間)、HIP 1350°C (120 MPa、2 時間)、研削 (齒形偏差 $< \pm 0.005 \text{ mm}$)、CVD GC4240 (450°C 、接着力 $> 80 \text{ N}$)。

切削パラメータ: 速度 200 m/分 、送り 2 mm/r 、切削深さ 5 mm 、MQL (0.2 L/h)。

テストデータ:

寿命: 800 分 (HSS 200 分、4 倍長い)。

精度: AGMA グレード 10、 $Ra 0.8 \mu\text{m}$ 。

切削力: 1200 N (HSS 1500 N 、20% 低減)。

摩耗損失: $VB < 0.3 \text{ mm}$ 、 $< 0.05 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

選択推奨事項: 中粗粒 WC + 高 Co (12 wt %) + GC4240、 $\varnothing 200 \text{ mm}$ ホブ、MQL + 齒面摩耗の定期検査。

精密ギアホブ加工（18CrNiMo76、HRC 60）：

作業条件: 材質 18CrNiMo76 (HRC 60)、モジュール 15、ギア径 $\varnothing 600 \text{ mm}$ 、微細加工。

ナイフ:

タイプ: ホブ ($\varnothing 180 \text{ mm}$ 、10 齒)。

マトリックス: WC6%Co (超微粒子、D50 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.5 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD TiAlN ($4 \mu\text{m}$ 、硬度 3300HV、耐熱性 1100°C)。

形状: 圧力角 20° 、齒先半径 0.3 mm 、切れ刃半径 0.02 mm 。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400°C (10^{-5} Pa 、2.5 時間)、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、研削 ($Ra 0.1 \mu\text{m}$)、PVD TiAlN (350°C 、接着力 $> 100 \text{ N}$)。

切断パラメータ: 速度 300 m/分 、送り 0.5 mm/r 、切断深さ 1 mm 、ドライ切断。

テストデータ:

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

寿命:1200 分 (HSS 250 分、4.8 倍長い)。

精度:AGMA グレード 12、Ra 0.4 μm 。

切削力: 800 N (HSS 1000 N、20%低減)。

摩耗損失: VB <0.2 mm、<0.04 mm³/h。

選択推奨事項:超微粒子 WC + 低 Co (6 wt %) + TiAlN、 $\varnothing$ 180 mm ホブ、ドライカット + 高精度工作機械。

ギアシェーピング (42CrMo4、HRC 58) :

作業条件: 材質 42CrMo4 (HRC 58)、モジュール 25、内歯車 $\varnothing$ 1000 mm。

ナイフ:

タイプ: ギアシェーピングカッター ($\varnothing$ 150mm、8 歯)。

マトリックス: WC10%Co (微粒子、D50 0.51 μm 、Cr3C2 0.5wt %)、硬度 1800~2000 HV。

コーティング: PVD AlCrN (5 μm 、硬度 3000HV、摩擦 0.3)。

形状: 圧力角 20°、切れ刃半径 0.03mm、歯面研磨 (Ra < 0.1 μm)。

処理: ボールミル処理 18 時間、CIP 280 MPa、焼結 1420°C (10⁻⁴ Pa、2 時間)、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、研削 (Ra 0.1 μm)、PVD AlCrN (400°C、接着力 >80 N)。

切断パラメータ: 速度 200 m/分、送り 0.1 mm/ストローク、切削深さ 2 mm、ウェット切断 (10 L/分)。

テストデータ:

寿命:1000 分(HSS300 分、3.3 倍増加)。

精度:AGMA グレード 11、Ra 0.6 μm 。

切削力: 1000 N (HSS 1300 N、23%削減)。

摩耗損失: VB <0.25 mm、<0.05 mm³/h。

選択の提案:微粒子 WC + AlCrN、 $\varnothing$ 150 mm ギアシェーピングカッター、ウェット切削 + 低振動工作機械。

ハード旋削加工 (18CrNiMo76、HRC 62) :

作業条件: 材質 18CrNiMo76 (HRC 62)、モジュール 15、ギア径 $\varnothing$ 500 mm、微細加工。

ナイフ:

タイプ:ハード旋削工具(インデックス可能インサート、CNMG120408)。

マトリックス: WC6%Co (超微粒子、D50 0.2~ 0.5 μm 、Cr3C2 0.5wt %)、硬度 2000 ~2200 HV。

コーティング: PVD TiAlN (4 μm 、硬度 3300HV、耐熱性 1100°C)。

形状: 主すくい角 75°、刃先傾斜角 6°、刃先半径 0.02mm、3D チップブレーカー。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400°C (10⁻⁵ Pa、2.5 時間)、HIP 1350°C (120 MPa、1.5 時間)、研削 (エッジ半径 <5 μm)、PVD TiAlN (350°C、接着力 >100 N)。

切断パラメータ: 速度 150 m/分、送り 0.1 mm/r、切断深さ 0.5 mm、ドライ切断。

テストデータ:

寿命:1500 分 (HSS 200 分、7.5 倍増加)。

精度:AGMA グレード 12、Ra 0.4 μm 、 $\pm$ 0.01 mm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

切削力：600 N（HSS 800 N、25%低減）。

摩耗損失：VB <0.15 mm、<0.04 mm³/h。

選択推奨事項:超微粒子 WC + TiAlN 、 CNMG120408MF、ドライカット + 高剛性工作機械。

5. 超硬合金製風力タービンギアツールの性能分析

パラメータ	超硬工具	高速度鋼 (HSS)
硬度 (HV)	18002200	800900
曲げ強度 (GPa)	1.82.8	34
靱性 (KIC)	1015 MPa·m ^{1/2}	2050 MPa·m ^{1/2}
耐摩耗性 (mm ³ /h)	<0.05	0.20.5
耐熱性 (°C)	8001000	500600
切断速度 (m/分)	100500	20100
寿命 (分)	5002000	100300
Ra (μm)	0.40.8	1.02.0

ハイライト:

耐摩耗性: 超微粒子 WC+TiAlN / AlCrN 、摩耗 <0.05 mm³/h、耐用年数が 37.5 倍に増加。

耐熱性: 800~1000°C、硬度>1200 HV、乾式切削。

効率: 速度 100500 m/分、効率が 3050% 増加しました。

精度: AGMA 1012 グレード、Ra 0.40.8 μm 。

6. 超硬風力タービンギアツールの最適化の提案

材料の最適化:

荒加工: 中粗粒 WC (12μm) 、 Co12wt %、GC4240 (6μm) 、耐摩耗性が 20% 向上。

仕上げ: 超微粒子 WC (0.2~ 0.5μm) 、 Co 6wt %、TiAlN (4μm) 、精度±0.01mm。

ギア形状: 微粒子 WC (0.51μm) 、 AlCrN (5μm) 、耐衝撃性が 15% 向上。

添加剤: Cr3C2/VC 0.5 wt %、硬度が 510% 増加しました。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1350°C、120 MPa、気孔率<0.001%、耐摩耗性が 15% 向上。

研削: CNC 研削盤、ダイヤモンド研削ホイール (58μm) 、歯形偏差<±0.005mm、Ra<0.1μm 。

コーティング:

TiAlN (4μm 、 350 °C、バイアス 100V)、耐熱性が 20% 向上しました。

AlCrN (5μm 、 400 °C、バイアス 80V)、耐衝撃性が 15% 向上しました。

GC4240 (6μm 、 450°C)、耐摩耗性が 25% 向上しました。

3D プリント: 複雑な歯の形状の SLM 成形、サイクル時間が 20% 短縮、精度は ±0.01 mm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 10^{-5}Pa 。

CNC 研削盤: 歯形偏差 $<\pm 0.005\text{ mm}$ 。

コーティング装置: 堆積速度 $12\mu\text{m/h}$ 、偏差 $<\pm 0.1\mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

荒削りホブ加工: 中粗粒 WC+GC4240、速度 200~300 m/分、MQL。

精密ギアホブ加工: 超微粒子 WC + TiAlN、速度 250 ~ 400 m/分、ドライ切削。

ギア成形: 微粒子 WC+ AlCrN、速度 150~250 m/分、湿式切削。

ハード旋削: 超微粒子 WC + TiAlN、速度 100 ~ 200 m/分、ドライ切削。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒径 $0.22\mu\text{m}$)、EBSD (粒界応力 $<5\%$)。

性能: ASTM G65 ($<0.040.05\text{ mm}^3/\text{h}$)、高温硬度 ($>1200\text{ HV}$ 、 900°C)。

試験: 切削力 600~1200 N、寿命 800~1500 分、Ra $0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ 、AGMA 1012 グレード。

7. 超硬合金製風力タービンギア切削工具の規格と仕様

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 1.8-2.8GPa。

GB/T 7997- 2017: 硬度 1400-2200 HV。

ASTM G 65: 摩耗率 $<0.05\text{ mm}^3/\text{h}$ 。

ISO 6508: 硬度偏差 $<\pm 50\text{ HV}$ 。

ISO 1832: 歯形偏差 $<\pm 0.01\text{ mm}$ 。

AGMA 2015: 歯形精度レベル 1012。

8. 結論

超硬合金製風力タービンギアツールは、材料（超微粒子 WC $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ 、Co 612wt）を最適化することで、高硬度（1800~2200 HV）、耐摩耗性（ $<0.05\text{ mm}^3/\text{h}$ ）、耐熱性（800~1000 $^{\circ}\text{C}$ ）、安定性（寿命 800~1500 分）を実現します。 %、TiAlN/AlCrN/GC4240 コーティング）およびプロセス（HIP 焼結 1350 $^{\circ}\text{C}$ 、120 MPa、PVD/CVD コーティング 300~450 $^{\circ}\text{C}$ ）。

この工具は、風力発電ギア（42CrMo4、18CrNiMo76、HRC 5562、弾性係数 1040）の粗加工 / 仕上げ加工に適しており、加工速度は 100~500 m/分、効率は 30~50% 向上し、精度は AGMA 1012、Ra $0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ です。超微粒子、複合コーティング、精密研削を最適化することでコストを削減できます（1 個あたり 500~2000 元）。課題は、弾性係数の高い加工（研削コストが 20% 増加）とコーティングの密着性（80 N 以上が必要）です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD は、ナノ WC (D50 0.2~0.5 μ m)、HIP 焼結（気孔率<0.001%）、多層 PVD/CVD コーティングを駆使し、高性能ホブ、ギアシェーピングカッター、ハードターニングツールを開発しています。これらは風力発電ギア加工のニーズを満たし、寿命は 1200 分以上、精度は AGMA 12 レベルです。これらの製品は、SEM、ASTM G65、AGMA 2015 の検査に合格しています。

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 18376-2001 超硬合金の性能試験方法

1 範囲

この規格は、硬さ、密度、曲げ強度、破壊靱性、微細組織、磁気特性、気孔率、耐摩耗性などの試験手順を含む、超硬合金の特性試験方法を規定する。本規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、また、他の類似の超硬合金材料（TaC および VC を添加した超硬合金など）にも適用される。本規格は、コーティング超硬合金の性能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、本規格への参照を通じて本規格の条項となる。日付が記載されているすべての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ない。日付が記載されていないすべての参照文書については、最新版が本規格に適用される。

GB/T 228.1-2001 金属材料の引張試験 パート 1: 室温試験方法

GB/T 230.1-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法（A、B、C スケール）

GB/T 3848-2001 超硬合金の密度測定方法

GB/T 3850-2001 超硬合金の曲げ強度の測定方法

GB/T 3851-2001 超硬合金の破壊靱性測定方法

GB/T 5242-2001 超硬合金の微細構造試験方法

GB/T 7997-2001 超硬合金のビッカース硬さ試験方法

GB/T 9097-2001 超硬合金の磁気特性の測定方法

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義を使用します。

超硬合金: 炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

硬度（HV）: ビッカース圧子の侵入に耐えるセメント炭化物の能力。ビッカース硬度値（HV30）で表され、単位は kgf/mm^2 です。

密度（ ρ ）: セメント炭化物の質量と体積の比で、 g/cm^3 で表されます。

曲げ強度（ σ_{bb} ）: 3点曲げ試験において超硬合金試験片が耐える最大応力（MPa）です。

破壊靱性（ K_{Ic} ）: 亀裂の成長に抵抗するセメント炭化物の能力。 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ で表されます。

微細構造: 超硬合金中の WC 粒子、Co 相、および気孔の分布特性。

超硬合金の磁気飽和値（ M_s ）と保磁力（ H_c ）は、Co 相の磁気特性を反映しています。

気孔率: 超硬合金内の気孔の体積率。A、B、C の 3 つのカテゴリに分類されます。

4. サンプルの準備

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

4.1 サンプルの要件

試験片は規則的な幾何学的形状（直方体、円筒など）で、表面が平らであり、ひび割れ、酸化層、または加工上の欠陥がないものである必要があります。

サンプル サイズは、次のような各パフォーマンス テストの要件を満たす必要があります。

硬度テスト：表面積 $>5\times5\text{mm}$ 、厚さ $>2\text{mm}$ 。

曲げ強度試験：長さ $\times$ 幅 $\times$ 高さ $=20\times6.5\times5.25\text{mm}$ ($\pm0.05\text{mm}$)。

破壊靱性試験：長さ $\times$ 幅 $\times$ 高さ $=20\times4\times2\text{mm}$ ($\pm0.02\text{mm}$)。

サンプルの表面粗さは $Ra < 0.1\mu\text{m}$ （研磨済み）です。

4.2 サンプル数

試験結果の統計的代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($>5\%$)、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

4.3 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド（YG8、YT15 など）、テスト項目を記入する必要がありますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

5 つのテスト方法

5.1 硬度試験

5.1.1 試験原理

ビッカース硬さ法（HV30）を用いる。30kgf の荷重を加え、ビッカース圧子を試料表面に押し付ける。圧痕の対角長さを測定し、硬さ値を算出する。

5.1.2 機器

GB/T 7997-2001 要件に準拠したビッカース硬度計。

圧子：標準ビッカースダイヤモンド圧子、頂点角 136° ($\pm0.5^\circ$)。

顕微鏡：倍率 400 倍、解像度 $<0.5\mu\text{m}$ 。

5.1.3 テスト手順

サンプル表面は $Ra < 0.1\mu\text{m}$ まで研磨され、洗浄および乾燥された。

kgf の荷重をかけ、10 ～ 15 秒間荷重を保持します。

くぼみの対角線の長さ (d_1 、 d_2) を測定し、平均値 ($d = (d_1 + d_2)/2$) を取得します。

硬度値を計算します。

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

其中：F = 30 kgf, d 单位为 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

5.1.4 結果処理

各サンプルごとに 5 点を測定し、偏差 $<\pm 2\%$ で平均値を取得しました。

硬度値の範囲: HV 1200~2000 (ブランドによって異なります。YG8 は約 HV 1500)。

5.2 密度試験

5.2.1 試験原理は

、アルキメデス法を使用して空気中および液体中のサンプルの質量を測定し、密度を計算することです。

5.2.2 機器

分析天秤、精度 $\pm 0.0001\text{g}$ 。

液体: 蒸留水、温度 $20^\circ\text{C} (\pm 1^\circ\text{C})$ 。

5.2.3 テスト手順

空気中のサンプルの質量 (m_1) を $\pm 0.0001\text{g}$ の精度で計量します。

サンプルを蒸留水に浸し、浮遊質量 (m_2) を計量します。

密度を計算します。

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_{\text{水}}$$

ここで、 $\rho_{\text{water}} = 0.9982 \text{ g/cm}^3$

5.2.4 結果処理

各サンプルは 3 回測定され、平均値は偏差 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 未満で算出されました。

標準値: WC-10Co の密度は約 $14.5 \sim 14.8 \text{ g/cm}^3$ です。

5.3 曲げ強度試験

5.3.1 試験原理

は 3 点曲げ法を用いる。試験片は 2 つの支持点間で力を受け、破断時の最大荷重を記録し、曲げ強度を算出する。

5.3.2 機器

万能試験機、荷重精度 $\pm 0.5\%$ 。

固定具: スパン $14.5 \text{ mm} (\pm 0.05 \text{ mm})$ 、支持点直径 2 mm 。

5.3.3 テスト手順

試料寸法: $20 \times 6.5 \times 5.25 \text{ mm} (\pm 0.05 \text{ mm})$ 。

荷重速度: 0.5 mm/分 。

破断荷重 $F(N)$ を記録します。

曲げ強度を計算します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\sigma_{bb} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

ここで、L = 14.5 mm、b = 6.5 mm、h = 5.25 mm。

5.3.4 結果処理

各グループで 5 つのサンプルをテストし、偏差 <±5% で平均値を取得しました。

標準値: YG8 曲げ強度は約 2000 ~ 2400 MPa です。

5.4 破壊靱性試験

5.4.1 試験原理 片側ノッチビーム法 (SEPB) は、

予め作製されたノッチ付き試験片の 3 点曲げによる破壊靱性 K_{Ic} を計算するために使用されます。

5.4.2 機器

万能試験機、荷重精度±0.5%。

固定具: スパン 16 mm (±0.05 mm)。

顕微鏡: 0.01 mm 未満の解像度でノッチの深さを測定します。

5.4.3 テスト手順

標本サイズ: 20×4×2 mm (±0.02 mm)。

プレファブリケーションノッチ: 深さ 0.8 ~ 1.2 mm、幅 <0.2 mm。

荷重速度: 0.5mm/分。

破断荷重 F(N)を記録します。

K_{Ic} を計算する:

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^2}$$

ここで、Y は幾何学係数 (約 2.8 ~ 3.0)、a はノッチの深さ、L = 16 mm、B = 4 mm、W = 2 mm です。

5.4.4 結果処理

各グループで 5 つのサンプルをテストし、偏差 <±5% で平均値を取得しました。

標準値: YG8 K_{Ic} 約 12-15 MPa·m^{1/2}。

5.5 微細構造検査

5.5.1 試験原理

WC の粒径、Co 相の分布および気孔率を金属顕微鏡で観察し、微細組織を等級分けして評価します。

5.5.2 機器

金属組織顕微鏡、倍率 1000 倍、解像度<0.5μm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

研磨機：試料を $Ra < 0.05 \mu m$ まで研磨します。

エッチング液：村上試薬（ $K_3Fe(CN)_6 + NaOH$ 溶液）。

5.5.3 テスト手順

研磨後、試料を村上試薬で 10～20 秒間エッチングした。

1000 倍の倍率で観察：

WC 粒径：平均粒径（ $0.5 \sim 2 \mu m$ ）を測定します。

Co 相分布：均一性を観察します。

多孔性分類：A、B、C の 3 つのカテゴリで評価されます（ $A < 0.02\%$ 、 $B < 0.2\%$ 、C は遊離炭素）。

5.5.4 結果処理

サンプルについて 5 つの視野を観察し、粒径と多孔度を記録しました。

標準値：YG8 粒径 $0.8-1.2 \mu m$ 、多孔度 A02-B00 - C00。

5.6 磁気特性試験

5.6.1 試験原理

超硬合金の磁気飽和値（ M_s ）と保磁力（ H_c ）を測定し、Co 相の含有量と微細構造特性を反映します。

5.6.2 機器

磁気特性試験装置、精度 $\pm 1\%$ 。

標本：直径 5mm、高さ 10mm（ $\pm 0.05mm$ ）。

5.6.3 テスト手順

サンプルは消磁され、テスター内に置かれます。

磁気飽和値 M_s （単位： $\mu T \cdot m^3/kg$ ）を測定します。

保磁力 H_c （単位： kA/m ）を測定します。

5.6.4 結果処理

各サンプルは 3 回測定され、偏差 $< \pm 2\%$ で平均値が算出されました。

標準値：YG8 M_s は約 $150 \sim 160 \mu T \cdot m^3/kg$ 、 H_c は約 $15 \sim 20 kA/m$ です。

5.7 耐摩耗試験

5.7.1 試験原理

研削ホイール摩耗法は、標準摩耗条件下でのサンプルの質量損失を測定し、耐摩耗性を評価するために使用されます。

5.7.2 機器

研削ホイール摩耗試験機、研削ホイール材質 SiC、粒度 60#。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

荷重:50N。

5.7.3 テスト手順

標本サイズ: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ ($\pm 0.05 \text{ mm}$)。

研削ホイール速度: 200r/min、試験時間: 30 分。

摩耗前後のサンプルの質量 (m_1 、 m_2) を $\pm 0.0001 \text{ g}$ の精度で計量します。

摩耗体積を計算します: $\Delta m = m_1 - m_2$

5.7.4 結果処理

各サンプルは 3 回テストされ、偏差 $< \pm 5\%$ で平均値が算出されました。

標準値: YG8 の摩耗量は約 0.05~0.08g です。

6 テスト結果の評価

試験結果は、超硬合金グレードの技術要件を満たす必要があります (例: YG8: 硬度 HV 1450-1550、曲げ強度 $> 2000 \text{ MPa}$)。

結果の偏差が許容範囲 ($> 5\%$) を超える場合は、再サンプリングとテストが必要です。

テストレポートには、サンプルブランド、テスト項目、テスト条件、結果データ、評価結論を含める必要があります。

7 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件: 機器モデル、周囲温度 ($20 \pm 5^\circ \text{C}$)、湿度 ($50 \pm 10\%$)。

試験結果: 硬度、密度、曲げ強度、破壊靱性、微細構造、磁気特性、多孔性、耐摩耗性など。

偏差分析: 各パラメータの平均と偏差。

結論: 技術要件を満たしているかどうか。

付録 A (参考付録) 典型的な炭化物性能基準値

ブランド	硬度 (HV30)	密度 (g/cm^3)	曲げ強度 (MPa)	破壊靱性 (K_{IC} 、 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	粒径 (μm)	気孔率
YG6	1500-1600	14.8~15.0	1800-2200	14~16 歳	0.8~1.2	A02-B00-C00
YG8	1450-1550	14.6~14.8	2000-2400	12~15 歳	0.8~1.2	A02-B00-C00
YT15	1550-1650	11.0~11.5	1600-2000	10~12 歳	0.6~1.0	A02-B00-C00

付録 B (参考付録) テスト環境要件

温度: $20 \pm 5^\circ \text{C}$ 。

湿度: $50 \pm 10\%$ 。

振動や腐食性ガス環境はありません。

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 230.1-2001

金属材料のロックウェル硬度試験

パート 1: 試験方法 (A、B、C スケール)

1 範囲

この規格は、ロックウェル硬度試験 (A、B、C スケール) を通じて室温 (10°C~35°C) における金属材料の硬度を測定する方法を規定しており、試験原理、設備要件、サンプル準備、試験手順、結果の計算と評価、試験報告書などが含まれています。この規格は、鋼、非鉄金属、およびセメント炭化物 (WC-Co など) の硬度試験に適用されます。

HRA スケール: 超硬合金および高硬度鋼 (硬度範囲 20 ~ 88 HRA) に適しています。

HRB スケール: 軟鋼、非鉄金属 (アルミニウム、銅など) に適用可能 (硬度範囲 20 ~ 100 HRB)。

HRC スケール: 焼入れ鋼および焼戻し鋼 (硬度範囲 20~70HRC) に適用します。

この規格は、薄肉試験片 (厚さ 0.6 mm 未満) または微小試験片の硬度試験には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版 (すべての修正を含む) が本規格に適用されます。

GB/T 230.2-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正

GB/T 230.3-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 3: 標準硬さ試験片の校正

GB/T 4340.1-1999 金属材料のビッカース硬さ試験 パート 1: 試験方法

GB/T 13683-1999 金属材料の機械的特性試験用語

3 用語と定義

この規格は、GB/T 13683-1999 および次の用語と定義を採用しています。

ロックウェル硬度 (HR): 金属材料がロックウェル圧子の圧入に耐える能力。HRA、HRB、HRC などのスケールに分かれており、圧入深さによって算出されます。

押し込み深さ (e): ロックウェル圧子を試料表面に押し込んだときに形成される深さ (mm 単位) は、硬度値に反比例します。

予荷重 (F_0): インデントーに加えられる初期荷重 (N 単位、ロックウェル試験の場合は 98.07 N)。

合計荷重 (F): インデントーに加えられる合計荷重 (N 単位、HRA および HRC の場合は 588.4 N、HRB の場合は 980.7 N)。

硬度スケール: 圧子の種類と荷重の組み合わせによって定義される硬度の単位 (HRC など)。

4 テストの原則

ロックウェル硬度試験は、ダイヤモンドコーンインデントー (HRA、HRC) または鋼球インデントー (HRB) を金属サンプルの表面に予荷重をかけ、全荷重を加え、一定時間荷重

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

を維持した後、予荷重まで除荷し、圧痕深さの差（e）を測定してロックウェル硬度値を算出します。ロックウェル硬度の計算式は次のとおりです。

HRA, HRC:

$$HR = 100 - \frac{e}{0.002}$$

HRB:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002}$$

で:

e は、インデントの深さの差（mm）です。

0.002 mm は各単位硬度値に対応する深さの増分です。

HRA の範囲は 20 ～ 88、HRB の範囲は 20 ～ 100、HRC の範囲は 20 ～ 70 です。

5 試験装置

5.1 ロックウェル硬度計

GB/T 230.2-2001 の検査および校正要件に準拠しています。

荷重: 予荷重 98.07 N (10 kgf) 、総荷重は次のとおりです。

HRA、HRC: 588.4 N (60 kgf) 。

HRB: 980.7 N (100 kgf) 。

荷重精度: ±0.5%。

保持時間制御: 5 秒～ 15 秒、偏差 <±0.5 秒。

5.2 インデンター

ダイヤモンドコーンインデンター（HRA、HRC）: 頂点角 120°（±0.5°）、上部球面半径 0.2 mm（±0.01 mm）。

鋼球圧子（HRB）: 直径 1.5875mm（1/16 インチ、±0.005mm）、硬度≥HRC 60。

インデンターの表面には欠陥がなく、エッジは明瞭です（顕微鏡検査、解像度 <0.5 μm）。

5.3 測定装置

硬度計には、精度 ±0.5 HR のデジタルまたはポインター読み取りシステムが装備されています。

5.4 キャリブレーションブロック

GB/T 230.3-2001 の要件を満たす標準校正ブロック:

HRA: 70 ～ 88 HRA、偏差 <±0.5 HRA。

HRB: 60-100 HRB、偏差 <±1.0 HRB。

HRC: 20～70 HRC、偏差 <±0.5 HRC。

ブロックの表面粗さは Ra<0.05μm です。

5.5 環境制御

温度: 10℃～35℃、20±5℃を推奨。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

湿度: 30%~80%、50±10%を推奨。
振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプルの形状: 直方体、円筒またはその他の規則的な形状、試験面積>5×5 mm、厚さは次の通り:

HRA、HRC: 厚さ > 0.8 mm。

HRB: 厚さ > 1.2 mm。

試験面は平らで、ひび割れ、酸化層、機械加工の欠陥などがない状態である必要があります。

表面粗さ Ra<0.1μm (研磨)。

試験片の厚さは、厚さ ≥ 10 × 圧痕深さ (約 0.5 mm) という要件を満たす必要があります。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 (> 1 HR)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 サンプルマーキング

試験片にはバッチ番号、ブランド (45#鋼、YG8 など)、試験項目を記入し、その記入は試験エリアに影響を与えないものとする。

6.4 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

標準校正ブロックを用いて硬度計を校正し、3 回測定します。偏差は以下のとおりです。

HRA、HRC: <±0.5 HR。

HRB: <±1.0 HR。

インデンターの状態をチェックして、摩耗や欠陥がないことを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: 10°C ~ 35°C、20±5°C を推奨。

相対湿度: 30%~80%、50±10% を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 スケールの選択

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

材料の硬さに応じてスケールを選択します。

超硬合金、高硬度鋼：HRA。

軟鋼、非鉄金属：HRB。

焼入れ鋼、焼戻し鋼：HRC。

7.4 テスト操作

試験面が水平であることを確認しながら、試験片を硬度試験機の作業台に置きます。

インデントがサンプルと安定して接触していることを確認するために、98.07 N（10 kgf）のプリロードを適用します。

合計荷重（588.4 N または 980.7 N）を適用し、5 ～ 15 秒間荷重を保持します。

98.07 N の予荷重まで負荷を解除し、硬度値（HRA、HRB、または HRC）を記録します。

サンプルごとに 5 点を測定し、インデントの間隔は次のとおりです。

HRA、HRC: 圧痕直径の 3 倍以上（約 0.6mm）。

HRB: へこみ直径の 4 倍以上（約 1.5mm）。

へこみは試験片の端から 1 mm 以上離れています。

7.5 結果の計算

硬度計は HR 値を直接表示するか、次の式で計算します。

HRA、HRC:

$$HR = 100 - \frac{e}{0.002}$$

HRB:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002}$$

5 点の平均値をサンプルの硬度値とすると、偏差は次のようになります。

HRA、HRC: $<\pm 1$ HR。

HRB: $<\pm 2$ HR。

8 テスト結果の評価

8.1 硬度値の範囲

金属材料のロックウェル硬度の範囲は、規模と材料によって異なります。

超硬合金（YG8）：HRA87～89。

硬化鋼（45#鋼、HRC 50）：HRC 48～52。

アルミニウム合金（6061-T6）：HRB 60～70。

8.2 逸脱評価

5 つのポイントは次のとおりです。それ以外の場合は再テストが必要です。

HRA、HRC: $<\pm 1$ HR。

HRB: $<\pm 2$ HR。

硬度値が材料の技術要件を超える場合は、その理由（試験片の表面欠陥や微細構造の不均一性など）を分析する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 影響要因の分析

表面品質: 表面粗さ $Ra > 0.1 \mu m$ の場合、硬度の値が低くなります (偏差 > 1 HR)。
 滞留時間: 5 秒未満または 15 秒を超える時間は、インデンテーションの深さに影響します (偏差 ± 0.5 HR)。
 試験片の厚さ: 厚さが 0.8 mm 未満の場合、サポート効果が生じ、硬度値が高くなります (偏差 > 2 HR)。
 微細構造: 粒径が不均一 ($\geq \pm 0.2 \mu m$) または多孔性が高いと、硬度の変動 ($> \pm 1$ HR) が生じる可能性があります。

9 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。
 サンプル情報: 材料の種類、ブランド、バッチ番号、サイズ。
 試験条件: 機器モデル、スケール (HRA/HRB/HRC)、荷重、保持時間 (5 ~ 15 秒)、周囲温度 ($10^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$)、湿度 (30% ~ 80%)。
 試験結果: 硬度値 (HR)、各ポイントの平均値および偏差。
 評価結論: 材料の技術的要件を満たしているかどうか。
 テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 代表的な金属材料のロックウェル硬度の基準値

素材の種類	ブランド/カテゴリー	ロックウェル硬度	ルーラー	代表的な用途
超硬合金	YG8	87-89	HRA	切削工具
硬化鋼	45# (HRC 50)	48-52	HRC	機械部品
アルミニウム合金	6061-T6	60~70	HRB	航空宇宙構造
銅合金	H62	40~50	HRB	電気部品

付録 B (参考付録) テスト環境要件

温度: $10^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$ 、 $20 \pm 5^{\circ}C$ を推奨。
 湿度: 30% ~ 80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。
 振動や腐食性ガス環境はありません。
 テストベンチの水平度: 偏差 < 0.02 mm/m。

付録 C (参考付録) ロックウェル硬度スケールの比較

ルーラー	インデンタタイプ	総荷重(N)	硬度範囲	適用可能な材料
HRA	ダイヤモンドコーン	588.4	20-88	硬質合金、高硬度鋼
HRB	鋼球 (1.5875 mm)	980.7	20~100	軟鋼、非鉄金属
HRC	ダイヤモンドコーン	588.4	20~70 歳	焼入れ鋼、焼戻し鋼

要約する

GB/T 230.1-2001 「金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法 (A、B、C スケール)」

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

ール)」は、金属材料のロックウェル硬さ試験の標準化された手順を規定し、標準化されたサンプル調製、試験手順、および結果評価を通じて、試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の実施は、鋼、非鉄金属、および超硬合金の硬度評価に適用でき、機械製造、航空宇宙、金型製造などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

付録:

GB/T 230.2-2001

金属材料のロックウェル硬度試験 パート 2: 硬度計の検証と校正

1 範囲

本規格は、金属材料のロックウェル硬さ試験に用いる硬度計（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T スケールを含む）の直接及び間接検査及び校正方法を規定するものであり、検査原理、設備要件、校正手順、結果評価等を含む。本規格は、固定式及び携帯式ロックウェル硬さ試験機の検査及び校正に適用され、硬さ試験機が GB/T 230.1-2001「金属材料ロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法」の要求を満たすことを保証する。本規格は、その他の硬さ試験方法に用いる硬度計の校正には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

GB/T 230.1-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法

GB/T 230.3-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 3: 標準硬さ試験片の校正

GB/T 13683-1999 金属材料の機械的特性試験用語

JJG 112-1999 金属ロックウェル硬度計の検証手順

3 用語と定義

この規格は、GB/T 13683-1999 および次の用語と定義を採用しています。

直接検査: 硬度計の荷重、圧子の形状、押し込み深さ、試験サイクル時間などのパラメータを測定して、標準要件への準拠を確認するプロセス。

間接検査: 標準硬度ブロックを使用して、既知の硬度の標準ブロックの硬度値を測定することにより、硬度計の測定精度と再現性を検証するプロセス。

校正: 硬度計の測定システムを調整して、測定結果を標準値と一致させるプロセス。

標準硬度ブロック: 硬度計の間接検証に使用される、既知のロックウェル硬度値を持つ校正済みの金属ブロック。

4 検査と校正の原則

ロックウェル硬度計の検査と校正は、硬度計の測定精度と信頼性を確保するために、直接法と間接法で実行されます。

直接検査: 硬度計の主要パラメータ（荷重、圧子の形状、押し込み深さ、試験サイクル時間）が GB/T 230.1-2001 の要件を満たしているかどうかを確認します。

間接検査: 標準硬度試験片を用いて、既知の硬度を有する試験片の硬度値を測定し、硬度試験機の測定偏差と再現性を評価します。

校正後、硬度試験機の測定偏差は以下の要件を満たす必要があります。

HRA、HRC: $<\pm 1.0$ HR。

HRB: $<\pm 2.0$ HR。

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 検査および校正装置

5.1 測定機器

力測定装置：精度 $\pm 0.5\%$ 、予荷重および総荷重の測定に使用されます。
深さ測定装置：精度 $\pm 0.001\text{mm}$ 、へこみの深さを測定するために使用されます。
時間測定装置：精度 ± 0.1 秒、保持時間の測定に使用されます。
顕微鏡またはプロジェクター：倍率 $50\times$ - $100\times$ 、解像度 $<0.5\mu\text{m}$ 、インデンターの形状を確認するため。

5.2 標準硬度ブロック

GB/T 230.3-2001 によれば、硬度の範囲は次のとおりです。

HRA: 70 ~ 88 HRA、偏差 $<\pm 0.5$ HRA。

HRB: 60-100 HRB、偏差 $<\pm 1.0$ HRB。

HRC: 20~70 HRC、偏差 $<\pm 0.5$ HRC。

標準硬度ブロックの表面粗さは $Ra < 0.05\mu\text{m}$ です。

5.3 環境制御

温度: 10°C ~ 35°C 、 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。

湿度: 30%~80%、 $50\pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6 検査と校正の手順

6.1 直接検査

6.1.1 負荷テスト

測定された予圧は 98.07 N (10 kgf) で、偏差は $\pm 1.0\%$ 未満です。

総荷重の測定:

HRA、HRC: 588.4 N (60 kgf)、偏差 $<\pm 0.5\%$ 。

HRB: 980.7 N (100 kgf)、偏差 $<\pm 0.5\%$ 。

衝撃や振動がなく、スムーズに荷重がかかります。

6.1.2 インデンター検査

ダイヤモンドコーンインデンター (HRA、HRC):

頂点角度 120° ($\pm 0.5^{\circ}$)。

上部の球面半径は 0.2 mm ($\pm 0.01\text{ mm}$) です。

表面には欠陥がありません (顕微鏡検査、解像度 $<0.5\mu\text{m}$)。

鋼球圧子 (HRB):

直径 1.5875 mm ($\pm 0.005\text{ mm}$)。

硬度 HRC60 以上。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面欠陥なし。

6.1.3 深度測定システムの検査

標準深さブロックを使用して、偏差 $<\pm 0.002\text{ mm}$ で押し込み深さを測定します。

6.1.4 テストサイクルタイム検査

保持時間 5～15 秒、偏差 $<\pm 0.5$ 秒。

荷重の適用およびアンロード時間は 2 秒未満で、影響はありません。

6.2 間接テスト

試験スケールに一致する標準硬度ブロック (HRC 60 など) を選択します。

標準硬度ブロックで 5 回測定し、硬度値を記録します。

平均と偏差を計算します。

HRA、HRC: 平均値偏差 $<\pm 1.0\text{ HR}$ 、単一偏差 $<\pm 1.5\text{ HR}$ 。

HRB: 平均偏差 $<\pm 2.0\text{ HR}$ 、単一偏差 $<\pm 3.0\text{ HR}$ 。

偏差が限度を超える場合は、硬度計を校正する必要があります。

6.3 キャリブレーション

直接試験および間接試験の結果に応じて、硬度計の荷重および深さ測定システムを調整するか、圧子を交換します。

校正後に間接テストを繰り返し、偏差が要件を満たしていることを確認します。

7 検査および校正結果の評価

7.1 資格の決定

直接検査: 荷重、圧力ヘッド、深さ、時間などのパラメータはすべて要件を満たしています。

間接テスト:

HRA、HRC: 平均値偏差 $<\pm 1.0\text{ HR}$ 、再現性 $<\pm 1.5\text{ HR}$ 。

HRB: 平均偏差 $<\pm 2.0\text{ HR}$ 、再現性 $<\pm 3.0\text{ HR}$ 。

7.2 不適合処理

直接テストが失敗した場合は、硬度計を修理する必要があります (圧子の交換、荷重システムの調整など)。

間接テストが失敗した場合、硬度計を校正して再テストする必要があります。

試験結果が 2 回連続して不合格となった場合、硬度試験機は使用してはならない。

7.3 影響要因の分析

荷重偏差: 荷重偏差が $\pm 0.5\%$ を超えると、硬度の値が高すぎるか低すぎます ($>\pm 1\text{ HR}$)。

インデンターの摩耗: インデンターの摩耗により硬度値が上昇する可能性があります ($>\pm 1\text{ HR}$)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

環境振動：振動により深度測定誤差が生じる可能性があります ($>\pm 0.5$ HR)。
標準ブロックの品質：標準ブロックの硬度偏差が ± 0.5 HR を超えると、テスト結果に影響します。

8 検査および校正報告書

検査および校正レポートには次の内容を含める必要があります。
硬度計の情報：モデル、番号、メーカー。
試験条件：周囲温度 ($10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$)、湿度 ($30\% \sim 80\%$)、スケール (HRA/HRB/HRC)。
テスト結果：
直接検査：荷重、インデンターの形状、深さ、時間、その他のパラメータと偏差。
間接検査：標準硬度ブロックの公称値、測定値、平均値および偏差。
校正の結論：適格かどうか、校正措置(負荷の調整、圧力ヘッドの交換など)。
検査日とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）標準硬度ブロックの推奨値

ルーラー	硬度範囲	公称値の例	逸脱要求
HRA	70~88 HRA	85 HRA	$<\pm 0.5$ HRA
HRB	60~100 HRB	90 HRB	$<\pm 1.0$ HRB
HRC	20~70 HRC	60 HRC	± 0.5 HRC 未満

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。
湿度: $30\% \sim 80\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。
振動や腐食性ガス環境はありません。
テストベンチの水平度：偏差 < 0.02 mm/m。

付録 C（参考付録）よくある問題と解決策

質問	考えられる原因	回避策
硬度値が高い	インデンターの摩耗	圧力ヘッドを交換する
硬度値が低い	負荷不足	負荷システムの調整
再現性が低い	環境振動	テスト環境を改善する
不正確な深度測定	深度測定システムの故障	深度測定システムの校正または修理

要約する

GB/T 230.2-2001「金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 2：硬さ試験機の検証及び校正」は、ロックウェル硬さ試験機の検査及び校正に関する標準化された手順を規定し、直接及び間接検査方法を通じて硬さ試験機の測定精度と信頼性を確保します。この規格の実施は、硬さ試験結果の精度と一貫性の向上に役立ち、機械製造、材料試験などの分野における硬さ試験機の管理に適用できます。

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：

GB/T 230.3-2001 金属材料
ロックウェル硬さ試験 パート 3: 標準硬さ試験片の校正

1 範囲

本規格は、金属材料のロックウェル硬さ試験における標準硬さ試験片（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T スケールを含む）の校正方法を規定し、校正の原則、設備要件、校正手順、結果評価などを含む。本規格は、新規製造または使用中のロックウェル硬さ試験片の硬度値が GB/T 230.1-2001 および GB/T 230.2-2001 の要求を満たすことを保証するための校正に適用され、その他の硬さ試験方法における標準硬さ試験片の校正には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

GB/T 230.1-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法

GB/T 230.2-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正

GB/T 13683-1999 金属材料の機械的特性試験用語

JIG 112-1999 金属ロックウェル硬度計の検証手順

3 用語と定義

この規格は、GB/T 13683-1999 および次の用語と定義を採用しています。

標準硬度ブロック：硬度計の間接検証および校正に使用される、既知のロックウェル硬度値を持つ校正済みの金属ブロック。

校正：標準硬度計またはより高精度のトレーサブルな装置を使用して、標準硬度ブロックの硬度値を決定するプロセス。

硬度均一性：標準硬度ブロックの表面における硬度値の分布の一貫性を、測定点の偏差で表します。

トレーサビリティ：校正チェーンを通じて硬度基準ブロックの硬度値を国内または国際的な硬度ベンチマークにリンクするプロセス。

4 校正原理

標準硬度片の校正は、校正済みの高精度ロックウェル硬度計（GB/T 230.2-2001 準拠）を用いて標準硬度片の表面で複数の硬度測定を行い、平均硬度値と硬度均一性を計算し、その硬度値の正確性と信頼性を確保することによって行われます。校正結果は、測定の一貫性と比較可能性を確保するために、国家または国際的な硬度標準にトレーサブルでなければなりません。

5. 校正機器

5.1 標準ロックウェル硬度計

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 230.2-2001 の要件に準拠しており、直接的および間接的にテストされています。

測定偏差:

HRA、HRC: $<\pm 0.5$ HR。

HRB: $<\pm 1.0$ HR。

硬度試験機は、国内または国際的な硬度規格にトレーサブルである必要があります。

5.2 インデント

ダイヤモンドコーンインデント (HRA、HRC): 頂点角 $120^\circ (\pm 0.5^\circ)$ 、上部球面半径 $0.2 \text{ mm } (\pm 0.01 \text{ mm})$ 。

鋼球圧子 (HRB): 直径 $1.5875 \text{ mm } (\pm 0.005 \text{ mm})$ 、硬度 $\geq \text{HRC } 60$ 。

インデント表面には欠陥はありませんでした (顕微鏡検査、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$)。

5.3 測定機器

ノギス: 精度 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 、標準ブロックのサイズを測定するために使用されます。

を測定、精度 $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 。

5.4 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 80\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6 標準硬度ブロックの要件

6.1 材料と製造

標準ブロック材質: 安定した硬度と、偏析や多孔性のない均質な微細構造を備えた高品質の鋼またはその他の金属。

サイズ: 厚さ $\geq 6 \text{ mm}$ 、試験面積 $\geq 30 \times 30 \text{ mm}$ 。

表面粗さ: $R_a < 0.05 \mu\text{m}$ (研磨)。

試験面は平らで、平行度は 0.01 mm 未満である必要があります。

6.2 硬度範囲

HRA: $70 \sim 88 \text{ HRA}$ 。

HRB: $60 \sim 100 \text{ HRB}$ 。

HRC: $20 \sim 70 \text{ HRC}$ 。

6.3 マーキング

標準ブロックには、公称硬度値、スケール、製造バッチ番号、製造ユニットなどの情報が記入されている必要があります、そのマーキングは試験領域に影響を与えてはなりません。

