

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、応用に関する包括的な
探究（VIII）

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 万人近くのリフォロワーを抱え、世界中の数十万人の業界関係者に毎日無料情報を提供しています。ウェブサイト群と公式アカウントへの累計アクセス数は数十億回に達し、タングステン、モリブデン、希土類元素業界における世界的に権威のある情報ハブとして認知され、24 時間 365 日、多言語ニュース、製品性能、市場価格、市場動向などのサービスを提供しています。

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

ハンス博士と CTIA GROUP のチームは、30 年以上にわたる業界経験に基づき、タングステン、モリブデン、希土類に関する知識、技術、タングステン価格、市場動向分析を執筆・公開し、タングステン業界と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 8 章 超硬合金の耐腐食性と耐高温性

超硬合金は、粉末冶金法によって製造される複合材料で、炭化タングステン（WC）を主硬相とし、コバルト（Co）、ニッケル（Ni）などの金属を結合相として用います。その優れた性能から、切削工具、鉋山機械、耐摩耗部品などに広く使用されています。以下では、耐食性と耐高温性の 2 つの側面から、その概念と代表的な特性について簡単に説明します。

超硬合金の耐食性

耐食性とは、超硬合金が腐食性媒体（酸、アルカリ、塩溶液など）における化学的侵食に耐える能力を指します。この特性は主に材料の組成と微細構造によって影響を受けます。

超硬合金の結合相は、その耐食性において重要な役割を果たします。コバルトを結合相とする超硬合金（YG シリーズなど）は、酸性媒体に対する性能が低下します。例えば、硫酸や塩酸環境では、コバルトが腐食しやすく、材料表面が徐々に溶解します。YG6（コバルト含有量 6%）を例にとると、常温の 10% 塩酸中での腐食速度は約 0.1~0.2mm/年ですが、弱アルカリ性または中性媒体（10% 水酸化ナトリウム溶液など）ではほとんど腐食しません。一方、ニッケルを結合相とする超硬合金（YN シリーズなど）は、特にアルカリ性および酸化性媒体において、より強い耐食性を示します。より安定しており、海洋環境などの過酷な環境での使用に適しています。また、微細構造の欠陥も耐食性に大きな影響を与える可能性があります。超硬合金に多孔性が高い場合や、遊離炭素や η 相などの不純物が含まれている場合、これらの欠陥が腐食の起点となり、材料の劣化を加速させます。

超硬合金の耐熱性

耐高温性とは、超硬合金が高温環境下でも硬度、強度、耐酸化性を維持する能力を指します。この特性は、組成と温度によっても影響を受けます。

超硬合金は低温でも性能が優れており、通常 600°C 以下でも高い硬度と強度を維持できます。例えば、YG8（コバルト 8% 含有）は 600°C でも約 1200 HV の硬度を維持でき、これは約 20% 低いだけです。しかし、温度が 800°C を超えると、結合相（コバルトなど）が軟化を始め、材料全体の強度と硬度が大幅に低下します。YG8 を例にとると、1000°C では硬度が 500~600 HV まで低下する可能性があります。さらに、高温における超硬合金の耐酸化性も課題となります。炭化タングstenは高温酸化環境で酸化タングsten（ WO_3 ）に変換され、表面剥離を引き起こし、耐用年数に影響を与えます。対照的に、炭化チタン（TiC）を添加した超硬合金（YT15 など）は、800°C でより優れた耐酸化性を示しますが、それでも強度は 20%~30% 低下します。

超硬合金の耐食性と耐高温性は、過酷な環境での適用において重要な指標となります。耐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

腐食性に関しては、ニッケル含有超硬合金は様々な媒体で優れた性能を発揮しますが、コバルト含有超硬合金は酸性環境で腐食しやすい傾向があります。耐高温性に関しては、超硬合金は 600°C 以下では安定していますが、高温になると硬度と耐酸化性が大幅に低下します。これらの特性は、様々な用途における超硬合金の適用性を決定づけ、その選択と使用の重要な根拠となります。

過酷な環境での超硬合金（WCCo）の耐久性は、化学、海洋、航空分野での応用の鍵となります。たとえば、酸性溶液（pH<3±0.1）では、超硬合金は強力な化学攻撃に耐える必要があります。海洋塩水噴霧（>1000 時間±100 時間）では、孔食を防ぐ必要があります。航空機エンジン（>1000°C±10°C）では、強度と耐酸化性を維持する必要があります。ただし、結合相 Co の電気化学的活性（腐食電位 $E_{\text{corr}} \sim 0.3 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$ ）は腐食を引き起こしやすく、WC は高温で酸化されて WO_3 （厚さ $>1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）を形成し、性能が低下します。最適化戦略は、微細構造（WC 粒子 $0.52 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、Co 6%12%±1%）、添加剤（ Cr_3C_2 0.5%±0.01% など）、および表面保護（コーティングの厚さ $520 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）から始めて、耐食性と耐高温性の相乗的な向上を達成する必要があります。

WCCo の酸性、塩水噴霧、高温環境における挙動と最適化パスを 4 つの側面から考察する：耐食性メカニズム、高温性能、性能最適化方法と試験および評価。耐食性メカニズムは、電気化学理論（ターフェル曲線、 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）により腐食の性質を明らかにします。高温性能は、耐酸化性（重量増加 $<0.5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ ）と熱疲労（亀裂 $<0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）に焦点を当てています。最適化方法では、Ni ベースの結合相（腐食速度 $<0.01 \text{ mm/年} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ ）と Cr_3C_2 コーティング（硬度 $>\text{HV } 1500 \pm 30$ ）を提案します。試験と評価は、ISO 9227、ASTM G59、熱衝撃試験（>500 回±50 回）を組み合わせ、定量的な根拠を提供します。

例えば、Ni 基 WC（Ni 10%±1%）の塩水噴霧における重量減少は $<0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、 Cr_3C_2 コーティング工具の 1000°C±10°C における硬度は $>\text{HV } 1200 \pm 30$ 、耐用年数は >5000 時間±500 時間です。本章は、第 6 章（コーティング摩耗率 $<0.06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ）および第 7 章（ $K_{\text{IC}} 820 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ）とシームレスに接続されており、第 9 章（多機能複合材料）の基礎となっています。

8.1 超硬合金の耐食性メカニズム

化学環境（酸、塩水噴霧、アルカリ性環境など）における長期使用の重要な基盤です。重量減少率は通常 $0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に制御されており、優れた安定性を示し、酸性（pH<3±0.1）、塩水噴霧（NaCl 濃度 5%±0.1%）、アルカリ性（pH>10±0.1）環境において効果的に耐腐食性を発揮します。腐食プロセスは主に結合相（コバルト、Co など）の電気化学的活性によって駆動され、その腐食電流密度（ i_{corr} ）は約 $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ であり、コバルトが優先的に溶解し、次に炭化タングステン（WC）粒子（サイズ $0.52 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）が脱落し、直径約 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ の腐食ピットが形成されます。WC 自体は化学的に非常に安定しており、溶解速度も極めて遅い（ $<10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ ）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2·h) もの、WC と結合相界面との結合強度 ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) が不十分な場合、界面で剥離が発生しやすくなり、腐食破損が著しく促進されます。耐食性を向上させるには、結合相の腐食電流密度 (目標 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) を低減し、電気化学的安定性 (腐食電位 $E_{\text{corr}} > 0.2 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$) を向上させ、WC-Co 界面の結合強度を高める必要があります。

WC の電気化学的挙動と結合相から、腐食は本質的に電気化学プロセスであることがわかります。コバルトは酸化溶解の陽極として作用します ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$)。一方、WC は化学的に不活性なため、陰極として反応に参加することがよくあります。このガルバニック効果が腐食の主な原動力です。酸性環境 ($\text{pH} < 3 \pm 0.1$) では、 H^+ イオンがコバルトの溶解反応を促進し、塩水噴霧環境 ($\text{NaCl} 5\% \pm 0.1\%$) では、 Cl^- イオンがコバルト表面の不動態膜を破壊し、孔食が増加します。顕微鏡分析により、腐食ピットは主に WC-Co 界面に集中していることが示されており、界面結合が不十分であることが故障の重要な要因であることを示しています。このメカニズムは、電気化学理論と試験規格 (ISO 9227、ASTM G59 など) の研究を通じてさらに検証されています。実際の事例では、WC-10Co 超硬合金の塩水噴霧環境における重量減少率は $0.09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ であり、耐食性の限界を反映しています。

一般的に、超硬合金の耐食メカニズムは、主に結合相の電気化学的溶解と界面破壊に関連しており、酸性および塩水噴霧環境下では孔食や粒子脱落として現れます。腐食電流密度を低減し、電気化学的安定性を向上させ、界面結合力を高めることで、耐食性を効果的に向上させることができ、過酷な環境下での応用に対する理論的裏付けとなります。

8.1.1 硬質相タングステンカーバイド (WC) とセメント炭化物中のバインダー相の電気化学的挙動

原理と技術概要

超硬合金の耐食性は、WC 硬質相と Co 結合相の電気化学的挙動によって決定され、腐食速度は $< 0.01 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm/年}$ を目標としています。超硬合金の硬質相であるタングステンカーバイド (WC) は、酸性および中性環境において優れた化学的安定性を示す ($E_{\text{corr}} 0.1 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$) で、ほとんど溶解しません (速度 $< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$)。対照的に、Co は電気化学的酸化 ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$) の影響を受けやすく、腐食電流 $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ の電流密度で腐食ピット (直径 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) が形成され、WCCo 界面が著しく弱くなります (接合強度 $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$)。電気化学的挙動は Butler-Volmer の式に従います。

$$i = i_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT} \right) - \exp \left(-\frac{\alpha nF\eta}{RT} \right) \right]$$