7 キャリブレーション手順

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 校正の準備

標準硬度計の状態をチェックして、GB/T 230.2-2001 の要件を満たしていることを確認します。

標準硬度ブロックを洗浄し、無水エタノールで油分やホコリを除去し、乾燥させてからご使用ください。

標準ブロックのサイズと平行度を測定し、表面粗さを記録します。

7.2 校正条件

周囲温度: 10°C ~ 35°C、20±5°C を推奨。

相対湿度: 30%~80%、50±10% を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 キャリブレーション操作

ブロックの試験面には 5 つの測定点が均等に配置されており、測定点の間隔は圧痕直径の 3 倍以上 (HRA、HRC は約 0.6 mm、HRB は約 1.5 mm)、端からの距離は 2.5 mm 以上です。

標準硬度計を使用して 5 点で硬度の値を測定し、各測定の結果を記録します。

保持時間: 5~15 秒、偏差<±0.5 秒。

7.4 結果の計算

計算 5 点の平均硬度値:

$$\overline{HR} = \frac{HR_1 + HR_2 + HR_3 + HR_4 + HR_5}{5}$$

計算硬度均一性 (最大偏差):

$$\Delta HR = HR_{\max} - HR_{\min}$$

資格判定:

HRA、HRC: 平均偏差 <±0.5 HR、均一性 <1.0 HR。

HRB: 平均偏差 <±1.0 HR、均一性 <2.0 HR。

7.5 トレース

校正結果は、国内または国際的な硬度標準にトレーサブルである必要があり、トレーサビリティ チェーンは文書化される必要があります (例: 国家計量標準機関を通じて)。

8 校正結果の評価

8.1 資格

平均硬度値偏差:

HRA、HRC: <±0.5 HR。

HRB: <±1.0 HR。

硬度均一性:

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

HRA、HRC: <1.0 HR。

HRB: <2.0 HR。

表面粗さ Ra<0.05μm 、平行度<0.01mm。

8.2 不適合処理

平均值偏差または均一性が限度を超える場合、その標準ブロックは使用してはならない。原因（材質の不均一性、表面品質の悪さなど）を分析し、標準ブロックを再製造または加工してから調整します。

8.3 影響要因の分析

材料の均質性: 微細構造の不均一性 (粒径 $>\pm 0.2\mu\text{m}$)により、均質性が低下する可能性があります ($>1\text{HR}$)。

表面品質: 粗さ $Ra>0.05\mu\text{m}$ の場合、硬度値に変動が生じます ($>\pm 0.5\text{HR}$)。

硬度計の精度: 硬度計の偏差が $\pm 0.5\text{HR}$ を超えると、校正結果に影響します。

環境振動: 振動により測定誤差が生じる可能性があります ($>\pm 0.5\text{HR}$)。

9 校正証明書

校正証明書には次の内容が記載されている必要があります。

標準硬度ブロック情報: 公称硬度値、スケール、製造バッチ番号、製造単位。

校正条件: 硬度計モデル、周囲温度 ($10^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$)、湿度 ($30\%\sim 80\%$)。

校正結果: 硬度値、平均值、均一性、5点における偏差。

トレーサビリティ情報: トレーサビリティ チェーンと国内/国際ベンチマーク。

校正結論: 適格かどうか。

校正日とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）標準硬度試験片の校正値の例

ルーラー	公称値	測定値 (HR)	平均 (HR)	均一性 (HR)	偏差 (HR)
HRA	85	85.1、85.0、84.9、85.2、85.0	85.0	0.3	± 0.1
HRB	90	90.2、89.8、90.0、90.1、89.9	90.0	0.4	± 0.2
HRC	60	60.1、60.0、59.9、60.2、60.0	60.0	0.3	± 0.1

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: $10^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\%\sim 80\%$ 、 $50\pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 $<0.02\text{mm/m}$ 。

付録 C（参考付録）よくある問題と解決策

質問	考えられる原因	回避策
硬度の均一性が悪い	不均一な材料微細構造	材料を交換するか、再加熱処理す

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

質問	考えられる原因	回避策
		る
平均値偏差を超えました	硬度計の精度が十分ではない	硬度計の校正
表面粗さが基準を超えている	研磨不足	再研磨
測定値の大きな変動	環境振動	テスト環境を改善する

要約する

GB/T 230.3-2001「金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 3: 標準硬さ試験片の校正」は、ロックウェル硬さ試験片の校正手順を標準化し、標準化された校正手順と結果評価を通じて、標準硬さ試験片の硬度値の精度と信頼性を保証します。この規格の実施は、硬度試験のトレーサビリティと一貫性の向上に役立ち、材料試験や計量校正などの分野に適用できます。

付録：

GB/T 3848-2001 超硬合金の密度測定方法

1 範囲

この規格は、超硬合金材料の密度の測定方法を規定する。密度は、アルキメデスの原理を用いて、空気中および液体中の試料の質量を測定することによって算出される。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含む。この規格は、多孔質またはひび割れのあるセメント炭化物試験片には適用されず、また、他の材料（鋼やセラミックなど）の密度測定にも適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

GB/T 3847-1983 超硬合金試験片の作製方法

GB/T 3850-1983 超硬合金の用語

JIG 196-1990 一般的に使用されるガラス測定機器の検証手順

3 用語と定義

この規格は、GB/T 3850-1983 および次の用語と定義を採用しています。

密度（ ρ ）：セメント炭化物試料の質量をその体積で割った値で、 g/cm^3 で表されます。

アルキメデスの原理：サンプルを液体に浸すと、サンプルが受ける浮力は、サンプルが押しのけた液体の質量に等しく、浮力は空気中のサンプルの質量と液体中の質量の差に等しくなります。

超硬合金：粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

4. 決定原則

超硬合金の密度はアルキメデスの原理に基づいて決定され、次の手順で計算されます。

空気中のサンプルの質量（ m_1 ）を量ります。

液体（通常は脱イオン水）中のサンプルの質量（ m_2 ）を量ります。

サンプルの体積は浮力に基づいて計算され、サンプルの密度は液体の密度に基づいて計算されます。

密度の計算式は以下のとおりです。

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

で：

ρ はサンプルの密度（ g/cm^3 ）です。

m_1 は空気中のサンプルの質量（ g ）です。

液体中のサンプルの質量（ g ）です。

ρ_0 は液体の密度（ g/cm^3 ）です（ 20°C の脱イオン水の場合は 0.9982 g/cm^3 ）。

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. 測定機器

5.1 分析天秤

精度: ± 0.1 mg。

測定範囲: 0~200g。

液体中のサンプルの質量を計量するための吊り下げ装置を装備しています。

5.2 液体培地

脱イオン水、純度は GB/T 6682-1992 の要件を満たしています。

温度: $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 、測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

cm^3 (20°C) で。

5.3 補助装置

温度計: 精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

細い金属線: 直径 < 0.1 mm、サンプルを吊り下げるために使用されます。

ビーカー: 容量 100 ~ 500 mL、JJG 196-1990 に準拠。

超音波洗浄機: 周波数 40 kHz、サンプルの洗浄に使用します。

5.4 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: 30%~80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプルの形状: 規則的な幾何学的形状 (直方体、円筒など)、質量 5 ~ 50 g。

試験片の表面は平らで、ひび割れ、気孔、酸化層などがあってはなりません。

試料は GB/T 3847-1983 の準備要件に準拠する必要があります。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 0.02 \text{ g/cm}^3$)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 サンプル洗浄

無水エタノールまたはアセトンを使用してサンプルの表面を洗浄し、油分やほこりを取り除きます。

超音波洗浄機で 5 分間洗浄します (周波数 40kHz)。

洗浄後、 60°C で 30 分間乾燥させるか、一定重量になるまで自然乾燥させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド（YG8、YT15 など）、テスト項目を記入する必要がありますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

分析天秤は、偏差が ± 0.1 mg 未満の標準分銅を使用して校正されました。
液体の温度を測定し、脱イオン水の密度を記録します（付録 A を参照）。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。
相対湿度: $30\% \sim 80\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。
振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 測定操作

分析天秤を使用して空気中のサンプルの質量 (m_1) を量り、 0.1 mg まで記録します。
サンプルは細い金属ワイヤーで吊り下げられ、脱イオン水に浸され、サンプルが完全に浸かっていて気泡がないことを確認しました。
脱イオン水中のサンプルの質量 (m_2) を量り、 0.1 mg まで記録します。
各サンプルを 3 回測定し、平均値を算出しました。
液体の温度を記録し、表から液体の密度 (ρ_0) を決定します。

7.4 結果の計算

サンプル密度を計算します。

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

3 回の測定の平均値がサンプル密度として採用され、偏差は ± 0.02 g/cm³ 未満です。

8 測定結果の評価

8.1 密度範囲

超硬合金の密度範囲はグレードによって異なります。

YG6 (6% Co): $14.6 \sim 14.9$ g/cm³。

YG8 (8% Co): $14.5 \sim 14.8$ g/cm³。

YT15 (5%Co + TiC) : $12.8 \sim 13.2$ g/cm³。

8.2 逸脱評価

3 回の測定における密度の偏差は ± 0.02 g/cm³ 未満です。それ以外の場合はテストを繰り返す必要があります。

密度値が予想範囲外の場合、原因を分析する必要があります（サンプルの多孔性、洗浄が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

不完全など）。

8.3 影響要因の分析

気泡付着：サンプル表面に気泡があると、 m_2 が大きくなりすぎ、密度が低くなりすぎます（偏差 $> 0.05 \text{ g/cm}^3$ ）。

液体の温度：温度偏差 $> \pm 5^\circ\text{C}$ は ρ_0 に影響し、密度偏差 $> 0.01 \text{ g/cm}^3$ 。

試験片の多孔度：多孔度 $> 0.5\%$ の場合、密度は低くなります（偏差 $> 0.1 \text{ g/cm}^3$ ）。

天秤の精度：天秤の偏差が $\pm 0.1 \text{ mg}$ を超えると、密度の計算に影響します（偏差 $> 0.01 \text{ g/cm}^3$ ）。

9 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。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件：機器モデル、液体媒体（脱イオン水）、温度（ $^\circ\text{C}$ ）、湿度（ $\%$ ）。

試験結果：空気中の質量（ m_1 ）、液体中の質量（ m_2 ）、密度（ ρ ）、平均値および偏差。

評価結論：期待された範囲を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）脱イオン水の密度と温度の関係表

温度（ $^\circ\text{C}$ ）	密度（ ρ_0 ）（ g/cm^3 ）
15	0.9991
20	0.9982
25	0.9970
30	0.9957

付録 B（参考付録）典型的な炭化物密度の基準値

ブランド	Co 含有量（重量 $\%$ ）	密度（ g/cm^3 ）	代表的な用途
YG6	6	14.6～14.9	鉋山用ドリルビット
YG8	8	14.5～14.8	切削工具
YT15	5	12.8～13.2	仕上げツール

付録 C（参考付録）テスト環境要件

温度： $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度：30%～80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 $< 0.02 \text{ mm/m}$ 。

要約する

GB/T 3848-2001「超硬合金の密度測定方法」は、超硬合金の密度測定のための標準化され

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

た手順を提供し、アルキメデスの原理に基づいて試験結果の精度と再現性を保証します。
この規格の実施は、超硬合金材料の品質管理に役立ち、切削工具や鉱山用ドリルなどの高
性能応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

付録:

GB/T 3850-2001 超硬合金の曲げ強度の測定方法

1 範囲

この規格は、超硬合金材料の曲げ強度の測定方法を規定する。三点曲げ試験法は、試験片が破断するまで荷重を加えることにより、曲げ強度（抗折強度、TRS）を算出する方法である。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含まれる。この規格は、多孔質またはひび割れのあるセメント炭化物試験片には適用されず、また、他の材料（鋼やセラミックなど）の曲げ強度の測定にも適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

GB/T 3847-1983 超硬合金試験片の作製方法

GB/T 3851-1983 セメントカーバイド用語

GB/T 230.1-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法

3 用語と定義

この規格は、GB/T 3851-1983 および次の用語と定義を採用しています。

曲げ強度（ σ_{bb} ）または横方向破断強度（TRS）: 3 点曲げ試験でセメント炭化物試験片が耐えることができる最大応力（MPa で表されます）。

三点曲げ試験: 試験片を 2 つの支点到に置き、試験片が破断するまで中央に荷重を加える試験方法。

超硬合金: 炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

4. 決定原則

三点曲げ試験法は、超硬合金の曲げ強度を測定するために用いられます。試料を 2 点の支持点に置き、試料の中央に破断するまで荷重を加えます。最大破断荷重（P）を記録し、試料サイズとスパンに基づいて曲げ強度を計算します。曲げ強度の計算式は以下のとおりです。

$$\sigma_{bb} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

で:

σ_{bb} は曲げ強度（MPa）です。

P は破断荷重（N）です。

L は支持点スパン（mm）です。

b は試験片の幅（mm）です。

h はサンプルの厚さ（mm）です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

5. 測定機器

5.1 万能試験機

荷重範囲: 0~50 kN、精度 $\pm 0.5\%$ 。

荷重速度制御: 0.5~5 mm/分、偏差 $< \pm 0.1$ mm/分。

3点曲げ固定具を装備しており、支持点の幅を調整可能です。

5.2 フィクスチャ

支持点および荷重点の直径: 2 mm (± 0.02 mm)。

支持点スパン: 30 mm (± 0.05 mm)。

支持点および荷重点の表面硬度は HRC60 以上、表面粗さは $Ra < 0.1\mu\text{m}$ です。

5.3 測定ツール

ノギス: 精度 ± 0.02 mm、サンプルサイズの測定に使用します。

マイクロメーター: 精度 ± 0.001 mm、正確な厚さ測定に使用されます。

5.4 環境制御

温度: 10°C~35°C、20 ± 5 °Cを推奨。

湿度: 30%~80%、50 ± 10 %を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

標本形状: 直方体、寸法 35 $\times$ 5 $\times$ 5 mm (± 0.1 mm)。

試験片の表面は平らで、ひび割れ、気孔、酸化層などがあってはなりません。

試料は GB/T 3847-1983 の準備要件に準拠する必要があります。

サンプルの表面粗さは $Ra < 0.2\mu\text{m}$ (研磨済み) です。

応力集中を軽減するために、試験片の4つの長辺は 0.1 $\times$ 45°の面取りが施されています。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 10\%$)、サンプル数を 8 に増やす必要があります。

6.3 サンプル洗浄

無水エタノールを使用してサンプルの表面を洗浄し、油分やほこりを取り除き、乾燥させてから使用してください。

6.4 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド (YG8、YT15 など)、テスト項目を記入する必要があります。

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

りますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

6.5 サンプル測定

試験片の幅（b）と厚さ（h）は、ノギスとマイクロメータを使用して、精度±0.02 mm で測定されました。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

試験機は、荷重偏差が±0.5%未満の標準力センサーを使用して校正されました。

固定具のサポート ポイントのスパンをチェックします。偏差は ±0.05 mm 未満です。

7.2 試験条件

周囲温度: 10°C ~ 35°C、20±5°C を推奨。

相対湿度: 30%~80%、50±10% を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 測定操作

試験片が水平であり、スパン L が 30 mm (±0.05 mm) であることを確認しながら、3 点曲げ治具の 2 つの支持点に試験片を置きます。

荷重点が試験片の中央に位置するように調整します。

1 mm/分 (±0.1 mm/分) の速度で荷重を加えます。

試験片が破損したときの最大荷重 (P) を N 単位で記録します。

各サンプルは 1 回テストされ、結果の安定性を確保するために 5 ~ 8 回繰り返されました。

7.4 結果の計算

曲げ強度を計算します。

$$\sigma_{bb} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

サンプルの平均値を、偏差 <±10% で取得します。

8 測定結果の評価

8.1 曲げ強度範囲

超硬合金の曲げ強度の範囲はグレードによって異なります。

YG6 (6%Co): 2000~2500MPa。

YG8 (8%Co): 1800~2200MPa。

YT15 (5%Co + TiC) : 1300~1600MPa。

8.2 逸脱評価

5~8 個の検体の異常値が ±10% 未満の場合、それ以外の場合は再検査が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

曲げ強度値が予想範囲外の場合、その原因を分析する必要があります（試験片の欠陥、固定具の位置ずれなど）。

8.3 影響要因の分析

試験片の欠陥: 多孔度が 0.5% を超える場合、または微小亀裂がある場合は強度が低下します（偏差 > 15%）。

固定具の位置合わせ: サポート ポイントの位置がずれると、応力が集中し、強度が低下する可能性があります（偏差 > 10%）。

荷重速度: 速度 > 5 mm/分の場合、強度が高くなります（偏差 > 5%）。

微細構造: 粒径が不均一 ($>\pm 0.2 \mu\text{m}$) または結合相の分布が不均一な場合、強度が低下します（偏差 > 10%）。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件: 機器モデル、スパン (L)、荷重速度、周囲温度 (10°C~35°C)、湿度 (30%~80%)。

σ_{bb})、各試験片の平均値および偏差。

評価結論: 期待範囲を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）代表的な超硬合金の曲げ強度の参考値

ブランド	Co 含有量（重量%）	曲げ強度（MPa）	代表的な用途
YG6	6	2000-2500	鉋山用ドリルビット
YG8	8	1800-2200	切削工具
YT15	5	1300-1600	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: 10°C~35°C、20±5°Cを推奨。

湿度: 30%~80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 < 0.02 mm/m。

要約する

GB/T 3850-2001「超硬合金の曲げ強度の測定方法」は、超硬合金の曲げ強度の測定手順を標準化し、三点曲げ試験法による試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の導入は、超硬合金材料の機械的特性の評価に役立ち、切削工具や鉋山用ドリルなどの高性能応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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 3851-2001 超硬合金の破壊靱性測定方法

1 範囲

この規格は、超硬合金材料の破壊靱性（応力拡大係数 K_{IC} として表される）の測定方法を規定する。片側ノッチビーム（SENB）試験法は、試験片に荷重を負荷することにより破壊靱性を計算するために使用される。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含む。この規格は、多孔質またはひび割れのあるセメント炭化物試験片には適用されず、また、他の材料（鋼やセラミックなど）の破壊靱性の測定にも適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

GB/T 3847-1983 超硬合金試験片の作製方法

GB/T 3850-1983 超硬合金の用語

GB/T 230.1-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 1：試験方法

3 用語と定義

この規格は、GB/T 3850-1983 および次の用語と定義を採用しています。

破壊靱性（ K_{IC} ）：き裂状態での超硬合金試験片の破壊に対する抵抗力。単位は $\text{MPa}\cdot\text{m}$ で、臨界応力拡大係数で表されます。 $\sqrt{1/2}$ 。

片側ノッチビーム（SENB）試験：試験片の片側に予亀裂を作製し、3 点曲げ法を用いて破断するまで荷重を加える試験方法。

事前亀裂：実際の欠陥をシミュレートするために機械加工または疲労事前亀裂によって準備された初期亀裂。

超硬合金：炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

4. 決定原則

超硬合金の破壊靱性は、片側ノッチビーム（SENB）試験法によって測定されます。サンプルの片側に予めき裂を設け、3 点曲げ試験治具にサンプルを取り付け、サンプルが破断するまで荷重を加えます。最大破壊荷重（P）を記録し、サンプルサイズ、き裂長さ、およびスパンに基づいて破壊靱性を算出します。破壊靱性の計算式は次のとおりです。

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \cdot Y$$

で：

K_{IC} は破壊靱性（ $\text{MPa}\cdot\text{m}$ ）です。 $\sqrt{1/2}$;

P は破断荷重（N）です。

L は支持点スパン（mm）です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

B はサンプルの厚さ (mm) です。

W は試料の幅 (mm) です。

a/W に依存する幾何学的係数です(付録 A を参照)。

5. 測定機器

5.1 万能試験機

荷重範囲: 0~50 kN 、精度 $\pm 0.5\%$ 。

荷重速度制御: 0.05~0.5 mm/分、偏差 $<\pm 0.01$ mm/分。

3 点曲げ固定具を装備しており、支持点の幅を調整可能です。

5.2 フィクスチャ

支持点および荷重点の直径: 2 mm (± 0.02 mm)。

支持点スパン: 20 mm (± 0.05 mm)。

支持点および荷重点の表面硬度は HRC60 以上、表面粗さは Ra0.1 μ m 以下である。

5.3 ひび割れ試験装置

精密切断機: 初期切開の加工に使用され、切開幅は 0.2 mm 未満、深さ精度は ± 0.01 mm です。

顕微鏡: 倍率 50~200 倍、解像度 $<0.5\mu$ m 、亀裂長さの測定に使用。

5.4 測定ツール

ノギス: 精度 ± 0.02 mm、サンプルサイズの測定に使用します。

マイクロメーター: 精度 ± 0.001 mm、正確な厚さ測定に使用されます。

5.5 環境制御

温度: 10°C~35°C、20 ± 5 °Cを推奨。

湿度: 30%~80%、50 ± 10 %を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

標本形状: 直方体、寸法 20 $\times$ 4 $\times$ 2.5 mm (± 0.1 mm)。

試験片の表面は平らで、ひび割れや酸化層がないことが必要です。

試料は GB/T 3847-1983 の準備要件に準拠する必要があります。

表面粗さ Ra $<0.2\mu$ m (研磨)。

6.2 プレハブクラック

切断位置: 試験片の底部中央に位置し、長さ a は試験片の幅 W の 0.2 ~ 0.5 倍 (つまり a/W = 0.2 - 0.5)。

切歯の幅: <0.2 mm、切開先端は半径 0.05 mm に鈍化。

切り抜きは機械加工または疲労事前亀裂によって準備できますが、自然な亀裂をシミュレ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ートするには疲労事前亀裂が推奨されます。

6.3 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。
結果に大きな偏差がある場合 ($> 10\%$)、サンプル数を 8 に増やす必要があります。

6.4 サンプル洗浄

無水エタノールを使用してサンプルの表面を洗浄し、油分やほこりを取り除き、乾燥させてから使用してください。

6.5 サンプル測定

試験片の幅 (W)、厚さ (B)、および亀裂長さ (a) は、ノギスとマイクロメータを使用して $\pm 0.02 \text{ mm}$ の精度で測定されました。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

試験機は、荷重偏差が $\pm 0.5\%$ 未満の標準力センサーを使用して校正されました。
固定具のサポート ポイントのスパンをチェックします。偏差は $\pm 0.05 \text{ mm}$ 未満です。
亀裂長さの測定は、偏差 $< \pm 0.01 \text{ mm}$ の顕微鏡を使用して校正されました。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。
相対湿度: $30\% \sim 80\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。
振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 測定操作

試験片は、スパン L が $20 \text{ mm} (\pm 0.05 \text{ mm})$ の 3 点曲げ固定具の 2 つの支持点に配置されました。
荷重点が試験片の中央に配置され、あらかじめ製作した亀裂と一致するように調整します。
 0.1 mm/分 ($\pm 0.01 \text{ mm/分}$) の速度で荷重を加えます。
試験片が破損したときの最大荷重 (P) を N 単位で記録します。
各サンプルは 1 回テストされ、結果の安定性を確保するために 5 ~ 8 回繰り返されました。

7.4 結果の計算

幾何係数 Y を計算します (a/W テーブルに基づきます。付録 A を参照)。
破壊靱性を計算します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \cdot Y$$

サンプルの平均値を、偏差 $< \pm 10\%$ で取得します。

8 測定結果の評価

8.1 破壊靱性範囲

超硬合金の破壊靱性範囲はグレードによって異なります。

YG6 (6% Co): $10\sim 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

YG8 (8% Co): $12\sim 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

YT15 (5%Co + TiC) : $8\sim 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

8.2 逸脱評価

5～8 個の検体の異常値が $\pm 10\%$ 未満の場合、それ以外の場合は再検査が必要です。

破壊靱性値が予想範囲外の場合、その原因（亀裂品質、試験片欠陥など）を分析する必要があります。

8.3 影響要因の分析

亀裂品質：切断幅が 0.2 mm を超える場合、または先端が均一に鈍くない場合は、 K_{IC} が高くなりすぎる可能性があります（偏差 $> 10\%$ ）。

固定具の位置合わせ：サポート ポイントの位置がずれていると、応力の分散が不均一になり、 K_{IC} が低下します（偏差 $> 5\%$ ）。

荷重速度：速度 $> 0.5 \text{ mm/分}$ は破壊挙動に影響を与え、 K_{IC} が高くなりすぎます（偏差 $> 5\%$ ）。

微細構造：結合相の不均一な分布（Co 含有量の変動 $> \pm 0.5\%$ ）により、 K_{IC} が低下します（偏差 $> 10\%$ ）。

9 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。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ、亀裂長さ (a)。

試験条件：機器モデル、スパン (L)、荷重速度、周囲温度 ($10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$)、湿度 ($30\% \sim 80\%$)。

K_{IC})、各標本の平均値および偏差。

評価結論：期待された範囲を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）幾何係数 Y 表

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a/W	Y
0.2	1.90
0.3	2.10
0.4	2.40
0.5	2.80

注: Y 值为近似值, 实际应用中可参考标准提供的详细表或插值计算。

付録 B (参考付録) 代表的な超硬合金の破壊靱性の参考値

牌号	Co 含量 (wt%)	断裂靱性 (K_{IC}) (MPa·m ^{1/2})	典型应用
YG6	6	10-12	采矿钻头
YG8	8	12-15	切削工具
YT15	5	8-10	精加工刀具

付録 C (参考付録) テスト環境要件

温度: 10°C~35°C、20±5°Cを推奨。

湿度: 30%~80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

GB/T 3851-2001「超硬合金の破壊靱性測定方法」は、超硬合金の破壊靱性測定のための標準化された手順を提供し、片面ノッチ付き梁試験法による試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の実施は、超硬合金材料の耐割れ性評価に役立ち、切削工具や鉱山用ドリルなどの高性能応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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 9097-2001 超硬合金の磁気特性の測定方法

1 範囲

この規格は、電磁誘導法およびヒステリシスループ法を用いて、磁気飽和強度（磁化強度）および保磁力（ H_c ）の測定を含む、超硬合金材料の磁気特性の測定方法を規定する。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含む。TiC、VC）。この規格は、非強磁性材料またはコバルトを含まない超硬合金には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

GB/T 3847-1983 超硬合金試験片の作製方法

GB/T 3850-1983 超硬合金の用語

GB/T 3848-2001 超硬合金の密度測定方法

3 用語と定義

この規格は、GB/T 3850-1983 および次の用語と定義を採用しています。

磁気飽和強度（ M_s ）：十分に強い外部磁場下で磁気飽和に達したときの超硬合金試料の磁気強度。kA/m または emu/g で表されます。

保磁力（ H_c ）：超硬合金サンプルを磁化した後、外部磁場を反転させてサンプルの磁化強度をゼロにするために必要な磁場の強さで、単位は kA/m です。

ヒステリシス ループ：外部磁場の作用下でサンプルの磁化強度が磁場の強さに応じて変化するとき形成される閉曲線。保磁力の測定に使用されます。

超硬合金：炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

4. 決定原則

超硬合金の磁気特性の測定は、電磁誘導法とヒステリシスループ法に基づいて行われます。

磁気飽和強度（ M_s ）：試料の磁気飽和強度は、試料を強力な磁場（通常 1000 kA/m 以上）に置き、コバルト相を磁気飽和状態にすることで測定されます。磁気飽和強度はコバルト含有量と関連しており、コバルト相の品質を評価するために使用できます。

保磁力（ H_c ）の測定：試料のヒステリシスループを描き、外部磁場を反転させた際に磁化強度が 0 に低下する磁場強度、すなわち保磁力を記録する。保磁力は、材料の磁気微細構造と粒径を反映している。

5. 測定機器

5.1 磁気特性試験装置

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

装置の種類: ヒステリシスループ計測器(振動試料磁力計 VSM や電磁力法計測器など)。
磁場範囲: 0~2000 kA/m、精度 $\pm 0.5\%$ 。
磁化強度測定範囲: 0~1000 kA/m または 0~200 emu/g、精度 $\pm 0.1\%$ 。
均一な磁場を提供するために電磁石または超伝導磁石を装備しています。

5.2 補助装置

分析天秤: 精度 ± 0.1 mg、サンプルの質量を計量するために使用されます。
ノギス: 精度 ± 0.02 mm、サンプルサイズの測定に使用します。

5.3 環境制御

温度: 10°C~35°C、20 ± 5 °Cを推奨。
湿度: 30%~80%、推奨 <60%。
振動なし、外部磁場干渉なし（周囲磁場 <0.1 kA/m）。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプルの形状: 長方形または円筒形、推奨サイズは 6×6×10 mm または直径 6 mm、高さ 10 mm。
サンプル質量: 機器の要件に応じて 0.5 ~ 5 g。
試験片の表面は平らで、ひび割れや酸化層がないようにしてください。
試料は GB/T 3847-1983 の準備要件に準拠する必要があります。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。
結果の偏差が大きい場合（ $\pm 2\%$ 超）、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 サンプル洗浄

無水エタノールを使用してサンプルの表面を洗浄し、油分やほこりを取り除き、乾燥させてから使用してください。

6.4 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号とブランド名を記入する必要があります、その記入はテスト領域に影響を与えてはなりません。

6.5 サンプル測定

サンプルの質量を ± 0.001 g の精度で計量します。
サンプルサイズを ± 0.02 mm の精度で測定します。

7 つの測定手順

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1 機器の校正

磁気特性テスターを校正するには、標準サンプル（純ニッケルや標準セメント炭化物など）を使用します。

磁場強度を±0.5%未満の偏差で校正します。

偏差 <±0.1% の校正済み磁化測定。

7.2 試験条件

周囲温度: 20±5 °C。

相対湿度: <30%-80%。

外部磁場干渉なし (<0.1 kA/m)。

7.3 磁気飽和強度の決定

サンプルの軸が磁場の方向と平行になるように、サンプルを磁気特性試験装置のサンプルステージに置きます。

サンプルが磁気飽和に達するように強力な磁場 (>1000 kA/m) を適用します。

サンプルの磁化 (M) を kA/m または emu/g で記録します。

サンプルの質量と密度に応じて、磁気飽和強度を計算します。

$$M_s = \frac{M}{m}$$

或

$$M_s = \frac{M \cdot \rho}{V}$$

で:

Ms は磁気飽和強度 (emu/g または kA/m) です。

M は emu または kA/m 単位での測定値です。

m はサンプルの質量 (g) です。

ρ はサンプルの密度 (g/cm³) です。

V は cm³単位のサンプル体積です。

7.4 保磁力の測定

サンプルは初期の消磁状態（外部磁場は 0）に置かれます。

サンプルが磁気飽和に達するまで、徐々に増加する磁場が適用されます。

反対方向に磁場を印加し、ヒステリシスループを描き、磁化強度 0 に対応する外部磁場強度、すなわち保磁力 Hc を記録します。

各サンプルを 3 回測定し、平均値を算出しました。

7.5 結果の計算

磁気飽和強度: 3 回の測定値の平均値を計算します (偏差は ±2% 未満)。

保磁力: 偏差が±2% 未満の 3 回の測定値の平均値を計算します。

8 測定結果の評価

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 磁気特性範囲

超硬合金の磁気特性はグレードとコバルト含有量によって異なります。

YG6 (6% Co): 磁気飽和強度 90~110 emu/g、保磁力 5~10 kA/m。

YG8 (8% Co): 磁気飽和強度 110~130 emu/g、保磁力 4~8 kA/m。

YT15 (5%Co + TiC) : 磁気飽和強度 70~90emu/g、保磁力 8~12kA/m。

8.2 逸脱評価

3 つのサンプルの磁気飽和強度と保磁力の偏差は $\pm 3\%$ 未満です。それ以外の場合は再テストが必要です。

磁気特性値が予想範囲を超える場合、その原因（コバルト相の不均一な分布や微細構造欠陥など）を分析する必要があります。

8.3 影響要因の分析

コバルト相の分布:コバルト含有量の変動 ($>\pm 0.5\%$) または不均一な分布により、磁気特性の偏差 ($>3\%$) が発生する可能性があります。

粒径:WC 粒径が不均一 ($>\pm 0.5 \mu\text{m}$)だと保磁力に影響します (偏差 $>\pm 2\%$)。

外部磁気干渉:周囲磁場が 0.1 kA/m を超えると測定誤差が発生します ($\pm 5\%$ 以上)。

サンプル品質: 多孔度が 0.5% を超えると、磁気飽和強度が低下します (偏差 $>5\%$)。

9 テストレポートと

テストレポートには次の内容を含める必要があります。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ、品質。

テスト条件: 機器モデル、周囲温度 ($10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$)、湿度 ($30\% \sim 80\%$)、外部磁場干渉。

試験結果: 磁気飽和強度 (M_s)、保磁力 (H_c)、各サンプルの平均値および偏差。

評価結論: 期待された範囲を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 代表的な超硬合金の磁気特性の参考値

ブランド	Co 含有量 (重量%)	磁気飽和強度 (emu/g)	保磁力 (kA/m)	代表的な用途
YG6	6	90~110	5-8	鉱山用ドリルビット
YG8	8	110~130	4-8	切削工具
YT15	5	70~90	8~12 歳	仕上げツール

付録 B (参考付録) テスト環境要件

温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 80\%$ 、推奨 $<60\%$ 。

外部振動なし、外部磁場干渉なし ($<0.1 \text{ kA/m}$)。

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

テストベンチの水平度：偏差 <0.02 mm/m。

要約する

GB/T 9097-2001「超硬合金の磁気特性測定方法」は、磁気飽和強度および保磁力の測定を含む超硬合金の磁気特性測定のための標準化された手順を規定し、試験結果の精度と再現性を確保します。この規格の実施は、超硬合金中のコバルト相の品質と微細構造の評価に役立ち、材料製造および品質管理の技術的サポートを提供します。切削工具、鉋山用ドリルなどの分野に適用できます。

付録:

GB/T 3849-2008

超硬合金ビッカース硬さ試験方法

1 範囲

この規格は、試験原理、機器要件、サンプル準備、試験手順、結果の計算と評価、試験報告書などを含む、超硬合金のビッカース硬さ（HV）の試験方法を規定しています。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金、および他の炭化物（TaC、この規格は、コーティングされた超硬合金または表面強化処理（浸炭層硬度試験など）を施した超硬合金には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となる。日付が記載されているすべての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ない。日付が記載されていないすべての参照文書については、最新版が本規格に適用される。

GB/T 230.1-2004 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法（A、B、C スケール）

GB/T 4340.1-1999 金属ビッカース硬さ試験 パート 1: 試験方法

GB/T 5249-2008 超硬合金サンプルの作製に関する一般仕様

JJG 151-2006 ビッカース硬度計の検証手順

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義を使用します。

超硬合金: 炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

ビッカース硬度（HV）: ビッカース圧子の侵入に耐えるセメント炭化物の能力。ビッカース硬度値で表され、単位は kgf/mm^2 です。

この規格では主に HV30（荷重 30kgf）を標準試験条件として採用しています。

くぼみの対角線: ビッカース圧子をサンプル表面に押し付けたときに形成される正方形のくぼみの 2 つの対角線の長さ (mm)。

4 テストの原則

ビッカース硬度試験は、標準ビッカースダイヤモンド圧子（頂角 136° ）を所定の荷重（通常 30kgf）で超硬合金サンプルの表面に押し付け、一定時間保持した後、荷重を除去し、圧痕の 2 つの対角線の長さ（ d_1 、 d_2 ）を測定し、平均対角線長さ（ d ）を算出して、ビッカース硬度値（HV）を算出します。計算式は次のとおりです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

其中:

- F 为试验载荷, 单位为 kgf (本标准为 30 kgf) ;
- d 为压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ 。

5 試驗裝置

5.1 ビッカース硬度計

JJG 151-2006 検証規制の要件に準拠します。

荷重範囲: 5~50 kgf 、精度 $\pm 0.5\%$ 。

保持時間制御: 5~60 秒、偏差 $< \pm 0.5$ 秒。

5.2 圧力ヘッド

標準ビッカースダイヤモンド圧子、頂点角 $136^\circ (\pm 0.5^\circ)$ 。

インデンターの表面には欠陥がなく、エッジは明瞭です(顕微鏡検査、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$)。

5.3 測定装置

顕微鏡: 倍率 $400\times \sim 600\times$ 、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$ 。

測定精度 $\pm 0.001\text{mm}$ のデジタル読み取りシステムを搭載。

5.4 キャリブレーションブロック

超硬標準校正ブロック、硬度範囲 HV 1200 ~ 2000、偏差 $< \pm 2\%$ 。

ブロックの表面粗さは $Ra < 0.05 \mu\text{m}$ です。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

試験片は規則的な幾何学的形状(直方体、円筒など)で、試験面積が $5 \times 5 \text{ mm}$ を超え、厚さが 2 mm を超える必要があります。

試験面は平らで、ひび割れ、酸化層、機械加工の跡、微細な欠陥などがない状態である必要があります。

表面粗さ $Ra < 0.1 \mu\text{m}$ (研磨)。

6.2 サンプル数

試験結果の統計的代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 3\%$)、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド（YG8、YT15 など）、テスト項目を記入する必要がありますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

6.4 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

硬度計は標準校正ブロック（荷重 30kgf）を使用して校正され、3 回測定され、偏差は±1% 未満でした。

インデンターの状態をチェックして、摩耗や欠陥がないことを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: 20±5°C。

相対湿度: 50±10%。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

試験面が水平であることを確認しながら、試験片を硬度試験機の作業台に置きます。

荷重 30 kgf（HV30）、保持時間 10～15 秒を選択します。

インデンターはサンプル表面にゆっくりと押し付けられ、荷重を維持した後、自動的に荷重が解除されます。

くぼみの 2 つの対角線の長さ（d1、d2）は、±0.001 mm の精度で顕微鏡を使用して測定されました。

各試験片について 5 つの圧痕点を測定し、圧痕間隔は対角線の長さの 3 倍（0.3 mm 以上）とし、試験片の端からの距離は 0.5 mm 以上とする。

7.4 結果の計算

各ポイントにおけるくぼみの平均対角線の長さを計算します。

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

各ポイントのピッカース硬度値を計算します。

$$HV = \frac{1.8544 \times 30}{d^2}$$

5 つの圧痕点の硬度値がサンプルの硬度値として採用され、偏差は ±3% 未満です。

8 テスト結果の評価

8.1 硬度値の範囲

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超硬合金のピッカース硬度は通常 HV 1200 ～ 2000 ですが、具体的な範囲はグレードによって異なります。

YG6: HV 1500-1600。

YG 8:HV 1450-1550。

YT 15:HV 1550-1650。

8.2 逸脱評価

5 つの圧痕ポイントの許容差は $\pm 3\%$ 未満です。それ以外の場合は再テストが必要です。サンプルの硬度値が等級の技術的要件を超える場合は、原因（微細構造の不均一性や過剰な多孔性など）を分析し、再度サンプルを採取して試験する必要があります。

8.3 影響要因の分析

表面品質：表面粗さ $Ra > 0.1 \mu m$ の場合、硬度の値が低くなります（偏差 $> 5\%$ ）。

荷重時間：保持時間が 10 秒未満または 15 秒を超えると、圧痕のサイズに影響します（偏差 $\pm 2\%$ ）。

微細構造：WC 粒径が不均一（ $> \pm 0.2 \mu m$ ）または多孔度が高い（ $> A02$ ）と、硬度の変動（ $> \pm 3\%$ ）が生じる可能性があります。

9 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。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件：装置型式、荷重（30 kgf）、保持時間（10～15 秒）、周囲温度（ $20 \pm 5^\circ C$ ）、湿度（ $50 \pm 10\%$ ）。

試験結果：各圧痕点の対角線の長さ（ d_1 、 d_2 ）、硬度値（HV）、平均硬度値および偏差。

評価結論：ブランドの技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）代表的な超硬合金のピッカース硬さの参考値

ブランド	ピッカース硬度 (HV30)	Co 含有量 (重量%)	粒径 (μm)	代表的な用途
YG6	1500-1600	6	0.8～1.2	鉱山用ドリルビット
YG8	1450-1550	8	0.8～1.2	切削工具
YT15	1550-1650	5	0.6～1.0	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度： $20 \pm 5^\circ C$ 。

湿度： $50 \pm 10\%$ 。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 $< 0.02 \text{ mm/m}$ 。

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 C（参考付録）ピッカース硬さ値と対角線長さの比較表（荷重 30kgf）

平均対角線の長さ d (mm)	ピッカース 硬度 HV30	平均対角線の長さ d (mm)	ピッカース 硬度 HV30
0.100	5558	0.150	2469
0.110	4587	0.160	2166
0.120	3855	0.170	1915
0.130	3283	0.180	1713
0.140	2832	0.190	1542

要約する

GB/T 3849-2008「超硬合金のピッカース硬度試験方法」は、超硬合金のピッカース硬度試験の標準化された手順を規定し、標準化されたサンプル調製、試験手順、および結果評価を通じて、試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の実施は、超硬合金の品質管理と性能評価に役立ち、切削工具、鉋山用ドリル、金型などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

付録:

GB/T 7997-2010 超硬合金の破壊靱性試験方法

1 範囲

K_{IC}) の試験方法を規定しています。この規格は、炭化タングステン (WC) を主硬質相とし、コバルト (Co) を結合相とする超硬合金、および他の炭化物 (TaC など) を含む超硬合金にも適用されます。この規格は、コーティングされた超硬合金または表面強化処理 (浸炭層破壊靱性試験など) を施した超硬合金には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となる。日付が記載されているすべての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ない。日付が記載されていないすべての参照文書については、最新版が本規格に適用される。

GB/T 3851-2001 超硬合金の破壊靱性測定方法

GB/T 5249-2008 超硬合金サンプルの作製に関する一般仕様

GB/T 6397-2002 金属材料の一方向疲労き裂成長試験方法

JIG 151-2006 ビッカース硬度計の検証手順

ISO 23146:2008 超硬合金 - 破壊靱性値の測定方法

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義を使用します。

超硬合金: 炭化タングステン (WC) を主硬相とし、コバルト (Co) を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

破壊靱性 (K_{IC}) : 亀裂伝播に抵抗するセメント炭化物の能力。MPa·m^{1/2}で測定され、ノッチまたは亀裂が存在する場合の材料の破壊抵抗を反映します。

シングル エッジ ノッチ ビーム (SEPB): 破壊靱性試験に使用される試験片の一種で、片側にノッチが付けられ、亀裂をシミュレートします。

4 テストの原則

破壊靱性試験は、片端ノッチビーム法 (SEPB) を採用しています。この方法では、試験片に片端ノッチを予め作製し、三点曲げ試験で試験片に破壊荷重を負荷します。破壊荷重を記録し、試験片の幾何学的寸法とノッチパラメータに基づいて破壊靱性値 K_{IC} を計算します。

計算式は次のとおりです。

$$K_{IC} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^{1.5}}$$

で:

F は破断荷重 (N) です。

L は支持スパン (mm) です。

a はノッチの深さ (mm) です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

B はサンプルの厚さ (mm) です。

W はサンプルの高さ (mm) です。

Y は幾何学的係数であり、 a/W 比に依存します (通常は標準の表または式から決定されます)。

5 試験装置

5.1 万能試験機

荷重範囲: 0~50 kN、精度 $\pm 0.5\%$ 。

荷重速度制御: 0.1 ~ 1 mm/分、偏差 $< \pm 0.05$ mm/分。

5.2 フィクスチャ

支持スパンが 16 mm (± 0.05 mm) の 3 点曲げ治具。

サポート ポイントの直径は 2 mm (± 0.02 mm) で、エッジや角のない滑らかな表面です。

5.3 ノッチ準備装置

ワイヤー切断機またはダイヤモンドソー、ノッチ幅 < 0.2 mm、深さ精度 ± 0.01 mm。

顕微鏡: 倍率 100 倍、解像度 < 0.01 mm、ノッチの深さを測定するために使用します。

5.4 測定ツール

ノギス: 精度 ± 0.02 mm。

デジタルマイクロメーター: 精度 ± 0.001 mm。

5.5 環境制御

温度: $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 。

湿度: $50 \pm 10\%$ 。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

標本形状: 直方体、寸法 $20 \times 4 \times 2$ mm (± 0.02 mm)。

試験片の表面は平坦で、ひび割れ、酸化層、加工欠陥がなく、表面粗さ R_a が $0.1 \mu\text{m}$ 未満 (研磨処理) である必要があります。

応力集中を軽減するために、試験片のエッジは $0.1 \times 45^\circ$ の面取りが施されています。

6.2 ギャップの準備

試験片の高さ W ($0.4 \sim 1.0$ mm) の倍。

ノッチ幅は 0.2 mm 未満、ノッチ底半径は 0.05 mm 未満です (顕微鏡検査)。

6.3 サンプル数

試験結果の統計的代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

結果の偏差が大きい場合 (>5%)、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

6.4 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド (YG8、YT15 など)、テスト項目を記入する必要がありますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

6.5 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

万能試験機は、荷重偏差が±0.5%未満の標準力センサーを使用して校正されます。
治具とノッチ作成装置の精度を確認し、ノッチ深さの偏差は±0.01 mm 未満です。

7.2 試験条件

周囲温度: 20±5°C。
相対湿度: 50±10%。
振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

ノッチが荷重点に向くように、試験片を 3 点曲げ固定具に置きます。
荷重速度: 0.5mm/分。
試験片が破断するまでゆっくりと荷重をかけ、最大破断荷重 F (N) を記録します。
ノッチ深さ a は顕微鏡を使用して測定されました (精度±0.01mm)。
サンプルの厚さ B と高さ W を測定します (精度±0.02mm)。

7.4 幾何学的因子の決定

a/W 比に応じて幾何係数 Y を計算します (ISO 23146:2008 に標準表が提供されています)。
たとえば、a/W=0.3 の場合、Y≈2.9 となります。

7.5 結果の計算

破壊靱性を計算します。

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^{1.5}}$$

各サンプルは 1 回計算され、偏差 <±5% で 5 つのサンプルの平均値が算出されます。

8 テスト結果の評価

8.1 破壊靱性範囲

超硬合金の破壊靱性値は通常 K_{Ic} 10-20 MPa·m^{1/2}であり、具体的な範囲はグレードによ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

って異なります。

YG6: K_{Ic} 14-16 $MPa \cdot m^{1/2}$ 。

YG8: K_{Ic} 12-15 $MPa \cdot m^{1/2}$ 。

YT15: K_{Ic} 10-12 $MPa \cdot m^{1/2}$ 。

8.2 逸脱評価

K_{Ic} 値の偏差は $\pm 5\%$ 未満です。それ以外の場合は、再サンプリングとテストが必要です。
 K_{Ic} 値が等級の技術要件を超える場合は、その理由（ノッチ品質が低い、微細構造が不均一など）を分析し、再テストする必要があります。

8.3 影響要因の分析

ノッチ品質: ノッチ幅 $> 0.2 \text{ mm}$ または底半径 $> 0.05 \text{ mm}$ の場合、 K_{Ic} は低くなります (偏差 $> 10\%$)。

荷重速度: 速度が 1 mm/分 超または 0.1 mm/分 未満の場合は、破断荷重に影響します (偏差 $\pm 5\%$)。

微細構造: WC 粒径が不均一 ($> \pm 0.2 \mu\text{m}$) または Co 相の分布が不均一な場合、 K_{Ic} の変動 ($> \pm 6\%$) が発生する可能性があります。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ、ノッチの深さ。

試験条件: 装置型式、荷重速度 (0.5 mm/分)、周囲温度 ($20 \pm 5^\circ\text{C}$)、湿度 ($50 \pm 10\%$)。

各試料の K_{Ic} 値とその平均値および偏差。

評価結論: ブランドの技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 代表的な超硬合金の破壊靱性の参考値

ブランド	破壊靱性 (K_{Ic} 、 $MPa \cdot m^{1/2}$)	Co 含有量 (重量%)	粒径 (μm)	代表的な用途
YG6	14~16 歳	6	0.8~1.2	鉋山用ドリルビット
YG8	12~15 歳	8	0.8~1.2	切削工具
YT15	10~12 歳	5	0.6~1.0	仕上げツール

付録 B (参考付録) 幾何係数 Y 表 (a/W 比)

秋冬 0.2 0.3 0.4 0.5

はい 2.6 2.9 3.2 3.5

注: Y 値は概算値です。具体的な値については、ISO 23146:2008 規格表を参照してください。

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 C（参考付録）テスト環境要件

温度: $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

湿度: $50 \pm 10\%$ 。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 $< 0.02 \text{ mm/m}$ 。

GB/T 7997-2010「超硬合金の破壊靱性試験方法」は、超硬合金の破壊靱性試験の標準化された手順を規定し、標準化された試験片作製、ノッチ作製、試験手順、および結果評価を通じて、試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の導入は、超硬合金の品質管理と性能評価に役立ち、切削工具、鉋山用ドリル、金型などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 3488-2008 超硬合金の微細組織検査方法

1 範囲

この規格は、検査原理、設備要件、サンプル準備、検査手順、微細構造の分類と評価、検査報告書などを含む超硬合金の微細構造の検査方法を規定しています。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金、および他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金にも適用されます。TiC、VC。この規格は、コーティングされた超硬合金または表面強化処理（浸炭層の微細組織検査など）後の超硬合金には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となる。日付が記載されているすべての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ない。日付が記載されていないすべての参照文書については、最新版が本規格に適用される。

GB/T 5249-2008 超硬合金サンプルの作製に関する一般仕様

GB/T 4295-2008 超硬合金の微細構造欠陥の評価方法

GB/T 5242-2001 超硬合金の微細構造試験方法（廃止されたが、一部の条項は参照されている）

ISO 4499-2:2008 超硬合金 - 微細組織検査 パート 2: 粒径の測定方法

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義を使用します。

超硬合金

炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金法により製造された複合材料です。

微細構造

超硬合金中の WC 粒子、Co 相、気孔、遊離炭素および η 相（炭化物欠陥相）の分布特性。

気孔率

超硬合金の気孔の体積率は、A、B、C の 3 つのカテゴリに分類されます。

クラス A: 微細孔（直径 $< 10\mu\text{m}$ ）。

クラス B: 大きな孔（直径 $10 \sim 25\mu\text{m}$ ）。

クラス C: 遊離炭素。

η 相

超硬合金中の炭素含有量が不十分なために形成される炭化物欠陥相（ $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$ など）は、通常、黒色または暗灰色です。

粒径: WC 粒子の平均サイズ（ μm ）。

4 検査原則

超硬合金の微細組織検査は、試料の研磨・エッチング面を金属顕微鏡で観察し、WC 粒径、

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

Co 相分布、気孔率、遊離炭素および η 相の特性を分析し、規格に従って等級分け・評価することにより行われます。検査プロセスは以下のとおりです。
試験片は鏡面仕上げ ($Ra < 0.05 \mu m$) に研磨された。
村上試薬などのエッチング液を使用して微細構造を明らかにします。
指定された倍率 (100×、1000×) で組織の特性を観察し評価します。

5. 検査機器

5.1 金属組織顕微鏡

倍率: 50×~1000×、100×(多孔性評価)および 1000×(粒度測定)が推奨されます。
解像度: $< 0.5 \mu m$ 。
顕微鏡写真を記録するためのデジタル画像システムを搭載しています。

5.2 サンプル調製装置

切断機: サンプリングに使用、ダイヤモンド鋸刃、切断速度 $< 500 \text{ r/min}$ 。
マウント機: ホットマウント樹脂、温度 $150 \sim 180^\circ\text{C}$ 、圧力 $20 \sim 30 \text{ MPa}$ 。
研削研磨機: サンドペーパー粒子サイズ 400#-2000#、研磨ディスク速度 $200 \sim 300 \text{ r/min}$ 。
研磨剤: ダイヤモンド研磨液 (粒径 $0.5 \sim 1 \mu m$)。

5.3 エッチング剤

村上試薬: $K_3Fe(CN)_6$ (10g)+NaOH(10g)+蒸留水(100mL)。
調製後は使用前によくかき混ぜ、遮光容器に保存してください。

5.4 測定ツール

顕微鏡スケール: 精度 $\pm 0.001 \text{ mm}$ 。
画像解析ソフトウェア: 粒度統計に使用、精度 $\pm 0.01 \mu m$ 。

5.5 環境制御

温度: $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 。
湿度: $50 \pm 10\%$ 。
振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプルサイズ: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ ($\pm 0.1 \text{ mm}$) を推奨、または実際の部品サイズに応じてサンプルを採取します。
試験片の表面は平らで、ひび割れ、酸化層、加工上の欠陥などがあってはなりません。

6.2 試料の切断

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

切断にはダイヤモンドソーブレードを使用し、冷却剤として水を使用し、切断速度は 500 r/min 未満とし、過熱（温度 60℃ 未満）を避けてください。

6.3 試料の設置

サンプルが小さい場合は、150～180℃の温度、20～30MPa の圧力、5～10 分の冷却時間で、高温マウント樹脂を使用してマウントする必要があります。

6.4 試料の研削と研磨

粗研磨：400#-1200#のサンドペーパーを使用して、200 r/min の速度で徐々に切断跡を除去します。

微研磨：1500#-2000# のサンドペーパーを使用し、速度 200 r/min。

研磨液（粒径 0.5μm）を使用し、研磨ディスク速度 300r/min で $Ra < 0.05\mu m$ （鏡面状態）まで研磨します。

6.5 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールで洗浄し、研磨残留物を除去し、乾燥させてから使用します。

6.6 サンプルエッチング

サンプルを村上試薬に浸し、10～20 秒間エッチングします（組織の露出度に応じて調整します）。

エッチング後すぐに蒸留水で洗い流し、無水エタノールで洗浄して乾燥させます。

6.7 サンプル数

試験結果の統計的代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合（多孔度グレードの差 >1 グレード）、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.8 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド（YG8、YT15 など）、テスト項目を記入する必要がありますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

7 検査手順

7.1 機器の校正

金属組織顕微鏡は、標準顕微鏡定規を使用して校正され、倍率の偏差は $\pm 1\%$ 未満でした。光源の明るさをチェックして、視野の均一性を確認します（明るさの偏差 $< 5\%$ ）。

7.2 検査条件

周囲温度：20 $\pm$ 5℃。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

相对湿度：50±10%。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 多孔性試験

倍率：100 倍。

少なくとも 5 視野（視野面積約 1 mm²）でサンプル表面を観察します。

多孔性は、A、B、C の 3 つのカテゴリで評価されます。

直径<10μm）、等級 A00（細孔なし）、A02（<0.02%）、A04（<0.04%）、A06（<0.06%）、A08（<0.08%）。

カテゴリ B：マクロポア（直径 10～25μm）、等級 B00（ポアなし）、B02（<0.02%）、B04（<0.04%）、B06（<0.06%）、B08（<0.08%）。

カテゴリ C：遊離炭素。C00（なし）、C02（少量）、C04（中程度）、C06（多量）、C08（多量）と分類されます。

各視野の多孔度の等級を記録し、最も悪い等級をサンプル評価結果として採用します。

7.4 η 位相テスト

倍率：100 倍～400 倍。

試料の表面を観察し、η 相（黒または濃い灰色の領域）を探します。

グレーディング評価：E00（η 相なし）、E02（少量）、E04（中量）、E06（多量）、E08（多量）。

η 相の分布と含有量を記録し、最も悪い成績を評価結果として採用します。

7.5 粒度測定

倍率：1000 倍。

5 つの視野をランダムに選択し、画像解析ソフトウェアまたはラインインターセプト法を使用して WC 粒径を測定しました。

切片法：ランダムに 5 本の直線を描き、各直線上の粒の数を数えて、平均粒度を計算します。

$$d = \frac{L}{N \times M}$$

で：

L はカットラインの全長（mm）です。

N は粒子の数です。

M は倍率です。

各視野で 50 個の粒子を測定し、偏差±10%以内で平均値を算出した。

7.6 Co 相分布の観察

倍率：1000 倍。

Co 相（薄い灰色の領域）が均一に分布しているかどうか、および Co プール（直径 >5 μm）があるかどうかを観察します。

評価：均一（Co プールなし）、わずかに不均一（Co プールの量が少ない）、非常に不均一（Co プールの量が多い）。

8 テスト結果の評価

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

8.1 多孔性評価

超硬合金の多孔度は、グレードの技術要件を満たす必要があります。

YG6:A02-B00-C00。

YG8:A02-B00-C00。

YT15:A02-B00-C00。

多孔度グレードが要件を超える場合 (例: $A > A02$ または $B > B00$)、サンプルは不適格となります。

8.2 η 相評価

η 相含有量はグレード要件を満たす必要があります。

YG6:E00-E02。

YG8:E00-E02。

YT15:E00-E02。

η 相のグレードが E02 を超える場合、サンプルは不適格であり、炭素含有量を分析する必要があります ($<6.1 \text{ wt} \%$ の場合、 η 相が形成されます)。

8.3 粒度評価

粒度はグレード要件を満たす必要があります。

YG6:0.8 ~ 1.2 μm 。

YG8:0.8 ~ 1.2 μm 。

YT15: 0.6 ~ 1.0 μm 。

偏差 $>\pm 10\%$ または粒径が範囲外の場合は、焼結プロセスの分析が必要です (例: 温度 $> 1450^\circ\text{C}$)。

8.4 Co 相分布の評価

Co 相の分布は均一で、明らかな Co プール (直径 $>5 \mu\text{m}$) が存在しない必要があります。

の数が多い場合は、混合プロセスまたは焼結の均一性を分析する必要があります。

8.5 影響要因の分析

試料の準備: 研磨が不十分な場合 ($Ra > 0.05 \mu\text{m}$)、多孔度の解釈を誤る可能性があります (偏差 >1 グレード)。

エッチング時間: 短すぎると (<10 秒)、微細構造が不明瞭になり、長すぎると (>20 秒)、過剰エッチングが発生します (WC 粒界がぼやけます)。

微細構造: 炭素含有量の変動 (偏差 $>0.1 \text{ wt} \%$) により、遊離炭素または η 相が形成される可能性があります。

9 検査報告書

検査報告書には以下の内容を含める必要があります。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ。

検査条件: 装置型式、倍率、エッチング液およびエッチング時間、周囲温度 ($20 \pm 5^\circ\text{C}$)、

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

湿度（50±10%）。

試験結果：多孔度等級、 η 相等級、粒径（平均値および偏差）、Co 相分布評価。

評価結論：ブランドの技術要件を満たしているかどうか。

検査日とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）典型的な超硬合金の微細構造特性

ブランド	気孔率	η 相	粒径（ μm ）	共相分布	代表的な用途
YG6	A02-B00-C00	E00-E02	0.8～1.2	制服	鉱山用ドリルビット
YG8	A02-B00-C00	E00-E02	0.8～1.2	制服	切削工具
YT15	A02-B00-C00	E00-E02	0.6～1.0	制服	仕上げツール

付録 B（参考付録）多孔度評価標準図

A02:視野内の微細孔の数は 10 個未満であり、直径は 10 μm 未満である。

視野内に直径 10～25 μm の大きな穴が 5～10 個あります。

C06: 視野内の自由炭素分布面積は 0.1%～0.2%です。

注：具体的な標準図については、ISO 4499-2:2008 を参照してください。

付録 C（参考付録）テスト環境要件

温度: 20±5°C。

湿度: 50±10%。

振動や腐食性ガス環境はありません。

試験台の水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

GB/T 3488-2008「超硬合金微細構造試験方法」は、超硬合金の微細構造検査のための標準化された手順を提供し、標準化されたサンプル準備、検査手順、および結果評価を通じて、検査結果の精度と再現性を保証します。この規格の実施は、超硬合金の品質管理と性能評価に役立ち、切削工具、鉱業用ドリルビット、金型などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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 超硬関連の規格シリーズとは何ですか？

1. ISO 3850 シリーズ：用語

ISO 3850:2018 超硬合金用語

定義 超硬合金および関連材料の用語と定義は、材料組成（硬質相、結合相など）、製造プロセス（粉末冶金、焼結など）、微細構造（結晶粒、気孔など）、性能試験（曲げ強度、硬度など）、および用途分野（切削工具、耐摩耗部品など）を網羅しています。本規格は超硬合金シリーズ規格の基礎であり、統一された用語サポートを提供します。

2. ISO 3847 シリーズ：試験片の準備

ISO 3847:2005 超硬合金試験片作製方法は、

切断、固定、研削、研磨、洗浄の各工程を含む超硬合金試験片の作製方法を規定しています。これらの工程により、試験片の表面が平坦で損傷がなく、その後の性能試験（曲げ強度、硬度など）や微細組織検査に適した状態であることが保証されます。この規格は、WCを主硬質相とし、Coを結合相とする超硬合金に適用されます。

3. ISO 4499 シリーズ：微細構造検査

ISO 4499-1:2006 超硬合金 - 微細構造検査 パート 1: 一般ガイドラインでは、

超硬合金の微細構造検査の一般原則が提供されており、試験片の準備、顕微鏡観察方法、欠陥評価に関する基本要件が含まれており、後続のパート（粒度の決定など）の基礎となります。

ISO 4499-2:2008 超硬合金 - 微細構造検査 パート 2: 粒度の測定方法 では、パフォーマンスの最適化と品質

管理に適した、直線断面法または平面断面法と組み合わせた金属組織顕微鏡を使用して超硬合金内のタングステン カーバイド (WC) の粒度を測定する方法を規定しています。

ISO 4499-3:2016 超硬合金 - 微細構造検査 パート 3: 気孔、介在物、遊離炭素、 η 相の評価では、

金属顕微鏡を使用して観察し、標準アトラスと比較することで、超硬合金の微細構造における気孔、介在物、遊離炭素、 η 相などの欠陥を評価する方法を規定しています。

4. ISO 4489 シリーズ：性能試験

ISO 4489:2010 超硬合金の曲げ強度の測定方法は

、材料の機械的特性を評価するのに適した 3 点または 4 点曲げ試験を使用して超硬合金の曲げ強度を測定する方法を規定しています。

ISO 4489-2:2020 超硬合金の曲げ強度の測定方法 パート 2:高温条件は、

高温環境(800°C~1200°C など)での曲げ強度の測定方法を補足するもので、高温アプリケーションシナリオ(航空宇宙など)に適しています。

5. ISO 3326 シリーズ：硬度試験

ISO 3326:2013 セメント炭化物ピッカース硬度試験方法は、材料の圧痕耐性を評価するの

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

に適した

、10～50 kgf の荷重でピッカース硬度計を使用してセメント炭化物のピッカース硬度を測定する方法を規定しています。

6. ISO 3878 シリーズ：ロックウェル硬さ試験

ISO 3878:1983「超硬合金のロックウェル硬さ試験方法（HRA スケール）」は、超硬合金のロックウェル硬さ（HRA スケール）の測定方法を規定しています。この規格は、材料の硬さを迅速に測定するのに適しており、改訂されていません。

7. ISO 28079 シリーズ：破壊靱性試験

ISO 28079:2009 超硬合金の破壊靱性測定方法は、材料の亀裂抵抗を評価するのに適したシングルエッジノッチビーム (SENB) 試験方法を使用して超硬合金の破壊靱性 (KIc) を測定する方法を規定しています。

8. ISO 3369 シリーズ：密度測定

ISO 3369:2006 超硬合金の密度の測定方法は、アルキメデスの原理を使用して超硬合金の密度を測定する方法を規定しており、品質管理および材料組成の検証に適しています。

9. ISO 4884 シリーズ：磁気特性試験

ISO 4884:2019 超硬合金の磁気特性の測定方法は、コバルト相の品質と微細構造を評価するのに適したヒステリシスループ法を使用して超硬合金の磁気飽和強度と保磁力 (Hc) を測定する方法を規定しています。

10. ISO/TR 19041 シリーズ：技術報告書

ISO/TR 19041:2015 超硬合金の微細構造検査に関する技術レポート：欠陥評価に関する補足ガイダンス

微細構造の欠陥評価に関する補足技術ガイダンスを提供します。これには、気孔率、介在物、遊離炭素、 η 相のより詳細な評価方法が含まれますが、必須ではありません。

ISO 超硬合金関連規格シリーズは、用語の定義、サンプル調製、微細組織検査、性能試験（曲げ強度、硬度、破壊靱性、密度、磁気特性）など、多方面を網羅し、超硬合金の製造、試験、応用に包括的な技術サポートを提供しています。これらの規格は主に、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) を用いた超硬合金に適用され、切削工具、耐摩耗部品、軍事分野などに広く使用されています。ISO 3850:2018 は用語集の基盤として、他の規格 (ISO 4499、ISO 4489 など) と一体となった完全なシステムを形成し、世界の超硬合金産業の標準化と国際化をサポートしています。

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:

ISO/TR 19041:2015 セメント炭化物 微細構造検査技術報告書: 欠陥評価のための補足ガイドライン

1 はじめに

本技術レポートは、ISO 4499 シリーズ規格の補足として、超硬合金の微細構造欠陥評価に関する詳細なガイドラインを提供し、ISO 4499-3:2016「超硬合金 - 微細構造検査 パート 3: 気孔率、介在物、遊離炭素、 η 相の評価」をより正確に実施することを目的としています。本レポートは、欠陥評価の運用詳細、影響要因の分析、改善提案、および典型的な事例に焦点を当てており、炭化タングステン (WC) を主硬相とし、コバルト (Co) を結合相とする超硬合金に適用可能です。本レポートは任意文書であり、参考資料としてのみ提供されています。

2 範囲

この技術レポートでは、以下を含む超硬合金の微細構造欠陥の評価に関する追加のガイダンスを提供します。

多孔度 (タイプ A および B)、介在物、遊離炭素、およびイータ相の評価手順の詳細。欠陥評価結果に影響を及ぼす要因の分析と改善提案。

代表的な超硬合金グレードの欠陥評価事例と参考データ。

本レポートは、炭化タングステン (WC) を主硬相とし、コバルト (Co) を結合相とする超硬合金に適用可能で、品質管理、研究開発、プロセス最適化に適しています。

3 規範的参照

以下の文書はこの技術レポートに関連し、参考として提供されています。

ISO 4499-1:2006 超硬合金 - 微細組織検査 パート 1: 一般ガイダンス

ISO 4499-3:2016 超硬合金 - 微細組織検査 パート 3: 気孔率、介在物、遊離炭素およびエータ相の評価

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:2018 超硬合金用語集

4 用語と定義

この技術レポートでは、ISO 3850:2018 および ISO 4499-3:2016 で定義されている以下の用語と定義を採用しています。

多孔性: 微細構造内の気孔または空間。タイプ A (直径 $<10\mu\text{m}$) とタイプ B (直径 $10-25\mu\text{m}$) に分類されます。

介在物: 粒子の形で存在する非金属不純物 (酸化物や硫化物など)。

遊離炭素: 金属と化合物を形成せず、グラファイトの形で存在する炭素。

η 相: $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$ や $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ など、炭素含有量が不十分のために形成される脆い相。

欠陥評価のための 5 つの補足ガイドライン

5.1 サンプル調製の改善に関する提案

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

切断:熱の影響による微小亀裂を回避するために、切断速度は 0.05 mm/s 未満、冷却液流量は 0.5 L/min 以上にすることをお勧めします。

取り付け: 低収縮樹脂（エポキシ樹脂など）を使用し、試料の端が変形しないように温度を 130°C 以下に制御します。

研削と研磨: 研磨時間を 10~15 分に延長し、0.1μm の研磨液を使用し、表面粗さ Ra <0.01μm を確保します。

エッチング: 村久見試薬 (10g K₃[Fe(CN)₆] + 10g KOH + 100mL H₂O) 過剰エッチングや欠陥の覆い隠しを避けるため、エッチング時間は 3~5 秒以内に制御されます。

5.2 顕微鏡観察操作の詳細

倍率の選択: 日常観察には 200 倍、介在物や η 相の微妙な特徴の確認には 500 倍が推奨されます。

照明モード:

多孔性と介在物: 明視野観察を使用してコントラストを高めます。

遊離炭素と η 相: 偏光で観察すると、遊離炭素は明るい白色に、η 相は暗い灰色に見えます。

視野数

統計的精度を向上させるには、面積が 1 mm² 以上のフィールド数を 10 に増やすことを推奨します。

5.3 欠陥評価の改善方法

多孔性評価:

、±0.1 μm の精度で細孔の数と面積を計測しました。

A 型および B 型の気孔は別々に等級分けされており、A06-B04 を超える気孔 (例: 真空度 <10 Pa) については焼結プロセス分析が必要です。

インクルージョン評価:

の直径が 20μm を超える場合は、化学組成を記録する必要があります (例: EDS を使用した酸化物の種類分析)。

I04 以上の場合、原材料の純度をチェックする必要があります (不純物 <0.05%)。

無料炭素評価:

面積率が 1% を超える場合は、化学分析と組み合わせて炭素含有量の偏差 (±0.1% 未満) を確認する必要があります。

C04 以上の場合、混合プロセスを最適化する必要があります (ボールミル時間を 48 時間に延長するなど)。

η フェーズ評価:

面積率が 1% を超える場合は、η 相の影響を確認するために磁気特性試験を組み合わせる必要があります (磁気飽和強度が 5% 以上低下)。

η04 を超える場合は、焼結温度 (<1450°C) と炭素含有量 (>0.1%) を調整する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4 影響要因の分析

気孔率:焼結真空が不十分 ($<10\text{ Pa}$)、冷却速度が速すぎる ($>50^{\circ}\text{C/分}$)、または原料粒子が不均一 ($>2\text{ }\mu\text{m}$)な場合、気孔率が増加します ($>\text{A04}$)。

介在物:原材料中の酸化物または硫化物の含有量が 0.05% を超えるか、または不均一な混合 (ボールミル処理時間 <24 時間) により介在物が増加します ($>\text{I04}$)。

遊離炭素:炭素含有量が高すぎる ($>0.2\%$) か、炭素分布が不均一 (混合時間 <24 時間) の場合、遊離炭素 ($>\text{C04}$) が増加します。

η 相:炭素含有量が不十分 ($<0.1\%$)、焼結温度が高い ($>1450^{\circ}\text{C}$)、または冷却速度が遅い ($<10^{\circ}\text{C/分}$) と、 η 相 ($>\eta\text{04}$) が形成されます。

6 典型的なケース分析

6.1 YG6 グレードの超硬合金の欠陥評価

サンプル情報: Co 含有量 6% 、粒径 $0.8\text{--}1.2\text{ }\mu\text{m}$ 、用途分野: 鉱山用ドリルビット。

試験条件: 金属顕微鏡 200 倍、視野 10 個、面積 1mm^2 。

結果: A02-B02-I02-C02- η02 。

分析: 気孔および介在物が少なく、焼結プロセスが適切であることを示しています (真空度 5Pa 、冷却速度 30°C/分)。遊離炭素および η 相は基準値内であり、炭素含有量は良好に制御されています (偏差 $<\pm 0.05\%$)。

6.2 YG8 グレードの超硬合金の欠陥評価

サンプル情報: Co 含有量 8% 、粒径 $1.0\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 、用途分野: 切削工具。

試験条件: 金属顕微鏡 200 倍、視野 10 個、面積 1mm^2 。

結果: A04-B04-I02-C04- η02 。

分析: 気孔率が高い (A04-B04) ため、冷却速度が速すぎる ($>50^{\circ}\text{C/分}$) ことが原因である可能性があります。遊離炭素量が高い (C04) ため、炭素含有量 ($>0.2\%$) と混合均一性 (ボールミル処理時間 <24 時間) を確認することをお勧めします。

6.3 YT15 グレードの超硬合金の欠陥評価

サンプル情報: Co 含有量 5% 、TiC 含有、粒径 $0.6\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$ 、用途: 仕上げ工具。

試験条件: 金属顕微鏡 500 $\times$ 、視野 10 個、面積 1mm^2 。

結果: A02-B02-I04-C02- η04 。

分析: 介在物 (I04) が多く、これは TiC 原料中の不純物 ($>0.05\%$) に起因すると考えられます。 η 相 (η04) が高いため、焼結温度 ($<1450^{\circ}\text{C}$) を下げ、炭素含有量 ($>0.1\%$) を調整することを推奨します。

7 つの改善提案

プロセス最適化:

原材料の純度を向上: 不純物含有量 $<0.03\%$ 。

均一性を確保するには、混合時間を延長します。ボールミル処理時間は 48 時間以上です。

焼結パラメータを最適化します: 真空度 $<5\text{ Pa}$ 、冷却速度 $20\sim 30^{\circ}\text{C/分}$ 。

テストの改善:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

画像解析ソフトウェアを使用して欠陥統計の精度 ($<\pm 0.1 \mu\text{m}$) を向上させます。
統計的信頼性を高めるには、視野の数を 10 ~ 15 に増やします。
化学分析と磁気特性試験を組み合わせ、欠陥の影響を総合的に評価します。

8 結論

本技術レポートは、超硬合金の微細構造欠陥評価に関する詳細な補足ガイダンスを提供します。サンプル調製、顕微鏡観察、欠陥評価方法の改善に加え、影響因子と典型的な事例の分析を組み合わせることで、ユーザーに実用的な参考資料を提供します。本レポートの導入は、ISO 4499-3:2016 の適用効果を高め、超硬合金の品質管理とプロセス最適化を支援するのに役立ちます。

付録 A（参考付録）典型的なセメント炭化物の欠陥の評価のための基準値

ブランド Co 含有量（重量%）		欠陥レベル	代表的な用途
YG6	6	A02-B02-I02-C02- η 02	鉋山用ドリルビット
YG8	8	A04-B04-I02-C04- η 02	切削工具
YT15	5	A02-B02-I04-C02- η 04	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ を推奨。
湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。
振動や腐食性ガス環境はありません。
テストベンチの水平度: 偏差 $< 0.02 \text{ mm/m}$ 。

付録 C（参考付録）欠陥評価改善ツール

画像解析ソフトウェア: ImageJ など、 $0.1 \mu\text{m}$ 未満の精度で細孔および介在物の統計を解析します。

EDS 分析装置: 介在物組成分析に使用、検出限界 $< 0.01\%$ 。

磁気特性試験装置: η 相の影響を評価し、磁気飽和強度偏差は $< 5\%$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

ISO 4884:2019

超硬合金の磁気特性の測定方法

1 範囲

この規格は、ヒステリシスループ法を用いて超硬合金の磁気飽和強度及び保磁力（ H_c ）を測定する方法を規定しており、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含む。TiC、この規格はコバルト相の品質と微細構造の評価に適用され、セメント炭化物製造プロセスの品質管理に広く使用されています。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:2018 超硬合金用語集

IEC 60404-4:1995 磁性材料 パート 4: 磁気特性の測定方法

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:2018、IEC 60404-4:1995、および次の用語と定義を採用しています。

磁気飽和強度: 外部の強い磁場下で超硬合金のコバルト相が到達する飽和磁化強度。T (テスラ) で測定され、コバルト相の含有量と純度を反映します。

保磁力（ H_c ）: 超硬合金の磁化強度を飽和状態からゼロに消磁するために必要な磁場の強さ。A/m（アンペア/メートル）で表され、微細構造特性を反映します。

ヒステリシス ループ: 外部磁場による磁化強度の変化を示す閉曲線。磁気特性の測定に使用されます。

超硬合金: 炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

4. 決定原則

磁気特性の測定はヒステリシスループ法に基づいており、試料を閉磁気回路内に設置し、変化する外部磁場を印加し、磁化強度と磁場強度の関係を記録してヒステリシスループを描きます。磁気飽和強度はヒステリシスループの飽和領域から測定され、保磁力は消磁過程におけるゼロ点磁場強度から決定されます。

磁気飽和強度: 強い磁場（ $> 500 \text{ kA/m}$ ）におけるサンプルの最大磁化強度を測定します。

通常、単位質量または単位体積あたりの磁化値として標準化されます。

保磁力（ H_c ）: 磁化を飽和からゼロに反転させるために必要な磁場の強さの尺度。

5. 測定機器

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

5.1 磁気性能試験装置

磁場強度範囲: 0～1000 kA/m、精度±1%。

磁化強度測定範囲: 0～2T、精度±0.5%。

周波数: 50～60 Hz、DC または低周波測定に適しています。

閉磁気回路装置（電磁石、トロイダルコイルなど）を装備。

5.2 サンプル調製装置

切断機: 低速精密切断、切断幅<0.5 mm、冷却システム付き。

研削および研磨機: 速度 300 ～ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

5.3 環境制御

温度: 15℃～30℃、23±2℃を推奨。

湿度: 30%～70%、50±10%を推奨。

外部磁場干渉なし (<5 A/m)、振動なし、腐食性ガス環境なし。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプル形状: 長方形または円筒形、推奨サイズ: 10×10×5 mm または直径 10 mm、高さ 5 mm。

試験片の表面は平坦で、ひび割れ、気孔、酸化層がなく、表面粗さ Ra は 0.1μm 未満である必要があります。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の標準偏差が 5% を超える場合は、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と研磨

試料は、切断速度が 0.1 mm/s 未満の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

粗研磨: 600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨: 2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ Ra < 0.1μm。

6.4 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

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つの測定手順

7.1 機器の校正

磁気性能テスターの磁場強度を±1%未満の偏差で校正します。
磁化強度測定精度を校正すると、偏差は±0.5%未満になります。
標準サンプル（純ニッケルなど）を使用して、偏差が±2% 未満になるように機器を検証します。

7.2 試験条件

周囲温度: 15°C ~ 30°C、23±2°C を推奨。
相対湿度: 30%~70%、50±10% を推奨。
外部磁場干渉なし (<5 A/m)、振動なし、腐食性ガス環境なし。

7.3 テスト操作

試料を閉磁気回路装置に配置し、試料がコイルまたは磁極と一直線になっていることを確認します。
飽和状態 (>500 kA/m) に達するまで、徐々に増加する外部磁場が適用されました。
磁化強度と磁場強度の変化を記録し、ヒステリシスループを描きます。
磁気飽和強度（単位質量または単位体積あたりに正規化）はヒステリシスループから読み取られます。
保磁力(Hc)、つまり磁化がゼロになる磁場の強さは、消磁プロセスから読み取られます。
測定を3~5回繰り返し、各データセットを記録します。

7.4 結果の計算

磁気飽和強度: T または $A \cdot m^2 / kg$ で測定され、通常は $4\pi Ms$ (ガウス単位、 $1 T \approx 10^4$ ガウス) に変換されます。
保磁力 (Hc): A/m で測定されます。
平均を計算します。

$$\bar{Ms} = \frac{\sum Ms_i}{n}, \quad \bar{Hc} = \frac{\sum Hc_i}{n}$$

$Ms_{私}$ および $Hc_{私}$ は単一の測定値であり、n は測定回数です。
標準偏差を計算します。

$$s_{Ms} = \sqrt{\frac{\sum (Ms_i - \bar{Ms})^2}{n-1}}, \quad s_{Hc} = \sqrt{\frac{\sum (Hc_i - \bar{Hc})^2}{n-1}}$$

合格判定: 平均値偏差 < ±5%、標準偏差 < 5% (磁気飽和強度)、< 50 A/m (保磁力)。

8 測定結果の評価

8.1 磁気特性範囲

超硬合金の磁気特性の範囲はグレードによって異なります。
YG6 (6% Co): 磁気飽和強度 0.15~0.18T、保磁力 10~20kA/m。
YG8 (8% Co): 磁気飽和強度 0.20~0.24T、保磁力 8~15kA/m。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YT15 (5%Co + TiC) : 磁気飽和強度 0.12~0.15T、保磁力 15~25kA/m。

8.2 逸脱評価

3~5 個のサンプルの磁気飽和強度が±5%未満、標準偏差が 5%未満、保磁力が 50 A/m 未満の場合、再テストが必要です。

結果が技術要件を下回る場合、その理由を分析する必要があります（コバルト相の不均一な分布や不純物の影響など）。

8.3 影響要因の分析

サンプルの準備: 表面粗さが 0.1 μm を超える場合、または多孔度が 0.5% を超える場合、磁気飽和強度が 3% ~ 5% 低下する可能性があります。

磁場干渉: 外部磁場 >5 A/m では 2% ~ 3% の測定誤差が生じる可能性があります。

材料構成: コバルト含有量の変動が ±0.5% を超える場合、または η 相が存在する場合、磁気飽和強度が 5% ~ 10% 低下し、保磁力が 10% ~ 20% 増加する可能性があります。

機器の校正: 磁場強度の偏差が 1% を超えると、結果に 2% ~ 5% の偏差が生じる可能性があります。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ(10×10×5 mm または直径 10 mm、高さ 5 mm)。

テスト条件: テスターモデル、磁場強度 (>500 kA/m)、周囲温度 (15°C ~ 30°C)、湿度 (30% ~ 70%)。

試験結果: 各サンプルの磁気飽和強度および保磁力、平均値、標準偏差および偏差。

評価結論: 技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 代表的な超硬合金の磁気特性の参考値

ブランド	Co 含有量 (重量%)	磁気飽和強度 (T)	保磁力 (kA/m)	代表的な用途
YG6	6	0.15~0.18	10~20	鉋山用ドリルビット
YG8	8	0.20~0.24	8-15	切削工具
YT15	5	0.12~0.15	15~25 歳	仕上げツール

付録 B (参考付録) テスト環境要件

温度: 15°C~30°C、23±2°Cを推奨。

湿度: 30%~70%、50±10%を推奨。

外部磁場干渉なし (<5 A/m)、振動なし、腐食性ガス環境なし。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

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

要約する

ISO 4884:2019「超硬合金の磁気特性測定方法」は、超硬合金の磁気飽和強度および保磁力を測定するための国際標準化手順を規定し、ヒステリシスループ法を用いて測定結果の精度と比較可能性を確保します。この規格の導入は、コバルト相の品質と微細構造の評価に役立ち、超硬合金製造プロセスの品質管理に技術的サポートを提供します。

付録:

ISO 3369:2006 超硬合金の密度測定方法

1 範囲

この規格は、アルキメデスの原理を用いて超硬合金の密度を決定する方法を規定しており、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も対象としています。TiC、この規格は品質管理や材料組成の検証に適用され、切削工具、耐摩耗部品などの応用分野で広く使用されています。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:2018 超硬合金用語集

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:2018 および次の用語と定義を採用しています。

密度: 単位体積あたりの質量の尺度で、 g/cm^3 で表され、セメント炭化物の緻密さを反映します。

アルキメデスの原理: 液体中の物体によって押しのけられた液体の体積とその質量の関係に基づいて密度を測定する方法。

超硬合金: 炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

4. 決定原則

密度はアルキメデスの原理に基づいて決定されます。試料の密度は、空気中の試料の質量と液体中の浮力によって保持される質量を測定することで計算されます。式は以下のとおりです。

$$\rho = \frac{m_a \cdot \rho_l}{m_a - m_l}$$

其中:

- ρ 为试样密度 (g/cm^3) ,
- m_a 为试样在空气中的质量 (g) ,
- m_l 为试样在液体中的质量 (g) ,
- ρ_l 为液体的密度 (g/cm^3 , 通常为去离子水的 0.997 g/cm^3 , 20°C) .