ここで、 $i_0 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (交換電流密度)、 $\alpha \sim 0.5 \pm 0.05$ (移動係数)、 η は過電位 ($< 0.1 \text{ V} \pm 0.01 \text{ V}$) である。最適化の目標は、 E_{corr} を増加させることである。そして i を減らす。

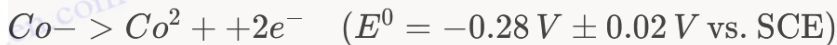
電気化学試験は 3 電極システム (WCCo 作用電極、SCE 参照電極、Pt 補助電極) を使用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、電解液には 3.5%±0.1% NaCl（海洋環境を模擬）と 0.1 M±0.01 M H₂SO₄（酸性環境を模擬）が含まれています。試験装置は高精度（電位±0.001 V、電流±10⁻⁹ A）で、信頼性の高いデータを保証します。例えば、WC10Co（粒径 0.5μm±0.01μm）を H₂SO₄中で溶存させると、 i_{corr} は約 10⁻⁵ A/cm²±10⁻⁶ A/cm²となりますが、Cr₃C₂（0.5%±0.01%）を添加すると、 i_{corr} は 10⁻⁶ A/cm²±10⁻⁷ A/cm²まで低下し、耐食性が大幅に向上します。このセクションでは、理論、実験、最適化戦略を通じた包括的なガイダンスを提供します。

メカニズムと分析

WC の高い安定性は、WC の高い結合エネルギー（700 kJ/mol±10 kJ/mol）によるものであり、pH 範囲 212±0.1（腐食速度<10⁻⁸ g/cm²·h±10⁻⁹ g/cm²·h）ではほとんど不溶です。Co の腐食反応は以下のとおりです。



酸性環境では、H⁺が Co の溶解を促進し（速度 10⁻⁶ g/cm²·h±10⁻⁷ g/cm²·h）、腐食ピット（深さ 15μm±0.1μm）を形成します。中性塩水噴霧では、Cl⁻がピット（ピット直径 110μm±0.1μm）を誘発し、 i_{corr} が 20%±5%増加します。SEM 分析の結果、腐食は主に Co の溶解によって引き起こされ、Co 担体の損失により WC 粒子が脱落し（脱落速度約 0.1%±0.02%）、表面粗さ Ra（>0.1μm±0.01μm）が増加していることが示されました。

WCCo 界面は腐食に極めて重要である。界面エネルギーが 1 J/m²±0.1 J/m²のとき、接合強度は 100 MPa±10 MPa を超え、粒子脱落率は 50%±5%減少する。粒径が 0.5μm±0.01μm の場合、粒界密度（>10¹⁴ m⁻²±10¹³ m⁻²）が増加し、耐食性が向上するが、Co の不均一な分布（偏差>0.5%±0.1%）は局部腐食（ i ）を悪化させる。 i_{corr} が 30%±5%増加します。Cr₃C₂（0.5%±0.01%）を添加して Cr₂O₃ 不動態化層（厚さ 10 nm±1 nm）を形成すると、 E_{corr} 0.15 V±0.02 V に増加し、 i_{corr} は 40%±5%減少します。XPS 分析により、Cr₂O₃（Cr 3p ピーク 約 577 eV±0.1 eV）の形成が確認され、Co の溶解を効果的に抑制しました。

超硬合金の耐食性に影響を与える要因の分析

超硬合金は、炭化タングステン（WC）を主相とし、コバルト（Co）などの金属を結合相として有しています。その耐食性は、酸、塩水噴霧、アルカリなどの過酷な化学環境において極めて重要です。しかし、その腐食挙動は、材料自身の特性（Co 含有量、粒径、添加剤、表面粗さなど）や外部環境パラメータ（電解質組成、pH 値、イオン濃度など）など、複数の要因の影響を受けます。これらの主要な要因を起点として、電気化学データ、顕微鏡分析、環境シミュレーション、実際の事例を組み合わせ、超硬合金の耐食性への影響メカニズムを深く探究し、各要因間の相互作用とそれらが材料の使用性能に与える影響を分析します。

（1）結合相としての超硬合金中のコバルト（Co）含有量の影響

結合相のコバルト（Co）は、超硬合金の主な腐食活性成分であり、その含有量は材料の電気化学的腐食傾向を直接決定する。研究によると、Co 含有量が 10%±1%の場合、腐食電

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

流密度 (i_{corr}) は約 $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ であり、酸性または塩水噴霧環境において一定の耐食性があることを示しています。しかし、Co 含有量が $12\% \pm 1\%$ に増加すると、 i_{corr} 約 $50\% \pm 5\%$ 増加し、耐食性が大幅に低下します。この現象の主な原因は、Co 含有量の増加により、腐食媒体にさらされる表面積が増加し、陽極溶解反応 ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$) が加速されるためです。さらに、Co 含有量が高いと、材料の不動態化能力も低下し、 Cl^- イオンの存在下では孔食が発生しやすくなります。WC-12Co サンプルを例にとると、 $0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 溶液に 24 時間さらした後、腐食ピットの深さは $10\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ に達し、表面に密な孔食領域が形成され、高 Co 含有量が局部腐食を著しく悪化させたことを示しています。

(2) 粒径の影響

、粒界密度と腐食性媒体の浸透経路に影響を与えることで、超硬合金の耐食性に重要な役割を果たしています。粒径が小さい場合 ($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ など)、粒界の数が多くなり、腐食性媒体の浸透経路が分散され、腐食ピットは少なく浅くなります (ピットの深さ $< 5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$)。また、微粒子により WC-Co 界面がより均一に分布し、コバルトの溶解がある程度制限されるため、材料の破損の程度が低下します。しかし、粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に増加すると、粒界密度が低下し、局所的な腐食集中が激しくなり、腐食ピットの深さが約 $20\% \pm 5\%$ 増加します。粒径が大きくなると WC-Co 界面の露出面積が減少し、コバルトの溶解が少数の界面に集中するため、より深い腐食ピットが形成されます。特に酸性環境では、 H^+ イオンが粒界に沿って浸透しやすくなり、材料の劣化が加速されます。

(3) 添加物の効果

炭化クロム (Cr_3C_2) は、結合相の化学的性質と表面状態を変化させることで、超硬合金の耐食性を大幅に最適化します。実験データによると、 $0.5\% \pm 0.01\%$ の Cr_3C_2 を添加すると、高温焼結中に Cr と酸素が反応して緻密な Cr_2O_3 不動態層を形成し、腐食性媒体 (H^+ や Cl^- など) とコバルトの直接接触を遮断するため、 i_{corr} を約 $40\% \pm 5\%$ 低減できます。 Cr_3C_2 を添加した WC-10Co サンプルを例に挙げると、 $0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 溶液中の腐食ピットの深さはわずか $3\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ であり、 Cr_3C_2 を添加していない WC-12Co ($10\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$) よりも大幅に浅い。エネルギー分散型分光分析 (EDS) では、 Cr_2O_3 層の厚さは約 $0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$ であることが示された。厚さが厚く、腐食性媒体を効果的に隔離します。しかし、 Cr_3C_2 含有量が $1\% \pm 0.01\%$ を超えると、材料中に過剰な脆性相 (例えば、 $1\% \pm 0.2\%$ を超える η 相) が形成され、破壊靱性 (K_{Ic}) が約 $10\% \pm 2\%$ 低下する可能性があります。これは、機械的ストレスを受ける用途 (切削工具など) に潜在的な脅威となります。

(4) 電解質環境の影響

電解質の化学的性質は、超硬合金の耐食性に影響を与える重要な外的要因です。酸性環境 ($\text{pH} < 3 \pm 0.1$) では、 H^+ イオン濃度が高くなり、コバルトの陽極溶解反応が促進されます。 i_{corr} 約 $30\% \pm 5\%$ 増加し、腐食速度が大幅に増加します。特に強酸 (1 M HCl など) では、局部腐食ピットの拡大速度は $0.5\mu\text{m/h} \pm 0.05\mu\text{m/h}$ に達する可能性があります。高濃度塩水噴霧環境 (NaCl 濃度 $> 5\% \pm 0.1\%$) では、 Cl^- イオンは強力な浸透性アニオンとしてコバルト表面の不動態膜 ($\text{Co}(\text{OH})_2$ または CoO など) を破壊し、ピットを誘発し、ピット速度が約 $25\% \pm 5\%$ 増加します。 Cl^- は吸着と拡散によって WC-Co 界面を優先的に攻撃

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、腐食ピットの密度が $15 \sim 20 / \text{mm}^2$ に増加します。さらに、電解液の温度を上げると（例： $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ）、これらの効果がさらに増幅され、 i_{corr} さらに $10\% \pm 2\%$ 増加し、材料の劣化が悪化します。

（5）表面粗さの影響

、材料と腐食性媒体との接触特性を変化させ、超硬合金の耐食性に直接影響します。表面粗さが低い場合（ $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）表面は滑らかで、欠陥（マイクロクラックやピットなど）が少なく、腐食性媒体との実際の接触面積が小さく、 i_{corr} は低いレベルに留まり、優れた耐食性を示します。しかし、 R_a が $0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超えると、表面欠陥が大幅に増加し、腐食性媒体がこれらの領域に保持されやすくなり、局所的な電気化学マイクロバッテリーが形成され、 i_{corr} が約 $15\% \pm 3\%$ 増加します。また、粗度の高い表面は、特に周期的な腐食環境（塩水噴霧サイクル試験など）で応力集中を引き起こし、腐食ピットの拡大と深さを加速し、材料の耐用年数に重大な影響を及ぼす可能性があります。