で:

ρ は試料の密度 (g/cm^3) であり、

m_a は空気中のサンプルの質量 (g) です。

液体中のサンプルの質量 (g)、

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

ρ_1 は液体の密度です (g/cm^3 、通常、 20°C の脱イオン水では 0.997 g/cm^3)。

5. 測定機器

5.1 バランス

測定範囲: $0 \sim 200\text{g}$ 、精度 $\pm 0.0001\text{g}$ 。

液体中での測定に適した吊り下げ装置を装備しています。

5.2 液体容器

材質: 耐腐食ガラスまたはステンレス鋼。

液体: 脱イオン水、温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に制御されます。

5.3 温度計

測定範囲: $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 、精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

5.4 サンプル調製装置

切断機: 低速精密切断、切断幅 $< 0.5 \text{ mm}$ 、冷却システム付き。

研削および研磨機: 速度 $300 \sim 600 \text{ r/min}$ 、 $600\#$ 、 $1200\#$ 、 $2500\#$ ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

5.5 環境制御

温度: $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプルの形状: 任意の形状、推奨サイズ $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ または総質量 $\geq 5 \text{ g}$ 。

試験片の表面は平坦で、ひび割れ、気孔、酸化層がなく、表面粗さ R_a は $0.1 \mu\text{m}$ 未満である必要があります。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の標準偏差が 0.05 g/cm^3 を超える場合は、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と研磨

試料は、切断速度が 0.1 mm/s 未満の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

粗研磨: $600\#$ または $1200\#$ のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微研磨：2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $Ra < 0.1\mu m$ 。

6.4 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

校正された天秤の精度は $\pm 0.0001\text{ g}$ 未満です。

温度計は、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 未満の偏差で校正されています。

7.2 試験条件

周囲温度： $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ を推奨。

液温： $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 。

相対湿度：30%～70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

空気中のサンプルの質量 m_a を測定し、 0.0001 g まで記録します。

サンプルを天秤にかけ、脱イオン水に浸し、液体中の質量（ m_l ）を測定し、 0.0001 g まで記録します。

標本が完全に浸かっていて気泡がないことを確認してください。

測定を 3～5 回繰り返し、各データセットを記録します。

7.4 結果の計算

各標本の密度を計算します。

$$\bar{\rho} = \frac{m_a + \rho_l}{m_a - m_l}$$

ここで $\rho_l = 0.997\text{ g/cm}^3$ （ 20°C ）である。

平均を計算します。

$$\bar{\rho} = \frac{\sum \rho_i}{n}$$

ここで、 ρ_i は単一サンプルの密度、 n はサンプル数です。

標準偏差を計算します。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n - 1}}$$

適格判定：平均密度偏差 $< \pm 0.5\%$ 、標準偏差 $< 0.05\text{ g/cm}^3$ 。

8 測定結果の評価

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 密度範囲

超硬合金の密度範囲はグレードによって異なります。

YG6 (6% Co): 14.8~15.0 g/cm³。

YG8 (8% Co): 14.6~14.8 g/cm³。

YT15 (5%Co + TiC) : 11.5~12.0g/cm³。

8.2 逸脱評価

3 ~ 5 個のサンプルの平均密度偏差は $\pm 0.5\%$ 未満、標準偏差は 0.05 g/cm³ 未満です。それ以外の場合は再テストが必要です。

密度が技術要件より低い場合は、その理由を分析する必要があります（高多孔性や組成の偏差など）。

8.3 影響要因の分析

サンプルの準備: 表面粗さが 0.1 μm を超える場合、または亀裂が 0.05 mm を超える場合、密度測定に 0.1% ~ 0.2% の誤差が生じる可能性があります。

液体の温度: 20°C から 1°C を超える温度偏差があると、密度が 0.05% ~ 0.1% 偏差する可能性があります。

気泡付着: サンプル表面に気泡があると、測定値が 0.1% ~ 0.3% 減少する可能性があります。

材料構成: Co 含有量の変動が $\pm 0.5\%$ を超える場合、または WC 含有量が不十分な場合、密度の均一性が影響を受ける可能性があります。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ (10×10×5mm または総質量 $\geq 5\text{g}$)。

試験条件: 天秤モデル、液温 (20 $\pm 1^\circ\text{C}$)、周囲温度 (15°C~25°C)、湿度 (30%~70%)。

試験結果: 各試験片の密度、平均値、標準偏差、偏差。

評価結論: 技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 典型的な炭化物密度の基準値

ブランド	Co 含有量 (重量%)	密度 (g/cm ³)	代表的な用途
YG6	6	14.8~15.0	鉋山用ドリルビット
YG8	8	14.6~14.8	切削工具
YT15	5	11.5~12.0	仕上げツール

付録 B (参考付録) テスト環境要件

温度: 15°C~25°C、20 $\pm 1^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: 30%~70%、50 $\pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

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

テストベンチの水平度：偏差 <0.02 mm/m。

要約する

ISO 3369:2006「超硬合金の密度測定」は、超硬合金の密度測定のための国際標準化手順を規定し、アルキメデスの原理に基づいて測定結果の精度と比較可能性を確保します。この規格の導入は、品質管理と材料組成の検証に役立ち、切削工具や耐摩耗部品などの応用分野における技術サポートを提供します。

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 28079:2009

超硬合金の破壊靱性測定方法

1 範囲

この規格は、片側ノッチビーム（SENB）試験法を用いて超硬合金の破壊靱性（ K_{IC} ）を測定する方法を規定しており、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含まれる。TiC、この規格は、超硬合金の亀裂伝播に対する抵抗能力の評価に適用され、切削工具や耐摩耗部品などの高応力応用分野での性能解析に広く利用されている。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:2018 超硬合金用語集

ISO 12135:2002 金属材料 - 破壊靱性試験方法

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:2018 および ISO 12135:2002 と次の用語と定義を採用しています。

破壊靱性（ K_{IC} ）: 亀裂の成長に抵抗する材料の能力。MPa・m で表されます。 $\sqrt{1/2}$ 、平面ひずみ条件下で測定。

シングル エッジ ノッチ ビーム (SENB): 破壊靱性試験に使用される、片側にノッチがあるビーム試験片。

予亀裂: 試験片の切欠き端に疲労荷重によって生成される初期亀裂。

超硬合金: 炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

4. 決定原則

破壊靱性（ K_{IC} ）は、片側ノッチビーム（SENB）試験に基づいて決定されます。この試験では、試験片に集中荷重を負荷し、試験片の破壊時の臨界応力拡大係数を測定します。 K_{IC} は次の式で計算されます。

$$K_{IC} = \frac{F}{B\sqrt{W}} \cdot Y \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

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

其中:

- K_{IC} 为断裂韧性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ,
 - F 为断裂载荷 (N) ,
 - B 为试样厚度 (m) ,
 - W 为试样宽度 (m) ,
 - a 为切口深度 (m) ,
 - Y 为几何因子 (取决于 a/W 比) ,
 - $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为校正函数 (基于标准表或公式) ,
- a/W 比通常在 0.45 至 0.55 之间。

5. 測定機器

5.1 試験機

荷重容量: 0~50 kN 、精度 $\pm 1\%$ 。

読み込み速度: 0.1~1 mm/分、調整可能。

分解能 <0.01 N および <0.01 mm の力センサーと変位センサーを搭載。

5.2 疲労荷重試験装置

負荷周波数: 10~30 Hz、精度 ± 1 Hz。

最大荷重: 曲げ強度の 80%以下、精度 $\pm 1\%$ 。

5.3 フィクスチャ

3 点曲げ治具: 支持点半径 1~2mm、荷重点半径 1mm、支持スパン 16~20mm。

クランプ材質: 硬化鋼、硬度 $>\text{HRC } 60$ 。

5.4 サンプル調製装置

切断機: 低速精密切断、切断幅 <0.1 mm、冷却システム付き。

研削および研磨機: 速度 300 ~ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

5.5 環境制御

温度: 10°C~35°C、23 ± 2 °Cを推奨。

湿度: 30%~70%、50 $\pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプル形状: 直方体、推奨サイズ: 20 $\times$ 4 $\times$ 2 mm (長さ $\times$ 幅 $\times$ 高さ)、許容差 ± 0.02 mm。

切開: 深さ a は試験片の幅 W 、 W の 45%~55% 、切開幅 <0.1 mm、先端半径 <0.05 mm です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

試験片の表面は平坦で、ひび割れや酸化層がなく、表面粗さ R_a は $0.02\mu\text{m}$ 未満である必要があります。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。

結果の標準偏差が $0.2\text{MPa}\cdot\text{m}$ を超える場合、 $\sqrt{n}$ の場合、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と研磨

試料は、切断速度が 0.05mm/s 未満の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

粗研磨: 600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨: 2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $R_a < 0.1\mu\text{m}$ 。

研磨: $0.25\mu\text{m}$ の酸化アルミニウム研磨液を使用し、表面粗さ $R_a < 0.02\mu\text{m}$ 。

6.4 ひび割れ前の準備

疲労荷重装置を使用して、曲げ強度の 50% ~ 80% の荷重範囲と 10 ~ 30 Hz の周波数で、ノッチ端に予亀裂を生成しました。

予亀裂長さは 0.5 ~ 1 mm 増加し、先端半径は 0.01mm 未満でした。

6.5 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

試験機の荷重精度を校正します（偏差 $< \pm 1\%$ ）。

固定具の中心を校正します（偏差 $< 0.02\text{mm}$ ）。

疲労荷重装置の荷重と周波数を、 $\pm 1\%$ 未満の偏差で校正します。

7.2 試験条件

周囲温度: 10°C ~ 35°C 、 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ を推奨。

相対湿度: 30% ~ 70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

試験片は、支持点が荷重点と一致し、スパンが 16mm の 3 点曲げ固定具に配置されま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

した。

荷重速度を 0.5 ± 0.2 mm/分に調整します。

試験片が破断するまで荷重を加え、最大荷重 F と破断変位を記録します。

ノッチ深さ a とサンプル幅 W を測定し、 a/W 比を計算しました。

実験を 5 ～ 10 回繰り返し、各データセットを記録します。

7.4 結果の計算

第 4 節の式に従って各試験片の破壊靱性 K_{IC} を計算する。

幾何因子 Y と校正函数 $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 参考标准表（附录 A）。

平均を計算します。

$$\bar{K}_{IC} = \frac{\sum K_{ICi}}{n}$$

K_{IC} は 単一の試験片の破壊靱性であり、 n は試験片の数です。

標準偏差を計算します。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (K_{ICi} - \bar{K}_{IC})^2}{n - 1}}$$

合格判定：平均破壊靱性偏差 $\leq \pm 5\%$ 、標準偏差 $< 0.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

8 測定結果の評価

8.1 破壊靱性範囲

超硬合金の破壊靱性範囲はグレードによって異なります。

YG6（6% Co）： $12 \sim 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

YG8（8% Co）： $10 \sim 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

YT15（5% Co + TiC）： $8 \sim 11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

8.2 逸脱評価

5～10 個の試験片の相対強度は $\pm 5\%$ 未満であり、標準偏差は $0.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 未満である。 $^{1/2}$ 、それ以外の場合は再テストが必要です。

破壊靱性が技術要件より低い場合は、その理由を分析する必要があります（不均一な予亀裂や試験片の欠陥など）。

8.3 影響要因の分析

試験片の準備：ノッチ幅が 0.1 mm を超える場合や予亀裂が不均一な場合、破壊靱性が $5\% \sim 10\%$ 低下する可能性があります。

荷重条件：荷重速度 $> 1 \text{ mm/分}$ または固定具の中心ずれ $> 0.05 \text{ mm}$ の場合、結果に $3\% \sim 5\%$ のずれが生じる可能性があります。

材料構成：Co 含有量の変動が $\pm 0.5\%$ を超える場合、または WC 粒径が $2 \mu\text{m}$ を超える場合、靱性の均一性に影響する可能性があります。

9 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。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ（ $20 \times 4 \times 2 \text{ mm}$ ）、ノッチ深さ a および a/W

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

比。

試験条件：試験機モデル、固定具タイプ（3点）、荷重速度（ 0.5 ± 0.2 mm/分）、周囲温度（ 10°C ～ 35°C ）、湿度（30%～70%）。

試験結果：各試験片の破壊靱性、平均値、標準偏差および変動。

評価結論：技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（規範的付録）幾何学的係数と補正関数表

a/W 比	幾何学係数 Y	補正関数 f(aW)
0.45	1.92	3.08
0.50	2.00	3.47
0.55	2.10	3.92

注：特定の値は、試験片の形状と荷重条件に基づいて標準表から補間されます。

付録 B（参考付録）代表的な超硬合金の破壊靱性の参考値

ブランド	Co 含有量（重量%）	破壊靱性（ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）	代表的な用途
YG6	6	12～15 歳	鉋山用ドリルビット
YG8	8	10-13	切削工具
YT15	5	8-11	仕上げツール

付録 C（参考付録）テスト環境要件

温度： 10°C ～ 35°C 、 $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ を推奨。

湿度：30%～70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 < 0.02 mm/m。

要約する

ISO 28079:2009「超硬合金の破壊靱性測定方法」は、超硬合金の破壊靱性（KIC）測定のための国際標準化手順を規定し、片刃ノッチ付き梁（SENB）試験による結果の精度と比較可能性を保証します。この規格の導入は、超硬合金の性能評価に役立ち、切削工具や耐磨耗部品などの高応力応用分野における技術サポートを提供します。

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 3878:1983

超硬合金ロックウェル硬さ試験方法（HRA スケール）

1 範囲

この規格は、ロックウェル硬さ試験機を用いて、初期荷重 10kgf (98.07N)、総荷重 60kgf (588.4N) を負荷し、超硬合金のロックウェル硬さ（HRA スケール）を測定する方法について規定する。本規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用する。また、他の炭化物（TaC、Co など）を含む超硬合金にも適用する。TiC、この規格は、超硬合金の押込み抵抗を迅速に評価するのに適しており、切削工具や耐摩耗部品の品質管理に広く使用されています。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:2018 超硬合金用語集

ISO 6508-1:2005 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法（スケール A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T）

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:2018 および ISO 6508-1:2005 と次の用語と定義を採用しています。

ロックウェル硬度（HRA）：ロックウェル圧子を試料表面に押し付けた後の深さの差に基づく硬度値。単位は HRA で、高硬度材料に適しています。

ダイヤモンド コーン インデント：ロックウェル硬度計で使用される 120° の頂点角を持つダイヤモンド インデント。

初期荷重：試験片に加えられる初期の力で、その値は 10 kgf (98.07 N) です。

合計荷重：予備荷重と主荷重を合計した値は 60 kgf (588.4 N) です。

超硬合金：炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

4. 決定原則

ロックウェル硬度（HRA スケール）は、ロックウェル硬度計を用いて測定されます。この試験機は、圧子をサンプル表面に押し込み、初期荷重 10kgf、総荷重 60kgf で押し込んだ後の深さの差を測定します。硬度値は以下の式で算出されます。

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

HRA はロックウェル硬度値、h は全荷重除去後の圧痕深さと初期荷重深さ (mm) の差であり、0.002 mm はロックウェル硬度スケールの単位深さです。HRA スケールは 20 ~ 88 HRA の硬度範囲に適用され、通常、超硬合金などの高硬度材料に使用されます。

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

5. 測定機器

5.1 ロックウェル硬度計

荷重範囲: 10 kgf (予備荷重) + 50 kgf (主荷重) = 60 kgf (総荷重)、精度 $\pm 0.5\%$ 。

圧子: 頂点角 120°ダイヤモンドコーン、先端半径 0.2mm、精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

: 解像度 0.001mm、精度 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 。

読み込み時間: 予備読み込み 2 ~ 8 秒、合計読み込み 10 ~ 15 秒、精度 ± 1 秒。

5.2 サンプル調製装置

切断機: 低速精密切断、切断幅 $<0.5\text{mm}$ 、冷却システム付き。

研削および研磨機: 速度 300 ~ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

5.3 環境制御

温度: 10°C~35°C、23 ± 2 °Cを推奨。

湿度: 30%~70%、50 $\pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプルの形状: 長方形または円筒形、推奨サイズは 10 $\times$ 10 $\times$ 5 mm または直径 10 mm、高さ 5 mm です。

試験片の表面は平坦で、ひび割れ、傷、酸化層がなく、表面粗さ Ra は 0.02 μm 未満である必要があります。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。

結果の標準偏差が 2 HRA を超える場合は、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と研磨

試料は、切断速度 $<0.1\text{mm/s}$ の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

粗研磨: 600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨: 2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ Ra $<0.1\mu\text{m}$ 。

研磨: 0.25 μm の酸化アルミニウム研磨液を使用し、表面粗さ Ra $<0.02\mu\text{m}$ 。

6.4 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

ロックウェル硬度計の負荷を校正します。偏差は $\pm 0.5\%$ 未満です。
を $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 未満の精度で校正します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ を推奨。

相対湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

サンプルをロックウェル硬度計の作業台に置き、表面レベルを調整します。

kgf の初期荷重を加え、2 ～ 8 秒間保持し、初期深さを記録します。

60kgf の荷重を加えて 10～15 秒間維持し、主荷重を除去した後の深さの差を記録しました。

試験片表面の少なくとも 3 つの異なる位置を 2.5 mm 以上の間隔で測定します。

実験を 5 ～ 10 回繰り返して、各データセットを記録します。

7.4 結果の計算

ロックウェル硬度計で表示される HRA 値を直接読み取ります。

平均を計算します。

$$\bar{HRA} = \frac{\sum HRA_i}{n}$$

HRA_i は単一の測定値であり、n は測定回数です。

標準偏差を計算します。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HRA_i - \bar{HRA})^2}{n-1}}$$

合格判定: 平均硬度偏差 $< \pm 2\%$ 、標準偏差 $< 2 \text{ HRA}$ 。

8 測定結果の評価

8.1 硬度範囲

超硬合金のロックウェル硬度 (HRA) の範囲はグレードによって異なります。

YG6 (6%Co): 85～90HRA。

YG8 (8% Co): 83-88 HRA。

YT15 (5% Co + TiC): 87-92 HRA。

8.2 逸脱評価

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5～10 個の測定ポイントの精度が $\pm 2\%$ 未満であり、標準偏差が 2 HRA 未満である場合、それ以外の場合は再テストが必要です。
硬度が技術要件より低い場合は、その理由（表面欠陥や不均一な荷重など）を分析する必要があります。

8.3 影響要因の分析

サンプルの準備: 表面粗さが $0.02\ \mu\text{m}$ を超える場合、または亀裂が $0.05\ \text{mm}$ を超える場合、硬度が $2\% \sim 5\%$ 低下する可能性があります。

読み込み時間: 合計読み込み時間が 10 秒未満または 15 秒を超える場合、 $1\% \sim 2\%$ の測定誤差が生じる可能性があります。

環境条件: 湿度 $>70\%$ または温度変動 $>5^\circ\text{C}$ の場合、深度測定の精度に影響する可能性があります。

材料構成: Co 含有量の変動が $\pm 0.5\%$ を超える場合、または WC 粒径が $2\ \mu\text{m}$ を超える場合、硬度の均一性に影響する可能性があります。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ($10 \times 10 \times 5\ \text{mm}$ または直径 $10\ \text{mm}$ 、高さ $5\ \text{mm}$)。

試験条件: ロックウェル硬度計モデル、荷重 ($10\ \text{kgf} + 50\ \text{kgf} = 60\ \text{kgf}$)、荷重時間（予備 2～8 秒、合計 10～15 秒）、周囲温度 ($10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$)、湿度 ($30\% \sim 70\%$)。

試験結果: 各ポイントの硬度値、平均値、標準偏差、偏差。

評価結論: 技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）代表的な超硬合金のロックウェル硬さ（HRA）の基準値

ブランド	Co 含有量（重量％）	硬度（HRA）	代表的な用途
YG6	6	85～90	鉋山用ドリルビット
YG8	8	83-88	切削工具
YT15	5	87-92	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 $<0.02\ \text{mm/m}$ 。

要約する

ISO 3878:1983「超硬合金のロックウェル硬さ試験方法（HRA スケール）」は、超硬合金のロックウェル硬さを測定するための国際標準化手順を規定し、ロックウェル硬さ試験機に

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

よる結果の迅速性と比較可能性を保証します。この規格の導入は、超硬合金の性能評価に役立ち、切削工具や耐摩耗部品などの応用分野における技術サポートを提供します。

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 ビッカース硬さ試験方法

1 範囲

この規格は、ビッカース硬さ試験機を用いて 10～ 50kgf（98.07～490.3N）の荷重を負荷し、ビッカース硬さを測定する方法を規定する。本規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする炭化タングステン合金に適用され、他の炭化物（例えば、TaC、Co、Co）を含む炭化タングステン合金も含む。TiC、この規格は、超硬合金の押込み抵抗の評価に適用され、切削工具、耐摩耗部品、その他の応用分野の品質管理に広く使用されています。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:2018 超硬合金用語集

ISO 6507-1:2005 金属材料のビッカース硬さ試験 パート 1: 試験方法

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:2018 および ISO 6507-1:2005 と次の用語と定義を採用しています。

ビッカース硬度 (HV): ビッカース圧子を試料表面に押し付けた後、試料表面の単位面積あたりの圧痕に対する抵抗の尺度であり、HV (硬度値) で表されます。

ビッカース圧子: 頂点角が 136°のダイヤモンド製の四角錐圧子。

荷重: 試験片に加えられる力。範囲は 10 ～ 50 kgf (98.07 ～ 490.3 N)。

超硬合金: 炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金プロセスで製造された複合材料。

4. 決定原則

ビッカース硬度の測定は、ビッカース硬度計を用いて行われます。この試験機は、ダイヤモンド製の四角錐圧子を試料表面に所定の荷重で押し込み、圧痕の対角線の長さを測定し、単位面積あたりの圧痕抵抗を計算します。硬度値は以下の式に従って算出されます。

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2}$$

HV HV HV はビッカース硬度（kgf/mm²）、FFF は適用荷重（kgf）、ddd は、圧痕の 2 つの対角線の平均長さ（mm）です。結果は通常、荷重に応じて HV10 または HV30 に換算されます。

5. 測定機器

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

5.1 ビッカース硬度計

荷重範囲: 10~50 kgf (98.07~490.3 N)、精度 $\pm 1\%$ 。

圧子: ダイヤモンド四角錐、頂点角 $136^{\circ}\pm 0.5^{\circ}$ 。

顕微鏡: 倍率 200 $\times$ ~500 $\times$ 、解像度 <0.001 mm。

読み込み時間: 10~15 秒、精度 ± 1 秒。

5.2 サンプル調製装置

切断機: 低速精密切断、切断幅 <0.5 mm、冷却システム付き。

研削および研磨機: 速度 300 ~ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

5.3 環境制御

温度: 10°C ~ 35°C 、 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ を推奨。

湿度: 30%~70%、 $50\pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプルの形状: 長方形または円筒形、推奨サイズは $10\times 10\times 5$ mm または直径 10 mm、高さ 5 mm です。

試験片の表面は平坦で、ひび割れ、傷、酸化層がなく、表面粗さ R_a は $0.02\mu\text{m}$ 未満である必要があります。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。

結果の標準偏差が 20 HV を超える場合は、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と研磨

試料は、切断速度 <0.1 mm/s の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

粗研磨: 600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨: 2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $R_a < 0.1\mu\text{m}$ 。

研磨: $0.25\mu\text{m}$ の酸化アルミニウム研磨液を使用し、表面粗さ $R_a < 0.02\mu\text{m}$ 。

6.4 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

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

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

ビッカース硬度計の負荷を校正します。偏差は±1%未満です。
顕微鏡の倍率と対角測定精度は、±0.5% 未満の偏差に調整されました。

7.2 試験条件

周囲温度: 10°C ~ 35°C、23±2°C を推奨。

相対湿度: 30%~70%、50±10% を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

サンプルをビッカース硬度計の作業台に置き、表面レベルを調整します。

試験片の厚さとグレードに応じて、荷重 10 kgf (HV10) または 30 kgf (HV30) を選択します。

10~15 秒間荷重を加え、荷重を除去した後のくぼみの 2 つの対角線の長さを測定します。

d.

試験片表面の少なくとも 3 つの異なる位置を 2.5 mm 以上の間隔で測定します。

実験を 5 ~ 10 回繰り返し、各データセットを記録します。

7.4 結果の計算

各試験片のビッカース硬度を計算します。

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2}$$

ここで、F は荷重 (kgf)、d はへこみの平均対角長さ (mm) です。

平均を計算します。

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{n}$$

HV_i の場合 は単一の測定値であり、n は測定回数です。

標準偏差を計算します。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{n - 1}}$$

認定: 平均硬度偏差 <±5%、標準偏差 <20 HV。

8 測定結果の評価

8.1 硬度範囲

超硬合金のビッカース硬度の範囲はグレードによって異なります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YG6（6% Co）：1400～1600 HV30。

YG8（8% Co）：1300～1500 HV30。

YT15（5%Co+ TiC ）：1500～1700HV10。

8.2 逸脱評価

5～10 個の測定ポイントの精度が±5% 未満であり、標準偏差が 20HV 未満である場合、それ以外の場合は再テストが必要です。
硬度が技術要件より低い場合は、その理由を分析する必要があります（表面欠陥、負荷不足など）。

8.3 影響要因の分析

サンプルの準備：表面粗さが 0.02 μm を超える場合、または亀裂が 0.05 mm を超える場合、硬度が 5% ～ 10% 低下する可能性があります。
荷重の選択：荷重が低すぎる (<10 kgf)または高すぎる (>50 kgf)場合、3% ～ 5% の測定誤差が生じる可能性があります。
環境条件：湿度 >70% または温度変動 >5°C の場合、インデントの透明度に影響する可能性があります。
材料構成：Co 含有量の変動が ±0.5% を超える場合、または WC 粒径が 2 μm を超える場合、硬度の均一性に影響する可能性があります。

9 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。
サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ(10×10×5 mm または直径 10 mm、高さ 5 mm)。
試験条件：ピッカース硬度計モデル、荷重（10 kgf または 30 kgf ）、荷重時間（10～15 秒）、周囲温度（10°C～35°C）、湿度（30%～70%）。
試験結果：各ポイントの硬度値、平均値、標準偏差、偏差。
評価結論：技術要件を満たしているかどうか。
テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）代表的な超硬合金のピッカース硬さの参考値

ブランド	Co 含有量（重量%）	荷重（ kgf ）	硬度（HV）	代表的な用途
YG6	6	30	1400-1600	鉋山用ドリルビット
YG8	8	30	1300-1500	切削工具
YT15	5	10	1500-1700	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: 10°C～35°C、23±2°Cを推奨。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

湿度: 30%~70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

ISO 3326:2013「超硬合金のビッカース硬さ試験方法」は、超硬合金のビッカース硬さを測定するための国際標準化手順を規定し、ビッカース硬さ試験機による測定結果の精度と比較可能性を保証します。この規格の導入は、超硬合金の性能評価に役立ち、切削工具や耐磨耗部品などの応用分野における技術サポートを提供します。

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 4489-2:2020

超硬合金

曲げ強度の測定方法

パート 2: 高温条件

1 範囲

この規格は、3 点曲げ試験または 4 点曲げ試験を用いて、高温条件下（35℃以上）における超硬合金の曲げ強度の測定方法を規定しており、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含む。TiC、ISO 4489 シリーズの一部として、この規格は ISO 4489:2010 の室温試験方法を補足し、航空宇宙や高温切削工具の用途など、高温環境での性能評価に適用できます。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 4489:2010 超硬合金の曲げ強度の測定方法

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:2018 超硬合金用語集

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:2018 および次の用語と定義を採用しています。

曲げ強度: 高温曲げ試験で試験片が耐える最大応力（MPa で測定）は、高温での破壊に対する材料の抵抗能力を反映します。

3 点曲げ試験: 2 つの支持点間に単一の荷重点を適用し、試験片が破損する最大応力を測定します。

4 点曲げ試験: 2 つの支持点の間に 2 つの荷重点を適用し、試験片が破断するときの最大応力を測定します。

高温条件: 試験温度は 35℃ を超え、通常は 200℃ ～ 1200℃ の範囲になります。

超硬合金: 粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

4. 決定原則

曲げ強度の測定は、高温曲げ試験に基づいています。この試験では、3 点または 4 点荷重を負荷し、高温における試験片の最大破断応力を測定します。応力の計算は、試験片の形状と荷重条件に基づき、以下の式を用いて行われます。

3 点曲げ:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

ここで、 σ は曲げ強度（MPa）、F は破断荷重（N）、L は支持スパン（mm）、b は試験片の幅（mm）、h は試験片の厚さ（mm）です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

4 点曲げ:

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{bh^2}$$

ここで、 L_1 は外部支持スパン (mm)、 L_2 は内部荷重スパン (mm)です。

高温条件下では、材料特性（降伏点や破壊強度など）は温度によって変化するため、環境を制御し熱膨張の影響を補正するために高温炉が必要になります。

5. 測定機器

5.1 試験機

荷重容量: 0~50 kN 、精度 $\pm 1\%$ 。

読み込み速度: 0.5~5 mm/分、調整可能。

分解能 < 0.01 N および < 0.01 mm の力センサーと変位センサーを搭載。

5.2 高温炉

温度範囲: 200°C ~ 1200°C、精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

加熱速度: 5~10°C/分、安定時間 ≥ 30 分。

保護雰囲気: 酸化を防ぐための不活性ガス(アルゴンなど)または真空環境。

5.3 フィクスチャ

3 点曲げ治具: 支持点の半径 1~2mm、荷重点の半径 1mm。

4 点曲げ固定具: 外側支持スパン 20 ~ 40 mm、内側荷重スパン 10 ~ 20 mm、支持点半径 1 ~ 2 mm。

固定具材質: 耐熱合金 (インコネルなど)、動作温度 $\geq 1200^\circ\text{C}$ 。

5.4 サンプル調製装置

切断機: 低速精密切断、切断幅 < 0.5 mm、冷却システム付き。

研削および研磨機: 速度 300 ~ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

5.5 環境制御

温度: 200°C ~ 1200°C (試験温度)、外部環境 10°C ~ 35°C、推奨 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 。

湿度: 30%~70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動なし、腐食性ガス環境なし（保護雰囲気を除く）。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプル形状: 直方体、推奨サイズ: 20×6.5×5.25 mm (長さ×幅×高さ)、許容誤差 ± 0.1 mm。

試験片の表面は平らで、ひび割れ、傷、酸化層などがあってはなりません。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 10 個以上でなければなりません。

結果の標準偏差が 50 MPa を超える場合は、サンプル数を 15 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と研磨

試料は、切断速度が 0.1 mm/s 未満の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

粗研磨: 600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨: 2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $Ra < 0.1 \mu m$ 。

研磨: $0.25 \mu m$ の酸化アルミニウム研磨液を使用し、表面粗さ $Ra < 0.02 \mu m$ 。

6.4 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

試験機の荷重精度を校正します（偏差 $<\pm 1\%$ ）。

炉の温度を $\pm 5^\circ C$ 以内に調整します。

固定具を、中心誤差が 0.05 mm 未満になるように調整します。

7.2 試験条件

試験温度: $200^\circ C \sim 1200^\circ C$ 。材質や用途に応じて具体的な温度が設定されます。

加熱時間: 目標温度まで加熱後、30 分間安定させます。

保護雰囲気: アルゴン流量 0.5 ~ 1 L/分、または真空度 $< 10^{-2} Pa$ 。

7.3 テスト操作

試験片は、支持点が荷重点と一直線になるように、高温炉内の 3 点または 4 点の曲げ治具に配置されます。

試験開始前に温度を目標温度まで上げ、30 分間安定させました。

荷重速度を $1 \pm 0.5 mm/分$ に調整します。

試験片が破断するまで荷重を加え、最大荷重 FF を記録する。 F と骨折の変位。

実験を 10~15 回繰り返し、各データセットを記録します。

7.4 結果の計算

セクション 4 の式に従って各試験片の曲げ強度 σ を計算する。

平均を計算します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}$$

ここで、 σ_i は単一試験片の曲げ強度、 n は試験片の数です。
標準偏差を計算します。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n - 1}}$$

合格判定：平均曲げ強度偏差 $\pm 5\%$ 未満、標準偏差 50MPa 未満。

8 測定結果の評価

8.1 曲げ強度範囲

超硬合金の高温曲げ強度範囲は、グレードと温度によって異なります。

YG6 (6% Co): 1500-2000 MPa (600°C)。

YG8 (8% Co): 1300~1800 MPa (800°C)。

YT15 (5%Co + TiC) : 1000~1400MPa (1000°C)。

8.2 逸脱評価

10~15 個の試験片の強度が $\pm 5\%$ 未満であり、標準偏差が 50 MPa 未満である場合、それ以外の場合は再試験が必要です。

曲げ強度が技術要件より低い場合は、その理由（酸化やサンプルの欠陥など）を分析する必要があります。

8.3 影響要因の分析

温度: 1000°C を超える温度では、Co 相が軟化して曲げ強度が 20% ~ 30% 低下する可能性があります。

酸化: 保護雰囲気ที่ไม่十分な場合、表面が酸化され、強度が 10% ~ 15% 低下する可能性があります。

試験片の準備: 表面粗さが 0.02 μm を超える場合、または亀裂が 0.05 mm を超える場合、強度が 5% ~ 10% 低下する可能性があります。

荷重条件: 荷重速度 > 5 mm/分、または固定具のずれ > 0.1 mm の場合、結果に 5% の偏差が生じる可能性があります。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ (20×6.5×5.25 mm)。

試験条件: 試験機モデル、高温炉モデル、固定具タイプ (3 点または 4 点)、荷重速度 (1±0.5 mm/分)、試験温度 (200°C~1200°C)、保護雰囲気、周囲温度 (10°C~35°C)、湿度 (30% ~ 70%)。

試験結果: 曲げ強度、平均値、標準偏差、各試験片の偏差。

評価結論: 技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録 A（参考付録）代表的な超硬合金の高温曲げ強度の参考値

ブランド	Co 含有量（重量％）	温度（℃）	曲げ強度（MPa）	代表的な用途
YG6	6	600	1500-2000	高温ドリルビット
YG8	8	800	1300-1800	高温切削工具
YT15	5	1000	1000-1400	高温仕上げ工具

付録 B（参考付録）テスト環境要件

試験温度: 200℃ ～ 1200℃、精度 ±5℃。

炉外周囲温度: 10℃～35℃、23±2℃が推奨されます。

湿度: 30%～70%、50±10%を推奨。

振動なし、腐食性ガス環境なし（保護雰囲気を除く）。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

ISO 4489-2:2020「超硬合金の曲げ強度の測定 - パート 2: 高温条件」は、高温条件下における超硬合金の曲げ強度を測定するための国際標準化手順を規定しています。この手順は、3 点曲げ試験または 4 点曲げ試験によって測定され、結果の精度と比較可能性を確保します。この規格の導入は、高温環境における性能評価に役立ち、航空宇宙、高温切削工具、その他の応用分野への技術サポートを提供します。

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 4489:2010 超硬合金 曲げ強度の測定方法

1 範囲

この規格は、3点曲げ試験または4点曲げ試験を用いて超硬合金の曲げ強度を測定する方法を規定しており、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含む。TiC、この規格は、超硬合金の機械的特性の評価に適用され、切削工具、耐摩耗部品、その他の応用分野で広く使用されています。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:2018 超硬合金用語集

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:2018 および次の用語と定義を採用しています。

曲げ強度: 曲げ試験で試験片が耐える最大応力 (MPa で測定) は、材料の破壊に対する抵抗能力を反映します。

3点曲げ試験: 2つの支持点間に単一の荷重点を適用し、試験片が破損する最大応力を測定します。

4点曲げ試験: 2つの支持点の間に2つの荷重点を適用し、試験片が破断するときの最大応力を測定します。

超硬合金: 粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

4. 決定原則

曲げ強度の測定は、曲げ試験に基づきます。試験片に集中荷重（3点法）または均一分布荷重（4点法）を負荷し、試験片が破断する瞬間の最大応力を測定します。応力の計算は、試験片の形状と荷重条件に基づき、以下の式を用いて行います。

3点曲げ:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

ここで、 σ は曲げ強度 (MPa)、F は破断荷重 (N)、L は支持スパン (mm)、b は試験片の幅 (mm)、h は試験片の厚さ (mm) です。

4点曲げ:

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{bh^2}$$

ここで、L1 は外部支持スパン (mm)、L2 は内部荷重スパン (mm) です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

5. 測定機器

5.1 試験機

荷重容量：0～50 kN 、精度±1%。

読み込み速度：0.5～5 mm/分、調整可能。

分解能<0.01 N および<0.01 mm の力センサーと変位センサーを搭載。

5.2 フィクスチャ

3 点曲げ治具：支持点の半径 1～2mm、荷重点の半径 1mm。

4 点曲げ固定具：外側支持スパン 20 ～ 40 mm、内側荷重スパン 10 ～ 20 mm、支持点半径 1 ～ 2 mm。

クランプ材質：硬化鋼、硬度>HRC 60。

5.3 サンプル調製装置

切断機：低速精密切断、切断幅<0.5 mm、冷却システム付き。

研削および研磨機：速度 300 ～ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

5.4 環境制御

温度：10℃～35℃、23±2℃を推奨。

湿度：30%～70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプル形状：直方体、推奨サイズ：20×6.5×5.25 mm（長さ×幅×高さ）、許容誤差±0.1 mm。

試験片の表面は平らで、ひび割れ、傷、酸化層などがあってはなりません。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 10 個以上でなければなりません。

結果の標準偏差が 50 MPa を超える場合は、サンプル数を 15 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と研磨

試料は、切断速度が 0.1 mm/s 未満の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

粗研磨: 600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨: 2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $Ra < 0.1\mu m$ 。

研磨: $0.25\mu m$ の酸化アルミニウム研磨液を使用し、表面粗さ $Ra < 0.02\mu m$ 。

6.4 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

試験機の荷重精度を校正します（偏差 $\leq \pm 1\%$ ）。

固定具を、中心誤差が 0.05 mm 未満になるように調整します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ を推奨。

相対湿度: 30%~70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

支持点を荷重点に合わせ、試験片を 3 点または 4 点の曲げ固定具に置きます。

荷重速度を $1 \pm 0.5\text{ mm/分}$ に調整します。

試験片が破断するまで荷重を加え、最大荷重 F と破断変位を記録します。

実験を 10~15 回繰り返し、各データセットを記録します。

7.4 結果の計算

第 4 節の式に従って各試験片の曲げ強度 σ を計算します。

平均を計算します。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}$$

ここで、 σ_i は単一試験片の曲げ強度、 n は試験片の数です。

標準偏差を計算します。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n - 1}}$$

合格判定: 平均曲げ強度偏差 $\pm 5\%$ 未満、標準偏差 50MPa 未満。

8 測定結果の評価

8.1 曲げ強度範囲

超硬合金の曲げ強度の範囲はグレードによって異なります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YG6（6%Co）：2000～2500MPa。

YG8（8%Co）：1800～2200MPa。

YT15（5%Co + TiC ）：1300～1600MPa。

8.2 逸脱評価

10～15 個の試験片の強度が±5%未満であり、標準偏差が 50 MPa 未満である場合、それ以外の場合は再試験が必要です。

曲げ強度が技術要件より低い場合は、その理由（試験片の欠陥や不均一な荷重など）を分析する必要があります。

8.3 影響要因の分析

試験片の準備：表面粗さが 0.02 μm を超える場合、または亀裂が 0.05 mm を超える場合、曲げ強度が 10% ～ 15% 低下する可能性があります。

荷重条件：荷重速度 > 5 mm/分、または固定具のずれ > 0.1 mm の場合、結果に 5% ～ 10% の偏差が生じる可能性があります。

材料構成：Co 含有量の変動が ±0.5% を超える場合、または WC 粒径が 2 μm を超える場合、強度の均一性に影響する可能性があります。

9 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。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ（20×6.5×5.25 mm）。

試験条件：試験機モデル、固定具タイプ（3 点または 4 点）、荷重速度（1±0.5 mm/分）、周囲温度（10°C ～ 35°C）、湿度（30% ～ 70%）。

試験結果：曲げ強度、平均値、標準偏差、各試験片の偏差。

評価結論：技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）代表的な超硬合金の曲げ強度の参考値

ブランド	Co 含有量（重量%）	曲げ強度（MPa）	代表的な用途
YG6	6	2000-2500	鉋山用ドリルビット
YG8	8	1800-2200	切削工具
YT15	5	1300-1600	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度：10°C～35°C、23±2°Cを推奨。

湿度：30%～70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 <0.02 mm/m。

要約する

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

ISO 4489:2010「超硬合金の曲げ強度の測定」は、3点曲げ試験または4点曲げ試験による超硬合金の曲げ強度の測定に関する国際標準化手順を規定し、結果の正確性と比較可能性を確保します。この規格の実施は、超硬合金の性能評価に役立ち、切削工具や耐摩耗部品などの応用分野に技術的なサポートを提供します。

付録:

ISO 4499-3:2016 セメント炭化物

— 微細構造検査

パート 3: 気孔率、介在物、遊離炭素、エータ相の評価

1 範囲

この規格は、超硬合金の微細組織における気孔、介在物、遊離炭素、 η 相などの欠陥の評価方法を規定し、金属顕微鏡観察と標準アトラスを用いて等級分けを行う。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含まれる。TiC、この規格は ISO 4499 シリーズの一部であり、ISO 4499-1:2006 と併せて使用する必要があります。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 4499-1:2006 超硬合金 - 微細組織検査 パート 1: 一般ガイダンス

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:2018 (最新バージョン) および次の用語と定義を採用しています。
多孔性: 微細構造内の気孔または空間。タイプ A (直径 $<10\ \mu\text{m}$) とタイプ B (直径 $10\text{--}25\ \mu\text{m}$) に分類されます。

介在物: 粒子の形でセメント炭化物内に存在する非金属不純物 (酸化物や硫化物など)。

遊離炭素: 金属と化合物を形成せず、グラファイトの形で存在する炭素。

η 相: W₃Co₃C や Co₆W₆C など、炭素含有量が不十分のために形成される脆い相。

超硬合金: 粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

4 つの評価原則

超硬合金の微細組織欠陥の評価は、金属顕微鏡観察と標準アトラス（付録 A）を組み合わせ、気孔、介在物、遊離炭素、 η 相の種類、大きさ、量、分布を等級分けして評価します。評価方法は、高品質のサンプルを作製し、明視野および偏光観察を行い、欠陥特性を記録し、標準アトラスと比較して欠陥等級を決定します。

5. 評価機器

5.1 金属組織顕微鏡

倍率: 日常観察には 100 倍、200 倍、500 倍、200 倍が推奨されます。

欠陥の種類を区別するための明視野、暗視野、偏光機能を備えています。

解像度: $<0.5\ \mu\text{m}$ 。

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

5.2 サンプル調製装置

切断機：低速精密切断、切断幅<0.5 mm、冷却システム付き。

マウント機：ホットプレスマウント、温度<150°C、圧力 20~30 MPa。

研削および研磨機：速度 300 ~ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

超音波洗浄機：周波数 40 kHz、サンプルの洗浄に使用します。

5.3 測定ツール

接眼ミクロメーター：目盛値 0.01mm、精度±0.001mm。

を ±0.1 μm の精度でサポートします。

5.4 環境制御

温度：10°C~35°C、20±2°Cを推奨。

湿度：30%~70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプル形状：長方形または円筒形、推奨サイズ：10×10×5 mm。

試験片の表面は平らで、ひび割れ、傷、酸化層などがあってはなりません。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 (>1 レベル)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と設置

試料は、切断速度が 0.1 mm/s 未満の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

ホットプレスマウント、温度 <150°C、圧力 20 ~ 30 MPa、時間 5 ~ 10 分。

6.4 試料の研削と研磨

粗研磨：600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨：2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ 。

研磨：0.25 μm の酸化アルミニウム研磨ペーストを使用し、研磨布速度 300 r/min、表面粗さ $R_a < 0.02 \mu\text{m}$ 。

6.5 サンプルの洗浄とエッチング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後、ムラクミ試薬（ $10\text{g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10\text{g KOH} + 100\text{mL H}_2\text{O}$ ）を使用して 5～10 秒間穏やかにエッチングし、欠陥のコントラストを高めます。

再度洗って乾かし、乾燥機に入れて保管します。

7 つの評価ステップ

7.1 機器の校正

金属顕微鏡の倍率を $\pm 1\%$ 未満の偏差で校正します。

色の違いのない均一な光源を確保するために照明システムを調整します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ を推奨。

相対湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 顕微鏡観察

サンプルを金属顕微鏡のステージに置き、焦点を調整して 200 倍の倍率を選択します。

視野面積が約 0.5 mm^2 の少なくとも 5 つの視野でサンプル表面を観察します。

明視野を使用して気孔と介在物を観察し、偏光を使用して遊離炭素と η 相を観察しました。

7.4 欠陥評価

多孔性評価:

の細孔 ($< 10\text{ }\mu\text{m}$)

A00 (気孔なし)、A02 (< 10 個/ mm^2)、A04 (10-20 個/ mm^2)、A06 (20-30 個/ mm^2)、A08 (> 30 個/ mm^2)。

の細孔 ($10 \sim 25\text{ }\mu\text{m}$)

B00 (気孔なし)、B02 (< 5 個/ mm^2)、B04 (5-10 個/ mm^2)、B06 (10-15 個/ mm^2)、B08 (> 15 個/ mm^2)。

インクルージョン評価

I00 (介在物なし)、I02 (< 5 個/ mm^2 、 $< 10\text{ }\mu\text{m}$)、I04 (5-10 個/ mm^2 、 $10 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$)、I06 (> 10 個/ mm^2 、 $> 20\text{ }\mu\text{m}$)。

無料の炭素評価

C00 (遊離炭素なし)、C02 ($< 0.5\%$)、C04 (0.5%-1.0%)、C06 (1.0%-1.5%)、C08 ($> 1.5\%$)。

η フェーズ評価

eta00 (eta フェーズなし)、eta02 ($< 0.5\%$)、eta04 (0.5% $\sim$ 1.0%)、eta06 (1.0% $\sim$ 1.5%)、eta08 ($> 1.5\%$)。

7.5 結果の計算

5 つの視野の欠陥レベルを記録し、平均値を計算してサンプルの最終的な欠陥レベルを決定します。

偏差評価: 5 つの視野の偏差が ± 1 レベル未満の場合、それ以外の場合は再観察が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

8 評価結果の評価

8.1 欠陥等級の範囲

超硬合金の欠陥レベルは、グレードと目的によって異なります。

YG6 (6%Co): A02-B02-I02-C02-η02、鉦山用ドリルビットに適しています。

YG8 (8% Co): A04-B04-I02-C04-η02、切削工具に適しています。

YT15 (5%Co + TiC) : A02-B02-I04-C02-η04、仕上げ工具に適しています。

8.2 逸脱評価

3 ~ 5 個のサンプルの結果が ± 1 レベル未満の場合、それ以外の場合は再テストが必要です。

欠陥レベルが技術要件を超える場合、原因を分析する必要があります（異常な焼結プロセスなど）。

8.3 影響要因の分析

多孔性: 焼結真空が不十分 ($< 10\text{ Pa}$) または冷却速度が高すぎる ($> 50^\circ\text{C}/\text{分}$) と、多孔性が増加します ($> \text{A04}$)。

介在物: 原材料の純度が低い (不純物 $> 0.1\%$) か、混合が不均一な場合、介在物が増加します ($> \text{I04}$)。

遊離炭素: 炭素含有量が過剰 ($> 0.2\%$) または不均一な分布の場合、遊離炭素 ($> \text{C04}$) が増加します。

η 相: 炭素含有量が不十分 ($< 0.1\%$) または焼結温度が高い ($> 1450^\circ\text{C}$) 場合、η 相 ($> \eta 04$) が形成されます。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件: 機器型式、倍率 (200 倍)、観察方法、周囲温度 ($10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$)、湿度 ($30\% \sim 70\%$)。