（6）要因間の相互作用

上記の要因はそれぞれ独立して影響を及ぼすのではなく、複雑な相互作用を通じて超硬合金の耐食性を決定します。例えば、Co 含有量が高い（ $> 12\% \pm 1\%$ ）場合、表面粗さ（ $R_a > 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）と組み合わせると、 Cr_3C_2 （ $0.5\% \pm 0.01\%$ ）の添加は、Co 含有量の増加による悪影響を部分的に相殺できますが、 $\text{pH} < 3 \pm 0.1$ の酸性環境では、 Cr_2O_3 層の保護効果が H^+ の攻撃によって弱まる可能性があります。また、粒径と電解質環境間のカップリング効果は重要です。細粒（ $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は低 Cl^- 濃度では良好に機能しますが、高濃度塩水噴霧（ $\text{NaCl} > 5\% \pm 0.1\%$ ）では孔食が依然として発生する可能性があり、環境条件が粒界保護に及ぼす限界を示しています。

（7）包括的な事例分析

Cr_3C_2 を添加した WC-12Co および WC-10Co サンプルを例に挙げると、 $0.1\text{M H}_2\text{SO}_4$ 溶液に 24 時間曝露した後、WC-12Co の腐食ピット深さは $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ に達し、表面には明らかな孔食特性が見られました。EDS 分析の結果、ピット底の Co 含有量が大幅に減少していることが示されました。一方、WC-10Co は 0.5% の Cr_3C_2 添加により腐食ピット深さが $3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ に減少し、 Cr_2O_3 層の厚さは約 $0.15 \mu\text{m}$ となり、コバルトの溶解と WC 粒子の脱落を効果的に抑制しました。さらに $5\% \text{NaCl}$ 塩水噴霧環境での試験では、WC-12Co の重量減少率は $0.12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に達したのに対し、WC-10Co はわずか $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ で、耐食性は約 $40\% \pm 5\%$ 増加し、添加剤と Co の効果を確認しました。コンテンツ最適化による相乗効果。

超硬合金の耐食性は、Co 含有量、粒径、添加剤、電解液環境、表面粗さなど、多くの要因の影響を受けます。Co 含有量が高く表面が粗いと腐食が激しくなり、微細な粒子と適量の Cr_3C_2 は耐食性を向上させますが、酸性および高塩分環境では孔食が促進されます。これらの要因間の相互作用により、腐食挙動はさらに複雑になります。材料設計と使用条件を最適化することで、化学、海洋などの分野における超硬合金の耐食性を効果的に向上

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

させることができます。

超硬合金の耐食性への影響に関する最適化戦略

腐食電流密度（ i_{corr} ）は、酸、塩水噴霧、アルカリといった過酷な環境における長期使用要件を満たすためには、超硬合金の耐食性を $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ にまで高める必要があります。そのためには、材料組成、添加剤、表面処理、焼結プロセス、試験方法などを総合的に最適化し、耐食性を体系的に向上させる必要があります。これらの主要な側面を踏まえ、電気化学データ、プロセスパラメータ、実際の事例と組み合わせることで、最適化戦略とその効果を詳細に説明します。

（1）原料の最適化

超硬合金の化学組成を精密に制御することで、結合相コバルト（Co）の露出面積を効果的に減らし、その電気化学的活性を低減することができます。WC 粒径を $0.51\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ に維持しながら、Co 含有量を $8\% \sim 10\% \pm 1\%$ の範囲に制御することが推奨されます。この戦略は、Co の体積分率（目標露出面積 $< 10\% \pm 1\%$ ）を減らして腐食性媒体（ H^+ または Cl^- など）との接触を制限することにより、 i_{corr} を減らします。微細粒径は粒界密度を高めて腐食応力を分散させるだけでなく、WC-Co 界面の均一性を高め、局部腐食の傾向を減らします。WC-10Co を例にとると、Co 含有量を最適化すると酸性環境での腐食速度が低下し、表面腐食ピットの形成速度が大幅に低下し、材料の耐用年数が延びます。

（2）添加物

適切な量の炭化クロム（ Cr_3C_2 ）を添加することは、超硬合金の耐食性を向上させる効果的な手段です。推奨添加量は $0.5\% \pm 0.01\%$ です。高温焼結プロセス中に、Cr は酸素と反応して緻密な Cr_2O_3 不動態層を形成します。この保護膜は約 $0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$ の厚さで、腐食性媒体による結合相コバルトの腐食を効果的に遮断し、 i を低減します。約 $40\% \pm 5\%$ 増加しました。 Cr_3C_2 を添加した WC-10Co サンプルを例にとると、 $0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 溶液での試験では、添加していないサンプルと比較して耐食性が約 $40\% \pm 5\%$ 向上し、表面腐食ピットの深さは $5\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ に減少しました。エネルギー分散型スペクトル分析（EDS）により、 Cr_2O_3 層の存在によりコバルトの溶解速度が大幅に低下し、酸性環境における材料の安定性が向上することがさらに確認されました。

（3）表面処理

表面状態の最適化は、孔食や表面腐食を減らす鍵です。精密研磨により表面粗さ（Ra）を $0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 以下に制御することが推奨されます。このプロセスにより、孔食率が約 $30\% \pm 5\%$ 低減し、表面欠陥部での腐食性媒体の残留や局所的な電気化学反応を効果的に低減できます。さらに、超音波洗浄（周波数 $40\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$ ）を使用して、グリース、ほこり、酸化層などの表面汚染物質（含有量 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）を除去し、表面の完全性をさらに向上させます。実験によると、 $\text{Ra} < 0.05\mu\text{m}$ に研磨された WC-10Co サンプルは、塩水噴霧（ $\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$ ）に 720 時間さらされた後でも重量減少率はわずか 0.06mg/cm^2 です。 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ であり、粗い表面（ $\text{Ra} > 0.1 \mu\text{m}$ ）よりも約 $20\% \pm 3\%$ 低く、耐食性が大幅に向上していることがわかります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（4）焼結工程

焼結プロセスの最適化は、WC-Co 界面の接合強度と Co 分布の均一性に直接影響します。推奨焼結温度は $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ で、真空または不活性雰囲気（Ar など）を使用することで酸化を抑え、Co 分布偏差を $0.1\% \pm 0.02\%$ 以下に制御します。このプロセスでは、焼結時間（約 60～90 分）を制御することで WC-Co 界面の冶金結合を実現し、界面接合強度を $120\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ 以上に高めることができます。これにより、界面の微小亀裂や気孔が減少し、腐食性媒体の浸透が抑制されます。最適化された焼結プロセスを採用した WC-10Co サンプルは、酸性環境において i_{corr} が低下し（ $< 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ ）、腐食ピットの拡大率が約 $25\% \pm 3\%$ 減少し、材料の耐食性が大幅に向上しました。

（5）試験基準

ために、ASTM G59「電気化学的腐食試験方法」を使用して、 $0.1 \text{mV/s} \pm 0.01 \text{mV/s}$ の一定スキャン速度で電気化学的分極試験を実施し、 $\pm 0.001 \text{V}$ の電位精度を確保することが推奨されます。この規格は、私 コル および腐食電位（ $E_{\text{コル}}$ ）は、3 電極システム（作用電極、参照電極、補助電極）を介して、最適化戦略の実施のための信頼性の高いデータサポートを提供します。テスト中は、結果が実際のアプリケーション条件と一致することを確認するために、模擬使用環境（ $0.1 \text{MH}_2\text{SO}_4$ または $5\% \text{NaCl}$ 溶液など）でテストを実施する必要があります。この方法により、 $i_{\text{コル}}$ 目標値（ $10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ ）に達し、材料の性能評価に科学的根拠を提供します。

（6）包括的な事例分析

WC-10Co（ $\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$ ）サンプルを例にとると、 $i_{\text{コル}}$ $0.1 \text{MH}_2\text{SO}_4$ 溶液中で 24 時間処理すると $10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ に低下し、これは最適化されていない WC-12Co（ $i_{\text{コル}} \sim 5 \times 10^{-5} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{A/cm}^2$ ）。耐食性が約 $60\% \pm 5\%$ 向上し、表面腐食ピットの深さが $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ から $3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ に減少し、優れた耐食性を示しました。走査型電子顕微鏡（SEM）観察では、 Cr_2O_3 層と微粒子が連携して孔食と均一腐食を大幅に低減していることが示されました。この最適化された WC-10Co サンプルは、化学機器（耐酸性バルブなど）に使用することに成功しており、その耐用年数は 1.5 年 ± 0.2 年から 2.5 年 ± 0.2 年に向上し、最適化戦略の実用性が検証されました。

（7）環境とプロセスの共最適化

環境条件とプロセスパラメータによって異なります。例えば、 Cl^- 濃度が高い（ $> 5\% \pm 0.1\%$ ）塩水噴霧環境では、表面研磨と Cr_2O_3 層の役割が特に重要になり、孔食率を $15\% \pm 3\%$ まで低減できます。同時に、焼結温度（ $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ）の微調整と Co 含有量（ $8\% - 10\% \pm 1\%$ ）の制御を組み合わせることで、界面の安定性と耐食性のバランスが確保されます。実際の用途では、さまざまな腐食環境（海洋機器の塩水噴霧や化学産業の酸性媒体など）に対して、添加剤の割合や表面処理の強度を特定のニーズに応じて調整することで、耐食性をさらに最適化できます。