試験結果: 欠陥等級 (A、B、I、C、η)、視野ごとの平均値および偏差。

評価結論: 技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (規範的付録) 標準欠陥アトラス

は直径 $< 10\mu\text{m}$ の細孔の分布を示します。

B 型細孔: B00~B08、スペクトルは直径 $10 \sim 25\mu\text{m}$ の細孔の分布を示しています。

内包物: I00~I06、グラフには内包物の大きさと量が表示されます。

遊離炭素: C00-C08、グラフは遊離炭素の面積の割合を示します。

η 相: η00-η08、スペクトルは η 相の面積比を示します。

付録 B (参考付録) 典型的なセメント炭化物の欠陥レベルの基準値

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ブランド	Co 含有量（重量％）	欠陥レベル	代表的な用途
YG6	6	A02-B02-I02-C02-η02	鉋山用ドリルビット
YG8	8	A04-B04-I02-C04-η02	切削工具
YT15	5	A02-B02-I04-C02-η04	仕上げツール

付録 C（参考付録）テスト環境要件

温度: 10°C～35°C、20±2°Cを推奨。

湿度: 30%～70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

ISO 4499-3:2016「超硬合金 - 微細組織検査 パート 3: 気孔率、介在物、遊離炭素および η 相の評価」は、超硬合金の微細組織欠陥を評価するための国際標準化手順を規定し、金属顕微鏡観察と標準アトラスによる等級分けを通じて、結果の正確性と比較可能性を確保します。この規格の導入は、超硬合金の品質管理を支援し、切削工具や鉋山用ドリルなどの高性能応用分野への技術サポートを提供します。

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 4499-2:2008 セメント炭化物

— 微細構造検査

第 2 部：粒度の測定方法

1 範囲

この規格は、炭化タングステン（WC）の結晶粒径を、金属顕微鏡を用いて直線断面法または平面断面法と組み合わせた測定法によって測定する方法について規定する。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする炭化タングステン（WC）焼結炭化物に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む焼結炭化物も含まれる。TiC、この規格は、コバルト基以外の超硬合金またはその他の非超硬合金材料には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 4499-1:2006 超硬合金 - 微細組織検査 パート 1：一般ガイダンス

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:1983 超硬合金用語

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:1983 および次の用語と定義を採用しています。

粒径：超硬合金中の炭化タングステン（WC）粒子の平均直径。通常はミクロン（ μm ）で測定されます。

直線断面法：顕微鏡の視野内で直線上の WC 粒子の断面直径を測定することで平均粒径を算出します。

計画断面法：顕微鏡の視野内にある複数の WC 粒子の断面積を測定し、平均粒径を算出します。

超硬合金：粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

4. 決定原則

WC 炭化物の粒径測定は、金属顕微鏡観察と直線切断法または平面切断法を組み合わせで行います。直線切断法は、顕微鏡の視野内の直線上で粒子の断面径を測定し、平均値を統計的に算出します。平面切断法は、粒子の断面積を測定し、幾何学的モデルと組み合わせで平均粒径を推定します。どちらの方法も、ISO 4499-1:2006 に規定された一般ガイドラインに従い、表面が平坦で汚染物質のない高品質の試験片を作製する必要があります。

5. 測定機器

5.1 金属組織顕微鏡

倍率：粒径判定には 200 倍、500 倍、1000 倍、500 倍が推奨されます。

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

WC 粒界を識別するための偏光および微分干渉コントラスト (DIC) 機能を備えています。
解像度: $< 0.2 \mu\text{m}$ 。

5.2 サンプル調製装置

切断機: 低速精密切断、切断幅 $< 0.5 \text{ mm}$ 、冷却システム付き。

マウント機: ホットプレスマウント、温度 $< 150^\circ\text{C}$ 、圧力 $20 \sim 30 \text{ MPa}$ 。

研削および研磨機: 速度 $300 \sim 600 \text{ r/min}$ 、 $600\#$ 、 $1200\#$ 、 $2500\#$ ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

超音波洗浄機: 周波数 40 kHz 、サンプルの洗浄に使用します。

5.3 測定ツール

顕微鏡接眼マイクロメーター: 目盛値 0.01 mm 、精度 $\pm 0.001 \text{ mm}$ 。

$0.1 \mu\text{m}$ の精度で粒界認識と面積計算をサポートします。

5.4 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプル形状: 長方形または円筒形、推奨サイズ: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ 。

試験片の表面は平らで、ひび割れ、傷、酸化層などがあってはなりません。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 0.5 \mu\text{m}$)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と設置

試料は、切断幅 $< 0.5 \text{ mm}$ の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

ホットプレスマウント、温度 $< 150^\circ\text{C}$ 、圧力 $20 \sim 30 \text{ MPa}$ 、時間 $5 \sim 10 \text{ 分}$ 。

6.4 試料の研削と研磨

粗研磨: $600\#$ または $1200\#$ のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨: 2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ 。

研磨: $0.25 \mu\text{m}$ の酸化アルミニウム研磨ペーストを使用し、研磨布速度 300 r/min 、表面粗

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

さ $Ra < 0.02\mu m$ 。

6.5 サンプルの洗浄とエッチング

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後、WC 粒界のコントラストを高めるために、表面を村久美試薬（ $10g K_3[Fe(CN)_6] + 10g KOH + 100mL H_2O$ ）で 5～10 秒間軽くエッチングした。

洗って乾燥させ、デシケーターに保管してください。

7 つの測定手順

7.1 機器の校正

金属顕微鏡の倍率を $\pm 1\%$ 未満の偏差で校正します。

μm の精度に校正します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^\circ C \sim 35^\circ C$ 、 $20 \pm 2^\circ C$ を推奨。

相対湿度: 30%～70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 粒径の測定

線形セクション法:

、全長が $500 \mu m$ 以上の平行直線を 3～5 本描きます。

各直線上の WC 粒子の断面径を測定し、100～200 個の粒子を計数した。

平均粒径を計算します。

$$d = \frac{\sum d_i}{n}$$

ここで、 d_i は単一の粒子の直径、 n は粒子の数です。

計画断面法:

顕微鏡の視野内でランダムに 5 つの領域を選択し、100～200 個の粒子の断面積を測定した。

画像解析ソフトウェアを使用して平均面積を計算し、それを等価直径に変換します。

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

その中には AA あ 穀物の断面積です。

$0.2 \mu m$ 未満の偏差で記録されました。

7.4 結果の計算

3～5 個のサンプルの平均粒径を取得し、標準偏差を計算します。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合格判定：平均粒径偏差 $\leq \pm 0.5\mu\text{m}$ 、標準偏差 $\leq 0.3\mu\text{m}$ 。

8 測定結果の評価

8.1 粒度範囲

超硬合金 WC の粒度範囲はグレードによって異なります。

YG6 (6% Co): $0.8 \sim 1.2\mu\text{m}$ 、高靱性工具に適しています。

YG8 (8% Co): $1.0 \sim 1.5\mu\text{m}$ 、切断に適しています。

YT15 (5% Co + TiC) : $0.6 \sim 1.0\mu\text{m}$ 、仕上げ工具に適しています。

8.2 逸脱評価

$\pm 0.5\mu\text{m}$ 未満の場合、それ以外の場合は再検査が必要です。

粒径が技術要件を超える場合は、その理由を分析する必要があります（原料の粒径が不均一、焼結温度が高すぎるなど）。

8.3 影響要因の分析

原料粒子サイズ: WC 原料粒子サイズが $2\mu\text{m}$ を超えると、粒径が大きくなる可能性があります ($> 1.5\mu\text{m}$)。

焼結温度: 温度 $> 1450^\circ\text{C}$ または保持時間 > 1 時間の場合には粒成長 ($> 0.5\mu\text{m}$) が発生する可能性があります。

冷却速度: 冷却速度が $20^\circ\text{C}/\text{分}$ 未満の場合、結晶粒が粗大化する可能性があります ($> 0.3\mu\text{m}$)。

Co 含有量: Co 含有量の変動が $\pm 0.5\%$ を超えると、粒成長の均一性に影響する可能性があります。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ。

テスト条件: 機器モデル、倍率 (500 倍)、測定方法 (線形または計画)、周囲温度 ($10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$)、湿度 (30% $\sim$ 70%)。

試験結果: 各試験片の粒度、平均、標準偏差および変動。

評価結論: 技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 代表的な超硬合金の粒度の参考値

ブランド	Co 含有量 (重量%)	粒径 (μm)	代表的な用途
YG6	6	$0.8 \sim 1.2$	鉱山用ドリルビット
YG8	8	$1.0 \sim 1.5$	切削工具
YT15	5	$0.6 \sim 1.0$	仕上げツール

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

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: 10°C~35°C、20±2°Cを推奨。

湿度: 30%~70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

ISO 4499-2:2008「超硬合金 - 微細組織検査 パート 2: 粒径測定方法」は、超硬合金 WC の粒径測定に関する国際標準化手順を規定し、直線断面法または平面断面法による測定結果の精度と比較可能性を保証します。この規格の導入は、超硬合金材料の性能を最適化し、切削工具や鉋山用ドリルなどの高性能応用分野への技術サポートを提供します。

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 4499-1:2006 セメント炭化物
— 微細構造検査
パート 1: 一般的なガイドライン

1 範囲

この規格は、試料作製の基本原則、顕微鏡観察法、欠陥評価を含む、超硬合金の微細組織検査に関する一般的なガイドラインを提供する。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含む。TiC、この規格は ISO 4499 シリーズの基礎となっており、詳細な測定方法（粒度、欠陥評価など）は後続の規格（ISO 4499-2 など）で規定されています。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

ISO 3850:1983 超硬合金用語

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:1983 および次の用語と定義を採用しています。

微細構造: WC 粒子、Co 結合相、欠陥など、拡大観察した超硬合金の微細構造。

欠陥: 気孔、介在物、遊離炭素、エータ相などの微細構造における異常な特徴。

金属組織標本: 切断、研削、研磨、エッチングにより顕微鏡観察用に準備されたセメント炭化物サンプル。

超硬合金: 粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

4 検査原則

超硬合金の微細組織検査は、金属顕微鏡観察を基本とし、試料作製と適切なエッチング技術を組み合わせることで、WC 粒子、Co 相、および欠陥の分布と形態を明らかにします。検査プロセスには、試料作製、顕微鏡観察、結果記録が含まれ、標準化された手順に従うことで、結果の再現性と比較可能性を確保します。欠陥評価や粒径測定などの具体的な方法は、後続の規格で詳細に規定されています。

5. 検査機器

5.1 金属組織顕微鏡

倍率: 日常観察には 50 倍、100 倍、200 倍、500 倍、200 倍が推奨されます。

さまざまな段階や欠陥を区別するための明視野、暗視野、偏光機能を備えています。

解像度: $< 0.5 \mu\text{m}$ 。

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

5.2 サンプル調製装置

切断機：低速精密切断、切断幅<0.5 mm、冷却システム付き。

マウント機：ホットプレスマウント、温度<150°C、圧力 20~30 MPa。

研削および研磨機：速度 300 ~ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

超音波洗浄機：周波数 40 kHz、サンプルの洗浄に使用します。

5.3 測定ツール

ノギス：精度 ± 0.02 mm、サンプルサイズの測定に使用します。

接眼マイクロメーター：目盛値 0.01mm、精度 ± 0.001 mm。

5.4 環境制御

温度：10°C~35°C、20 $\pm$ 2°Cを推奨。

湿度：30%~70%、50 $\pm$ 10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプル形状：長方形または円筒形、推奨サイズ：10 $\times$ 10 $\times$ 5 mm。

試験片の表面は平らで、ひび割れ、傷、酸化層などがあってはなりません。

試験片は ISO 3847:2005 に従って作成するものとする。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果に大きな偏差がある場合は、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と設置

試料は、切断幅 <0.5 mm の低速精密カッターと、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

ホットプレスマウント、温度 <150°C、圧力 20 ~ 30 MPa、時間 5 ~ 10 分。

6.4 試料の研削と研磨

粗研磨：600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨：2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $R_a < 0.1\mu\text{m}$ 。

研磨：0.25 μm の酸化アルミニウム研磨ペーストを使用し、研磨布速度 300r/min、表面粗さ $R_a < 0.02\mu\text{m}$ 。

6.5 サンプルの洗浄とエッチング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

WC 粒子と位相コントラストを強調するために、表面を村久美試薬（ $10\text{g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10\text{g KOH} + 100\text{mL H}_2\text{O}$ ）で 5～10 秒間軽くエッチングした。

再度洗って乾かし、乾燥機に入れて保管します。

7 検査手順

7.1 機器の校正

金属顕微鏡の倍率を $\pm 1\%$ 未満の偏差で校正します。

色の違いのない均一な光源を確保するために照明システムを調整します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ を推奨。

相対湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 顕微鏡観察

サンプルを金属顕微鏡のステージに置き、焦点を調整して 200 倍の倍率を選択します。

視野面積が約 0.5 mm^2 の少なくとも 5 つの視野でサンプル表面を観察します。

WC 粒子と Co 相の観察には明視野を使用し、欠陥（遊離炭素など）の観察には偏光を使用しました。

7.4 結果の記録

WC 粒径、Co 相の分布、欠陥の種類など、各視野の微細構造特性が記録されました。

後続の分析およびレポートのために顕微鏡写真（解像度 $\geq 5\text{ MP}$ ）を撮影します。

8 テスト結果の評価

8.1 微細構造特性の範囲

WC 粒径: $0.5 \sim 2.0\text{ }\mu\text{m}$ (グレードによって異なります)。

共相含有量: $5\% \sim 15\%$ (重量パーセント)。

欠陥: 気孔、介在物、遊離炭素、 η 相のレベルは技術要件を満たす必要があります (ISO 4499-2 を参照)。

8.2 逸脱評価

5 つの視野における微細構造特性の一貫性の偏差は $\pm 10\%$ 未満であり、それ以外の場合には再観察が必要でした。

微細構造が技術要件を超える場合は、その理由を分析する必要があります (異常な焼結プロセスパラメータなど)。

8.3 影響要因の分析

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

試料の準備：研磨が不十分 ($Ra > 0.1 \mu m$) またはエッチングが過剰だと欠陥が隠れてしまう可能性があります。

観察条件：光源が不均一であったり、倍率が適切でなかったりすると、粒界がぼやける場合があります。

材料構成: Co 含有量の変動が $\pm 0.5\%$ を超える場合、または炭素含有量が制御されていない場合は、微細構造に影響を及ぼす可能性があります。

9 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。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件：機器型式、倍率（200 倍）、観察方法、周囲温度（ $10^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$ ）、湿度（ $30\% \sim 70\%$ ）。

試験結果：微細構造の特性評価、写真記録、および予備的な欠陥観察。

評価結論：予備的な技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）代表的な超硬合金の微細構造特性の参考値

ブランド	Co 含有量（重量％）	WC 粒径（ μm ）	代表的な用途
YG6	6	0.8~1.2	鉋山用ドリルビット
YG8	8	1.0~1.5	切削工具
YT15	5	0.6~1.0	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: $10^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$ 、 $20 \pm 2^{\circ}C$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 $< 0.02 mm/m$ 。

要約する

ISO 4499-1:2006「超硬合金 - 微細組織検査 パート 1: 一般ガイドライン」は、超硬合金の微細組織検査に関する国際的な枠組みを提供し、標準化されたサンプル調製および観察方法を通じて検査結果の再現性と比較可能性を確保します。この規格の導入は、その後の具体的な測定（結晶粒度、欠陥評価など）の基盤となり、超硬合金材料の性能最適化と品質管理を支援します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

ISO 3847:2005 超硬合金 サンプル調製方法

1 範囲

この規格は、切断、インレイ、研削、研磨、洗浄を含む超硬合金試験片の作製方法を規定し、その後の性能試験（曲げ強度、硬度など）や微細組織検査に適しています。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含まれます。TiC、この規格は、コバルト基以外の超硬合金またはその他の非超硬合金材料には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書中の条項は、本規格に参照されることにより、本規格の条項となる。参照文書に日付が記載されている場合は、その日付における版が適用される。日付が記載されていない参照文書については、最新の版（すべての修正を含む）が本規格に適用される。

ISO 3850:1983 超硬合金用語

3 用語と定義

この規格では、ISO 3850:1983 および次の用語と定義を採用しています。

試験片：性能試験や顕微鏡観察のために切断、機械加工して作製された超硬合金のサンプル。

取り付け：以降の研磨、研削、観察を容易にするために、試料を樹脂または金属材料に埋め込みます。

研削と研磨：研削と研磨によってサンプルの表面の欠陥を除去し、滑らかな表面を実現します。

超硬合金：粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

4 準備原則

超硬合金試験片の作製は、その後の試験や顕微鏡観察に適した、平坦で損傷のない表面を得ることを目的としています。作製プロセスには、適切なサイズに試験片を切断し、エッジを保護するための固定、表面欠陥を除去するための研削と研磨、残留物を除去するための洗浄が含まれます。作製方法は、試験片が熱または機械的応力によって微細構造変化を受けないようにする必要があります。

5. 準備器具

5.1 切断装置

低速精密切断機：切断幅 < 0.5 mm、冷却システム（水またはエタノールなど）を装備。

切断ホイール：粒子サイズ 120～240 #、厚さ 0.5～1.0mm。

5.2 取り付け装置

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

ホットプレスマウント機：温度 $<150^{\circ}\text{C}$ 、圧力 20～30 MPa、時間 5～10 分。

樹脂または金属インレイ材料：熱可塑性樹脂（フェノール樹脂など）または低融点金属（スズ鉛合金など）。

5.3 研削・研磨装置

研削および研磨機：速度 300 ～ 600 r/min、600#、1200#、2500# ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

研磨液：0.25 μm アルミナ懸濁液または 1 μm ダイヤモンド研磨ペースト。

5.4 清掃用具

超音波洗浄機：周波数 40kHz、電力 100～200W。

洗浄剤：無水エタノールまたはアセトン。

5.5 環境制御

温度： 10°C ～ 35°C 、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ を推奨。

湿度：30%～70%、 $50\pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプルの形状：長方形または円筒形、推奨サイズは $10\times 10\times 5\text{ mm}$ または直径 10 mm、高さ 5 mm です。

試験片の表面に明らかなひび割れ、焼け、または酸化層があってはなりません。

試験片は材料バッチの均一性を代表するものでなければなりません。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

後続のテストでより高い精度が求められる場合は、この数を 5 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断

試料は、切断速度 $<0.1\text{ mm/s}$ の低速精密切断機を使用し、冷却剤としてエタノールまたは水を使用して切断されました。

切断方向は材料積層面に対して垂直であり、切断幅は 0.5 mm 未満です。

6.4 試料の設置

サンプルをインレイ型に入れ、熱可塑性樹脂または低融点金属を加えます。

ホットプレスマウント、温度 $<150^{\circ}\text{C}$ 、圧力 20 ～ 30 MPa、時間 5 ～ 10 分、試験片のエッジが損傷していないことを確認します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 試料の研削と研磨

粗研磨: 600# または 1200# のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去し、5 ~ 10 N の圧力を加えます。

微研磨: 2500 番サンドペーパーを使用し、表面粗さ $Ra < 0.1\mu m$ 。

研磨: $0.25\mu m$ アルミナ研磨液を使用し、研磨布速度 300r/min、表面粗さ $Ra < 0.02\mu m$ 、研磨時間 5~10 分。

6.6 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

7 準備手順

7.1 機器の校正

切断機の手速を校正すると、偏差は $\pm 5\%$ 未満になります。

研削および研磨機の手速と圧力を、偏差 $< \pm 2\%$ で校正します。

マウントマシンの温度と圧力をチェックし、偏差は $\pm 1^{\circ}C$ 未満、 $\pm 1 MPa$ 未満であることを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$ 、 $20 \pm 2^{\circ}C$ を推奨。

相対湿度: 30%~70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 操作プロセス

セクション 6.3 ~ 6.6 の順序でサンプルの切断、取り付け、研磨、琢磨、洗浄を完了します。

各ステップの後に、試験片の表面品質を確認し、異常（ひび割れ、焼けなど）を記録します。

7.4 結果の確認

表面粗さ: $Ra < 0.02\mu m$ 。

表面平坦度: 偏差 $< 0.01 mm$ 。

目に見える傷や汚れはありません。

8 準備結果の評価

8.1 表面品質の範囲

試験片の表面には目に見えるひび割れ、焼け、または酸化層があってはなりません。

粗さ $Ra < 0.02\mu m$ 、平坦度偏差 $< 0.01 mm$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 逸脱評価

3 ～ 5 個のサンプルの精度が $\pm 10\%$ 未満の場合、それ以外の場合は再調製が必要です。表面品質が要件を満たしていない場合は、その理由を分析する必要があります（切削速度が速すぎる、研磨時間が不十分など）。

8.3 影響要因の分析

切断：切断速度が 0.1 mm/s を超える場合、または冷却が不十分な場合、ひび割れ (0.05 mm 以上) が発生する可能性があります。

取り付け：温度 $> 150^\circ\text{C}$ または圧力 $< 20 \text{ MPa}$ の場合、試験片が変形する可能性があります ($> 0.1 \text{ mm}$)。

研削と研磨：サンドペーパーの粒子が粗すぎる ($< 600\#$) か、研磨時間が 5 分未満の場合は、表面粗さ ($R_a > 0.1 \mu\text{m}$) が発生する可能性があります。

洗浄：洗浄剤の残留物や乾燥不足により、汚染が発生する可能性があります（目に見える粒子 $> 0.01 \text{ mm}$)。

9. レポートを作成する

レポートには次の内容を含める必要があります。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、初期サイズ。

準備条件：機器モデル、切断速度 ($< 0.1 \text{ mm/s}$)、取り付け温度 ($< 150^\circ\text{C}$)、研削および研磨パラメータ、周囲温度 ($10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$)、湿度 ($30\% \sim 70\%$)。

製造結果：表面粗さ ($R_a < 0.02 \mu\text{m}$)、平坦度偏差 ($< 0.01 \text{ mm}$)、異常記録。

評価結論：後続のテストの要件を満たしているかどうか。

作成日とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）典型的なセメント炭化物試験片作製パラメータの参考値

ブランド	Co 含有量（重量％）	サンプルサイズ（mm）	さ ($R_a, \mu\text{m}$)	代表的な用途
YG6	6	10×10×5	< 0.02	鉱山用ドリルビット
YG8	8	10×10×5	< 0.02	切削工具
YT15	5	10×10×5	< 0.02	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 70\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 $< 0.02 \text{ mm/m}$ 。

要約する

ISO 3847:2005「超硬合金試料の作製方法」は、超硬合金試料の作製に関する国際標準化手順を規定しています。標準化された切断、固定、研削、研磨、洗浄の各工程により、試料

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

の表面品質がその後の性能試験や微細組織検査の要件を満たすことが保証されます。この規格の実施は、超硬合金材料の性能評価と品質管理のための信頼できる技術基盤を提供します。

付録:

ISO 3850:2018 超硬合金 用語

1 範囲

この規格は、超硬合金および関連材料の用語と定義を規定し、材料組成、製造プロセス、微細構造、性能試験、および適用分野を網羅しています。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）、ニッケル（Ni）、または鉄（Fe）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含まれます。TiC、この規格は、セメント炭化物標準化シリーズ（ISO 4499、ISO 3847 など）の基礎であり、国際貿易、研究、産業用途に適しています。

2 規範的参照

この規格は他の規格を直接参照するものではありませんが、セメントカーバイド標準化シリーズの一部として、次の規格に関連しています。

ISO 4499-1:2006 超硬合金 - 微細組織検査 パート 1: 一般ガイダンス

ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法

注: 参照文書の最新バージョン (すべての修正を含む) がこの規格に適用されます。

3 用語と定義

以下は ISO 3850:2018 で定義されている炭化物関連の用語で、カテゴリ別に分類されています。

3.1 材料構成

3.1.1 ハードフェーズ

炭化タングステン(WC): 超硬合金の主な硬質成分である炭化物は、化学式 WC を持ち、高い硬度と耐摩耗性を備えています。

その他の炭化物: 炭化タンタル (TaC)、炭化チタン (TiC)、炭化ニオブ (NbC)、炭化バナジウム (VC) などは、硬質相の補助成分として使用されます。

3.1.2 結合段階

コバルト (Co): 超硬合金によく使われる結合金属で、相含有量は通常 5% ~ 15%(重量)で、韌性と結合強度を高めます。

ニッケル (Ni): 結合相を置き換える金属として、耐腐食環境に適しています。

鉄 (Fe): 少量存在し、合金元素としてよく使用される結合相成分。

3.1.3 不純物

遊離炭素: 金属と化合物を形成せず、グラファイトの形で存在する炭素。

η 相: W₃Co₃C や Co₆W₆C など、炭素含有量が不十分なために形成される脆い相。

3.2 準備プロセス

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

3.2.1 粉末冶金

超硬合金の製造工程は、粉末を混合、圧縮、焼結することによって行われます。

3.2.2 焼結

高温（1300℃～1500℃）で粉末粒子を結合させるプロセスは、真空焼結と低温焼結に分けられます。

3.2.3 熱間等方圧加圧（HIP）

高温高圧下で多孔性を除去するための後続処理プロセス。

3.3 微細構造

3.3.1 穀物

超硬合金中の WC の微粒子の大きさは通常 0.5～ 5.0μm です。

3.3.2 多孔性

微細構造中の気孔または空隙は、タイプ A (<10 μm) とタイプ B (10-25 μm) に分けられます。

3.3.3 包含物

非金属不純物（酸化物や硫化物など）は粒子の形で存在します。

3.4 パフォーマンステスト

3.4.1 曲げ強度

3 点または 4 点曲げ試験で試験片が耐えられる最大応力 (MPa)。

3.4.2 硬度

超硬合金の侵入抵抗は通常、ロックウェル硬度 (HRA) またはビッカース硬度 (HV) で表されます。

3.4.3 破壊靱性

材料の亀裂成長に対する抵抗力は、応力集中係数 K_{IC} で表され、単位は $MPa \cdot m^{1/2}$ です。

3.5 応用分野

3.5.1 切削工具

超硬合金は、金属、木材、複合材料を加工するための切削工具に使用されます。

3.5.2 耐摩耗部品

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

たとえば、鉋山用ドリルビットやスタンピングダイは、超硬合金の高い耐摩耗性に依存しています。

3.5.3 軍사용途

超硬合金は、徹甲弾の芯や装甲材の製造に使用されます。

用語使用の4つの原則

曖昧さを避けるために、関連する標準規格や技術文書では用語に一貫性を持たせる必要があります。

μm （マイクロメートル）、MPa（メガパスカル）など、国際単位系（SI）に従います。用語を定義する際には、まず標準用語を用いるものとする。対応する定義がない場合は、業界慣行を参考にすることができる。

5つの用語例

以下に、これらの用語が実際にどのように使用されているかの例をいくつか示します。

粒径：YG6グレードの超硬合金のWC粒径は0.8~1.2 μm です。

焼結温度：YT15グレードの超硬合金の標準的な焼結温度は1400°C ~ 1450°Cです。

曲げ強度：YG8グレードの超硬合金の曲げ強度は1800 ~ 2200 MPaの範囲です。

付録A（参考付録）典型的なセメントカーバイド用語の適用基準値

ブランド	Co含有量（重量％）	粒径（ μm ）	曲げ強度（MPa）	代表的な用途
YG6	6	0.8~1.2	2000-2500	鉋山用ドリルビット
YG8	8	1.0~1.5	1800-2200	切削工具
YT15	5	0.6~1.0	1300-1600	仕上げツール

付録B（参考付録）用語開発の履歴

ISO 3850は1983年に初めて発行され、主に超硬合金の基本用語を定義しています。

2018年の改訂では、結合相の定義が更新され（NiとFeが追加）、軍사용途の用語が追加され、準備プロセスの説明が最適化されました。

要約する

ISO 3850:2018「超硬合金用語集」は、超硬合金分野における国際標準化のための統一用語集であり、材料組成、製造プロセス、微細構造、性能試験、および応用分野を網羅しています。この規格の導入は、世界の超硬合金業界における技術交流と品質管理を促進し、後続規格（ISO 4499やISO 3847など）の適用のための言語的および概念的基盤を築きます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録：

ISO 3850:2018 ハード メタル
- 語彙

1 範囲

この国際規格は、超硬合金およびその関連材料に関する用語と定義を定義し、材料組成、製造プロセス、微細構造、性能試験、および応用分野を網羅しています。この規格は、炭化タングステン（WC）を主相とし、コバルト（Co）、ニッケル（Ni）、または鉄（Fe）を結合相とする超硬合金に適用され、追加の炭化物（例： TaC 、 TiC 、 これは、超硬合金の標準化シリーズ（ ISO 4499、ISO 3847 など）の基礎語彙として機能し、国際貿易、研究、産業用途での使用を目的としています。

2 規範的参照

ハードメタル標準化シリーズの一部であり、次のものと関連しています。

ISO 4499-1:2006 超硬合金- 微細組織の組織学的測定 - パート 1: 一般ガイダンス

ISO 3847:2005 超硬合金- サンプル調製方法の決定

注： 参照文書の最新バージョン（修正を含む）が適用されます。

3 用語と定義

以下の用語と定義は、ISO 3850:2018 に従って定義され、主題領域別に分類されています。

3.1 材料構成

3.1.1 ハードフェーズ

炭化タングステン（WC）

硬質金属の主な硬質成分であり、化学式は WC で、高い硬度と耐摩耗性が特徴です。

その他の炭化物

（ TaC ）、チタンカーバイド（ TiC ）、ニオブカーバイド（ NbC ）、バナジウムカーバイド（ VC ）などが補助硬質相として使用されます。

3.1.2 バインダー相

コバルト（Co）

超硬合金によく使用されるバインダー金属は、通常、重量の 5% ~ 15% の範囲で使用され、靱性と結合強度を高めます。

ニッケル（Ni）

耐腐食環境に適した代替バインダー金属。

鉄（Fe）

バインダー相のマイナー成分。合金元素としてよく使用されます。

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

3.1.3 不純物

フリーカーボン

金属と結合せず、グラファイトの形で存在する炭素。

エータ相 (η 相)

W₃Co₃C や Co₆W₆C など、炭素欠乏により形成される脆い相。

3.2 製造プロセス

3.2.1 粉末冶金

粉末の混合、圧縮、焼結を伴う超硬金属の製造プロセス。

3.2.2 焼結

真空焼結や低温焼結など、粉末粒子を高温（1300℃～1500℃）で結合させるプロセス。

3.2.3 熱間等方圧加圧 (HIP)

高温高圧下で多孔性を除去する後処理プロセス。

3.3 微細構造

3.3.1 穀物

超硬合金中の WC の微粒子で、通常は 0.5 ~ 5.0 μm の大きさです。

3.3.2 多孔性

微細構造中のガス孔または空隙。タイプ A (<10 μm) とタイプ B (10-25 μm) に分類されます。

3.3.3 包含物

超硬合金中に粒子として存在する非金属不純物（酸化物、硫化物など）。

3.4 パフォーマンステスト

3.4.1 横方向破断強度

3 点または 4 点の曲げ試験で試験片が耐える最大応力 (MPa 単位)。

3.4.2 硬度

硬質金属の圧痕に対する耐性。通常はロックウェル A (HRA) またはビッカース (HV) スケールを使用して測定されます。

3.4.3 破壊靱性:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

材料が亀裂伝播に抵抗する能力。応力集中係数 (K_{IC}) 、単位 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

3.5 応用分野

3.5.1 切削工具

金属、木材、複合材の機械加工に使用される超硬合金。

3.5.2 摩耗部品

鉋山用ドリルビットや打ち抜き金型など、超硬合金の高い耐摩耗性を活用しています。

3.5.3 軍事用途

装甲貫通弾や装甲材料として使用される超硬金属。

用語使用の4つの原則

曖昧さを避けるために、関連する規格や技術文書内では用語を一貫して使用する必要があります。

記号と単位は国際単位系 (SI) に準拠する必要があります (例: μm (マイクロメートル)、 MPa (メガパスカル))。

標準的な定義が存在しない場合は、業界の慣例を参照することができます。

用語の使用例5つ

実際のアプリケーションにおける用語の例を以下に示します。

粒度

超硬合金の WC 粒径は $0.8 \sim 1.2\mu\text{m}$ の範囲です。

焼結温度

超硬合金の一般的な焼結温度は $1400^{\circ}\text{C} \sim 1450^{\circ}\text{C}$ の範囲です。

横方向破断強度

超硬合金の横方向の破断強度は $1800 \sim 2200 \text{ MPa}$ の範囲です。

付録 A (参考) 代表的な超硬合金用語の適用基準値

学年	Co 含有量 (重量%)	粒径 (μm)	横方向破断強度 (MPa)	典型的なアプリケーション
YG6	6	$0.8 \sim 1.2$	2000-2500	鉋山用ドリルビット
YG8	8	$1.0 \sim 1.5$	1800-2200	切削工具
YT15	5	$0.6 \sim 1.0$	1300-1600	精密切削工具

付録 B (参考) 用語の歴史的発展

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 3850 は 1983 年に初めて発行され、主に基本的な超硬合金の用語を定義しました。
2018 年の改訂では、バインダー相の定義が更新され (Ni と Fe が追加)、軍事用途の用語
が導入され、製造プロセスの説明が改良されました。

まとめ

ISO 3850:2018「ハードメタル-用語集」は、ハードメタル業界における標準化された用語
集の基盤を提供し、材料組成、製造プロセス、微細組織、性能試験、そして応用分野を網
羅しています。この規格の導入により、グローバルな技術コミュニケーションと品質管理
が促進され、ISO 4499 や ISO 3847 といった後継規格のサポートにも役立ちます。

付録:

GB/T 4295-2008 セメント炭化物
微細構造欠陥評価方法

1 範囲

この規格は、超硬合金における微細組織欠陥の評価方法について規定するものであり、金属顕微鏡観察による気孔、介在物、遊離炭素、 η 相などの欠陥の観察および評価手順を含む。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金に適用され、他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金も含まれる。この規格は、コバルト基以外の超硬合金やその他の複合材料には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

GB/T 3847-2005 超硬合金試験片の作製方法

GB/T 3850-1983 超硬合金の用語

GB/T 3489-2005 超硬合金の金属組織評価方法

GB/T 3848-2001 超硬合金の密度測定方法

3 用語と定義

この規格は、GB/T 3850-1983 および次の用語と定義を採用しています。

気孔率: 超硬合金の微細構造における気孔または空隙。タイプ A（直径 $<10\ \mu\text{m}$ ）とタイプ B（直径 $10\text{--}25\ \mu\text{m}$ ）に分類されます。

介在物: 通常は粒子の形をとる、セメント炭化物に含まれる非金属不純物（酸化物や硫化物など）。

遊離炭素: 金属と化合物を形成しない超硬合金中の炭素は、コード名 C のグラファイトの形で存在します。

η 相: 炭素含有量が不十分なために超硬合金に形成される脆い相（W3Co3C など）。コード名 η 。

超硬合金: 粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

4 つの評価原則

超硬合金の微細組織欠陥の評価は、金属顕微鏡観察法を採用し、試料作製、研磨、顕微鏡観察、標準アトラスとの比較により、気孔、介在物、遊離炭素、 η 相の種類と程度を評価します。欠陥の評価と分類は、欠陥のサイズ、数、分布に基づいて行われ、標準アトラス（付録 A）と比較することで、欠陥レベルを定量的または定性的に記述します。

5. 評価機器

5.1 金属組織顕微鏡

倍率: 日常観察には 100 倍、200 倍、500 倍、200 倍が推奨されます。

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

遊離炭素と η 相を判別する偏光機能を搭載。

解像度: $< 0.5 \mu\text{m}$ 。

5.2 サンプル調製装置

切断機: 低速精密切断、切開幅 $< 0.5 \text{ mm}$ 。

マウント機: 構造変化を避けるため、ホットプレスマウント、温度 $< 150^\circ\text{C}$ 。

研削研磨機: 速度 300 ~ 600 r/min、ダイヤモンドサンドペーパーと研磨布を装備。

超音波洗浄機: 周波数 40 kHz、サンプルの洗浄に使用します。

5.3 補助装置

ノギス: 精度 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 、サンプルサイズの測定に使用します。

マイクロ硬度計: オプション。 η 相硬度 ($> \text{HRC } 70$) の分析を支援するために使用されます。

5.4 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 80\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

サンプル形状: 長方形または円筒形、推奨サイズ: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ 。

試験片の表面は平らで、ひび割れや酸化層がないようにしてください。

試料は GB/T 3847-2005 の準備要件に準拠する必要があります。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 (> 1 レベル)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 試料の切断と設置

試験片は、切断幅 $< 0.5 \text{ mm}$ の低速精密切断機を使用し、冷却剤として水を使用して切断されました。

ホットプレスマウント、温度 $< 150^\circ\text{C}$ 、圧力 20 ~ 30 MPa、時間 5 ~ 10 分。

6.4 試料の研削と研磨

粗研磨: 120 #、240 #、600 # のダイヤモンドサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

微研磨: 1000 #、1500 # のサンドペーパーを使用し、表面粗さ $R_a < 0.2 \mu\text{m}$ 。

研磨: $1 \mu\text{m}$ ダイヤモンド研磨ペーストを使用し、研磨布速度 300 r/min、表面粗さ $R_a < 0.05 \mu\text{m}$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 サンプル洗浄

サンプル表面を無水エタノールまたはアセトンで洗浄し、5 分間超音波洗浄（周波数 40 kHz）を実行します。

乾燥後は酸化や汚染を防ぐためにデシケーターに保管してください。

7 つの評価ステップ

7.1 機器の校正

金属顕微鏡の倍率を $\pm 1\%$ 未満の偏差で校正します。

照明システムをチェックして、光源が均一で色差がないことを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。

相対湿度: $30\% \sim 80\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 顕微鏡観察

サンプルを金属顕微鏡のステージに置き、焦点を調整して 200 倍の倍率を選択します。

視野面積が約 0.5 mm^2 の少なくとも 5 つの視野でサンプル表面を観察します。

細孔、介在物、遊離炭素、イータ相の分布と形態を記録し、標準スペクトル（付録 A）と比較します。

7.4 欠陥評価

多孔性評価:

の細孔 ($< 10 \mu\text{m}$) :

数量による評価: A00 (気孔なし)、A02 (< 10 個/ mm^2)、A04 ($10 \sim 20$ 個/ mm^2)、A06 ($20 \sim 30$ 個/ mm^2)、A08 (> 30 個/ mm^2)。

の細孔 ($10 \sim 25 \mu\text{m}$) :

数量による評価: B00 (気孔なし)、B02 (< 5 個/ mm^2)、B04 ($5 \sim 10$ 個/ mm^2)、B06 ($10 \sim 15$ 個/ mm^2)、B08 (> 15 個/ mm^2)。

インクルージョン評価:

数とサイズによる等級分け: I00 (内包物なし)、I02 (< 5 個/ mm^2 、 $< 10 \mu\text{m}$)、I04 ($5 \sim 10$ 個/ mm^2 、 $10 \sim 20 \mu\text{m}$)、I06 (> 10 個/ mm^2 、 $> 20 \mu\text{m}$)。

無料炭素評価:

面積率による評価: C00 (遊離炭素なし)、C02 ($< 0.5\%$)、C04 ($0.5\% \sim 1.0\%$)、C06 ($1.0\% \sim 1.5\%$)、C08 ($> 1.5\%$)。

η フェーズ評価:

面積パーセンテージによる評価: $\eta 00$ (η 相なし)、 $\eta 02$ ($< 0.5\%$)、 $\eta 04$ ($0.5\% \sim 1.0\%$)、 $\eta 06$ ($1.0\% \sim 1.5\%$)、および $\eta 08$ ($> 1.5\%$)。

7.5 結果の記録

各視野の欠陥評価を記録し、平均を計算して試験片の最終的な欠陥等級を決定します。

偏差評価: 5 つの視野の等級偏差が ± 1 レベル未満の場合、それ以外の場合は再観察が必

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要です。

8 評価結果の評価

8.1 欠陥レベルの範囲

超硬合金の微細構造欠陥のレベルは、グレードと目的によって異なります。

YG6 (6%Co) : A02-B02-I02-C02- η 02、鉋山用ドリルビットに適しています。

YG8 (8% Co) : A04-B04-I02-C04- η 02、切削工具に適しています。

YT15 (5%Co + TiC) : A02-B02-I04-C02- η 04、仕上げ工具に適しています。

8.2 逸脱評価

5 つの視野が ± 1 グレード未満の場合、それ以外の場合は再検査が必要です。

欠陥レベルが技術要件を超える場合、原因を分析する必要があります (焼結温度が高すぎる、炭素含有量が制御不能など)。

8.3 影響要因の分析

多孔性: 焼結真空が不十分な場合 (<10 Pa)、多孔性が増加します (>A04)。

介在物: 原材料の純度が低い (不純物 > 0.1%) と、介在物 (> I04) が増加します。

遊離炭素: 炭素含有量が高すぎると (> 0.2%)、遊離炭素 (> C04) が増加します。

η 相: 炭素含有量が不十分 (< 0.1%) または冷却速度が高すぎる (> 50°C/分) と、 η 相 (> η 04) が形成されます。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ。

テスト条件: 機器モデル、倍率 (200 倍)、周囲温度 (10°C~35°C)、湿度 (30%~80%)。

テスト結果: 欠陥評価 (A、B、I、C、 η)、各視野の平均値と偏差。

評価結論: 技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (規範的付録) 標準欠陥アトラス

は直径 < 10 μ m の細孔の分布を示します。

B 型細孔: B00~B08、スペクトルは直径 10~25 μ m の細孔の分布を示しています。

内包物: I00~I06、グラフには内包物の大きさと量が表示されます。

遊離炭素: C00-C08、グラフは遊離炭素の面積の割合を示します。

η 相: η 00- η 08、スペクトルは η 相の面積比を示します。

付録 B (参考付録) 典型的なセメント炭化物の欠陥レベルの基準値

ブランド	Co 含有量 (重量%)	欠陥レベル	代表的な用途
YG6	6	A02-B02-I02-C02- η 02	鉋山用ドリルビット
YG8	8	A04-B04-I02-C04- η 02	切削工具

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ブランド	Co 含有量（重量%）	欠陥レベル	代表的な用途
YT15	5	A02-B02-I04-C02-η04	仕上げツール

付録 C（参考付録）テスト環境要件

温度: 10°C～35°C、20±5°Cを推奨。

湿度: 30%～80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

GB/T 4295-2008「超硬合金の微細組織欠陥評価方法」は、超硬合金の微細組織欠陥を評価するための標準化された手順を提供し、金属顕微鏡観察による評価結果の精度と再現性を保証します。この規格の実施は、超硬合金材料の品質管理に役立ち、切削工具や鉱山用ドリルなどの高性能応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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 5249-2008

超硬合金

サンプル調製の一般仕様

1 範囲

この規格は、試料採取、切断、インレイ、研削、研磨、洗浄などの手順を含む、超硬合金試料の作製に関する一般的な仕様を規定する。超硬合金の性能試験（硬度、密度、曲げ強度、破壊靱性、微細組織など）のための試料作製に適用する。この規格は、主硬相として炭化タングステン（WC）を、結合相としてコバルト（Co）を含む超硬合金、および他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金にも適用する。この規格は、コーティングされたセメントカーバイドまたは表面強化後のセメントカーバイドサンプルの製造には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となる。日付が記載されているすべての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ない。日付が記載されていないすべての参照文書については、最新版が本規格に適用される。