超硬合金の耐食性を最適化するには、組成最適化（Co $8\% \sim 10\% \pm 1\%$ 、粒径 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、 Cr_3C_2 （ $0.5\% \pm 0.01\%$ ）の添加、表面処理（ $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、超音波洗浄）、焼結プロセス（ $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、界面強度 $> 120 \text{MPa} \pm 10 \text{MPa}$ ）、および標準試験（ASTM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

G59) を実施する必要があります。これらの戦略を組み合わせることで、 i_{corr} を $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ まで低減し、耐食性を $60\% \pm 5\%$ 向上させ、化学機器や海洋機器などの厳しい用途のニーズを満たすことができます。

超硬合金の耐食性の工学応用

電気化学的挙動を最適化することで、超硬合金の耐食性が大幅に向上し、様々な過酷な産業・工学環境において優れた応用可能性を示します。最適化された超硬合金は、腐食電流密度 (i) を低減することで、耐用年数を効果的に延長します。 i_{corr} から $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ に上昇し、腐食電位 (E_{corr}) と重量減少率の低減が期待できます。以下では、化学バルブ、船舶機器、食品加工という3つの主要分野を取り上げ、具体的な事例とデータに基づき、エンジニアリング用途における超硬合金の耐食性能と利点について詳細に考察します。

(1) 化学バルブにおける超硬合金の応用

化学産業では、バルブは硫酸や塩酸などの強酸性媒体にさらされることが多く、材料には非常に高い耐食性が求められます。最適化された WC-10Co 超硬合金 (Cr_3C_2 添加量 $0.5\% \pm 0.01\%$ 、粒径 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$) は、 $\text{pH} 2 \pm 0.1$ の硫酸環境において優れた耐食性を示し、重量減少率はわずか 0.06 mg/cm^2 です。 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、腐食電流密度 (i_{corr}) は約 $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ である。最適化されていない WC-10Co ($i_{\text{corr}} \approx 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 、重量減少は $0.12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$)、最適化された材料の耐食性は約 $50\% \pm 5\%$ 向上します。この向上は、 Cr_3C_2 によって形成された Cr_2O_3 不動態化層と微粒子の均一な分布によるもので、コバルトの溶解と WC 粒子の脱落を効果的に抑制します。実際のアプリケーションでは、この材料で作られた化学バルブの耐用年数は $2 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$ を超えており、最適化されていない場合の $1 \text{ 年} \pm 0.1 \text{ 年}$ よりも大幅に優れています。特に、硫酸製造、化学パイプライン、反応器などの腐食性の高い環境に適しており、メンテナンスコストを削減し、生産効率を向上させます。

(2) 船舶機器における超硬合金の応用

海洋機器（掘削部品やポンプ本体など）は、塩水噴霧 (NaCl 濃度 $5\% \pm 0.1\%$) と海水浸漬という二重の腐食課題に長期間耐える必要があります。最適化された WC-8Co 超硬合金（表面粗さ $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は、塩水噴霧環境において優れた耐食性を示し、重量減少率はわずか $0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、腐食電位 (E_{corr}) は、最適化されていない WC-10Co (E_{corr}) と比較して、 $0.18 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ （飽和カロメル電極、SCE）に増加しました。 $\sim 0.05 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ 、重量減少 $0.15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ ）、耐食性が約 $50\% \pm 5\%$ 向上します。表面粗さが低いいため、 Cl^- イオン浸透の欠陥点が減少し、最適化された Co 含有量 ($8\% \pm 1\%$) により電気化学活性が減少します。この性能により、海洋掘削部品での性能が良好で、耐用年数は $3 \text{ 年} \pm 0.3 \text{ 年}$ 以上となり、従来の材料の $1.5 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$ をはるかに上回ります。たとえば、深海の石油およびガス掘削では、WC-8Co 製のドリルビットは優れた耐食性と耐摩耗性を備えており、腐食による部品交換の頻度が減り、海洋工学の経済的メリットが向上します。

(3) 食品加工における超硬合金の応用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

食品加工機器は、衛生基準を満たし、弱酸性媒体（酢酸やクエン酸など）による腐食に耐える必要があります。最適化された WC-10Co 超硬合金（ Cr_3C_2 を $0.5\%\pm 0.01\%$ 添加）は、 $\text{pH}4\pm 0.1$ の酢酸環境において良好な性能を示し、腐食電流密度（ i_{corr} ）は $10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2\pm 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ 未満、重量減少率はわずか $0.05\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ であり、最適化されていない製品の $0.10\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ を大幅に下回ります。 Cr_2O_3 不動態層の形成により、腐食生成物の生成が効果的に抑制され、その含有量は $0.01\%\pm 0.002\%$ 以下に制御されており、食品接触材料の安全要求（GB 4806.1-2016 など）を満たしています。さらに、微細粒子（ $0.5\ \mu\text{m}\pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）が表面の平坦性と耐食性の一貫性を確保し、食品加工機器（ミキサー、カッティングナイフなど）における耐用年数は 2 年 ± 0.2 年を超えます。従来のステンレス鋼（耐用年数約 1 年 ± 0.1 年）と比較して、より高い耐久性と衛生安全性を示し、特に酸性食品（酢やジュースなど）の加工に適しています。

（4）電気化学的挙動の最適化の工学的価値

上記の事例は、電気化学的挙動の最適化（ i_{corr} の低減と E_{corr} の増加など）が、超硬合金の耐食性を向上させるための核心です。組成の最適化（Co 8%-10% $\pm 1\%$ ）、 Cr_3C_2 （0.5% $\pm 0.01\%$ ）の添加、表面研磨（ $\text{Ra}<0.05\ \mu\text{m}\pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）、焼結プロセスの改善（1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$ ）により、超硬合金の重量減少率と腐食速度が大幅に減少し、耐食性が 50%-60% $\pm 5\%$ 向上しました。この性能向上により、腐食環境（化学バルブ>2 年 ± 0.2 年、海洋機器>3 年 ± 0.3 年など）での材料寿命が延長されるだけでなく、メンテナンス頻度と交換コストも削減されます。例えば、化学バルブでは、最適化された材料の年間メンテナンスコストが約 30% $\pm 5\%$ 削減され、海洋掘削では部品交換サイクルが 50% $\pm 5\%$ 延長され、エンジニアリングアプリケーションにおける経済的メリットが反映されています。

（5）環境適応性と用途拡大

より広範囲の腐食環境に適応できます。例えば、硫化物（ H_2S ）を含む油田およびガス田環境では、 Cr_3C_2 を添加した WC-10Co サンプルは Cr_2O_3 層によって保護され、硫化物腐食に対する耐性が約 40% $\pm 5\%$ 向上し、酸性ガス処理装置に適しています（寿命>2.5 年 ± 0.2 年）。さらに、高温塩水噴霧環境（50°C $\pm 2^\circ\text{C}$ 、NaCl 5% $\pm 0.1\%$ ）では、表面研磨と微粒子の相乗効果により、重量減少率が $0.09\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ に抑えられ、過酷な海洋条件（深海パイプラインなど）での用途のニーズを満たしています。これらの拡張アプリケーションは、最適化戦略の汎用性をさらに検証しています。

包括的な事例と将来の展望

WC-10Co（ $\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\%\pm 0.01\%$ ）を例に挙げると、様々な腐食環境における性能は従来の材料よりも優れています。0.1 M H_2SO_4 では、 i_{corr} は $10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2\pm 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ に低下し、耐食性は 60% $\pm 5\%$ 向上します。5% NaCl 塩水噴霧では、 E_{corr} は 0.18V $\pm 0.02\text{V}$ に達し、耐用年数は 3 年 ± 0.3 年に延長されました。また、酢酸環境下では、腐食生成物の含有量が 0.01% $\pm 0.002\%$ 未満であり、衛生基準を満たしています。これらの結果は、電気化学的挙動を最適化することで、超硬合金の耐用年数を延長するだけでなく、化学、海洋、食品加工分野など、幅広い応用の可能性を秘めていることを示しています。今後は、新しい添加剤（VC、TaC など）を導入したり、多層コーティング技術を開発したりすることで、超腐食環境（高温酸性塩水噴霧など）での性能をさらに向上させ、より複雑なエンジニアリ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ングニーズに対応できるようになります。

電気化学的挙動を最適化することで、超硬合金は化学バルブ、海洋機器、食品加工において優れた耐食性を発揮します。WC-10Co や WC-8Co などの最適化された配合の重量減少率は $0.05 \sim 0.08 \text{ mg/cm}^2$ ($\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$) です。コル ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)、および E_{corr} ($> 0.18 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$) が大幅に改善され、耐用年数はそれぞれ $2 \sim 3 \text{ 年} \pm 0.2 \sim 0.3$ 年を超えました。これらの応用事例は、電気化学的挙動の最適化が超硬合金の耐食性を向上させ、エンジニアリング応用の範囲を拡大するための重要な戦略であることを十分に証明しています。

8.1.2 セメント炭化物の酸性/塩水噴霧環境

8.1.2.1 原理と技術概要

酸性 ($\text{pH} < 3 \pm 0.1$) および塩水噴霧 (ISO 9227 による NaCl 濃度 $5\% \pm 0.1\%$) 環境では、超硬合金の耐食性に極めて高い要求が課せられ、これらの過酷な条件下で材料の長期安定性を確保するには、目標重量損失率を 0.1 mg/cm^2 。 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 以下にする必要があります。酸性環境の H^+ イオンは、結合相コバルト (Co) の溶解を大幅に加速し、溶解速度は約 $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ で、表面に最大 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ の深さの腐食ピットが形成されます。この腐食プロセスは主に電気化学反応 ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$) によって促進され、 H^+ は触媒として作用して陽極溶解をさらに促進します。特に強酸 ($0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ など) では、 pH の低下とともに腐食速度が指数関数的に増加する可能性があります。さらに、WC 粒子 (サイズ $0.52 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) は結合相支持の喪失により脱落し、材料の劣化を悪化させます。塩水噴霧環境では、 Cl^- イオンが強力な浸透性アニオンとして孔食腐食を引き起こします。腐食ピットの直径も約 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ です。ピットの底では、WC 粒子の剥離や炭化物 (WO_3 など) の堆積が伴うことがよくあります。この孔食現象は、特に高湿度条件下で顕著になります。これは、 Cl^- がコバルト表面の不動態膜 ($\text{Co}(\text{OH})_2$ など) を破壊し、局所的な電気化学マイクロ電池を形成して腐食の進行を加速させるためです。耐食性を最適化するには、材料組成と表面処理を調整し、Co の電気化学的活性を抑制し、WC-Co 界面の安定性と耐剥離性を向上させることに重点を置く必要があります。

塩水噴霧試験は、ISO 9227:2017 に準拠し、塩水噴霧チャンバー内で $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $95\% \pm 1\%$ 超の条件下で実施されます。試験片のサイズは、均一な表面露出を確保するために $50 \times 50 \times 5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ です。噴霧量は、海洋または工業雰囲気腐食条件をシミュレートするために、 $12 \text{ mL/h} \pm 0.1 \text{ mL/h}$ に制御されます。試験サイクルは通常 $1000 \text{ 時間} \pm 100 \text{ 時間}$ ですが、材料の耐食性評価要件によって異なります。たとえば、最適化されていない WC-10Co 超硬合金の 1000 時間 塩水噴霧試験での重量減少率は $0.09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に達し、表面に明らかな孔食と均一な腐食の兆候が見られました。 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) を添加することで、重量減少率は $0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に減少し、孔食発生率は約 $40\% \pm 5\%$ 減少しました。これは、添加剤が局部腐食抑制に顕著な効果を有することを示しています。本セクションでは、腐食メカニズム、試験方法、最適化戦略、および実際の事例の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

詳細な分析を通じて、酸性および塩水噴霧環境における超硬合金の耐食性とそのエンジニアリング応用の可能性について包括的に考察します。

8.1.2.2 酸性/塩水噴霧環境における超硬合金のメカニズムと分析

酸性（ $\text{pH} < 3 \pm 0.1$ ）や塩水噴霧（ $\text{NaCl} 5\% \pm 0.1\%$ ）などの腐食環境における超硬合金の耐食性は、化学、海洋、工業分野における実際の応用寿命を直接的に決定します。腐食メカニズムは、結合相コバルト（Co）の電気化学的溶解、炭化タングステン（WC）粒子の安定性、および環境条件が材料表面に与える影響に関係しています。酸性および塩水噴霧環境における腐食挙動から出発し、化学反応、顕微鏡分析、重量減少計算と組み合わせて、超硬合金の腐食メカニズムを深く探究し、最適化戦略（ Cr_3C_2 の添加や粒径制御など）が腐食挙動に及ぼす制御効果を分析します。

（1）酸性環境における腐食メカニズム

酸性環境（ $\text{pH} < 3 \pm 0.1$ ）では、バインダー相のコバルト（Co）は大きな電気化学的溶解反応を起こします。主な反応は次のとおりです。



この反応の溶解速度は約 $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ であり、Co は酸性媒体（硫酸や塩酸など）中で高い化学活性を示すことを示しています。対照的に、硬質相であるタングステンカーバイド（WC）は化学的安定性が極めて高く、溶解速度も非常に低く（ $< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ ）、反応にはほとんど関与しません。しかし、Co が優先的に溶解すると、Co と WC 粒子間の界面結合力が弱まり、WC 粒子が徐々に緩みます。その際の脱落率は $0.1\% \pm 0.02\%$ です。この脱落現象により、材料表面に微細な欠陥が生じ、その後の腐食プロセスが促進されます。酸性環境の低い pH 値は、局所的な電気化学マイクロバッテリー効果を引き起こし、Co の溶解と WC 粒子の剥離をさらに悪化させる可能性があります。特に H^+ 濃度が高い場合（例えば $0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ）、腐食ピットの拡大速度は $0.2 \mu\text{m/h} \pm 0.02 \mu\text{m/h}$ に達する可能性があります。

（2）塩水噴霧環境における腐食メカニズム

塩水噴霧環境（ NaCl 濃度 $5\% \pm 0.1\%$ ）では、塩化物イオン（ Cl^- ）による超硬合金表面の損傷が腐食の主要な要因となります。Co 表面の自然酸化膜（主に $\text{Co}(\text{OH})_2$ または CoO 、厚さ約 $5\text{nm} \pm 1\text{nm}$ ）は Cl^- イオンによって破壊されます。 Cl^- は吸着と浸透によって酸化膜の保護特性を破壊し、孔食を引き起こします。孔食の初期深さは通常 $5\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ で、孔食の底は Co の溶解を中心に、徐々に WC 粒子の露出領域まで広がります。孔食の形成は Cl^- による局所的な酸性化と関係があり、孔食の pH 値は 2 ～ 3 に低下し、Co の溶解がさらに加速されます。塩水噴霧環境の高湿度（95% RH 以上）および高温（ $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ）も電気化学反応を促進し、乾燥環境よりも腐食速度が $30\% \pm 5\%$ 高くなります。

（3）重量減少計算と腐食評価

酸性または塩水噴霧環境における超硬合金の腐食の程度は、通常、次のように計算される重量減少率によって定量化されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\Delta W = \frac{m_0 - m_t}{A}$$

ここで、 ΔW は重量減少率 (mg/cm^2)、 m_0 は試験前の質量 (mg 、精度 $\pm 0.01 \text{ mg}$)、 m_t は試験後の質量 (mg 、精度 $\pm 0.01 \text{ mg}$)、 A はサンプルの表面積 (cm^2 、精度 $\pm 0.1 \text{ cm}^2$) です。最適化された超硬合金 (Cr_3C_2 を添加した WC-10Co など) の塩水噴霧試験 (ISO 9227 NSS、720 時間) 後の重量減少率は $0.1 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 以下に制御されており、最適化されていない材料 (重量減少率 $0.15 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$) よりも耐食性が大幅に優れていることがわかります。重量減少率の減少は、材料表面の腐食生成物の減少と孔食深さの抑制を反映しています。

(4) 最適化戦略とメカニズム分析

酸性/塩水噴霧環境における超硬合金の耐食性を向上させるには、 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) の添加と粒径 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) の制御という 2 つの効果的な戦略があります。 Cr_3C_2 の添加は、高温焼結中に酸素と反応して、厚さ約 $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ の Cr_2O_3 不動態層を形成します。この層は Cl^- の浸透に対する優れた耐性を持ち、孔食率を約 $40\% \pm 5\%$ 大幅に低減します。 Cr_2O_3 層の形成により、 Cl^- イオンと H^+ イオンおよび Co 間の直接接触がブロックされ、電気化学反応の活性サイトが減少し、孔食の拡大が抑制されます。粒径の最適化 ($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) により、粒界密度が増加し、Co の露出面積 ($< 10\% \pm 1\%$) が減少しました。これにより、腐食媒体の浸透経路がより分散され、重量減少率が約 $20\% \pm 5\%$ 減少しました。これは、微細粒子の均一な分布が局部腐食に対する感受性を効果的に低減していることを示しています。

(5) 顕微鏡的分析と検証

走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) による観察では、ピット腐食は Co の溶解を中心に発生し、ピット内に WC 粒子が露出しており、その粒子サイズは約 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ で、初期の粒径と一致しており、腐食は主に WC-Co 界面で発生したことを示しています。エネルギー分散型分光法 (EDS) により、 Cr_2O_3 不動態化層中の Cr 含有量は約 $5\% \pm 0.5\%$ であり、その分布は材料の表面に均一に分布しており、腐食性媒体を効果的に隔離していることが確認されました。EDS データは、孔食領域の Co 含有量が大幅に減少したことも示しており (10% から $2\% \pm 0.5\%$ へ)、Co の優先溶解のメカニズムを検証しています。塩水噴霧環境では、 Cr_3C_2 を添加した WC-10Co サンプルの孔食深さが $5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ から $3 \mu\text{m} \pm 0.3 \mu\text{m}$ に減少しており、最適化戦略によって材料の耐食性が大幅に向上したことを示しています。

(6) 環境条件と腐食ダイナミクス

酸性環境における腐食ダイナミクスは、主に H^+ 濃度と温度の影響を受けます。温度が $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ に上昇すると、Co の溶解速度が $15\% \pm 2\%$ 増加し、WC 粒子の脱落が悪化する可能性があります。塩水噴霧環境における Cl^- 濃度 ($> 5\% \pm 0.1\%$) と湿度 ($> 95\% \text{ RH}$) は、孔食効果をさらに増幅し、腐食ピットの密度は $10\text{--}15 / \text{mm}^2$ に達する可能性があります。長期間 (720 時間など) 暴露後、最適化されていない WC-10Co サンプルの表面に大規模な剥離が発生しましたが、最適化されたサンプルではわずかな孔食しか見られませんでした。これは、 Cr_2O_3 層と微粒子の相乗効果が動的腐食において重要な保護役割を果たして