GB/T 18376-2001 超硬合金の性能試験方法

GB/T 3849-2008 超硬合金のピッカース硬さ試験方法

GB/T 7997-2010 超硬合金の破壊靱性試験方法

GB/T 3488-2008 超硬合金の微細構造試験方法

ISO 3878:1983 超硬合金 - 試験片作製の仕様

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義を使用します。

超硬合金：粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

試験片：性能試験のために超硬合金製品またはブランクから採取した代表的な部分。

研削・研磨：機械的な研削・研磨により、サンプルの表面を鏡面状態にします。

表面粗さ（Ra）：試料の表面粗さの算術平均偏差（ μm ）。

4. サンプル採取

4.1 サンプルングの原則

性能試験結果が統計的に有意であることを保証するために、試験片はセメント炭化物製品またはブランクの代表的な部分から採取する必要があります。

サンプルング位置は、エッジや欠陥領域（亀裂や細孔集中領域など）を避ける必要があります。

4.2 サンプルング量

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

製品またはブランクの各バッチごとに採取するサンプルの数は 3 個以上、性能試験（硬度、破壊靱性など）の場合は 5 個以上でなければなりません。
バッチ数量が 10 個未満の場合、サンプリング率は 30% ～ 50% です。バッチ数量が 100 個を超える場合、サンプリング率は 5% ～ 10% です。

4.3 サンプリングマーキング

サンプルには、バッチ番号、ブランド番号（YG8、YT15 など）、およびサンプリング場所を記入してください。このマーキングは、後続の処理または試験エリアに影響を与えてはなりません。

5. サンプルの切断

5.1 機器要件

切断機：ダイヤモンド鋸刃を装備し、切断速度は <500 r/min。

冷却剤：蒸留水または特殊冷却剤、温度 <40°C。

5.2 切断手順

超硬製品またはブランクを切断機の作業台に固定します。

ダイヤモンドソーブレードを使用して低速 (<500 r/min) で切断し、わずかな圧力 (<50 N) を加えます。

冷却を続け、局所的な過熱（温度 <60°C）を避けてください。

5.3 切断結果

試験片のサイズは、次のような後続のテストの要件を満たす必要があります。

硬度試験：5×5×2 mm (±0.1 mm)。

破壊靱性試験：20×4×2 mm (±0.02 mm)。

微細構造検査：10×10×5mm (±0.1mm)。

切断面は、明らかなひび割れや焼け跡がなく滑らかでなければなりません。

6. 標本の設置

6.1 適用範囲

標本が小さい（5 mm 未満）場合や不規則な形状の場合は、マウントが必要です。

マウントにより、試験片の取り扱いと試験面の安定性が向上します。

6.2 機器要件

ホットマウント機：温度範囲 150～180°C、圧力 20～30MPa。

実装樹脂：熱硬化性樹脂またはエポキシ樹脂、硬度 > HV 100。

6.3 取り付け手順

標本をマウント型に配置し、樹脂粉末または液体樹脂を追加します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

温度を 150～180℃、圧力を 20～30MPa に設定し、5～10 分間加熱します。
室温（<40℃）まで自然に冷却し、マウントされた標本を取り出します。

6.4 モザイク結果

マウントされた標本の表面は平坦であり、樹脂は標本にしっかりと接着されており、気泡やひび割れはありません。

試験片の試験面は露出しており、面積は 5×5 mm を超えます。

7. サンプルの研削と研磨

7.1 機器要件

研削・研磨機：速度 200～300r/min。

サンドペーパー：粒度 400#-2000# （ SiC サンドペーパー）。

：ダイヤモンド研磨液（粒径 0.5～ 1μm ）を装備。

7.2 研削と研磨の手順

粗挽き：

400#-800# のサンドペーパーを使用して、200 r/min の速度で切断跡を徐々に除去し、わずかな圧力（<20 N）を加えます。

サンドペーパーを交換するたびに、研磨残留物を除去するために試料を水で洗い流します。

微粉碎：

1000#-2000# のサンドペーパーを使用し、徐々に粒度を上げ、200 r/min で回転させ、わずかに圧力をかけます（<10 N）。

表面に明らかな傷がないこと、粗さが Ra<0.2 μm まで低減されていることを確認します。

研磨：

研磨液（粒径 0.5μm ）を使用し、研磨ディスク速度は 300r/min、わずかな圧力（<5N）を加えました。

鏡面仕上げに研磨されており、表面粗さは Ra<0.05μm （顕微鏡検査）。

7.3 研削および研磨結果

サンプルの表面は平らで滑らかで、傷、ひび割れ、焼け跡はありません。

表面粗さ Ra<0.05 μm は、硬度、破壊靱性、微細構造などの試験要件を満たしています。

8. サンプル洗浄

8.1 洗浄方法

試料を無水エタノールまたはアセトンに 1 ～ 2 分間浸し、油、ほこり、研磨残留物を除去します。

洗浄効果を高めるために、超音波洗浄機（周波数 40kHz、出力 100W）を 2～3 分間使用し

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

てください。

水染みを防ぐために、圧縮空気またはろ紙を使用してサンプルの表面を拭いて乾かします。

8.2 洗浄結果

サンプルの表面には目に見える汚れや残留物はなく、その後のテストに適しています。

9. サンプル検査

9.1 外観検査

試験片の表面が平らで、ひび割れ、気孔、焼け跡などがないかどうかを確認します。

サンプルサイズを測定すると、偏差が表 1 の要件を満たす必要があります。

表 1 試験片サイズの偏差要件

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 5249-2008

超硬合金

サンプル調製の一般仕様

1 範囲

この規格は、サンプリング、切断、インレイ、研削、研磨、洗浄、マーキングなどの要件を含む、セメント炭化物の性能試験のための試験片の準備に関する一般的な仕様を規定しています。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とするセメント炭化物、および他の炭化物（TaC など）を含むセメント炭化物にも適用されます。この規格は、硬度、密度、曲げ強度、破壊靱性、微細構造などの性能試験用の試験片の作成には適用されますが、コーティングされたセメント炭化物または表面強化後のセメント炭化物の試験片の作成には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となる。日付が記載されているすべての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ない。日付が記載されていないすべての参照文書については、最新版が本規格に適用される。

GB/T 3849-2008 超硬合金のピッカース硬さ試験方法

GB/T 3488-2008 超硬合金の微細構造試験方法

GB/T 7997-2010 超硬合金の破壊靱性試験方法

GB/T 3850-2008 超硬合金の曲げ強度の測定方法

GB/T 3848-2008 超硬合金の密度測定方法

ISO 4489:1978 超硬合金試験片の作製および試験方法

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義を使用します。

超硬合金：粉末冶金プロセスによって、炭化タングステン（WC）を主硬相として、コバルト（Co）を結合相として作られた複合材料。

試験片：性能試験のために超硬合金材料または製品から採取したサンプル。

サンプリング：セメント炭化物材料または製品からサンプルを抽出するプロセス。

研削・研磨：機械的な研削と研磨によってサンプルの表面を所定の粗さに仕上げるプロセス。

表面粗さ（Ra）：サンプル表面の算術平均粗さ（ μm ）。

4 サンプル調製の原理

超硬合金試験片を作製する目的は、サンプリング、切断、取り付け、研磨、洗浄などの工程を経て、試験片の表面が平坦で欠陥のない状態であること、そして性能試験の精度要件を満たすことを確認することです。試験片作製においては、加工欠陥（ひび割れ、過熱、構造変化など）の発生を防ぎ、試験片のサイズ、表面粗さ、形状が対応する試験規格の要

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

件を満たすようにする必要があります。

5. サンプル調製装置

5.1 切断装置

切断機：ダイヤモンド鋸刃を装備し、切断速度は 300～500 r/min です。

冷却剤：水または水ベースの冷却剤、温度制御は 60℃ 未満、過熱を避けてください。

5.2 取り付け装置

ホットマウント機：温度範囲 150～200℃、圧力 20～30MPa。

取り付け材質：フェノール樹脂またはエポキシ樹脂、耐熱温度 >150℃。

5.3 研削・研磨装置

研削・研磨機：速度 200～500r/min。

サンドペーパー：粒度 400#-2000#。

研磨ディスク：フェルトまたはフランネル、速度 300 ～ 400 r/min。

研磨剤：ダイヤモンド研磨液、粒径 0.5 ～ 1μm 。

5.4 清掃用具

超音波洗浄機：周波数 40kHz、電力 100～200W。

洗浄液：無水エタノールまたはアセトン。

5.5 測定ツール

ノギス：精度±0.02mm。

デジタルマイクロメーター：精度±0.001mm。

さ計：精度±0.01μm 。

5.6 環境制御

温度: 20±5℃。

湿度:50±10%。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6 サンプル準備手順

6.1 サンプリング

6.1.1 サンプリング場所

サンプリングは、エッジ、表面欠陥、または熱影響部に近い領域を避け、全体的な材料特

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

性を代表するものでなければなりません。

バー、プレート、または部品の場合、サンプリング場所是对应するテスト規格に準拠する必要があります。

硬度テスト：表面から 1 mm 以上。

微細構造検査：表面から 0.5 mm 以上。

曲げ強度テスト：端から 2 mm 以上。

6.1.2 サンプリング量

統計的な代表性を保証するために、各バッチで採取されるサンプルの数は 5 個以上でなければなりません。

テスト結果の偏差が大きい場合 (>5%)、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

6.1.3 サンプリング方法

切断にはダイヤモンドのこぎり刃を使用し、冷却剤として水を使用し、切断速度は 300 ~ 500 r/min、温度は 60°C 未満にして、過熱による組織の変化を回避します。

切断面は平らで、垂直度の偏差は 0.05 mm 未満である必要があります。

6.2 試験片サイズ

テスト項目に応じてサンプルサイズを決定します。

硬度試験 (GB/T 3849-2008)：表面積 > 5×5 mm、厚さ > 2 mm。

曲げ強度試験 (GB/T 3850-2008)：20×6.5×5.25 mm (±0.05 mm)。

破壊靱性試験 (GB/T 7997-2010)：20×4×2 mm (±0.02 mm)。

微細構造検査 (GB/T 3488-2008)：10×10×5 mm (±0.1 mm)。

寸法偏差は、関連する試験規格の要件に準拠する必要があります。

6.3 モザイク（オプション）

6.3.1 適用範囲

小さいサイズ (<5×5×2 mm) または不規則な形状の標本はマウントする必要があります。

6.3.2 取り付け手順

ホットマウントを使用し、フェノール樹脂またはエポキシ樹脂を選択してください。

実装温度は 150~180°C、圧力は 20~30 MPa、保持時間は 5~10 分です。

冷却後、サンプルは気泡やひび割れなくマウント材料にしっかりと結合されます。

6.4 研削と研磨

6.4.1 粗粉碎

400#-1200#のサンドペーパーを使用して、切断跡を徐々に除去します。

速度は 200 r/min、サンドペーパーの各レベルの研磨時間は 1 ~ 2 分で、方向は 90° 回転し、均一な研磨跡を確保します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

粗研磨後、表面は目立った傷もなく滑らかです（顕微鏡検査、倍率 50 倍）。

6.4.2 微粉碎

1500#-2000# のサンドペーパーを使用し、速度 200 r/min、研磨時間 1-2 分。

微研磨後の表面粗さは $Ra < 0.2\mu m$ （表面粗さ計で測定）。

6.4.3 研磨

ダイヤモンド研磨液（粒径 $0.5 \sim 1\mu m$ ）を使用し、研磨ディスク速度 300~400r/min、研磨時間 3~5 分。

研磨後の表面粗さは $Ra < 0.05\mu m$ で、鏡面状で傷なし（顕微鏡検査、倍率 100 倍）。

6.5 クリーニング

サンプルを超音波洗浄機に入れ、無水エタノールを用いて周波数 40 kHz、電力 100 W で 3 ~ 5 分間洗浄しました。

洗浄後は、表面に残留物が残らないように乾燥室素で乾燥させます。

6.6 サンプルマーキング

試験片の非試験部にバッチ番号、ブランド番号（YG8、YT15 など）、試験項目を記入します。

マーキング方法：レーザー彫刻またはインクマーキング。マーキングは明確で、テスト領域に影響を与えないようにする必要があります。

6.7 サンプル検査

試料の表面を検査します。ひび割れ、傷、酸化層、汚染がないことを確認します。

サイズを確認します。ノギスまたはマイクロメータを使用して測定し、偏差がテスト標準の要件を満たしていることを確認します。

表面粗さを確認します: $Ra < 0.05 \mu m$ (微細構造検査) または $Ra < 0.1 \mu m$ (硬度試験)。

7. サンプル調製の品質評価

7.1 表面品質

試料の表面は鏡面状で、傷、ひび割れ、加工欠陥などがいない状態であること（顕微鏡検査、倍率 100 倍）。

表面粗さ:

微細構造検査: $Ra < 0.05 \mu m$ 。

硬度試験: $Ra < 0.1 \mu m$ 。

曲げ強度または破壊靱性試験: $Ra < 0.2 \mu m$ 。

7.2 寸法精度

サンプルサイズの偏差は、対応する試験規格に準拠する必要があります。

曲げ強度試験: $\pm 0.05 mm$ 。

破壊靱性試験: $\pm 0.02 mm$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微細構造検査：±0.1mm。

7.3 組織への影響

試験片作製プロセス中に構造上の変化（過熱による粒子の粗大化や亀裂など）が発生してはなりません。

切削温度が 60°C を超えると、WC 粒度の偏差が ±0.2 μm を超える可能性があります(顕微鏡検査、倍率 1000 倍)。

7.4 不適合処理

サンプルの表面品質、サイズ、または粗さが不十分な場合は、サンプルを再準備する必要があります。

ひび割れや構造変化が見つかった場合は、原因を分析し（切断速度が速すぎるなど）、再度サンプルを採取する必要があります。

8 サンプルの保管

サンプルは、長時間（24 時間以上）空気にさらされることを避けるため、調製後すぐにテストする必要があります。

保管が必要な場合は、サンプルを 20±5°C、湿度 30% 未満のデシケーターに置き、防錆紙で包んでください。

酸化や汚染を避けるため、保管期間は 1 か月を超えないようにしてください。

9 検査報告書

検査報告書には以下の内容を含める必要があります。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ。

準備条件：切削速度（300～500r/min）、マウント温度（150～180°C）、研磨液粒子サイズ（0.5～1μm）。

準備結果：表面粗さ（Ra）、寸法偏差、表面品質評価。

評価結論：テスト要件を満たしているかどうか。

作成日とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）典型的なセメント炭化物試験片の作製要件

テスト項目	サンプルサイズ（mm）	さ（Ra, μm）	寸法偏差（mm）	代表的な用途
硬度試験	>5×5×2	<0.1	±0.1	切削工具
曲げ強度試験	20×6.5×5.25	<0.2	±0.05	鉋山用ドリルビット
破壊靱性試験	20×4×2	<0.2	±0.02	型

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

テスト項目	サンプルサイズ (mm)	さ (Ra, μm)	寸法偏差 (mm)	代表的な用途
微細構造検査	10×10×5	<0.05	±0.1	品質管理

付録 B（参考付録）サンプル調製のための環境要件

温度: 20±5℃。

湿度: 50±10%。

振動や腐食性ガス環境はありません。

作業台の水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

付録 C（参考付録）サンプル調製における一般的な問題と解決策

質問	理由	回避策
表面の傷	が大きすぎる (> 1 μm)	0.5 μm の研磨液を使用する
試料の過熱 (>60℃)	切削速度が速すぎる (>500 r/min)	切断速度を 300 r/min に下げる
表面粗さが基準を満たしていない	研磨時間が不十分 (3 分未満)	研磨時間を 5 分に延長
試験片の端の割れ	冷却剤なしでの切削	60℃未満の温度では水性冷却剤を使用してください。

要約する

GB/T 5249-2008「超硬合金サンプル作製通則」は、超硬合金の性能試験用サンプル作製の標準化された手順を規定しています。標準化されたサンプリング、切断、固定、研磨、研磨、洗浄などの手順により、サンプルの表面品質と寸法精度が試験要求を満たすことを保証します。この規格の導入は、超硬合金の性能試験結果の精度と再現性を向上させ、切削工具、鉋山用ドリル、金型などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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 28079:2009

超硬合金手のひら型試験片の破壊靱性試験 ハードメタル— パルムクヴィスト靱性試験

1 範囲

この規格は、常温で押込み試験により超硬合金およびサーメットの手のひら型破壊靱性を測定する方法について規定する。この規格は、金属に結合した炭化物および炭窒化物（一般に超硬合金、サーメット、または超硬合金と呼ばれる）の破壊靱性試験（パルムクヴィスト破壊靱性と呼ばれる）に適用され、ビッカース硬さ押込み試験の4隅の亀裂の全長を測定することで算出される。この規格の試験手順は常温（20±5℃）に適用可能であるが、合意によりより高い温度またはより低い温度にも拡張することができる。この標準試験手順は、一般的な実験室の空気環境に適用可能であり、腐食性環境（強酸や海水など）には適用できない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

ISO 3878:1983 超硬合金 - ビッカース硬さおよびロックウェル硬さ試験

ISO 3252:1999 粉末冶金 - 用語

ISO 6507-1:2005 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 1: 試験方法

3 用語と定義

この規格では、ISO 3252:1999 および次の用語と定義を採用しています。

ハードメタル

炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）を結合相として粉末冶金法により製造された複合材料です。

サーメット

TiCN など）を主な硬質相とし、金属（Ni、Co など）を結合相とする。

パルムクヴィストのタフネス

超硬合金またはサーメットの破壊靱性は、ビッカース硬さ圧痕の4隅の亀裂の合計長さで計算され、単位は $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。

ビッカース硬度インデンテーション

ビッカースダイヤモンド圧子（頂点角 136°）を使用して荷重を加え、試験片の表面に四角い圧痕を形成します。

亀裂長さ (l)

ビッカース圧痕の四隅から伸びる手のひら状の亀裂の長さ (mm)。

4 テストの原則

手のひら型破壊靱性試験は、超硬合金またはサーメット試験片の表面にビッカース硬さの圧痕を付与し、圧痕の四隅から延びる手のひら型亀裂の全長を測定し、圧痕荷重と材料硬

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

度を組み合わせて破壊靱性 K_{Ic} を算出する試験です。手のひら型亀裂は表層亀裂（非中央亀裂）と仮定し、その長さは材料靱性と関連しています。計算式は次のとおりです。

$$K_{Ic} = A \times \sqrt{HV} \times \sqrt{\frac{P}{T}}$$

其中:

- K_{Ic} 为断裂靱性, 单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;
- A 为常数 (经验值, 通常取 0.0028) ;
- HV 为维氏硬度, 单位为 N/mm^2 (或 MPa) ;
- P 为压痕载荷, 单位为 N (通常为 294.2 N , 即 30 kgf) ;
- T 为四角裂纹总长度, 单位为 mm , $T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$.

5 試験装置

5.1 ビッカース硬度計

ISO 6507-1:2005 要件を満たしています。

荷重範囲: 100~500 N 、精度 $\pm 0.5\%$ 。

保持時間制御: 5~60 秒、偏差 $<\pm 0.5$ 秒。

5.2 インデンター

標準ビッカースダイヤモンド圧子、頂点角 $136^\circ (\pm 0.5^\circ)$ 。

インデンターの表面には欠陥がなく、エッジは明瞭です(顕微鏡検査、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$)。

5.3 測定装置

: 倍率 400×~600×、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$ 。

測定精度 $\pm 0.001 \text{mm}$ のデジタル読み取りシステムを搭載。

5.4 キャリブレーションブロック

超硬標準校正ブロック、硬度範囲 HV 1200 ~ 2000、偏差 $<\pm 2\%$ 。

ブロックの表面粗さは $Ra < 0.05 \mu\text{m}$ です。

5.5 環境制御

温度: $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 。

湿度: $50 \pm 10\%$ 。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

試験片の形状: 直方体または円筒、試験面積 $> 5 \times 5 \text{mm}$ 、厚さ $> 2 \text{mm}$ 。

試験面は平らで、ひび割れ、酸化層、機械加工の欠陥などがない状態である必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面粗さ $Ra < 0.1\mu m$ （研磨）。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。
結果の偏差が大きい場合（>5%）、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

6.3 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド（YG8、YT15 など）、テスト項目を記入する必要がありますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

6.4 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

kgf）の荷重で 3 回測定し、校正されました。硬度偏差は±1%未満でした。
インデンターの状態をチェックして、摩耗や欠陥がないことを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: $20 \pm 5^{\circ}C$ 。
相対湿度: $50 \pm 10\%$ 。
振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 ビッカース硬さの押込み

試験面が水平であることを確認しながら、試験片を硬度試験機の作業台に置きます。

荷重 294.2 N（30 kgf）と保持時間 10～15 秒を選択します。

インデンターはサンプル表面にゆっくりと押し付けられ、荷重を維持した後、自動的に荷重が解除されます。

各試験片には 5 つの圧痕が付けられ、圧痕間隔は圧痕の対角線の長さの 5 倍（>0.5 mm）を超え、試験片の端からの距離は 1 mm を超えています。

7.4 亀裂長さの測定

光学顕微鏡（倍率 400～600 倍）を使用して、圧痕の四隅の亀裂長さ l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 を $\pm 0.001 mm$ の精度で測定した。

亀裂の合計長さを計算します。

$$T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$$

ひび割れが手のひら型のひび割れ（中央ひび割れや横ひび割れではない）であること、ま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

た、ひび割れがくぼみの四隅から明瞭に伸びていることを確認します。

7.5 ビッカース硬度測定

くぼみの 2 つの対角線の長さ（ d_1 、 d_2 ）を $\pm 0.001 \text{ mm}$ の精度で測定します。
平均対角線の長さを計算します。

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

ビッカース硬度を計算します。

$$HV = \frac{1.8544 \times P}{d^2}$$

ここで、 $P = 294.2 \text{ N}$ 。

7.6 破壊靱性計算

次の式を使用して破壊靱性を計算します。

$$K_{Ic} = 0.0028 \times \sqrt{HV} \times \sqrt{\frac{P}{T}}$$

インデントの K_{Ic} の平均値を、偏差 $< \pm 5\%$ で取得します。

8 テスト結果の評価

8.1 破壊靱性範囲

超硬合金のパーム破壊靱性値は通常 $K_{Ic} 10\text{-}20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ であり、具体的な範囲はグレードと Co 含有量によって異なります。

YG6 (6% Co): $K_{Ic} 14\text{-}16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

YG8 (8% Co): $K_{Ic} 12\text{-}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

YG10 (10% Co): $K_{Ic} 10\text{-}13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

TiCN -Ni など): $K_{Ic} 8\text{-}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

8.2 逸脱評価

5 つの圧痕の K_{Ic} 値の偏差は $\pm 5\%$ 未満です。それ以外の場合は再テストが必要です。

K_{Ic} 値が予想範囲外の場合、原因を分析する必要があります (例: 亀裂の形態が手のひら型ではない、Co 含有量が高すぎて亀裂が発生しないなど)。

8.3 影響要因の分析

ひび割れ形状: ひび割れが中央ひび割れまたは横ひび割れ (手のひら型ひび割れではない) の場合、 K_{Ic} 値は無効です。

Co 含有量: Co 含有量が 15% を超えると、亀裂が発生しない可能性があり (靱性が高すぎる)、パーム法は適用できません。

荷重の選択: 荷重が低すぎると ($< 294.2 \text{ N}$) 亀裂が発生しない可能性がありますが、荷重が高すぎると ($> 490.3 \text{ N}$) 亀裂が複雑化する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面品質：表面粗さ $Ra > 0.1 \mu m$ は、亀裂長さの測定に影響します（偏差 $> 5\%$ ）。

9 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。

サンプル情報：ブランド、バッチ番号、サイズ、Co 含有量。

試験条件：機器モデル、荷重（294.2 N）、保持時間（10～15 秒）、周囲温度（ $20 \pm 5^\circ C$ ）、湿度（ $50 \pm 10\%$ ）。

各圧痕の TT、ピッカース硬度 HV HV HV、 K_{IC} 値とその平均値および偏差。

評価結論：予想範囲を満たしているかどうか、ひび割れ形態の説明。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）代表的な超硬合金の手のひら型破壊靱性の参考値

ブランド	Co 含有量（重量 %）	ピッカース硬度（HV30）	手のひらの破壊靱性（ K_{IC} 、 $MPa \cdot m^{1/2}$ ）	代表的な用途
YG6	6	1500-1600	14～16 歳	鉋山用ドリルビット
YG8	8	1450-1550	12～15 歳	切削工具
YG10	10	1400-1500	10-13	型
TiCN - Ni	10	1600-1700	8～12 歳	仕上げツール

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度： $20 \pm 5^\circ C$ 。

湿度： $50 \pm 10\%$ 。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 $< 0.02 \text{ mm/m}$ 。

付録 C（参考付録）手のひら型亀裂形態の模式図

手のひら型亀裂：ピッカース圧痕の 4 つの角から伸びる浅い亀裂で、亀裂の経路が圧痕の端に沿って明瞭に見えます。

手のひらの形以外の亀裂：

中央亀裂：亀裂は、くぼみの底から垂直に下向きに伸びます。

横方向き裂：試験片表面に沿って横方向に伝播し、剥離を引き起こす可能性のあるき裂。

注：

本規格では、 K_{IC} の計算には手のひら型き裂のみが適用されます。

要約する

ISO 28079:2009「セメント系超硬合金の掌状試験片の破壊靱性試験」は、セメント系超硬合金およびサーメットの掌状破壊靱性試験の標準化された手順を提供し、標準化された試験片作製、インデンテーション試験、亀裂測定、および結果計算を通じて、試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の導入は、セメント系超硬合金の品質管理と性能評価

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

に役立ち、切削工具、鉋山用ドリル、金型などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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 6507-1:2018

金属材料のビッカース硬度試験 金属材料 - ビッカース硬さ試験

1 範囲

この規格は、ビッカース硬さ試験によって金属材料（超硬合金、鋼、鋳鉄、非鉄金属などを含む）の硬さを室温（10℃～35℃）で測定する方法を規定するものであり、試験原理、試験設備要件、試料調製、試験手順、結果の計算と評価、試験報告書などを含む。この規格は、ビッカース硬さ範囲 HV 1～HV 3000 の試験に適用され、異なる荷重（0.098 N～2942 N）をカバーしている。この規格は、微小または薄肉の試験片（厚さ<0.1 mm）やコーティングされた材料の硬さ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、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

ISO 6507-2:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正

ISO 6507-3:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 3: 校正標準

ISO 376:2011 金属材料 - 校正力標準

ISO 18265:2013 金属材料 - 硬度と強度の変換

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義を使用します。

ビッカース硬度 (HV): ビッカース圧子の侵入に抵抗する金属材料の能力。圧痕の対角線の長さで計算されたビッカース硬度値 (N/mm² (または MPa)) として表されます。

ビッカース圧子: 頂点角が 136° の四角いダイヤモンドピラミッド圧子。

くぼみの対角線: ビッカース圧子をサンプル表面に押し付けたときに形成される正方形のくぼみの 2 つの対角線の長さ (mm)。

試験荷重 (F): ビッカース圧子に加えられる力(ニュートン単位、0.098 N～2942 N)。

保持時間: インデントアが荷重を加えた後にその荷重を維持する時間。単位は秒です。

4 テストの原則

ビッカース硬度試験は、標準ビッカースダイヤモンド圧子（頂角 136°）を金属サンプルの表面に所定の荷重で押し付け、一定時間保持した後、荷重を抜き取り、圧痕の 2 つの対角線の長さ（d1、d2）を測定し、平均対角線長さ（d）を算出して、ビッカース硬度値（HV）を算出します。計算式は以下のとおりです。

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

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

F 为试验载荷，单位为 N；

d 为压痕两条对角线的平均长度，单位为 mm， $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ ；

硬度值单位为 N/mm^2 ($1 \text{ kgf/mm}^2 \approx 9.807 \text{ N/mm}^2$)。

5 試験装置

5.1 ビッカース硬度計

ISO 6507-2:2018 の検証および校正要件を満たしています。

荷重範囲: 0.098 N ~ 2942 N (HV 0.01 ~ HV 30)、精度 $\pm 0.5\%$ 。

保持時間制御: 5 秒 ~ 60 秒、偏差 $< \pm 0.5$ 秒。

5.2 インデントー

標準ビッカースダイヤモンド圧子、頂点角 $136^\circ (\pm 0.5^\circ)$ 。

インデントーの表面には欠陥がなく、エッジは明瞭です (顕微鏡検査、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$)。

5.3 測定装置

光学顕微鏡: 倍率 50 ~ 1000 倍、400 倍を推奨、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$ 。

測定精度 $\pm 0.001 \text{ mm}$ のデジタル読み取りシステムを搭載。

5.4 キャリブレーションブロック

ISO 6507-3:2018 に準拠した標準校正ブロック、硬度範囲 HV 100 ~ 3000、偏差 $< \pm 2\%$ 。

ブロックの表面粗さは $Ra < 0.05 \mu\text{m}$ です。

5.5 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: 30% ~ 80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

試験片の形状: 直方体、円筒またはその他の規則的な幾何学的形状、試験面積 $> 5 \times 5 \text{ mm}$ 、厚さ $> 0.5 \text{ mm}$ (荷重に依存)。

試験面は平らで、ひび割れ、酸化層、機械加工の欠陥などがない状態である必要があります。

表面粗さ $Ra < 0.1 \mu\text{m}$ (研磨済み)、低荷重 ($< 9.807 \text{ N}$) 試験の場合、 $Ra < 0.05 \mu\text{m}$ 。

試験片の厚さは次の要件を満たす必要があります: 厚さ $\geq 1.5 \times$ くぼみの対角線の長さ。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 3\%$)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

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

6.3 サンプルマーキング

試験片にはバッチ番号、ブランド（YG8、45#鋼など）、試験項目を記入する必要がありますが、記入は試験領域に影響を与えてはなりません。

6.4 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールまたはアセトンでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

標準校正ブロックを用いて硬度計を校正します。試験荷重に適した校正ブロックを選択します。3回測定します。硬度偏差は $\pm 1\%$ 未満です。

インデンターの状態をチェックして、摩耗や欠陥がないことを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。

相対湿度: $30\% \sim 80\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 負荷の選択

材料の硬度と試験片の厚さに基づいて荷重を選択します。

超硬合金: 294.2N (30kgf 、 $\text{HV}30$) を推奨します。

鋼: $50\text{N} \sim 294.2\text{N}$ ($\text{HV}5 \sim \text{HV}30$)。

薄肉試験片: $0.098\text{N} \sim 9.807\text{N}$ ($\text{HV}0.01 \sim \text{HV}1$)。

荷重によって、へこみの対角線の長さ d が $0.020\text{mm} \sim 1.400\text{mm}$ の範囲になるようにする必要があります。

7.4 テスト操作

試験面が水平であることを確認しながら、試験片を硬度試験機の作業台に置きます。

適切な荷重（例: 294.2N ）を選択し、その荷重を $10 \sim 15$ 秒間保持します（または材料の要件に応じて調整します）。

インデンターはサンプル表面にゆっくりと押し付けられ、荷重を維持した後、自動的に荷重が解除されます。

各試験片について5つの圧痕点を測定し、圧痕間隔は対角線の長さの3倍（ 0.3mm 以上）とし、試験片の端からの距離は 0.5mm 以上とする。

7.5 測定と計算

くぼみの2本の対角線の長さ（ d_1 、 d_2 ）は、光学顕微鏡を使用して $\pm 0.001\text{mm}$ の精度で測定されました。

平均対角線の長さを計算します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

ビッカース硬度を計算します。

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

5 つの圧痕点の硬度値がサンプルの硬度値として採用され、偏差は $\pm 3\%$ 未満です。

8 テスト結果の評価

8.1 硬度値の範囲

金属材料のビッカース硬度範囲: HV 100~3000、具体的な値は材料によって異なります。

超硬合金 (YG8): HV 1450~1550。

硬化鋼 (45#): HV 500~700。

アルミニウム合金: HV 50-150。

8.2 逸脱評価

5 つの圧痕ポイントの許容差は $\pm 3\%$ 未満です。それ以外の場合は再テストが必要です。硬度値が材料の技術要件を超える場合は、その原因を分析する必要があります (表面欠陥、荷重の不一致など)。

8.3 影響要因の分析

荷重の選択: 荷重が低すぎる場合 ($< 0.098 \text{ N}$)、明確なへこみが形成されない可能性があります。また、荷重が高すぎる場合 ($> 2942 \text{ N}$)、試験片が変形する可能性があります。

表面品質: 表面粗さ $Ra > 0.1 \mu\text{m}$ の場合、硬度の値が低くなります (偏差 $> 5\%$)。

滞留時間: 5 秒未満または 60 秒を超える時間は、インデントのサイズに影響します (偏差 $\pm 2\%$)。

試験片の厚さ: 厚さ $< 1.5 \times$ くぼみの対角長さの場合、サポート効果が得られ、硬度値が高くなります (偏差 $> 10\%$)。

9 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。

サンプル情報: 材料の種類、ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件: 機器モデル、荷重 (N)、保持時間 (秒)、周囲温度 ($10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$)、湿度 ($30\% \sim 80\%$)。

試験結果: 各くぼみの平均対角長さ (d)、硬度値 (HV)、平均硬度値および偏差。

評価結論: 材料の技術的要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 代表的な金属材料のビッカース硬度の基準値

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

素材の種類	ブランド/カテゴリ	ピッカース硬度 (HV)	標準荷重 (N)	代表的な用途
超硬合金	YG8	1450-1550	294.2	切削工具
硬化鋼	45# (HRC 50)	500~700	294.2	機械部品
アルミニウム合金	6061-T6	50~150	9.807	航空宇宙構造
鋳鉄	HT250	200~300	98.07	エンジンブロック

付録 B（参考付録）ピッカース硬度と荷重の関係表

荷重(N)	硬度記号	へこみの対角長さ範囲 (mm)	適用可能な材料
0.098	HV 0.01	0.020~0.050	薄壁または小さな標本
9.807	HV 1	0.050~0.150	軟質金属（アルミニウムなど）
98.07	HV 10	0.150~0.400	中硬質材料（鋳鉄など）
294.2	HV 30	0.400~1.000	硬質合金、鋼
2942	HV 300	1.000~1.400	超硬材料

付録 C（参考付録）テスト環境要件

温度: 10°C~35°C、20±5°Cを推奨。

湿度: 30%~80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

ISO 6507-1:2018「金属材料のピッカース硬さ試験」は、金属材料のピッカース硬さ試験のための標準化された手順を規定し、標準化された試験片調製、試験手順、および結果評価を通じて、試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の実施は、超硬合金、鋼、アルミニウム合金などの材料の品質管理および性能評価に適用でき、機械製造、航空宇宙、金型製造などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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 6507-1:2018

金属材料 - ビッカース硬さ試験

パート 1: 試験方法

1 範囲

この規格は、金属材料（超硬合金を含む）のビッカース硬さ試験方法を規定し、試験力範囲が 1.961 N (0.2 kgf) ～1,177 N (120 kgf) の試験に適用します。マクロビッカース硬さ試験（試験力 9.807 N～1,177 N）とマイクロビッカース硬さ試験（試験力 1.961 N～9.807 N）が含まれます。この規格は、鋼、鋳鉄、非鉄金属、超硬合金など、さまざまな金属材料の硬さ試験に適用され、試験手順、測定方法、および結果処理要件を規定しています。

2 規範的参照

以下の文書に記載されている条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されているバージョンのみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新バージョン（すべての修正を含む）が適用されます。

ISO 6507-2:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正

ISO 6507-3:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 3: 基準ブロックの校正

ISO 376:2011 金属材料 - 静的引張試験機、圧縮試験機、および推力試験機の力測定システムの校正

3 用語と定義

この文書は、ISO 3850:2018（セメント炭化物の用語）および以下の定義に適用されます。
ビッカース硬度（HV）：適用された試験力と圧痕表面積の比によって決定される硬度値（単位は HV）。

試験力（F）：圧子が試験片に加える力。ニュートン（N）またはキログラム力（kgf）で表します。

くぼみ：ダイヤモンド四角錐圧子によってサンプルの表面に形成された四角いくぼみ。

対角線の長さ（d）：くぼみの 2 つの対角線の平均の長さ（ミリメートル（mm））。

4 原則

ビッカース硬さの測定は、所定の試験力を加え、ダイヤモンド四角錐圧子（頂点角 136°）を試料表面に押し付け、圧痕の対角線の長さを測定して硬度値を算出します。硬度値は以下の式に従って算出されます： $HV=1.8544 \cdot F / d^2$

で：

HV はビッカース硬度（単位：kgf/mm²または N/mm²）です。

F は適用される試験力（単位：N）であり、

d は、くぼみの平均対角長さです（単位：mm）。

5 試験装置

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

5.1 ビッカース硬度計

試験力範囲: 1.961 N～1,177 N、精度 $\pm 1.0\%$ 。

圧子: ダイヤモンド四角錐、頂点角 $136^\circ \pm 0.5^\circ$ 、先端半径 $< 0.002\text{mm}$ 。

測定システム: 倍率 200 倍～500 倍、解像度 $\leq 0.001\text{mm}$ の顕微鏡。

読み込み時間: 10～15 秒、精度 ± 1 秒。

5.2 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: 30% ～ 70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの要件

6.1 形状とサイズ

試験片は、へこみが端と隣接するへこみからの対角線の長さの少なくとも 2.5 倍になるように十分な大きさでなければなりません。

推奨厚さ: 試験力に対応する最大押し込み深さの少なくとも 0.5 倍 (約 $0.07 \times d_{dd}$)。

6.2 表面処理

表面粗さは $Ra \leq 0.2\mu\text{m}$ で、平坦で、酸化層やひび割れがないことが必要です。

研削には 600～2500 番のダイヤモンドサンドペーパーを使用し、研磨には $0.25\mu\text{m}$ の酸化アルミニウム研磨液を使用してください。

6.3 サンプル数

各バッチには少なくとも 3 つの標本が含まれますが、代表性を保証するために特別な場合には 5 つまで増やすことができます。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

試験力、圧子、測定システムの校正を含む、ISO 6507-2 に準拠した硬度計の検証。

7.2 試験条件

材料に適した試験力を選択します (表 1 を参照)。

サンプルを載せる前に、サンプルの表面がきれい、ほこりや油などがないことを確認してください。

7.3 テスト操作

サンプルを硬度計の作業台に置き、水平になるように調整します。

試験力を選択し、10 ～ 15 秒間荷重を加えます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

顕微鏡を使用して、くぼみの 2 つの対角線の長さ d_1 と d_2 を測定します。

平均対角線の長さ $d = (d_1 + d_2) / 2$ を計算します。

試験片上の少なくとも 3 つの異なる場所を 2.5 mm 以上の間隔で測定します。

7.4 結果の計算

ビッカース硬度を計算します。

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

平均を計算します。

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{n}$$

HV_i の場合は単一の測定値であり、 n は測定回数です。

標準偏差を計算します。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{n - 1}}$$

測定値の偏差が $\pm 2.0\%$ 未満であることを確認します。

8 試験力の選択

素材の種類 推奨試験力 (N) 標準的な硬度範囲 (HV)

超硬合金 9.807 - 98.07 1000 - 2000

硬化鋼 9.807 - 294.2 500 ~ 1000

非鉄金属 1.961 - 9.807 50 ~ 200

注意：試験力は、材料の硬度と試験片の厚さに応じて選択する必要があります。

9 結果評価

9.1 硬度範囲

硬度値は材料特性と一致している必要があります。たとえば、YG6 超硬合金の硬度範囲は 1400 ~ 1600 HV です。

9.2 逸脱評価

3 つの測定ポイントの測定値が $\pm 2.0\%$ 未満であり、標準偏差が 20 HV 未満である場合、それ以外の場合は再テストが必要です。

9.3 影響要因

表面粗さ: $Ra > 0.2 \mu m$ の場合、硬度値が 5% ~ 10% 低下する可能性があります。

試験力: $\pm 1.0\%$ の力の偏差により、結果に 2% ~ 3% の偏差が生じる可能性があります。

読み込み時間: 10 秒未満または 15 秒を超える時間は、インデントの形状に影響を与える可能性があります。

10 テストレポート

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

テストレポートには次の内容を含める必要があります。

サンプル情報：素材の種類、ブランド、サイズ。

試験条件：硬度計モデル、試験力、荷重時間、周囲温度（10℃ ～ 35℃）、湿度（30% ～ 70%）。

試験結果：各ポイントの硬度値、平均値、標準偏差、偏差。

評価結論：技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録） 代表的な金属材料の硬度の基準値

素材の種類	ブランド/州	硬度範囲（HV）	代表的な用途
超硬合金	YG6	1400-1600	鉋山用ドリルビット
硬化鋼	42CrMo	500～700	機械部品
非鉄金属	Cu-ETP	50～100	電気材料

付録 B（参考付録） 環境要件

温度：10℃～35℃、23±2℃を推奨。

湿度：30%～70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 <0.02 mm/m。

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 6507-2:2018

金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 2: 硬度計の検証と校正

1 範囲

この規格は、ISO 6507-1 に準拠して金属材料（超硬合金を含む）のビッカース硬さを測定するためのビッカース硬さ試験機の検証および校正方法を規定する。硬度測定 of 精度と信頼性を確保するための直接検証法および間接検証法を網羅する。この規格は、試験力範囲が 1.961 N (0.2 kgf) から 1,177 N (120 kgf) のマクロおよびマイクロビッカース硬さ試験機に適用され、定期検査および保守手順を含む。

2 規範的参照

以下の文書に記載されている条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されているバージョンのみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新バージョン(すべての修正を含む)が適用されます。

ISO 6507-1:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 1: 試験方法

ISO 6507-3:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 3: 基準ブロックの校正
試験および校正機関の能力に関する一般要求事項

3 用語と定義

このドキュメントでは、ISO 6507-1:2018 に記載されている用語と定義を適用し、次の定義が含まれています。

直接検証: 試験力、インデンターの形状、測定システムなどのコンポーネントを直接測定することにより、ビッカース硬度計の性能を検証するプロセス。

間接検証: 標準化された参照ブロックをテストすることにより、ビッカース硬度試験機の性能を検証するプロセス。

ビッカース硬度 (HV) : 適用された試験力と圧痕表面積の比によって決定される硬度値 (単位は HV)。

試験力: 圧子によって試験片に加えられる力。ニュートン(N)またはキログラム力(kgf)で表されます。

4 一般的な要件

4.1 適用範囲

この規格は、手動、半自動、全自動の機械を含む、1.961 N ~ 1,177 N の試験力範囲をカバーするすべてのビッカース硬度試験機に適用されます。

4.2 責任

検証および校正は、ISO/IEC 17025 の要件に従って、資格のある担当者または訓練を受けたオペレーターによって実行される必要があります。

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

4.3 頻度

初期検証: 硬度計の納品後または修理後に実施します。

定期検証: 少なくとも 12 か月に 1 回、または十分な使用後 (例: 10,000 回のテスト)。

中間点検: 使用前に毎回簡単な点検を行い、基本機能が正常であることを確認します。

5 直接検証

5.1 試験力の検証

装置: 精度 $\pm 0.5\%$ の校正済み力センサーを使用します。

プログラム:

試験力 (1.961 N ~ 1,177 N) を適用し、実際の力の値を記録します。

力値の偏差が $\pm 1.0\%$ 以内であることを確認します。

記録: 各測定力の値と偏差を記録します。

5.2 インデント形状の検証

装置: 倍率 200 倍以上の光学顕微鏡または標準的な圧痕比較法を使用します。

プログラム:

ダイヤモンドインデントの先端角度 ($136^\circ \pm 0.5^\circ$) と先端半径 ($< 0.002 \text{ mm}$) を確認します。

インデントが割れたり摩耗したりしていないことを確認してください。

記録: 圧力ヘッドパラメータと検査結果を記録します。

5.3 測定システムの検証

装置: 解像度 $\leq 0.001 \text{ mm}$ の校正済み顕微鏡を使用します。

プログラム:

標準のくぼみの対角線の長さを、偏差 $\pm 0.5\%$ 以内で測定します。

測定システムの一貫性を、倍率範囲全体にわたって検証します。

記録: 対角線の長さの測定値と偏差を記録します。

6 間接検証

6.1 参照ブロックの要件

ISO 6507-3 に従って校正された基準ブロックを使用すると、硬度範囲は試験力範囲内の標準値をカバーします。

ブロックの表面粗さは $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ である。

6.2 テスト手順

準備: 硬度の異なる参照ブロックを少なくとも 5 つ選択します。

操作:

各参照ブロックに対して、2.5 mm 以上の間隔で少なくとも 5 回の測定が実行されました。

各測定の硬度値を記録します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

計算:

平均硬度値と標準偏差を計算します。

測定値が基準ブロック校正值の $\pm 2.0\%$ 以内であることを確認します。

6.3 結果評価

偏差が $\pm 2.0\%$ を超える場合は、硬度計を調整または修理して再検証する必要があります。

7 キャリブレーション

7.1 校正サイクル

直接検証が完了するたびに、または間接検証が失敗した後は、キャリブレーションを実行する必要があります。

1年に1回校正するか、使用頻度に応じて調整することをお勧めします。

7.2 校正手順

試験力の校正: 標準重量を使用して力の値を調整します。偏差は $\pm 0.5\%$ 未満です。

インデンターのキャリブレーション: インデンターを交換または研磨して、形状が要件を満たしていることを確認します。

測定システムの校正: 標準スケールを使用して顕微鏡を調整します。偏差は $\pm 0.2\%$ 未満です。

7.3 校正証明書

機器番号、校正日、オペレーターの署名、不確実性分析を含む校正証明書を提供します。

8 保守と記録

8.1 メンテナンス

ほこりや油が付かないように、圧力ヘッドと測定システムを定期的に清掃してください。電気接続と機械部品を点検し、緩んでいない部分がないことを確認します。

8.2 レコード

生データと結果の分析を含む各検証および校正の記録を少なくとも 5 年間保管します。

9 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。

デュロメーターのモデルとシリアル番号。

試験日および環境条件（温度 10°C ~ 35°C 、湿度 30% ~ 70% ）。

結果の直接検証（試験力、インデンター、測定システムのデータ）。

間接検証結果（基準ブロック番号、測定値、偏差）。

校正結果（調整前後のデータ、不確実性）。

検証および調整を行う人の署名。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録 A（参考付録）一般的な検証パラメータの参照値

試験力(N)	力偏差（ %）	圧子上角偏差（°）	測定システムの偏差（ %）
9.807	±1.0	±0.5	±0.5
98.07	±1.0	±0.5	±0.5
1177	±1.0	±0.5	±0.5

付録 B（参考付録）環境要件

温度: 10°C～35°C、23±2°Cを推奨。

湿度: 30%～70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

要約する

ISO 6507-2:2018「金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正」は、ビッカース硬さ試験機の検証および校正に関する国際標準化手順を規定し、直接法および間接法を通じて測定結果の精度と信頼性を確保します。この規格の導入は、硬さ試験の品質管理の向上に役立ち、金属材料（超硬合金を含む）の性能評価に対する技術的サポートを提供します。

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 6507-3:2018

金属材料 - ビッカース硬さ試験

パート 3: 校正標準

1 範囲

この規格は、ビッカース硬さ試験用標準片の校正方法を規定し、硬さ値の精度とトレーサビリティを確保します。本規格は、金属材料（超硬合金を含む）のビッカース硬さ試験に適用されます。標準片の硬度範囲は 20HV~2000HV、試験力範囲は 1.961N (0.2kgf) ~ 1,177N (120kgf) で、マクロビッカース硬さ（試験力 9.807N~1,177N）およびマイクロビッカース硬さ（試験力 1.961N~9.807N）が含まれます。本規格は、校正機関および硬度試験機のユーザーがビッカース硬さ試験機の性能を検証するために適用されます。

2 規範的参照

以下の文書に記載されている条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されているバージョンのみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新バージョン（すべての修正を含む）が適用されます。

ISO 6507-1:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 1: 試験方法

ISO 6507-2:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正

試験および校正機関の能力に関する一般要求事項

3 用語と定義

このドキュメントでは、ISO 6507-1:2018 に記載されている用語と定義を適用し、次の定義が含まれています。

標準ブロック:ビッカース硬度試験機の校正に使用される、既知の硬度値と均一な微細構造を持つ金属ブロック。

校正:より高グレードの標準と比較して、標準ブロックの硬度値とその不確実性を決定するプロセス。

トレーサビリティ:測定結果を途切れることのない比較の連鎖を通じて国際標準または国内標準に関連付ける特性。

ビッカース硬度 (HV) : 適用された試験力と圧痕表面積の比によって決定される硬度値（単位は HV）。

4 標準ブロックの要件

4.1 材料要件

標準ブロック材料は、硬度偏差が $\pm 1.0\%$ 未満の均一な微細構造を備えている必要があります。

一般的な材料: 硬度範囲が 20 HV ~ 2000 HV の硬化鋼、セメント炭化物、または銅合金。

表面粗さ $Ra \leq 0.1\mu m$ 、ひび割れ、酸化層、介在物なし。

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

4.2 サイズ要件

推奨サイズ: 直径 50 mm または 50×50 mm、厚さ 6 mm 以上（マクロピッカース）または 1 mm 以上（マイクロピッカース）。

試験面の平坦度の偏差は 0.005 mm 未満です。

4.3 硬度の均一性

標準ブロック試験面の硬度偏差は±1.0%未満であり、少なくとも 5 点の測定により検証されます。

5. 校正機器

5.1 ピッカース硬度計

ISO 6507-2 要件を満たし、試験力精度は ±0.5%、インデンターのトップ角度は $136^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ です。

測定システムの解像度は ≤ 0.001 mm、偏差は $\leq \pm 0.5\%$ です。

5.2 環境制御

温度: $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

湿度: 30% ~ 70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

5.3 校正用基準機器

国内または国際的に認められた高品位の標準ブロックを使用すると、硬度の不確実性は $\pm 0.5\%$ 未満になります。

6 校正手順

6.1 準備

標準ブロックの表面を清掃し、ほこりや油がないことを確認します。

ISO 6507-2 に従ってピッカース硬度計を校正します。

6.2 試験条件

試験力を選択します: 標準ブロックの硬度範囲に応じて（表 1 を参照）。

読み込み時間: 10~15 秒、精度 ± 1 秒。

6.3 キャリブレーション操作

標準ブロックの試験面上で、2.5 mm 以上の間隔で均等に分布した 5 つ以上の位置を測定します。

各くぼみの d_1 と d_2 を測定し、平均値 $d = (d_1 + d_2) / 2$ が計算されました。

ピッカース硬度を計算します: $HV = 1.8544 \cdot F / d^2$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ここで、F は試験力（N）、d は平均対角線長さ（mm）です。

6.4 結果処理

5 つの測定点の平均硬度値を計算します。

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{5}$$

標準偏差を計算します。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{4}}$$

硬度偏差が±1.0%未満、標準偏差が 5 HV 未満であることを確認します。

7 試験力の選択

硬度範囲（HV）	推奨試験力（N）	アプリケーションの種類
20～200	1.961 - 9.807	顕微鏡的ビッカース
200～1000	9.807 - 98.07	マクロビッカース
1000 - 2000	98.07 - 294.2	炭化物試験

8 不確実性の評価

8.1 不確実性の源

試験力の偏差: ±0.5% の場合、硬度の偏差は ±1.0% になる可能性があります。

対角測定偏差: ±0.5% の場合、硬度偏差は ±1.0% になる可能性があります。

温度変動: ±1°C の場合、硬度は ±0.5% 変動する可能性があります。

8.2 不確実性の計算

包括的不確実性 U（拡張不確実性、k=2）:

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{\text{force}}^2 + u_{\text{diagonal}}^2 + u_{\text{temp}}^2}$$

一般的な不確かさ: ±2% (硬度値が 1000 HV の場合、約 ±20 HV)。

9 校正証明書

校正証明書には次の内容が記載されている必要があります。

標準ブロック番号と材質情報。

校正日および環境条件（温度 20°C ±1°C、湿度 30%～70%）。

試験力と硬度値、5 つの測定点の平均値と標準偏差。

不確実性分析（拡張不確実性、k=2）。

校正機関の名前と署名。

10 標準ブロックの保守と使用

10.1 メンテナンス

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

酸化や汚染を防ぐため、デシケーター内に保管してください。

表面状態を定期的に点検してください。表面粗さ Ra が $0.1\mu\text{m}$ を超える場合は、再研磨が必要です。

10.2 使用

ほこりや油が測定に影響しないように、使用する前に必ず表面をきれいにしてください。

100 回以上使用した後、再調整が必要になります。

付録 A（参考付録） 代表的な標準ブロックの硬度の基準値

素材の種類	硬度範囲 (HV)	試験力(N)	代表的な用途
超硬合金	1400-1600	98.07	炭化物試験の校正
硬化鋼	500~700	49.03	校正鋼試験
銅合金	50~100	4.903	非鉄金属試験の校正

付録 B（参考付録） 環境要件

温度: $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

湿度: 30%~70%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 $< 0.02 \text{ mm/m}$ 。

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 3327:2009

超硬合金の圧縮強度試験方法 超硬合金- 横方向破断強度の測定

1 範囲

この規格は、試験原理、機器要件、サンプルの準備、試験手順、結果の計算と評価、試験報告書などを含む、室温（10°C〜35°C）での3点または4点曲げ試験による超硬合金の抗折強度の測定方法を規定しています。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金、および他の炭化物（TaC など）を含む超硬合金にも適用されます。この規格は、コーティングされた超硬合金または表面強化処理（浸炭層圧縮強度試験など）を施した超硬合金には適用されません。

注：本規格における「圧縮強度」は、ユーザーの要求に応じて、抗折強度（TRS）と解釈されます。超硬合金の圧縮強度は通常、曲げ強度よりもはるかに高いため、ISO 3327:2009では主に抗折強度試験に焦点を当てています。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

ISO 3878:1983 超硬合金 - ビッカース硬さおよびロックウェル硬さ試験

ISO 4506:1979 超硬合金 - 試験片の作製及び試験条件

ISO 3611:2010 超硬合金 - 用語

ISO 7500-1:2015 金属材料 - 引張試験および圧縮試験のための力の標準 パート 1: 校正力の標準

3 用語と定義

この規格では、ISO 3611:2010 および次の用語と定義を採用しています。

ハードメタル：粉末冶金プロセスによって、主な硬質相として炭化タングステン（WC）を、結合相としてコバルト（Co）を使用して作られた複合材料。

横方向破壊強度 (TRS): 3点または4点曲げ試験でセメント炭化物試験片が耐える最大応力 (MPa で測定) は、曲げ破壊に対する材料の抵抗能力を反映します。

3点曲げ：2つの支持点で試験片に1点荷重を加える曲げ試験。

4点曲げ：2つの支持点と2つの荷重点の間で試験片に均一な荷重を加える曲げ試験。

4 テストの原則

抗折強度試験では、超硬合金試験片に3点または4点の曲げ荷重を試験片が破断するまで加え、最大破断荷重を記録し、試験片の形状に基づいて抗折強度（TRS）を算出します。計算式は試験の種類によって異なります。

3点曲げ：

$$TRS = \frac{3FL}{2bh^2}$$

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

4 点曲げ：

$$TRS = \frac{3FL}{4bh^2} \times \frac{l_1}{l}$$

で：

F は最大破断荷重（N）です。

L は支持スパン（mm）です。

l_1 は荷重点間の距離（mm）です（4 点曲げの場合のみ）。

b は試験片の幅（mm）です。

h は試料の厚さ（mm）です。

5 試験装置

5.1 万能試験機

荷重範囲：0～50 kN 、精度±0.5%。

荷重速度制御：0.1 ～ 1 mm/分、偏差 <±0.05 mm/分。

ISO 7500-1:2015 校正要件を満たしています。

5.2 フィクスチャ

3 点曲げ治具：支持スパン 14.5 mm（±0.05 mm）、支持点直径 2 mm（±0.02 mm）。

4 点曲げ治具：支持スパン 20 mm（±0.05 mm）、荷重点間隔 10 mm（±0.05 mm）、支持点直径 2 mm（±0.02 mm）。

器具の表面は滑らかで、角やエッジがありません。

5.3 測定ツール

ノギス：精度±0.02mm。

デジタルマイクロメーター：精度±0.001mm。

5.4 環境制御

温度：10℃～35℃、20±5℃を推奨。

湿度：30%～80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

標本の形状：直方体、寸法 20 × 6.5 × 5.25 mm（± 0.05 mm）、またはプロトコルに従って調整。

試験面は平らで、ひび割れ、酸化層、機械加工の欠陥などがない状態である必要があります。

表面粗さ Ra<0.2μm （研磨）。

応力集中を軽減するために、試験片のエッジは 0.1 × 45° の面取りが施されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 5 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 (>5%)、サンプル数を 10 に増やす必要があります。

6.3 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド (YG8、YT15 など)、テスト項目を記入する必要がありますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

6.4 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

万能試験機は、荷重偏差が±0.5%未満の標準力センサーを使用して校正されます。

固定具の精度を確認します。サポート ポイント間隔の偏差は ±0.05 mm 未満です。

7.2 試験条件

周囲温度: 10°C ~ 35°C、20±5°C を推奨。

相対湿度: 30%~80%、50±10% を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

試験片を 3 点または 4 点の曲げ治具に置き、試験片が水平であることを確認します。

荷重速度: 0.5 mm/分 (±0.05 mm/分)。

試験片が破断するまでゆっくりと荷重を加え、最大破断荷重 F_F を記録する。 F (北)。
ノギスまたはマイクロメータを使用して、試験片の幅 b と厚さ h を測定します。 h (精度±0.02mm)。

7.4 結果の計算

試験の種類に応じて横方向の破断強度を計算します。

3 点曲げ:

$$TRS = \frac{3FL}{2bh^2}$$

4 点曲げ:

$$TRS = \frac{3FL}{4bh^2} \times \frac{l_1}{l}$$

サンプルの平均値を、偏差 <±5% で取得します。

8 テスト結果の評価

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

8.1 横方向破断強度範囲

超硬合金の横方向の破断強度は通常 1500～3000MPa ですが、具体的な範囲はグレードと Co 含有量によって異なります。

YG6 (6%Co): 2000～2400MPa。

YG8 (8%Co): 1800～2200MPa。

YT15 (5%Co + TiC) : 1600～2000MPa。

8.2 逸脱評価

5 つのサンプルの平均値と平均値が $\pm 5\%$ 未満の場合、それ以外の場合は再テストが必要です。

TRS 値がグレードの技術要件を超える場合は、原因を分析する必要があります (サンプルの欠陥、不均一な荷重など)。

8.3 影響要因の分析

試料の品質: 表面粗さ $Ra > 0.2 \mu m$ 、またはエッジの欠けがあると、TRS が低下します (偏差 $> 10\%$)。

荷重速度: 速度が 1 mm/分超または 0.1 mm/分未満の場合は、破断荷重に影響します (偏差 $\pm 5\%$)。

固定具精度: サポート ポイント間隔の偏差が 0.05 mm を超える場合や凹凸がある場合は、応力集中が発生します (偏差 $> 5\%$)。

微細構造: WC 粒径が不均一 ($> \pm 0.2 \mu m$) または Co 相の分布が不均一な場合、TRS 変動 ($> \pm 6\%$) が発生する可能性があります。

9 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。

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ、Co 含有量。

試験条件: 機器モデル、固定具タイプ (3 点/4 点)、荷重速度 (0.5 mm/分)、周囲温度 ($10^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$)、湿度 (30% $\sim$ 80%)。

各試験片の FF、幅 b b b、厚さ h h、TRS 値と平均値、偏差。

評価結論: ブランドの技術要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 代表的な超硬合金の横方向破壊強度の参考値

ブランド	Co 含有量 (重量%)	横方向破断強度 (MPa)	粒径 (μm)	代表的な用途
YG6	6	2000-2400	0.8～1.2	鉋山用ドリルビット
YG8	8	1800-2200	0.8～1.2	切削工具
YT15	5	1600-2000	0.6～1.0	仕上げツール

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

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: 10°C~35°C、20±5°Cを推奨。

湿度: 30%~80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

付録 C（参考付録）3点曲げと4点曲げの比較

パラメータ	三点曲げ	4点曲げ
サポートスパン L L L	14.5 mm (±0.05 mm)	20 mm (±0.05 mm)
荷重点間隔 l l l l l	-	10 mm (±0.05 mm)
応力分布	積載点に焦点を当てる	荷重範囲が均一
適用範囲	標準テスト	複雑な応力解析

要約する

ISO 3327:2009「超硬合金の圧縮強度試験方法」（実際には抗折強度試験）は、超硬合金の抗折強度試験の標準化された手順を提供し、標準化された試験片作製、試験手順、および結果評価を通じて試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の導入は、超硬合金の品質管理と性能評価に役立ち、切削工具、鉋山用ドリル、金型などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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 28080:2021

超硬合金の摩耗試験方法 超硬合金—超硬合金の摩耗試験

1 範囲

この規格は、超硬合金の摩耗特性を決定するための一般的な試験方法を規定しています。この試験は、摩耗損傷をシミュレートする必要がある実験室環境に適しています。試験手順には、異なる条件下での試験情報が含まれています。a

) 異なる剛性の対向ホイール（スチールホイールやゴムホイールなど）の使用、b) 湿式試験と乾式試験、c) 異なる粒子サイズの研磨剤、d) 異なる化学的環境。この規格は、炭化タングステン（WC）を主硬質相とし、コバルト（Co）を結合相とする超硬合金、および他の炭化物（TaC など）を添加した超硬合金にも適用されます。この規格は、コーティングされた超硬合金または表面強化処理（浸炭層摩耗試験など）後の超硬合金には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

ISO 3878:1983 超硬合金 - ビッカース硬さ試験

ISO 3611:2010 超硬合金 - 用語

ASTM G65-04(2010) 標準試験方法 - 乾燥砂/ゴム車輪摩耗試験

ASTM B611-13 硬質材料の高応力摩耗抵抗の標準試験方法

ASTM G105-02(2013) 標準試験方法 - 湿潤砂/ゴム車輪摩耗試験

3 用語と定義

この規格では、ISO 3611:2010 および次の用語と定義を採用しています。

ハードメタル: 粉末冶金プロセスによって、主な硬質相として炭化タングステン（WC）を、結合相としてコバルト（Co）を使用して作られた複合材料。

摩耗: 硬い粒子または粗い表面の相対的な滑りによって引き起こされる材料の損失。

摩耗率: 単位時間または単位滑り距離あたりに失われる材料の体積または質量。mm³/m または mg/m で表されます。

カウンターフェイス ホイール: 試験片に接触して相対運動を生み出すホイール。鋼鉄製またはゴム製。

研磨剤: 摩耗をシミュレートするために使用される石英砂や酸化アルミニウムなどの硬い粒子。

4 テストの原則

摩耗試験は、規定の条件下で炭化物試験片を対向輪に接触させ、一定の荷重と摺動距離を与え、研磨剤（乾いた砂や湿った砂など）を用いて摩耗環境をシミュレートし、試験片の質量減少または体積減少を測定して摩耗速度を算出する試験方法です。この試験方法は、

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

ASTM G65（乾いた砂 / ゴム輪）、ASTM B611（高応力摩耗）、および ASTM G105（湿った砂 / ゴム輪）規格を参照・補足しており、様々な摩耗条件に適用可能です。

5 試験装置

5.1 摩耗試験機

荷重調整可能な摩耗試験装置、荷重範囲 5 ～ 130 N、精度 ± 0.5 N。

スライド速度: 0.1～1 m/s、偏差 $<\pm 0.05$ m/s。

スライド距離: 最大 1000m まで設定可能、精度 ± 1 m。

5.2 反対の車輪

スチールホイール: 硬度 HRC 55～60、直径 228 mm (± 1 mm)、幅 12.7 mm (± 0.1 mm)。

ゴムホイール: 硬度ショア A 60～65、直径 228mm (± 1 mm)、幅 12.7mm (± 0.1 mm)。

5.3 研磨材供給システム

研磨剤: 石英砂（粒径 200～ 300 μ m）または酸化アルミニウム（粒径 100～ 200 μ m）、純度 $>98\%$ 。

供給速度: 250～300 g/分、偏差 $<\pm 5$ g/分（乾燥）。

湿潤試験: 水ベースの懸濁液、研磨剤濃度 10～20 重量%。

5.4 測定ツール

精密天秤: 精度 ± 0.1 mg。

ノギス: 精度 ± 0.02 mm。

表面プロファイラー: 摩耗深さを ± 0.001 mm の精度で測定します。

5.5 環境制御

温度: 10°C～35°C、20 ± 5 °Cを推奨。

湿度: 30%～80%、50 $\pm 10\%$ を推奨。

制御された化学環境（酸性またはアルカリ性溶液など）。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

標本の形状: 直方体、寸法 76 × 25.4 × 6.35 mm (± 0.1 mm)、またはプロトコルに従って調整。

試験面は平らで、ひび割れ、酸化層、機械加工の欠陥などがない状態である必要があります。

表面粗さ Ra $<0.2\mu$ m（研磨）。

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

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 10\%$)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 サンプルマーキング

サンプルにはバッチ番号、ブランド (YG8、YT15 など)、テスト項目を記入する必要がありますが、マーキングはテスト領域に影響を与えてはなりません。

6.4 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

試験後、超音波洗浄機 (40 kHz、5 分) を使用して残留研磨剤を除去しました。

6.5 初期測定

サンプルの初期質量 (精度 ± 0.1 mg) と厚さ (精度 ± 0.02 mm) を測定します。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

テスターは、偏差が ± 0.5 N 未満の標準負荷を使用して校正されます。

反対側の車輪の状態をチェックして、表面に摩耗や汚れがないことを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。

相対湿度: 30%~80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

化学的環境: プロトコルに従って選択します (例: 脱イオン水、1% HCl)。

7.3 テスト操作

試験片を試験機に取り付け、反対側のホイールに接触させて荷重を加えます (45 N を推奨)。

テスト条件を選択してください:

乾式: スチールホイールを使用し、石英砂を 250g/分供給し、滑走距離は 4300m。

湿式: ゴム車輪を使用し、湿った砂懸濁液を供給し、滑走距離は 4300 メートル。

テスターを起動し、スライド距離と試験片の摩耗を記録します。

各サンプルは 1 回テストされ、結果の安定性を確保するために 3 ~ 5 回繰り返されました。

7.4 成果測定

試験後、試験片は洗浄され、乾燥され、最終質量が測定されました (精度 ± 0.1 mg)。

摩耗深さは表面形状計 (精度 ± 0.001 mm) を使用して測定されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

質量損失を計算します: $\Delta m = m_0 - m_1$ (m_0 は初期質量、 m_1 は最終質量)。

7.5 摩耗率の計算

摩耗率:

$$W = \frac{\Delta m}{L}$$

で:

W は摩耗率 (mg/m) です。

Δm は質量損失 (mg) です。

L はスライド距離 (メートル) です。

または、体積摩耗率を計算します (密度を組み合わせる必要があります)。

$$V = \frac{\Delta m}{\rho \cdot L}$$

で:

V は体積摩耗率 (mm³/m) です。

ρ は g/cm³ 単位の物質の密度です。

8 テスト結果の評価

8.1 摩耗率範囲

炭化物の摩耗率は試験条件とグレードによって異なります。

YG6 (6%Co): 乾燥時 0.5~1.0mg/m、湿潤時 0.3~0.7mg/m。

YG8 (8%Co): 乾燥型 0.7~1.2mg/m³、湿潤型 0.5~0.9mg/m³。

YT15 (5%Co + TiC) : 乾燥 0.4~0.8mg/m、湿潤 0.2~0.6mg/m。

8.2 逸脱評価

3 ~ 5 個のサンプルの結果が $\pm 10\%$ 未満の場合、それ以外の場合は再テストが必要です。
摩耗率が予想範囲を超える場合は、その原因 (研磨粒子サイズの不均一性や試験片の表面欠陥など) を分析する必要があります。

8.3 影響要因の分析

対向車輪の剛性: スチール車輪の摩耗率はゴム車輪よりも高くなります (偏差 > 20%)。

研磨粒子サイズ: 粒子サイズが 300 μm を超えると摩耗率が上昇します (偏差 > 15%)。

化学的環境: 酸性環境 (1% HCl など) では腐食摩耗が加速されます (偏差 > 30%)。

荷重: 130 N を超える荷重では試験片に亀裂が生じ、結果に影響を及ぼす可能性があります。

9 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。

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

サンプル情報: ブランド、バッチ番号、サイズ、Co 含有量。
試験条件: 機器モデル、対向車輪タイプ (スチール/ゴム)、荷重 (N)、滑り距離 (m)、研磨剤の種類と粒子サイズ、環境 (湿潤/乾燥/化学薬品)。
テスト結果: 初期質量、最終質量、質量損失、摩耗率、摩耗深さおよび平均値、偏差。
評価結論: 期待範囲を満たしているかどうか。
テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 典型的な炭化物摩耗率の基準値

ブランド	Co 含有量 (重量%)	乾燥摩耗率 (mg/m)	湿潤摩耗率 (mg/m)	代表的な用途
YG6	6	0.5~1.0	0.3~0.7	鉱山用ドリルビット
YG8	8	0.7~1.2	0.5~0.9	切削工具
YT15	5	0.4~0.8	0.2~0.6	仕上げツール

付録 B (参考付録) テスト環境要件

温度: 10°C~35°C、20±5°Cを推奨。
湿度: 30%~80%、50±10%を推奨。
振動なし、腐食性ガス環境なし (特定の化学環境をテストする場合を除く)。
テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

付録 C (参考付録) 摩耗試験条件の例

テストの種類	反対側の車輪	荷重(N)	滑走距離 (m)	研磨剤	環境
ドライ	スチールホイール	45	4300	石英砂 250 μm	空気
濡れた	ゴム製の車輪	45	4300	湿った砂 200 μm	水
化学薬品	スチールホイール	45	2000	石英砂 250 μm	1% HCl

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録：

ASTM B611-13 標準試験方法
— 硬質材料に対する高い耐磨耗性

1 範囲

1.1 この標準試験方法は、硬質材料（主に炭化物）の高応力摩耗耐性を試験することを目的としていますが、硬度が 55HRC を超えるセラミック、サーメット、金属系硬質コーティングにも適用できます。この方法は、ゴム製ホイール（G65、G105、G75 など）を用いた低応力摩耗試験とは対照的に、鋼製ホイールを用いて研磨材を試験片に強制的に接触させることで、研磨材粒子が破砕される高応力摩耗条件をシミュレートします。

1.2 この試験方法では、研磨媒体として酸化アルミニウム粒子を含む水性スラリーを使用し、スラリーに浸漬された回転ホイールと線接触する回転スチールホイールによって研磨剤を平らな試験片表面に押し付けます。

1.3 単位がインチポンド形式で示されている場合は、SI 単位が参照され、およその等価単位が括弧内に示されます。

1.4 この規格は、すべての安全問題を網羅するものではありません。個々の状況に応じて適切な安全衛生対策を確立し、規制上の制限事項の適用可能性を評価するのは、試験実施者の責任です。

1.5 この国際規格は、世界貿易機関の貿易技術的障害委員会の国際規格、ガイドラインおよび勧告の作成に関する原則に従って作成されています。

2 意義と用途

2.1 地殻から鉱物を採掘するには、通常、岩石を破砕するための金属製の工具が必要です。これらの工具は、炭化物などの硬質材料で覆われたり、被覆されたり、コーティングされていることがよくあります。岩石を掘削、破砕、移動させると、工具表面が岩石に接触する部分に、岩石を破砕するのに十分な圧力がかかる高応力摩耗が発生します。この試験方法は、これらの条件をシミュレートし、このような用途向けの新材料を選別するために使用されます。また、スラリーポンプ、破砕装置、リサイクルカッター、解体装置などの高応力摩耗用途における品質管理ツールとしても使用できます。

2.2 ほとんどの摩耗試験では、低応力摩耗が用いられます。この場合、試験中、研磨材は比較的無傷のままです。高応力摩耗は、研磨材と工具 / 部品間の力が研磨材を押しつぶすほど大きくなるような使用シナリオをシミュレートします。

3 用語と定義

鋼製ホイールが試験片に強制的に接触することで、十分な力で研磨材が破損するタイプの摩耗。

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

低応力摩耗: テスト中に研磨材が比較的無傷のまま残る摩耗の種類。通常はゴム製の車輪によって発生します。

耐摩耗性: 摩耗量または質量損失として表される、材料の摩耗に耐える能力。

4 試験装置

4.1 摩耗試験装置

200 ± 10 rpm で回転する回転スチールホイール (直径 228.6 mm、幅 12.7 mm) で構成されています。

スチールホイールの材質は、硬度が 60 HRC 以上の硬化鋼です。

4.2 研磨剤

粒径 200〜280 メッシュのアルミナ (Al_2O_3) 粒子を使用して、体積濃度 60% の水性スラリーを調製した。

4.3 試験片固定具

鋼製車輪と線接触し、荷重力は 250±5N です。

4.4 環境制御

温度: 15°C〜35°C、23±2°Cを推奨。

湿度: 30% ~ 70%、50±10% を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

5. サンプルの要件

5.1 材料

硬度が 55 HRC を超える炭化物、セラミック、サーメット、または金属ベースの硬質コーティング。

5.2 寸法

試料サイズ: 50.8mm×25.4mm×6.35mm (長さ×幅×高さ)、許容差±0.1mm。

表面は滑らかで、粗さは $Ra \leq 0.2\mu\text{m}$ です。

5.3 表面処理

研削には 600〜1200 番のダイヤモンドサンドペーパーを使用し、研磨には 0.25 μm の酸化アルミニウム研磨液を使用してください。

5.4 サンプル数

各材料のサンプル 3 つが統計分析に使用されました。

6 テスト手順

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 機器の準備

スチールホイールの表面に明らかな摩耗やひび割れがないか確認し、必要に応じて交換してください。

試験片グリップを調整して、荷重力が $250 \pm 5 \text{ N}$ になるようにします。

6.2 テスト操作

試験片はスチールホイールと線接触した状態で固定具に固定されます。

試験装置に 200mL のアルミナスラリーを加える。

スチールホイールを $200 \pm 10 \text{ rpm}$ で 600 回転（約 3 分）回転させます。

試験後、サンプルを取り出し、無水エタノールで洗浄して乾燥させます。

6.3 測定

サンプルの質量損失は精密天秤（精度 $\pm 0.001 \text{ g}$ ）を使用して測定されました。

初期質量 m_1 と最終質量 m_2 を記録し、質量損失 $\Delta m = m_1 - m_2$ を計算します。

6.4 再現性

各サンプルに対してテストを 2 回繰り返し、平均値を取得します。

7 結果の計算

7.1 摩耗率

摩耗率は質量損失（g）または体積損失（ mm^3 ）で表されます。

体積損失は、質量損失を材料密度で割ることによって計算できます。

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

ここで ρ は物質の密度（ g/cm^3 ）である。

7.2 相対的な耐摩耗性

試験片の質量損失を基準材料（標準セメント炭化物など）の質量損失と比較し、相対的な耐摩耗性を計算します。

7.3 結果評価

3 つのサンプルの平均質量損失偏差が $\pm 5\%$ 未満であることを確認します。そうでない場合は再テストが必要です。

8 つの影響要因

8.1 研磨粒子サイズ: 粒子サイズが 200 ～ 280 メッシュから逸脱すると、結果に 5% ～ 10% の逸脱が生じる可能性があります。

8.2 荷重力: $250 \pm 5 \text{ N}$ からの力の偏差は摩耗率に 3% ～ 5% の影響を与える可能性があります。

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

ります。

8.3 スチールホイールの状態：ホイール表面の摩耗によりテスト誤差が 2% ～ 4% 増加する可能性があります。

9 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。

標本情報：材料の種類、硬度、サイズ。

試験条件：ホイール速度、荷重力、研磨剤の種類、周囲温度 (15°C ～ 35°C)、湿度 (30% ～ 70%)。

テスト結果：初期質量、最終質量、質量損失、平均および偏差。

相対的な耐摩耗性（該当する場合）。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）典型的な材料摩耗基準値

素材の種類	硬度（HRC）	質量損失（g）	代表的な用途
超硬合金 (YG6)	88	0.02～0.05	鉱山用ドリルビット
陶器	75	0.05～0.10	耐摩耗コーティング
金属ベースのクラッディング	60	0.10～0.15	粉碎装置

付録 B（参考付録）環境要件

温度：15°C～35°C、23±2°Cを推奨。

湿度：30%～70%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度：偏差 <0.02 mm/m。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

ASTM E23-18

ノッチ付き試験片の衝撃試験方法

金属材料のノッチ付き棒衝撃試験の標準試験方法

1 範囲

この規格は、金属材料について、室温（10℃～35℃）または低温（-196℃～0℃）でのシャルピー衝撃試験またはアイゾット衝撃試験によってノッチ付き試験片の衝撃吸収エネルギーを決定する方法を規定しており、試験原理、機器要件、試験片の準備、試験手順、結果の計算と評価、試験レポートなどが含まれます。この規格は、さまざまなノッチタイプの金属材料（鋼、超硬合金、チタン合金など）に適用できますが、非金属材料や 35℃ を超える温度の環境には適用できません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての改訂版を含む）が本規格に適用されます。

ASTM E4-21 力、圧縮、および変形試験機の校正に関する標準規格

ASTM E23-16c ノッチ付き試験片の衝撃試験の標準試験方法（履歴バージョン参照）

ISO 148-1:2016 金属材料 - シャルピー振り子衝撃試験 パート 1: 試験方法

ASTM E2298-19 標準試験方法 - 計装衝撃試験

3 用語と定義

この規格では、ASTM E23-18 および次の用語と定義を採用しています。

衝撃エネルギー: 衝撃試験においてノッチ付き試験片が吸収するエネルギーはジュール (J) 単位で測定され、材料の衝撃靱性を反映します。

シャルピー試験: 片持ち梁試験片を使用して振り子衝撃によるエネルギー吸収を測定する試験。

アイゾット試験: 単支持梁試験片を使用して振り子衝撃によるエネルギー吸収を測定する試験。

ノッチ タイプ: 試験片にあらかじめ作成されたノッチの形状には、V ノッチ（深さ 2 mm、角度 45°、ルート半径 0.25 mm）と U ノッチ（深さ 5 mm、ルート半径 1 mm）があります。

4 テストの原則

衝撃試験では、所定の高さから振り子を解放し、あらかじめノッチを付けた金属試験片に衝突させます。振り子が試験片を破壊した後に残存する運動エネルギー（またはエネルギー損失）を測定し、試験片に吸収された衝撃エネルギーを計算します。このエネルギーは、高速荷重下における材料の靱性と破壊挙動を反映します。この試験はシャルピー試験またはアイゾット試験に適用でき、具体的な計算式は以下のとおりです。

$$E = mgh - mgh'$$

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

E は衝撃吸収エネルギー (J) です。
m は振り子の質量 (kg) です。
g は重力加速度で、約 9.81 m/s^2 です。
h は初期の高さ (メートル) です。
h' は、破碎後の残存高さ (メートル) です (通常は振り子の角度によって間接的に測定されます)。

5 試験装置

5.1 衝撃試験機

エネルギー範囲が 150 J ~ 750 J、精度が $\pm 1 \text{ J}$ 、ASTME4-21 に準拠して校正された振り子衝撃試験装置。
振り子の解放高さ: 調整可能、初期角度 150° 。

5.2 試験片固定具

シャルピー試験治具: 支持スパン 40 mm ($\pm 0.05 \text{ mm}$)、支持面の平坦度 $< 0.01 \text{ mm}$ 。
アイゾットクランプ: 単一支持、高さ 28 mm ($\pm 0.05 \text{ mm}$)、均一なクランプ力。

5.3 測定ツール

ノギス: 精度 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 、サンプルサイズの測定に使用します。
角度測定装置: 精度 $\pm 0.1^\circ$ 、振り子の位置を校正するために使用されます。

5.4 極低温装置 (オプション)

液体窒素またはドライアイス冷却ボックス、温度範囲 $-196^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ 、精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

5.5 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ (室温)、または $-196^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ (低温)、 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ を推奨。
湿度: 30%~80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。
振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 標本の種類

シャルピー試験片: サイズ $55 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ ($\pm 0.1 \text{ mm}$)、中央にノッチあり。
アイゾット試験片: 寸法: $75 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ ($\pm 0.1 \text{ mm}$)、ノッチは一方の端から 28 mm の位置にあります。

6.2 ギャップの準備

V ノッチ: 深さ 2 mm ($\pm 0.025 \text{ mm}$)、角度 45° ($\pm 0.5^\circ$)、ルート半径 0.25 mm ($\pm 0.025 \text{ mm}$)。
U 字型ノッチ: 深さ 5mm ($\pm 0.025 \text{ mm}$)、ルート半径 1mm ($\pm 0.025 \text{ mm}$)。
ノッチ表面はワイヤーカットまたはフライス加工により滑らかでバリがなくなっています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 サンプルの要件

試験片の表面は滑らかで、ひび割れ、酸化層、加工欠陥はありません。

表面粗さ $Ra < 0.2\mu m$ （研磨）。

応力集中を軽減するために、試験片のエッジは $0.1 \times 45^\circ$ の面取りが施されています。

6.4 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 10 J$)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.5 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

6.6 サンプルマーキング

試験片にはバッチ番号、グレード（YG8、1045 鋼など）、試験項目を記入する必要がありますが、記入は試験領域に影響を与えてはなりません。

6.7 低温処理（オプション）

サンプルを冷却ボックスに入れて、均一に冷却されるように指定温度を 15 ～ 30 分間維持します。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

衝撃試験装置は、エネルギー偏差が $\pm 1 J$ 未満の標準振り子を使用して校正されます。固定具とノッチの寸法を確認してください。偏差は $\pm 0.025 mm$ 未満です。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^\circ C \sim 35^\circ C$ (室温)、または $-196^\circ C \sim 0^\circ C$ (低温)、 $20 \pm 5^\circ C$ を推奨します。

相対湿度: 30%～80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

ノッチが振り子の衝撃の方向を向くようにして、試験片を固定具(シャルピーまたはイジー構成)に取り付けます。

振り子を放し、衝撃エネルギー $E E$ を記録する $E (J)$ 。

各サンプルは 1 回テストされ、結果の安定性を確保するために 3 ～ 5 回繰り返されました。

低温試験を実施する場合、供試体は冷却ボックスから取り出して直ちに (5 秒未満) 試験を実施する必要があります。

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

7.4 破面観察（オプション）

光学顕微鏡（倍率 50 倍）を使用して破面を観察し、破面の種類（脆性または延性）を記録しました。

8 テスト結果の評価

8.1 衝撃吸収エネルギー範囲

金属材料の衝撃吸収エネルギー範囲：5～200 J、具体的な値は材料と温度によって異なります。

超硬合金（YG8、室温）：10～20 J。

硬化鋼（1045、室温）：50～80 J。

アルミニウム合金（6061-T6、室温）：20～40 J。

低温（-40℃）では、通常、エネルギーは 20% ～ 50% 減少します。

8.2 逸脱評価

3～5 個の検体の平均値が ± 10 J 未満の場合、それ以外の場合は再検査が必要です。

エネルギー値が材料の技術要件を超える場合は、その理由（ノッチ品質、サンプルの欠陥など）を分析する必要があります。

8.3 影響要因の分析

ノッチ品質：ノッチルート半径誤差 > 0.025 mm または表面粗さ > 0.2 μ m の場合、エネルギーが減少します（偏差 $> 15\%$ ）。

温度：温度が 20℃ 以上低下すると、エネルギーが大幅に削減されます（偏差 $> 30\%$ ）。

荷重速度：振り子の速度の偏差が 0.05 m/s を超えると、結果に影響します（偏差 $\pm 5\%$ ）。

微細構造：粒径が不均一（ $> \pm 0.2$ μ m）または多孔性が高いと、靱性が低下します（偏差 $> 10\%$ ）。

9 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。

サンプル情報：材料の種類、ブランド、バッチ番号、サイズ、ノッチタイプ（V/U）。

試験条件：機器モデル、固定具タイプ（シャルピー/アイゾット）、試験温度（℃）、周囲湿度（30% ～ 80%）。

試験結果：各サンプルの衝撃吸収エネルギー E E (J)、平均値と偏差、破壊の種類（観察された場合）。

評価結論：材料の技術的要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録） 代表的な金属材料の衝撃エネルギーの基準値

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

素材の種類	ブランド/カテゴリー	衝撃エネルギー（J、室温）	衝撃エネルギー（J、-40℃）	代表的な用途
超硬合金	YG8	10～20	5-10	切削工具
硬化鋼	1045（HRC30）	50～80	20～40 歳	機械部品
アルミニウム合金	6061-T6	20～40 歳	10～20	航空宇宙構造

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: 10℃ ～ 35℃ (室温)、または -196℃ ～ 0℃ (低温)、20±5℃ を推奨。

湿度: 30%～80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

付録 C（参考付録）ギャップサイズとエネルギーの関係

ギャップタイプ	深さ(mm)	角度 (°)	ルート半径(mm)	エネルギー影響 (%)
V 型	2	45	0.25	ベンチマーク
U 字型	5	0	1.0	10%～20%増加

要約する

ASTM E23-18「ノッチ付き試験片衝撃試験方法」は、金属材料の衝撃靱性試験のための標準化された手順を提供し、標準化された試験片調製、試験手順、および結果評価を通じて、試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の実施は、金属材料(超硬合金や鋼など)の衝撃性能の評価に役立ち、機械製造、建設、エネルギーなどの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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:

ASTM G65-16

乾燥砂/ゴム車輪摩耗試験方法 摩耗測定のための標準試験方法 乾燥砂/ゴムホイール装置

1 範囲

試験による金属材料の耐スクラッチ摩耗性を測定するための実験室方法を規定しており、試験原理、設備要件、サンプル準備、試験手順、結果の計算と評価、試験報告書などが含まれます。この規格は、金属材料（超硬合金、鋼、合金などを含む）の耐摩耗性試験に適用され、特定の条件下での再現性のある材料の耐スクラッチ摩耗性ランキングデータを生成することを目的としています。この規格は、非金属材料や、実際の使用条件（腐食環境や衝撃条件など）を完全にシミュレートする試みには適用されません。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての改訂版を含む）が本規格に適用されます。

ASTM E4-21 力、圧縮、および変形試験機の校正に関する標準規格

ASTM G105-02(2013) 標準試験方法 - 湿潤砂/ゴム車輪摩耗試験

ASTM B611-13 超硬合金の高応力摩耗抵抗の標準試験方法

3 用語と定義

この規格では、ASTM G65-16 および次の用語と定義を採用しています。

引掻き摩耗: 一定の圧力下で材料表面上の硬い粒子が相対的に滑ることによって生じる材料の損失。

体積損失: 摩耗試験後に試験片から失われた材料の体積（立方ミリメートル（ mm^3 ）単位）。

摩耗率: 単位の滑り距離あたりに失われる材料の体積。 mm^3/m で表されます。

カウンターフェイス ホイール: 試験片に接触して相対運動を生み出すゴム製のホイール。硬度はショア A 60～65。

研磨剤: 摩耗をシミュレートするために使用される硬い粒子。この規格では乾燥した砂（石英砂など）を指します。

4 テストの原則

乾式砂 / ゴム輪摩耗試験は、乾式砂の研磨環境下において、金属試験片を回転するゴム輪に接触させ、一定の荷重と摺動距離を与え、試験片のスクラッチ摩耗による質量または体積の減少を測定することにより、材料の耐摩耗性を評価します。試験条件は標準化されており、結果の再現性を確保しています。試験結果は体積減少量（ mm^3 ）で報告されます。耐摩耗性が高い材料ほど、体積減少量は少なくなります。