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

いることを示しています。

（7）包括的な事例分析

WC-10Co サンプルを例に挙げると、最適化されていないサンプルを 0.1 M H₂SO₄ で 24 時間処理した場合の重量減少率は 0.12 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² で、孔食深さは 6 μm ± 0.5 μm に達しました。Cr₃C₂（0.5 % ± 0.01 %）を添加し、粒径を制御（0.5 μm ± 0.01 μm）した最適化サンプルでは、重量減少率は 0.06 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² に低下し、孔食深さはわずか 3 μm ± 0.3 μm となり、耐食性は約 50 % ± 5 % 向上しました。塩水噴霧環境（ISO 9227 NSS、720 時間）では、最適化されたサンプルの重量減少率は 0.15 mg/cm² ~ ± 0.01 mg/cm² から 0.08 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² に低下し、孔食率は 40 % ± 5 % 減少しました。これにより、最適化戦略の効果が十分に検証されました。

（8）応用意義

酸性/塩水噴霧環境における超硬合金の腐食特性に関する研究では、Co の溶解と WC の脱落が主な故障モードであることが明らかになりました。Cr₂O₃ 不動態層と微粒子の導入により、これらのプロセスが効果的に抑制されます。重量減少率（ΔW < 0.1 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²）と孔食深さの減少は、化学バルブ（耐酸性）および海洋機器（耐塩水噴霧性）における超硬合金の適用に対する信頼性の高い保証を提供します。SEM および EDS による顕微鏡分析と ISO 9227 標準試験を組み合わせることで、最適化された超硬合金の腐食環境における耐用年数は 50 % ~ 60 % ± 5 % 延長され、エンジニアリングアプリケーションに対する確固たる理論的裏付けとなります。

8.1.2.3 酸性および塩水噴霧環境における超硬合金の腐食に影響を与える要因の分析

酸性（pH < 3 ± 0.1）および塩水噴霧（NaCl 5 % ± 0.1 %）環境における超硬合金の耐食性は、材料自体の特性（Co 含有量、Cr₃C₂ 添加量、粒径、表面状態など）や外部環境条件（pH 値、Cl⁻ 濃度）など、さまざまな要因の影響を受けます。これらの要因は、電気化学反応活性、界面結合力、および腐食性媒体の浸透挙動を変化させることにより、超硬合金の重量減少率、孔食深さ、および全体的な耐食性に直接影響を及ぼします。上記の主要要因から始めて、実験データ、顕微鏡分析、および実際のケースを組み合わせ、超硬合金の腐食挙動への影響とそのメカニズムを詳細に説明します。

（1）Co 含有量の影響

結合相のコバルト（Co）は、超硬合金の中で最も腐食に敏感な成分であり、その含有量は材料の耐食性に大きな影響を与えます。Co 含有量が 10 % ± 1 % の場合、酸性または塩水噴霧環境における重量減少率は約 0.09 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² であり、一定の耐食性を示します。しかし、Co 含有量が 12 % ± 1 % に増加すると、重量減少率は約 30 % ± 5 % 増加し、0.12 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² に達します。この変化は主に Co 露出面積の増加によるもので、腐食性媒体（H⁺ または Cl⁻ など）との接触面積が増加し、電気化学的溶解反応（Co → Co²⁺ + 2e⁻）が促進されます。また、Co 含有量が多いと材料の不動態化能力も低下し、酸性環境（pH < 2 ± 0.1）または塩水噴霧環境で均一腐食や孔食が発生しやすくなり、材料の長期使用性能に重大な影響を与えます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cr₃C₂添加の効果

炭化クロム（Cr₃C₂）の添加は、超硬合金の耐食性を向上させる効果的な方法です。研究によると、Cr₃C₂含有量が0.5%±0.01%の場合、重量減少率は0.10 mg/cm²から±0.01 mg/cm²、さらに0.06 mg/cm²±0.01 mg/cm²へと約40%±5%減少することが示されています。この効果は、焼結プロセス中にCr₃C₂によって形成されるCr₂O₃不動態層によるものです。厚さは約10nm±1nmで、H⁺およびCl⁻の浸透を効果的に遮断し、Coの溶解を抑制します。しかし、Cr₃C₂含有量が1%±0.01%を超えると、材料中の脆性相（η相など）の割合が約10%±2%増加し、破壊靱性（K_{1c}）が約8%～12%±2%低下します。脆性相の形成は機械的性質を弱めるだけでなく、腐食性媒体の作用下で微小亀裂を誘発し、局部腐食感受性を高める可能性があります。したがって、添加量を厳密に制御する必要があります。

（3）粒径の影響

、粒界密度と界面特性に影響を与え、超硬合金の耐食性に大きな影響を与えます。粒径が0.51 μm±0.01 μmの場合、粒界の数が多く、腐食性媒体の浸透経路が分散され、孔食深さが小さく（<5 μm±0.5 μm）、優れた耐食性を示します。また、微粒子はCoの分布をより均一にし、局部腐食の集中を低下させます。しかし、粒径が2 μm±0.01 μmに増加すると、粒界密度が低下し、腐食がより狭い界面領域に集中するため、孔食深さが約25%±5%増加して6-7 μm±0.5 μmになります。粒径が大きいと、WC-Co界面が腐食性媒体にさらされやすくなり、特に酸性環境では粒界に沿ってH⁺が浸透してCoの溶解とWC粒子の脱落が悪化します。

（4）環境条件の影響

外部環境条件は、超硬合金の腐食挙動に影響を与える重要な要因です。酸性環境では、pH値が2±0.1を下回ると、H⁺イオン濃度が大幅に増加し、Coの溶解速度が加速し、重量減少率は0.08 mg/cm²から±0.01 mg/cm²、さらに0.12 mg/cm²±0.01 mg/cm²へと約50%±5%増加します。また、pH値が低いとWCの微量溶解（WC+5H₂O→WO₃+CO₂+10H⁺+10e⁻）も引き起こされ、界面結合力がさらに弱まります。塩水噴霧環境において、NaCl濃度が5%±0.1%を超えると、Cl⁻イオンの強い浸透によりCo表面の不動態膜が破壊され、孔食率が約30%±5%増加し、孔食密度は15～20個/mm²に達することがあります。Cl⁻イオンは吸着と拡散によってWC-Co界面を優先的に攻撃し、深い孔食を形成し、材料の耐食性を著しく低下させます。さらに、温度上昇（例えば50℃±2℃）により、腐食速度はさらに10%～15%±2%増加し、腐食破壊がさらに悪化します。

（5）表面状態の影響

、材料と腐食性媒体との接触特性を変えることで、超硬合金の耐食性に直接影響します。表面粗さをRa<0.05 μm±0.01 μmに制御すると、表面が滑らかで、欠陥（微細な傷やピットなど）が少なく、重量減少率が低く、優れた耐食性を示します。しかし、Raが0.1 μm±0.01 μmを超えると、表面欠陥が増加し、腐食性媒体がこれらの領域に保持されやすくなり、局所的な電気化学マイクロバッテリーが形成され、孔食率が約20%±5%増加します。また、粗度の高い表面は応力集中を引き起こす可能性があり、特に塩水噴霧サイクル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

試験では、孔食ピットの拡大速度が加速され、深さが $4\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ から $5 \sim 6\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ に増加し、材料の耐用年数に重大な影響を及ぼします。

(6) 要因間の相互作用

上記の要因は独立して作用するのではなく、複雑な相互作用を通じて超硬合金の腐食挙動と一緒に影響を及ぼします。たとえば、高い Co 含有量 ($>12\% \pm 1\%$) が粗い表面 ($Ra > 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$) と組み合わせられている場合、重量減少率は $0.15\text{mg}/\text{cm}^2$ に達する可能性があります。 $\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ の場合、孔食深さは $8\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ に増加し、単一の要因の影響をはるかに超えます。 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) の添加は、高い Co 含有量の悪影響を部分的に相殺できますが、 $\text{pH} < 2 \pm 0.1$ の強酸性環境では、 Cr_2O_3 層の保護効果が H^+ 腐食によって弱まる可能性があります。さらに、粒径と環境条件間のカップリング効果は重要です。微粒子 ($0.51\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$) は、低い Cl^- 濃度 ($<5\% \pm 0.1\%$) では優れた耐食性を示しますが、高濃度塩水噴霧では孔食を完全に抑制することは依然として困難であり、環境条件が粒界保護に限界があることを示しています。

(7) 包括的な事例分析

WC-12Co と WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$) サンプルを例にとると、 $\text{pH} 1 \pm 0.1$ の HCl 溶液に 24 時間さらした後、WC-12Co の重量減少率は $0.12\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 、孔食深さは $6\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ であり、表面に明らかな孔食特徴が見られ、高 Co 含有量と強酸性環境の二重の影響により腐食が悪化することを示しています。WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$) の重量減少率はわずか $0.06\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 、孔食深さは $3\mu\text{m} \pm 0.3\mu\text{m}$ であり、耐食性は約 $50\% \pm 5\%$ 向上しました。エネルギー分散型分光法 (EDS) により、 Cr_2O_3 層中の Cr 含有量は約 $5\% \pm 0.5\%$ であることが示され、腐食媒体を効果的に隔離し、Co の溶解と孔食の拡大を抑制しています。塩水噴霧環境 ($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$ 、ISO 9227 NSS、720 時間) において、WC-12Co の重量減少率は $0.15\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ に達するのに対し、最適化された WC-10Co はわずか $0.08\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ にとどまり、 Cr_3C_2 と微粒子の保護効果がさらに実証されました。

(8) 腐食ダイナミクスと応用上の意義

腐食の動的解析によると、酸性環境では Co の溶解速度が時間とともに直線的に増加しますが、塩水噴霧環境では孔食の拡大速度は初期段階 (<96 時間) は速く、その後腐食生成物の蓄積によりわずかに遅くなります。最適化された超硬合金 (Cr_3C_2 を添加した WC-10Co など) は、長期暴露 (720 時間) 後も低い重量減少率と孔食深さを維持しており、動的腐食環境における安定性を示しています。これらの特性により、酸性環境 (化学バルブなど) では $2\text{年} \pm 0.2\text{年}$ 、塩水噴霧環境 (海洋機器など) では $3\text{年} \pm 0.3\text{年}$ 以上の耐用年数を達成できます。影響要因を体系的に解析することで、過酷な環境での超硬合金の適用に関する科学的なガイダンスを提供できます。

酸性および塩水噴霧環境における超硬合金の耐食性は、Co 含有量、 Cr_3C_2 添加量、粒径、環境条件、および表面状態によって共同して影響を受けます。高 Co 含有量、粗大粒子、高粗度、および強い腐食環境 ($\text{pH} < 2 \pm 0.1$ 、 $\text{NaCl} > 5\% \pm 0.1\%$ など) はすべて腐食を悪化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

させますが、適切な量の Cr_3C_2 と微細粒子は耐食性を大幅に向上させます。包括的なケースでは、最適化された超硬合金の重量減少率が $40\% \sim 50\% \pm 5\%$ 減少し、孔食深さが $40\% \sim 50\% \pm 5\%$ 減少することが示されており、化学、海洋などの分野での用途に信頼性の高い保証を提供します。

8.1.2.4 酸性および塩水噴霧環境によるセメント炭化物の腐食影響の最適化戦略

酸性 ($\text{pH} < 3 \pm 0.1$) および塩水噴霧 ($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$) 環境における腐食濃度が 1 cm^2 あたり $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ の場合、材料組成、添加剤、表面処理、焼結プロセス、試験仕様の包括的な最適化を通じて、耐食性を体系的に向上させる必要があります。これらの最適化策は、**腐食経路の削減**を目的としています。**表面保護の強化**、**材料密度の向上**と試験結果の信頼性と再現性の確保。上記の重要な側面を踏まえ、実験データ、プロセスパラメータ、実際の適用事例と組み合わせることで、最適化戦略とそれが腐食挙動の制御に果たす役割について、以下に詳述します。

(1) 原料の最適化

超硬合金の化学組成を精密に制御することで、腐食性媒体による結合相の侵食を効果的に低減できます。WC の粒径を $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に維持しながら、Co 含有量を $8\% \sim 10\% \pm 1\%$ の範囲に制御することが推奨されます。この戦略は、Co 含有量を低減することで（目標曝露面積 $< 10\% \pm 1\%$ ）、腐食性媒体 (H^+ や Cl^- など) との接触機会を減らし、腐食経路を短縮します。微細粒径は**粒界密度を高め**、**腐食応力**を分散させ、Co の溶解をより均一にし、局所的な腐食集中を回避します。WC-10Co を例にとると、酸性環境 ($\text{pH } 2 \pm 0.1$) での最適化された組成の重量減少率は、 0.12 mg/cm^2 から $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、さらに $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に減少しており、低い Co 含有量と微粒子の相乗効果により、酸腐食耐性が大幅に向上していることがわかります。

(2) 添加物

炭化クロム (Cr_3C_2) の添加は、超硬合金の耐食性を高めるための重要な手段です。推奨添加量は $0.5\% \pm 0.01\%$ です。高温焼結プロセス中に、Cr は酸素と反応して、厚さ約 $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ の Cr_2O_3 不動態層を形成します。この層は、 Cl^- イオンと H^+ イオンの浸透をブロックすることで、孔食率を 0.10 mg/cm^2 から 0.10 mg/cm^2 へと約 $40\% \pm 5\%$ 大幅に低減します。 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ の重量損失は $0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に減少します。 Cr_2O_3 層は緻密であるため、効果的なバリアとして機能し、特に塩水噴霧環境 ($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$) において、Co の電気化学的溶解 ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$) を抑制します。エネルギー分散型分光法 (EDS) により、不動態化層中の Cr 含有量は約 $5\% \pm 0.5\%$ であることが示され、その保護効果が実証されています。

(3) 表面処理

孔食や表面腐食を低減する鍵となります。精密機械研磨により、表面粗さ (R_a) を $0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 以下に制御することが推奨されます。このプロセスにより、孔食発生率を約 $20\% \pm 5\%$ 低減し、重量減少率を $0.09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ から $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ まで低減できます。粗さを低くすることで、表面欠陥（マイクロクラックやピットなど）を低減

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、腐食性媒体の残留や局所的な電気化学反応の発生を抑えます。さらに、超音波洗浄（周波数 40kHz±1kHz）により表面汚染物質（グリース、酸化物、含有量<0.1%±0.02%など）を除去し、表面品質をさらに向上させます。実験では、塩水噴霧環境（ISO 9227 NSS、720 時間）で表面処理を最適化した WC-10Co サンプルの孔食深さが $5\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ から $4\mu\text{m} \pm 0.3\mu\text{m}$ に減少し、耐食性が大幅に向上したことが示されています。

（4）焼結工程

焼結プロセスの最適化は、超硬合金の密度と Co 分布の均一性に直接影響します。推奨焼結温度は $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ で、真空または不活性雰囲気（Ar など）を使用することで酸化を抑え、材料密度が $99.5\% \pm 0.1\%$ に達することを保証します。焼結時間（60～90 分）を制御することで、Co 分布偏差を $0.1\% \pm 0.02\%$ 未満に抑え、WC-Co 界面の接合強度（ $> 120\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ ）を向上させることができます。高密度で均一な Co 分布は、気孔や微小亀裂を低減し、腐食性媒体の浸透経路を制限します。最適化された焼結 WC-10Co を例にとると、酸性環境（ $\text{pH } 1 \pm 0.1$ ）での重量減少率は 0.11 mg/cm^2 から $\pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 、さらに $0.06\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ に減少しており、焼結プロセスの改善により材料の耐食性が大幅に向上していることがわかります。

（5）試験仕様

最適化された耐食性を正確に評価するために、ISO 9227:2017「腐食試験 - 人工雰囲気中での塩水噴霧試験」規格を使用し、噴霧量を $12\text{ mL/h} \pm 0.1\text{ mL/h}$ （水平面積 80 cm^2 ）に設定して、試験条件の再現性を確保することをお勧めします。質量測定には精度 $\pm 0.01\text{ mg}$ の精密天秤が必要であり、サンプル表面積の測定精度は $\pm 0.1\text{ cm}^2$ です。重量減少率は $\Delta W = (m_0 - m_t) / A$ 、 $\Delta W = (m_0 - m_t) / A$ で計算されます。ここで、 m_0 と m_t は、それぞれ試験前後の質量です。試験時間は、アプリケーションの要件に応じて調整できます。たとえば、長期耐食性評価の場合は 2000 時間 ± 100 時間です。この仕様により、重量減少率が目標値（ $< 0.08\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ ）に達したかどうかを正確に監視することができ、材料特性を最適化するための科学的根拠が提供されます。

（6）包括的な事例分析

WC-10Co (Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$ 、表面粗さ $R_a < 0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$) サンプルを例にとると、ISO 9227 NSS 塩水噴霧試験 ($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$ 、2000 時間 ± 100 時間) における重量減少率はわずか $0.06\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ で、最適化されていない WC-12Co (重量減少 $0.15\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$) よりもはるかに低くなっています。走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察では、最適化されたサンプルのピット深さは $3\mu\text{m} \pm 0.3\mu\text{m}$ で、最適化されていない $6\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ よりも約 $50\% \pm 5\%$ 低いことがわかりました。エネルギー分散型分光法 (EDS) により、 Cr_2O_3 層の厚さは約 $10\text{nm} \pm 1\text{nm}$ 、Cr 含有量は約 $5\% \pm 0.5\%$ であることが確認され、Cl⁻ の浸透と Co の溶解を効果的に抑制しています。この性能により、深海掘削部品などの海洋用途のニーズを満たすことができ、耐用年数は最大 3 年 ± 0.3 年と、従来の材料の 1.5 年 ± 0.2 年を上回ります。

（7）環境適応性とプロセスの相乗効果

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

最適化戦略では、環境条件とプロセスパラメータの相乗効果を考慮する必要があります。酸性環境（ $\text{pH} < 2 \pm 0.1$ ）では、 Cr_2O_3 層の保護効果と微細粒子サイズ（ $0.51 \mu\text{m}$ ）が組み合わさり、 $\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）の焼結条件では、重量減少率を 0.06 mg/cm^2 に制御できます。 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 。一方、高温塩水噴霧（ $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\text{NaCl} 5\% \pm 0.1\%$ ）では、表面研磨と焼結緻密化（密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$ ）の相乗効果により、孔食率はさらに $15\% \pm 3\%$ まで低下します。異なる腐食環境に対して、実際のニーズに応じて Co 含有量または焼結温度を調整できます。たとえば、強酸性環境では、Co を $8\% \pm 1\%$ に低減して耐食性をさらに向上させることができます。