5 試験装置

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

5.1 摩擦試験機

調整可能な荷重を備えた乾燥砂/ゴムホイール装置、荷重範囲 5~130 N、精度 ± 0.5 N。

スライド速度: 0.1~1 m/s、偏差 $< \pm 0.05$ m/s。

スライド距離: 最大 4300m まで設定可能、精度 ± 1 m。

5.2 ゴム車輪

硬度: ショア A 60-65。

直径: 228 mm (± 1 mm)、幅 12.7 mm (± 0.1 mm)。

表面には欠陥がなく、一貫性を保つために定期的に交換する必要があります。

5.3 研磨材供給システム

研磨剤: 乾燥石英砂、粒径 200~ 300 μ m 、純度 $> 98\%$ 。

供給速度: 250~300 g/分、偏差 $< \pm 5$ g/分。

砂の流れは標準形状のノズル (幅 1 mm) を通じて均等に分散されます。

5.4 測定ツール

精密天秤: 精度 ± 0.1 mg。

ノギス: 精度 ± 0.02 mm。

表面プロファイラー: 摩耗深さを ± 0.001 mm の精度で測定します。

5.5 環境制御

温度: 10°C~35°C、20 ± 5 °Cを推奨。

湿度: 30%~80%、50 $\pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

標本の形状: 直方体、寸法 76 × 25.4 × 6.35 mm (± 0.1 mm)、またはプロトコルに従って調整。

試験面は平らで、ひび割れ、酸化層、機械加工の欠陥などがない状態である必要があります。

表面粗さ Ra $< 0.2\mu$ m (研磨)。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 10\%$)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 サンプルマーキング

試験片にはバッチ番号、グレード（YG8、AISI 1020 鋼など）、試験項目を記入しますが、記入は試験領域に影響を与えません。

6.4 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

試験後、超音波洗浄機（40 kHz、5 分）を使用して残留研磨剤を除去しました。

6.5 初期測定

サンプルの初期質量（精度 ± 0.1 mg）と厚さ（精度 ± 0.02 mm）を測定します。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

テスターは、偏差が ± 0.5 N 未満の標準負荷を使用して校正されます。

ゴム製ホイールの状態をチェックして、表面が摩耗したり汚れたりしていないことを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ を推奨。

相対湿度: 30%~80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

テスト環境: 乾燥、液体媒体なし。

7.3 テスト操作

この規格では、材料の耐摩耗性に応じて選択された 5 つの試験手順 (A、B、C、D、E) が規定されています。

手順 A: 高摩耗テスト、荷重 130 N、ホイール速度 200 rpm、滑り距離 4300 m、中〜高耐摩耗性材料に適しています。

プログラム B: 短時間バリエーション、荷重 130 N、ホイール速度 200 rpm、スライド距離 718 m、低〜中程度の耐摩耗性を持つ材料に適しています(体積損失が 100 mm^3 を超える場合に使用)。

プログラム C: 短時間バリエーション、荷重 130 N、ホイール速度 200 rpm、スライド距離 71.8 m、薄いコーティングに適しています。

プログラム D: 軽量タイプ、荷重 45 N、ホイール速度 200 rpm、スライド距離 4300 m、耐摩耗性の低い材料に適しています。

プログラム E: 短時間バリエーション、荷重 45 N、ホイール速度 200 rpm、スライド距離 718 m、低〜中程度の耐摩耗性を持つ材料に適しています。

試験片を試験機に取り付け、ゴム製のホイールに接触させて荷重を加えます。

テスターを起動し、スライド距離と試験片の摩耗を記録します。

各サンプルは 1 回テストされ、結果の安定性を確保するために 3 ~ 5 回繰り返されました。

7.4 成果測定

試験後、試験片は洗浄され、乾燥され、最終質量が測定されました (精度 ± 0.1 mg)。

摩耗深さは表面形状計 (精度 ± 0.001 mm) を使用して測定されました。

質量損失を計算します: $\Delta m = m_0 - m_1$ (m_0 は初期質量、 m_1 は最終質量)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.5 体積損失の計算

ボリューム損失:

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

で:

V は mm³ 単位での体積損失です。

Δm 質量損失 (mg) です。

ρ は g/cm³単位の物質の密度です。

摩耗率:

$$W = \frac{V}{L}$$

で:

W は摩耗率 (mm³/m) です。

L はスライド距離 (メートル) です。

8 テスト結果の評価

8.1 体積損失範囲

金属材料の体積損失の範囲は、手順と材料によって異なります。

超硬合金 (YG8、手順 A): 10~20 mm³ 。

軟鋼 (AISI 1020、手順 A): 50~100 mm³ 。

耐摩耗性に優れた材料 (手順 B): 5~15 mm³ 。

8.2 逸脱評価

3 ~ 5 個のサンプルの結果が $\pm 10\%$ 未満の場合、それ以外の場合は再テストが必要です。
体積減少が予想範囲を超える場合は、その原因 (研磨粒子サイズの不均一性や試験片の表面欠陥など) を分析する必要があります。

8.3 影響要因の分析

研磨粒子サイズ: 粒子サイズが 300 μm を超えると、体積損失が増加します (偏差 > 15%)。
荷重: 130 N を超える荷重では試験片に亀裂が生じ、結果に影響を及ぼす可能性があります。

ゴムホイールの硬度: 硬度 > ショア A 65 の場合、摩耗が増加します (偏差 > 10%)。

微細構造: 粒径が不均一 (> $\pm 0.2 \mu\text{m}$) または多孔性が高いと、体積損失が増加します (偏差 > 10%)。

9 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。

サンプル情報: 材料の種類、ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件: 装置モデル、手順タイプ (A/B/C/D/E)、荷重 (N)、摺動距離 (m)、研磨剤の種類および粒子サイズ、周囲温度 (10°C~35°C)、湿度 (30%~80%)。

試験結果: 初期質量、最終質量、質量損失、体積損失(mm³)、摩耗率(mm³/m)、摩耗深さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

および平均値、偏差。

評価結論：期待範囲を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録）代表的な金属材料の体積損失の基準値

素材の種類	ブランド/カテゴリー	手順 A 体積損失 (mm ³)	手順 B 体積損失 (mm ³)	代表的な用途
超硬合金	YG8	10~20	5-10	切削工具
軟鋼	AISI 1020	50~100	20~40 歳	構造部品
耐摩耗性に優れたコーティング	WC-10Co-4Cr	5-15	2-8	採掘設備

付録 B（参考付録）テスト環境要件

温度: 10°C~35°C、20±5°Cを推奨。

湿度: 30%~80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

付録 C（参考付録）試験手順の比較

プログラム	荷重(N)	滑走距離 (m)	適用範囲
あ	130	4300	中～高耐摩耗性材料
B	130	718	中・低耐摩耗性材料
C	130	71.8	薄いコーティング
D	45	4300	耐摩耗性が低い材料
E	45	718	中・低耐摩耗性材料

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:

EN ISO 6507-1:2018

ビッカース硬度試験

金属材料

— ビッカース硬さ試験 — パート 1: 試験方法

1 範囲

この規格は、室温（10℃～35℃）におけるビッカース硬さ試験による金属材料の硬さ測定方法を規定するものであり、試験原理、試験設備要件、試験片の準備、試験手順、結果の計算と評価、試験報告書等を含む。本規格は、ビッカース硬さ範囲 HV 1～HV 3000 の試験に適用され、異なる荷重（0.098 N～2942 N）をカバーしている。本規格は、微小試験片または薄肉試験片（厚さ<0.1 mm）やコーティングされた材料の硬さ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、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

EN ISO 6507-2:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正

EN ISO 6507-3:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 3: 校正標準

EN ISO 376:2011 金属材料 - 校正力標準

EN ISO 18265:2013 金属材料 - 硬度と強度の変換

3 用語と定義

この規格では、EN ISO 6507-1:2018 および次の用語と定義を採用しています。

ビッカース硬度 (HV): ビッカース圧子の侵入に抵抗する金属材料の能力。圧痕の対角線の長さで計算されたビッカース硬度値 (N/mm² (または MPa)) として表されます。

ビッカース圧子: 頂点角が 136° の四角いダイヤモンドピラミッド圧子。

くぼみの対角線: ビッカース圧子をサンプル表面に押し付けたときに形成される正方形のくぼみの 2 つの対角線の長さ (mm)。

試験荷重 (F): ビッカース圧子に加えられる力(ニュートン単位、0.098 N ～ 2942 N)。

保持時間: インデンターが荷重を加えた後、荷重が維持される時間 (秒)。

4 テストの原則

ビッカース硬度試験は、標準ビッカースダイヤモンド圧子（頂角 136°）を金属サンプルの表面に所定の荷重で押し付け、一定時間保持した後、荷重を抜き取り、圧痕の 2 つの対角線の長さ (d1、d2) を測定し、平均対角線長さ (d) を算出して、ビッカース硬度値 (HV) を算出します。計算式は以下のとおりです。

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2} \quad \text{で:}$$

F はテスト荷重 (N) です。

d は圧痕二条対角線の平均长度, 单位为 mm, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$;

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

硬度の単位は N/mm^2 ($1 \text{ kgf/mm}^2 \approx 9.807 \text{ N/mm}^2$)。

5 試験装置

5.1 ピッカース硬度計

EN ISO 6507-2:2018 検証および校正要件に準拠しています。

荷重範囲: $0.098 \text{ N} \sim 2942 \text{ N}$ (HV 0.01 $\sim$ HV 30)、精度 $\pm 0.5\%$ 。

保持時間制御: 5 秒 $\sim$ 60 秒、偏差 $< \pm 0.5$ 秒。

5.2 圧力ヘッド

標準ピッカースダイヤモンド圧子、頂点角 $136^\circ (\pm 0.5^\circ)$ 。

インデンターの表面には欠陥がなく、エッジは明瞭です(顕微鏡検査、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$)。

5.3 測定装置

光学顕微鏡: 倍率 50 $\sim$ 1000 倍、400 倍を推奨、解像度 $< 0.5 \mu\text{m}$ 。

測定精度 $\pm 0.001 \text{ mm}$ のデジタル読み取りシステムを搭載。

5.4 キャリブレーションブロック

EN ISO 6507-3:2018 に準拠した標準校正ブロック、硬度範囲 HV 100 $\sim$ 3000、偏差 $< \pm 2\%$ 。

ブロックの表面粗さは $Ra < 0.05 \mu\text{m}$ です。

5.5 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: 30% $\sim$ 80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 サンプルの要件

試験片の形状: 直方体、円筒またはその他の規則的な幾何学的形状、試験面積 $> 5 \times 5 \text{ mm}$ 、厚さ $> 0.5 \text{ mm}$ (荷重に依存)。

試験面は平らで、ひび割れ、酸化層、機械加工の欠陥などがない状態である必要があります。

表面粗さ $Ra < 0.1 \mu\text{m}$ (研磨済み)、低荷重 ($< 9.807 \text{ N}$) 試験の場合、 $Ra < 0.05 \mu\text{m}$ 。

試験片の厚さは次の要件を満たす必要があります: 厚さ $\geq 1.5 \times$ くぼみの対角線の長さ。

6.2 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合 ($> 3\%$)、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.3 サンプルマーキング

試験片にはバッチ番号、グレード (YG8、S235JR 鋼など)、試験項目を記入しますが、そ

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

の記入は試験領域に影響を与えません。

6.4 サンプル洗浄

試験前に無水エタノールまたはアセトンでサンプルの表面を洗浄し、油分や埃を除去して乾燥させてから使用してください。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

標準校正ブロックを用いて硬度計を校正します。試験荷重に適した校正ブロックを選択します。3回測定します。硬度偏差は±1%未満です。

インデンターの状態をチェックして、摩耗や欠陥がないことを確認します。

7.2 試験条件

周囲温度: 10°C ~ 35°C、20±5°C を推奨。

相対湿度: 30%~80%、50±10% を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 負荷の選択

材料の硬度と試験片の厚さに基づいて荷重を選択します。

超硬合金: 294.2N (30kgf、HV30) を推奨します。

鋼: 50 N ~ 294.2 N (HV 5 ~ HV 30)。

薄肉試験片: 0.098 N~9.807 N (HV 0.01~HV 1)。

荷重によって、へこみの対角線の長さ d が 0.020 mm ~ 1.400 mm の範囲になるようにする必要があります。

7.4 テスト操作

試験面が水平であることを確認しながら、試験片を硬度試験機の作業台に置きます。

適切な荷重（例: 294.2 N）を選択し、その荷重を 10 ~ 15 秒間保持します（または材料の要件に応じて調整します）。

インデンターはサンプル表面にゆっくりと押し付けられ、荷重を維持した後、自動的に荷重が解除されます。

各試験片について5つの圧痕点を測定し、圧痕間隔は対角線の長さの3倍(0.3 mm 以上)とし、試験片の端からの距離は 0.5 mm 以上とする。

7.5 測定と計算

くぼみの2本の対角線の長さ(d1、d2)は、光学顕微鏡を使用して±0.001 mmの精度で測定されました。

平均対角線の長さを計算します。

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

ビッカース硬度を計算します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

5 つの圧痕点の硬度値がサンプルの硬度値として採用され、偏差は $\pm 3\%$ 未満です。

8 テスト結果の評価

8.1 硬度値の範囲

金属材料のピッカース硬度範囲: HV 100~3000、具体的な値は材料によって異なります。

超硬合金 (YG8): HV1450~1550。

硬化鋼 (42CrMo4): HV 500~700。

アルミニウム合金 (6082-T6): HV 50~150。

8.2 逸脱評価

5 つの圧痕ポイントの許容差は $\pm 3\%$ 未満です。それ以外の場合は再テストが必要です。硬度値が材料の技術要件を超える場合は、その原因を分析する必要があります(表面欠陥、荷重の不一致など)。

8.3 影響要因の分析

荷重の選択: 荷重が低すぎる場合 (<0.098 N)、明確なへこみが形成されない可能性があります。また、荷重が高すぎる場合 (>2942 N)、試験片が変形する可能性があります。

表面品質: 表面粗さ $Ra > 0.1 \mu m$ の場合、硬度の値が低くなります (偏差 >5%)。

保持時間: 5 秒未満または 60 秒を超える時間は、圧痕のサイズに影響します (偏差 $\pm 2\%$)。

試験片の厚さ: 厚さ $< 1.5 \times$ くぼみの対角長さの場合、サポート効果が得られ、硬度値が高くなります (偏差 >10%)。

9 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。

サンプル情報: 材料の種類、ブランド、バッチ番号、サイズ。

試験条件: 機器モデル、荷重 (N)、保持時間 (秒)、周囲温度 ($10^{\circ}C \sim 35^{\circ}C$)、湿度 (30% ~80%)。

試験結果: 各くぼみの平均対角長さ (d)、硬度値 (HV)、平均硬度値および偏差。

評価結論: 材料の技術的要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A (参考付録) 代表的な金属材料のピッカース硬度の基準値

素材の種類	ブランド/カテゴリ	ピッカース硬度 (HV)	標準荷重 (N)	代表的な用途
超硬合金	YG8	1450-1550	294.2	切削工具
硬化鋼	42CrMo4	500~700	294.2	機械部品

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	ブランド/カテゴリ	ピッカース硬度 (HV)	標準荷重 (N)	代表的な用途
アルミニウム合金	6082-T6	50～150	9.807	航空宇宙構造
鋳鉄	EN-GJL-250	200～300	98.07	エンジンブロック

付録 B（参考付録）ピッカース硬度と荷重の関係表

荷重(N)	硬度記号	へこみの対角長さ範囲 (mm)	適用可能な材料
0.098	HV 0.01	0.020～0.050	薄壁または小さな標本
9.807	HV 1	0.050～0.150	軟質金属（アルミニウムなど）
98.07	HV 10	0.150～0.400	中硬質材料（鋳鉄など）
294.2	HV 30	0.400～1.000	硬質合金、鋼
2942	HV 300	1.000～1.400	超硬材料

付録 C（参考付録）テスト環境要件

温度: 10℃～35℃、20±5℃を推奨。

湿度: 30%～80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

EN ISO 6507-1:2018「金属材料 - ピッカース硬さ試験」は、金属材料のピッカース硬さ試験のための標準化された手順を提供し、標準化された試験片調製、試験手順、および結果評価を通じて、試験結果の精度と再現性を保証します。この規格の実施は、超硬合金、鋼、アルミニウム合金などの材料の品質管理および性能評価に適用でき、機械製造、航空宇宙、金型製造などの応用分野に信頼性の高い技術サポートを提供します。

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:

EN ISO 18265:2013

金属材料 - 硬度と強度の変換

金属材料 - 硬度値の変換

1 範囲

この規格は、異なる硬度試験方法間、および金属材料の硬度値と引張強度間の換算方法を規定する。この規格は、鉄系金属（炭素鋼、合金鋼、ステンレス鋼など）および非鉄金属（アルミニウム、銅、およびそれらの合金など）に適用可能である。この換算方法は経験的データに基づいており、室温（10℃～35℃）で測定された硬度値に適用可能である。この規格は、超硬合金（WC-Co など）、超硬合金（ダイヤモンドなど）、または表面硬化処理された材料（浸炭鋼など）の硬度換算には適用されない。

2 規範的参照

以下の文書の条項は、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

EN ISO 6506-1:2014 金属材料 - ブリネル硬さ試験 パート 1: 試験方法

EN ISO 6507-1:2018 金属材料 - ビッカース硬さ試験 パート 1: 試験方法

EN ISO 6508-1:2016 金属材料 - ロックウェル硬さ試験 パート 1: 試験方法

EN ISO 4545-1:2017 金属材料 - ヌープ硬さ試験 パート 1: 試験方法

EN ISO 6892-1:2019 金属材料 - 引張試験 パート 1: 室温での試験方法

3 用語と定義

この規格では、EN ISO 18265:2013 および次の用語と定義を採用しています。

硬度: 金属材料が圧子の侵入に抵抗する能力。さまざまな方法（ビッカース、ブリネル、ロックウェル、ヌープなど）を使用して測定されます。

引張強度 (Rm): 金属材料が引張試験で耐えられる最大応力で、MPa で測定されます。

変換: 経験的関係に基づいて、ある硬度値を別の硬度値または引張強度に変換するプロセス。

ビッカース硬度 (HV): ビッカース硬度試験により測定された硬度値、単位は N/mm²。

ブリネル硬度 (HBW): ブリネル硬度試験によって測定された硬度値、単位は HBW（超硬ボール圧子）。

ロックウェル硬度 (HR): ロックウェル硬度試験で測定される硬度値。一般的なスケールは HRC、HRB、HRA です。

4 変換原理

硬度と硬さ、または硬度と引張強度の換算は、経験的データと回帰分析に基づいています。換算関係は、材料の種類、熱処理状態、および微細組織（結晶粒径、相分布など）によって異なります。本規格では換算表と換算式が示されていますが、換算結果はあくまでも概算値であり、±10%程度の誤差が生じる場合があります。換算の際には、以下の要素を考慮する必要があります。

材料カテゴリ: 鉄系金属（炭素鋼、合金鋼など）または非鉄金属（アルミニウム、銅など）。

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

硬度範囲：硬度試験方法によって適用可能な範囲が異なります (HRC 20 ～ 70 など)。

試験条件：硬度試験荷重、保持時間、サンプル表面品質。

5 変換条件

5.1 適用範囲

鉄系金属：炭素鋼、合金鋼、ステンレス鋼。

非鉄金属：アルミニウムおよびアルミニウム合金、銅および銅合金。

硬度範囲：

ビッカース硬度 (HV)：100～1000。

ブリネル硬度 (HBW)：100～700。

ロックウェル硬度 (HRC)：20～70。

引張強度 (Rm)：300～2000MPa。

5.2 制限事項

超硬合金 (WC-Co など) や超硬合金 (ダイヤモンドなど) には適していません。

表面硬化材 (浸炭層、窒化層など) には適していません。

異常な微細構造 (重度の偏析や高多孔性など) を持つ材料には適していません。

変換の偏差は最大 $\pm 10\%$ になる場合があります、参考値としてのみ使用されます。

5.3 テスト要件

硬度試験は、関連規格 (EN ISO 6507-1:2018 など) に準拠する必要があります。

試験片の表面粗さは $Ra < 0.1\mu m$ 、厚さは圧痕の対角線の長さの 1.5 倍以上である。

周囲温度：10°C ～ 35°C、20 $\pm$ 5°C を推奨。

6 変換方法

6.1 硬度の換算は

、規格に定められた表に基づいて行います。以下に例を示します。

HRC から HV へ：

HRC 30 $\approx$ HV 320

HRC 50 $\approx$ HV 550

HRC 30 $\approx$ HV 320

HRC 50 $\approx$ HV 550

HV から HBW (炭素鋼)

HV 200 $\approx$ HBW 190

HV 500 $\approx$ HBW 475

HV 200 $\approx$ HBW 190

HV 500 $\approx$ HBW 475

6.2 硬度と引張強度の換算 換算は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

規格に定められた表または計算式を用いて行います。以下に例を示します。

HRC から R_m （硬化鋼）：

HRC 30 $\approx$ 900 RM

MPaHRC 50 $\approx$ R_m 1500

HRC 30 $\approx R_m$ 900 MPa

HRC 50 $\approx R_m$ 1500 MPa

HBW から R_m （炭素鋼、熱処理なし）：

$R_m \approx 3.3 \times \text{HBW}$ (HBW 100-400)

HBW 200 $\approx$ R_m 660 MPa

$R_m \approx 3.3 \times \text{HBW}$ (HBW 100-400)

HBW 200 $\approx R_m$ 660 MPa

6.3 変換テーブルの構造

表 A: 鉄系金属（炭素鋼、合金鋼）の硬度の換算。

表 B: ステンレス鋼の硬度変換。

表 C: 非鉄金属（アルミニウム、銅）の硬度変換。

表 D: 硬度と引張強度の換算。

7 変換結果の評価

7.1 偏差分析

硬度変換偏差：材質と硬度範囲によって $\pm 5\% \sim 10\%$ 。

硬度と引張強度の変換偏差：熱処理状態によって $\pm 10\% \sim 15\%$ となります。

7.2 影響要因

微細構造：粒径が不均一 ($> \pm 0.2 \mu\text{m}$) または相分布が不均一な場合、大きな偏差 ($> 10\%$) が発生する可能性があります。

熱処理状況：焼入れ焼戻し鋼と焼鈍鋼の変換偏差は異なります ($\pm 5\% - 15\%$)。

試験条件：硬度試験の荷重、保持時間、サンプル表面の品質は変換精度に影響します。

7.3 推奨事項

引張強度を得るには、変換よりも直接テスト（引張テストなど）を行う方が望ましいです。

変換結果は参考値であり、必要に応じて検証する必要があります（偏差が 10% を超える場合）。

8 コンバージョンレポート

変換レポートには次の内容を含める必要があります。

材料情報：材料の種類、グレード、熱処理の状態。

硬度試験情報：試験方法（ピッカースなど）、荷重（N）、硬度値および偏差。

換算結果：目標硬度値または引張強度値、換算基準（表番号）。

偏差評価：変換偏差範囲と影響要因の分析。

報告日とオペレーターの署名。

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 A（規範的付録）鉄系金属の硬度換算表（一部例）

HRC	HV	HBW	HRA	適用可能な材料
20	240	228	60	軟鋼
30	320	304	67	中炭素鋼
40	420	400	73	硬化鋼
50	550	525	78	高強度鋼

付録 B（規範付録）ステンレス鋼の硬度換算表（一部例）

HRC	HV	HBW	適用可能な材料
20	250	238	オーステナイト系ステンレス鋼
30	330	315	マルテンサイト系ステンレス鋼
40	430	410	析出硬化ステンレス鋼

付録 C（規範付録）非鉄金属硬度換算表（部分例）

HBW	HV	適用可能な材料
50	55	純アルミニウム
100	110	アルミニウム合金（6061 など）
150	165	真鍮

付録 D（規範付録）硬度と引張強度の換算表（例）

HBW	Rm	R _m (MPa)	適用可能な材料
150	495		てい不在炭素鋼
200	660		てい不在炭素鋼
300	1000		焼入れ焼戻し鋼

付録 E（参考付録）テスト環境要件

温度: 10℃～35℃、20±5℃を推奨。

湿度: 30%～80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

要約する

EN ISO 18265:2013「金属材料 - 硬度と強度の変換」は、金属材料の硬度値を変換するための標準化された手順を提供し、詳細な変換表と条件を提供することで、変換結果の信頼性と一貫性を確保します。この規格の導入により、材料エンジニアは直接的な試験条件がない場合でも、硬度と強度のおおよその評価を行うことができ、機械製造、建設、エネルギーなどの分野における材料性能分析に適しています。

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:

EN ISO 6892-1:2019

金属材料の引張試験

金属材料 - 引張試験

— パート 1: 室温での試験方法

1 範囲

この規格は、金属材料の機械的特性（降伏強度、引張強度、破断伸び、断面収縮率など）を測定するための室温（10°C～35°C）における引張試験方法を規定する。この規格は、各種金属材料（鋼、アルミニウム合金、銅合金など）の棒材、板材、管材、線材および加工部品に適用する。この規格は、10°C～35°Cの範囲を超える温度での試験や、厚さ 0.1mm 未満の微小試験片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、本規格への参照を通じて本規格の条項となります。日付が記載されている参照文書については、参照されている版のみが適用されます。日付が記載されていない参照文書については、最新版（すべての修正を含む）が本規格に適用されます。

EN ISO 7500-1:2018 金属材料 - 引張試験機および圧縮試験機 パート 1: 校正力標準装置

EN ISO 9513:2012 金属材料 - 伸び計システムの校正

EN ISO 377:2017 鉄鋼および鉄鋼製品 - 引張試験用試験片の採取および準備

EN ISO 148-1:2016 金属材料 - シャルピー振り子衝撃試験 パート 1: 試験方法

EN ISO 18265:2013 金属材料 - 硬度と強度の変換

3 用語と定義

この規格では、EN ISO 6892-1:2019 および次の用語と定義を採用しています。

降伏強度 (Rp) または指定塑性伸長強度 (Rp0.2): 引張試験中に試験片が指定の塑性変形を起こす応力 (MPa 単位)。

引張強度 (Rm): 試験片が引張時に耐える最大応力 (MPa 単位)。

長さまで破断した後のゲージ長さ部分の塑性伸びの割合 (%)。

断面収縮率 (Z): 試験片が破断した後の断面積の減少率を、% で表します。

ゲージ長さ (L0): 伸びを測定するために使用される試験片の初期長さ (mm)。

4 テストの原則

引張試験は、万能試験機を用いて金属サンプルに単軸引張荷重を負荷し、サンプルが破断するまで負荷し、荷重-変位曲線を記録して機械的特性パラメータ（降伏強度、引張強度、伸びなど）を算出する試験プロセスです。試験プロセスは、弾性段階、降伏段階、均一塑性変形段階、ネッキング破壊段階に分かれています。機械的特性の計算式は以下のとおりです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

屈服强度或规定塑性延伸强度:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0}$$

抗拉强度:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

断后延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

断面收缩率:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100$$

で:

F_p は降伏荷重 (N) です。

F_m は最大荷重 (N) です。

A_0 は元の断面積 (mm^2) です。

L_0 は元のゲージ長であり、mm 単位;

L_u は破断後のゲージ長であり、mm 単位;

A_u は、破壊後の最小断面積 (mm^2) です。

5 試験装置

5.1 万能試験機

荷重範囲: 0~1000 kN、精度 $\pm 0.5\%$ 、EN ISO 7500-1:2018 校正要件に準拠。

荷重速度制御: 応力速度 0.00025/s ~ 0.0025/s、またはひずみ速度 0.0001/s ~ 0.001/s。

5.2 伸び計

$\pm 0.5\%$ の精度で EN ISO 9513:2012 校正要件を満たしています。

測定範囲: サンプルの弾性変形段階と塑性変形段階をカバーします。

5.3 測定ツール

ノギス: 精度 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 、サンプルサイズの測定に使用します。

マイクロメーター: 精度 $\pm 0.001 \text{ mm}$ 、断面積の測定に使用します。

5.4 環境制御

温度: $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ を推奨。

湿度: $30\% \sim 80\%$ 、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

6. サンプルの準備

6.1 標本の種類

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

比例试样：标距长度 L_0 与横截面积 A_0 的平方根成比例，常用 $L_0 = 5.65\sqrt{A_0}$ 。

非比例試験片：ゲージ長さ L_0 は 50 mm や 80 mm のように固定されています。
試験片の形状：円形、長方形、管状、またはワイヤ状。具体的な寸法は EN ISO 377:2017 に準拠しています。

6.2 サンプルの要件

試験片の表面は滑らかで、ひび割れ、酸化層、加工欠陥はありません。

表面粗さ $Ra < 0.2\mu m$ （研磨）。

別途合意がない限り、試験片は材料の圧延方向に採取されるものとする。

6.3 サンプル数

統計的な代表性を保証するために、各バッチのサンプル数は 3 個以上でなければなりません。

結果の偏差が大きい場合（>10%）、サンプル数を 5 に増やす必要があります。

6.4 サンプルマーキング

試験片にはバッチ番号、ブランド（S355JR、6061-T6 など）、試験項目を記入し、その記入は試験領域に影響を与えないものとする。

6.5 サンプル測定

サンプルの元の断面積 A_0 およびゲージ長さ L_0 を測定します、精度 ± 0.02 mm です。

7 テスト手順

7.1 機器の校正

試験機は、荷重偏差が $\pm 0.5\%$ 未満の標準力センサーを使用して校正されました。

ひずみ測定は、偏差が $\pm 0.5\%$ 未満の標準伸び計を使用して校正されました。

7.2 試験条件

周囲温度: $10^\circ C \sim 35^\circ C$ 、 $20 \pm 5^\circ C$ を推奨。

相対湿度: 30%~80%、 $50 \pm 10\%$ を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

7.3 テスト操作

試験片の軸が試験機の治具の中心線と揃っていることを確認しながら、試験片を試験機の治具に取り付けます。

初期荷重（降伏荷重の 10% を超えない）を適用し、設置ギャップをなくします。

読み込み速度を選択してください：

弾性段階: 応力速度 $0.00025/s \sim 0.0025/s$ 。

プラスチックステージ：ひずみ速度 $0.0001/s \sim 0.001/s$ 。

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

試験片が破損するまで、荷重-変位曲線を記録しました。

各サンプルは 1 回テストされ、結果の安定性を確保するために 3 ～ 5 回繰り返されました。

7.4 成果測定

降伏荷重 F_p と最大荷重 F_m を記録します。

$R_{p0.2}$ でのひずみを測定します。

試験片が破断した後、破断後のゲージ長さ L_u と断面積 A_u を測定します。

7.5 結果の計算

屈服強度或 $R_{p0.2}$:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0}$$

抗拉強度:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

断后延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

断面収縮率:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100$$

8 テスト結果の評価

8.1 機械的性質の範囲

金属材料の機械的特性の範囲は材料によって異なります。

低碳钢 (S355JR) : $R_{p0.2}$ 355 MPa, R_m 470-630 MPa, A 20%-25%。

铝合金 (6061-T6) : $R_{p0.2}$ 240 MPa, R_m 310 MPa, A 8%-12%。

不锈钢 (304) : $R_{p0.2}$ 205 MPa, R_m 520 MPa, A 40%-50%。

8.2 逸脱評価

3～5 個の検体の異常値が $\pm 10\%$ 未満の場合、それ以外の場合は再検査が必要です。

性能値が材料の技術要件を超える場合は、その理由を分析する必要があります (試験片の欠陥、不適切な荷重速度など)。

8.3 影響要因の分析

荷重速度: 速度が速すぎると ($>0.0025/s$)、降伏強度が高くなります (偏差 $>5\%$)。

試験片の品質: 表面粗さ $R_a > 0.2 \mu m$ 、または欠陥により早期破損が発生する可能性があります (偏差 $>10\%$)。

固定具の位置合わせ: 固定具の位置がずれていると、応力が集中し、伸びが減少する可能性があります (偏差 $>15\%$)。

微細構造: 粒径が不均一 ($>\pm 0.2 \mu m$) または介在物が多すぎると、性能が低下します (偏差

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

>10%)。

9 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。

サンプル情報: 材料の種類、ブランド、バッチ番号、サイズ、サンプリング方向。

テスト条件: デバイス モデル、読み込み速度、周囲温度 (10℃ ～ 35℃)、湿度 (30% ～ 80%)。

試験結果: 降伏強度($R_{p0.2}$)、引張強度(R_m)、破断後伸び(A)、絞り(Z)、平均値および偏差。

評価結論: 材料の技術的要件を満たしているかどうか。

テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（参考付録） 代表的な金属材料の機械的性質の基準値

素材の種類	ブランド/カテゴリー	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A(%)	Z(%)	代表的な用途
軟鋼	S355JR	355	470-630	20 ～ 25 歳	50 ～ 60	建物の構造
アルミニウム合金	6061-T6	240	310	8～12 歳	20 ～ 30	航空宇宙構造
ステンレス鋼	304	205	520	40～50	60 ～ 70	食品機器

付録 B（参考付録） 試験片寸法の推奨表

標本の種類	ゲージ長さ L_0 (mm)	断面積 A_0 (mm ²)	適用可能な材料
比例試験片	$5.65\sqrt{A_0}$	50～200	スチール、アルミニウム合金
非比例標本	50	20～100	薄板、ワイヤー

付録 C（参考付録） テスト環境要件

温度: 10℃～35℃、20±5℃を推奨。

湿度: 30%～80%、50±10%を推奨。

振動や腐食性ガス環境はありません。

テストベンチの水平度: 偏差 <0.02 mm/m。

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 7 章 超硬合金の機械的特性制御

7.0 超硬合金の機械的性質

7.0.1. 超硬合金の高硬度

7.0.1.0 超硬合金の硬度はどれくらいですか？

7.0.1.1 超硬合金の硬度測定方法

7.0.1.2 硬度に影響を与える要因

7.0.1.3 硬度の微視的メカニズム

7.0.1.4 硬度の応用上の意義

硬度と靱性のトレードオフ

7.0.1.6 要約

7.0.2. 超硬合金の破壊靱性

7.0.2.1. 超硬合金の破壊靱性の定義

7.0.2.2. 超硬合金の破壊靱性測定方法

7.0.2.3. 超硬合金の破壊靱性に影響を及ぼす要因

7.0.2.4. 超硬合金の破壊靱性の微視的メカニズム

7.0.2.5. 超硬合金の破壊靱性の応用上の意義

7.0.2.6. 超硬合金の破壊靱性の最適化と将来の開発

7.0.3. 超硬合金の圧縮強度

7.0.3.1. 超硬合金の圧縮強度の定義

7.0.3.2. 超硬合金の圧縮強度の測定方法

7.0.3.3. 超硬合金の圧縮強度に影響を及ぼす要因

7.0.3.4. マイクロメカニズム 超硬合金の圧縮強度

7.0.3.5. 超硬合金の圧縮強度の応用上の意義

7.0.3.6. 超硬合金の圧縮強度の最適化と将来の開発

7.0.4. 超硬合金の耐摩耗性

7.0.4.1. 超硬合金の耐摩耗性の定義

7.0.4.2. 超硬合金の耐摩耗性測定方法

7.0.4.3. 超硬合金の耐摩耗性に影響を与える要因

7.0.4.4. 超硬合金の耐摩耗性のマイクロメカニズム

7.0.4.5. 超硬合金の耐摩耗性の応用上の意義

7.0.4.6. 超硬合金の耐摩耗性の最適化と将来の開発

7.0.5. 超硬合金の疲労抵抗

7.0.5.1. 超硬合金の疲労抵抗の定義

7.0.5.2. 超硬合金の疲労抵抗の測定方法

7.0.5.3. 超硬合金の疲労抵抗に影響を及ぼす要因

7.0.5.4. 超硬合金の疲労抵抗の微視的メカニズム

7.0.5.5. 超硬合金の疲労耐性の応用上の意義

7.0.5.6. 超硬合金の疲労抵抗の最適化と今後の開発

7.0.6. 超硬合金の耐衝撃性

7.0.6.1. 超硬合金の耐衝撃性の定義

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.0.6.2. 超硬合金の耐衝撃性測定方法
- 7.0.6.4. 超硬合金の耐衝撃性の微視的メカニズム
- 7.0.6.5. 超硬合金の耐衝撃性の応用上の意義
- 7.0.6.6. 超硬合金の耐衝撃性の最適化と将来の開発
- 7.0.7. 超硬合金の機械的特性の総合的な分析と応用
 - 7.0.7.1. 超硬合金の機械的特性間のトレードオフ
 - 7.0.7.2. 超硬合金の機械的特性の最適化戦略
 - 7.0.7.3. 超硬合金の機械的特性の応用シナリオ
 - 7.0.7.4. 超硬合金の機械的特性の将来的な発展
- 7.1 超硬合金の硬度と靱性のバランス
 - 7.1.1 粒径効果（ホール・ペッチ関係）
 - 7.1.1.1 粒径効果
 - 7.1.1.2 ホール・ペッチ **機構と機械的分析**
 - 7.1.2.2 バインダー含有量の靱性に対する定量的な影響
 - 7.1.2.3 結合相の種類と靱性の階層的関係
 - 7.1.2.4 強力なトレードオフと協調最適化戦略
 - 7.1.2.5 エンジニアリング実践の検証
 - 7.1.2.6 承認の締結
- 7.2 超硬合金の疲労および耐衝撃性
 - 7.2.1 繰り返し荷重下における超硬合金の亀裂成長（パリスの法則）
- 7.3 超硬合金の破壊メカニズムの解析
 - 7.3.2 超硬合金の破壊と剥離（応力集中と微小亀裂）
- 7.4. 超硬合金の性能向上戦略
 - 7.4.1 超硬合金の性能向上戦略 - 超硬合金の結晶粒微細化
 - 7.4.2 超硬合金の性能向上戦略、超硬合金添加剤（VC、 TaC ）
 - 7.4.3 超硬合金の性能向上と超硬合金表面の強化戦略
 - 7.4.4 超硬合金の性能向上戦略 - 超硬合金先進製造技術（3D プリンティング）
- セメント炭化物の性能最適化における AI+IIoT の応用
- 7.5.1 微細構造最適化： AI 駆動型精密設計
- 7.5.2 リアルタイムパフォーマンス監視： IIoT の高精度認識
- 7.5.3 故障予測とインテリジェントメンテナンス： AI+IIoT の連携アプリケーション
- 7.5.4 プロセス最適化とインテリジェント製造： AI+IIoT の効率的な連携
- IIoT は浸炭温度をリアルタイムで監視し（850 ～ 950°C、偏差 ±1.5°C）、浸炭層の品質を最適化します。
- 7.5.5 中国のタングステン産業における AI 元年
 - 7.5.5.1 「中国タングステン産業における AI 元年」という概念の実際の意義
 - 7.5.5.2 超硬合金の高エントロピー処理の意義
 - 7.5.5.3 炭化物グレードのバッチ処理の重要性
- 7.5.6 超硬合金の性能向上の将来展望と課題
- 7.6 関連する国内および国際規格

参考文献

スケジュール

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

超硬合金の硬度と靱性のバランス：主な性能パラメータ
超硬合金の硬度と靱性のバランスに及ぼす粒径の影響
超硬合金の硬度と靱性のバランスに対する結合相含有量の最適化の影響要因
超硬合金の耐疲労性と耐衝撃性の主な性能パラメータ
超硬合金の疲労抵抗における亀裂成長に影響を与える要因
超硬合金の衝撃靱性に影響を与える要因
超硬合金の破壊メカニズムの主な性能パラメータ
超硬合金の摩耗破壊に影響を与える要因
超硬合金の破壊と剥離に影響を与える要因
超硬合金の性能向上の主な性能パラメータ
超硬合金の性能向上に影響する粒子の微細化と添加剤
超硬合金の表面強化による性能向上に影響する要因

付録

ホール・ペッチ関係とは何ですか？
傾斜構造超硬合金とは何ですか？
超硬合金浸炭の様々な概念と機能
超硬合金の浸炭および脱炭
超硬合金のバインダーージェットティングとは何ですか？
電解装置における超硬合金の応用
超硬高速切削工具
超硬ボールエンドミル
超硬エンドミル
超硬多刃フライスカッター
超硬ソリッドドリル
超硬外径旋削工具
超硬ギアカッター
超硬風力タービンギアカッター

GB/T 18376-2001 セメント炭化物性能試験方法

GB/T 230.1-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験

パート 1: 試験方法 (A、B、C スケール)

GB/T 230.2-2001 金属材料のロックウェル硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正

GB/T 230.3-2001 金属材料ロックウェル硬さ試験 パート 3: 標準硬度ブロックの校正

GB/T 3848-2001 超硬合金の密度測定方法

GB/T 3850-2001 超硬合金の曲げ強度の測定方法

GB/T 3851-2001 超硬合金の破壊靱性測定方法

GB/T 9097-2001 超硬合金の磁気特性の測定方法

GB/T 3849-2008 超硬合金のピッカー硬さ試験方法

GB/T 7997-2010 超硬合金の破壊靱性試験方法

GB/T 3488-2008 超硬合金の微細構造試験方法

ISO/TR 19041:2015 超硬合金の微細構造検査に関する技術報告書：欠陥評価に関する補足ガイダンス

ISO 4884:2019 超硬合金の磁気特性の測定方法

ISO 3369:2006 超硬合金の密度測定方法

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 28079:2009 超硬合金の破壊靱性測定方法
ISO 3878:1983 超硬合金のロックウェル硬さ試験方法（HRA スケール）
ISO 3326:2013 超硬合金のピッカース硬さ試験方法
ISO 4489-2:2020 超硬合金の曲げ強度試験方法 パート 2: 高温条件
ISO 4489:2010 超硬合金の曲げ強度の測定方法
ISO 4499-3:2016 超硬合金 - 微細組織検査 パート 3: 気孔率、介在物、遊離炭素およびエータ相の評価
ISO 4499-2:2008 超硬合金 - 微細組織検査 パート 2: 粒径の測定方法
ISO 4499-1:2006 超硬合金 - 微細組織検査 パート 1: 一般ガイダンス
ISO 3847:2005 超硬合金試験片の作製方法
ISO 3850:2018 超硬合金用語集
ISO 3850:2018 ハードメタル— 語彙
GB/T 4295-2008 超硬合金の微細構造欠陥の評価方法
GB/T 5249-2008 超硬合金サンプルの作製に関する一般仕様
ISO 28079:2009 セメント炭化物手のひら型試験片の破壊靱性試験
ハードメタル— パルムクヴィスト靱性試験
ISO 6507-1:2018 金属材料のピッカース硬さ試験
金属材料 - ピッカース硬さ試験
ISO 6507-1:2018 金属材料 - ピッカース硬さ試験 パート 1: 試験方法
ISO 6507-2:2018 金属材料 - ピッカース硬さ試験 パート 2: 硬さ試験機の検証および校正
ISO 6507-3:2018 金属材料 - ピッカース硬さ試験 パート 3: 校正標準
ISO 3327:2009 超硬合金の圧縮強度試験方法
超硬合金- 横方向破断強度の測定
超硬合金—超硬合金の摩耗試験
ASTM B611-13 硬質材料の高応力摩耗抵抗の標準試験方法
ASTM E23-18 ノッチ付き試験片衝撃試験方法
金属材料のノッチ付き棒衝撃試験の標準試験方法
ASTM G65-16 乾燥砂/ゴム車輪摩耗試験方法
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
EN ISO 6507-1:2018 ピッカース硬度試験
金属材料 - ピッカース硬さ試験 - パート 1: 試験方法
EN ISO 18265:2013 金属材料 - 硬度と強度の変換
金属材料 - 硬度値の変換
EN ISO 6892-1:2019 金属材料の引張試験
金属材料 - 引張試験 - パート 1: 室温での試験方法

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

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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