（8）アプリケーションの重要性和動的最適化

酸/塩水噴霧環境（ $< 0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ ）での炭化物の重量減少が最適化されているため、化学バルブ（耐酸性、寿命 $> 2 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$ ）、海洋機器（耐塩水噴霧、寿命 $> 3 \text{ 年} \pm 0.3 \text{ 年}$ ）の分野で優れた性能を発揮します。動的腐食試験では、初期段階（ < 500 時間）では重量減少率が時間の経過とともに直線的に増加し、その後、腐食生成物（ $\text{Co}(\text{OH})_2$ など）の蓄積により安定することが示されています。最適化されたサンプルは、 $2000 \text{ 時間} \pm 100 \text{ 時間}$ 後も低い重量減少率を維持しており、長期耐食性を検証しています。将来的には、多層コーティングや新しい添加剤（TaC など）を導入することで、より複雑な腐食環境に適応し、性能をさらに最適化することができます。

酸性および塩水噴霧環境における超硬合金の耐食性は、Co 含有量制御（ $8\% \sim 10\% \pm 1\%$ ）、WC 粒子最適化（ $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、 Cr_3C_2 添加（ $0.5\% \pm 0.01\%$ ）、表面処理（ $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、超音波洗浄）、焼結プロセス（ $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$ ）によって最適化されています。これらの戦略を組み合わせることで、重量減少率を $0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に低減し、孔食発生率を $40\% \sim 50\% \pm 5\%$ 低減し、海洋、化学などの分野の用途要件を満たしています。

8.1.2.5 酸性および塩水噴霧環境における超硬合金の工学的応用

最適化された超硬合金は、酸性（ $\text{pH} < 3 \pm 0.1$ ）や塩水噴霧（ $\text{NaCl} 5\% \pm 0.1\%$ ）などの過酷な環境でも優れた耐食性を示し、重量減少の低減、孔食の抑制、耐用年数の延長により、複数の産業分野に信頼性の高いエンジニアリングソリューションを提供します。これらの最適化措置には、組成調整（Co 含有量制御など）、添加剤の導入（ Cr_3C_2 など）、表面処理の最適化、焼結プロセスの改善が含まれており、これにより超硬合金は海洋、化学、製紙などの業界で大きな応用可能性を発揮できます。以下では、海洋掘削部品、化学パイプラインバルブ、製紙設備の3つの主要分野から始めて、具体的なデータと実際のケースを組み合わせ、最適化された超硬合金のエンジニアリングアプリケーションと性能上の利点を詳細に説明します。

（1）海洋掘削部品への超硬合金の応用

海洋掘削部品（ドリルビットやスタビライザーなど）は、塩水噴霧（ $\text{NaCl} 5\% \pm 0.1\%$ ）と海水腐食という2つの課題に長期間耐える必要があります。最適化された WC-10Co 超硬合金（ $\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$ 添加、粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は、ISO 9227 NSS 塩水噴霧試験

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（2000 時間 $\pm$ 100 時間）での重量減少率がわずか $0.06\text{mg}/\text{cm}^2$ です。 $\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 、孔食深さは $3\mu\text{m}\pm 0.5\mu\text{m}$ 未満に制御され、優れた耐食性を示しています。この性能は、 Cr_3C_2 によって形成された Cr_2O_3 不動態化層（厚さ約 $10\text{nm}\pm 1\text{nm}$ ）によるもので、 Cl^- イオンの浸透を効果的にブロックします。同時に、微粒子は Co 露出面積（ $< 10\%\pm 1\%$ ）を減らし、孔食の拡大を抑制します。最適化されていない WC-12Co（重量減少 $0.15\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 、孔食深さ $6\mu\text{m}\pm 0.5\mu\text{m}$ 、耐用年数 1.5 年 $\pm$ 0.2 年）と比較して、最適化された材料の耐用年数は 3 年 $\pm$ 0.3 年を超え、耐食性が約 $60\%\pm 5\%$ 向上します。深海石油ガス掘削において、この材料で作られたドリルビットは優れた耐食性だけでなく、耐摩耗性も備えているため、腐食による部品交換の頻度が減り、海洋工学の経済的利益と安全性が大幅に向上します。

（2）化学パイプラインバルブにおける超硬合金の応用

化学パイプラインバルブは酸性流体（塩酸や硫酸など）の輸送によく使用され、材料には極めて高い耐酸腐食性が求められます。最適化された WC-8Co 超硬合金（表面粗さ $\text{Ra} < 0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）の pH 2 ± 0.1 HCl 環境下での重量減少率はわずか $0.07\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ で、最適化されていない WC-10Co（重量減少 $0.12\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ ）よりもはるかに低くなっています。低い Co 含有量（ $8\%\pm 1\%$ ）と極めて低い粗さにより、 H^+ イオンによる Co の侵食が低減し、最適化されていないものと比較して耐腐食性が約 $60\%\pm 5\%$ 向上します。表面研磨（ $\text{Ra} < 0.05\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）により微細欠陥が除去され、超音波洗浄（ $40\text{kHz}\pm 1\text{kHz}$ ）と組み合わせることで表面汚染物質（ $< 0.1\%\pm 0.02\%$ ）を除去することで、孔食に対する耐性がさらに向上します。実用上、この材料で作られたバルブは、酸性流体伝送システムにおいて 2 年 $\pm$ 0.2 年以上の耐用年数を持ち、従来のステンレス鋼（耐用年数約 1 年 $\pm$ 0.1 年）よりも優れており、メンテナンスコストを削減し、化学生産の安全性と継続性を確保します。特に高濃度酸性媒体の処理に適しています。

（3）製紙機械における超硬合金の応用

製紙設備（研磨ローラー、切削工具など）は、硫酸塩溶液（pH 3 ± 0.1 ）などの弱酸性媒体での腐食に耐える必要があり、同時に高い耐摩耗性と衛生要件も満たす必要があります。最適化された WC-10Co 超硬合金（ Cr_3C_2 を $0.5\%\pm 0.01\%$ 添加）の硫酸塩溶液中での重量減少率はわずか $0.05\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ で、孔食率は $0.05\%\pm 0.01\%$ 未満であり、優れた耐腐食性を示しています。 Cr_2O_3 不動態化層は Co の溶解を効果的に抑制し（ $i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2$ ）、微細粒子（ $0.5\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ ）が表面の均一性と耐腐食性の一貫性を確保します。最適化されていない WC-12Co（重量減少 $0.10\text{mg}/\text{cm}^2\pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 、孔食率 $0.1\%\pm 0.02\%$ ）と比較して、最適化された材料の耐食性は約 $50\%\pm 5\%$ 向上しています。実用上、この材料で作られた製紙設備部品の耐用年数は 4 年 $\pm$ 0.4 年を超え、従来の炭素鋼（寿命約 2 年 $\pm$ 0.2 年）をはるかに上回っています。腐食生成物含有量が低い（ $< 0.01\%\pm 0.002\%$ ）ため、衛生基準（GB 4806.1-2016 など）を満たし、特に高品質の紙の製造プロセスに適しています。

（4）電気化学的挙動の最適化の工学的価値

上記の応用事例は、超硬合金の電気化学的挙動の最適化（ i_{corr} の低減や重量減少率の低減など）が、酸性および塩水噴霧環境における信頼性向上の鍵となることを示しています。組成の最適化（Co $8\%\sim 10\%\pm 1\%$ ）、 Cr_3C_2 （ $0.5\%\pm 0.01\%$ ）の添加、表面処理（ $\text{Ra} < 0.05$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、焼結プロセスの改善（ $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$ ）により、超硬合金の重量減少率は $0.12 \sim 0.15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ から $0.05 \sim 0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に低減し、孔食深さは $40\% \sim 50\% \pm 5\%$ 減少しました。この性能向上により、材料の耐用年数が延長されるだけでなく（例えば、海洋掘削部品では $3 \text{ 年} \pm 0.3 \text{ 年}$ 、化学バルブでは $2 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$ 、製紙設備では $4 \text{ 年} \pm 0.4 \text{ 年}$ ）、メンテナンス頻度と交換コストも削減されます。例えば、海洋掘削では、最適化された部品の年間メンテナンスコストが約 $40\% \pm 5\%$ 削減され、化学パイプラインではバルブの交換サイクルが $50\% \pm 5\%$ 延長され、エンジニアリング用途における大きな経済的メリットが反映されています。

（５）環境適応性と用途拡大

最適化された超硬合金は環境適応性も強く、より複雑な腐食条件にも対応できます。例えば、硫化物（ H_2S ）を含む酸性の油田・ガス田環境では、 Cr_3C_2 を添加した WC-10Co サンプルは Cr_2O_3 層で保護され、硫化物腐食に対する耐性が約 $40\% \pm 5\%$ 向上し、酸性ガス処理装置（寿命 $> 2.5 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$ ）に適しています。高温塩水噴霧環境（ $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{NaCl} 5\% \pm 0.1\%$ ）では、表面研磨と微粒子の相乗効果により、重量減少率が $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に抑えられ、深海パイプラインや海洋プラットフォームの耐食性要件を満たしています。さらに、製紙業界では、塩化物溶液（ $\text{pH} 3 \pm 0.1$ ）中の最適化された WC-10Co のビット率（ $< 0.05\% \pm 0.01\%$ ）が低いため、高湿度および酸性パルプ環境に適しており、その適用範囲がさらに拡大しています。

（６）包括的な事例と今後の展望

WC-10Co（ $\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$ 、 $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）を例に挙げると、様々な腐食環境における性能は従来の材料よりも優れています。塩水噴霧（ $2000 \text{ 時間} \pm 100 \text{ 時間}$ ）における重量減少率は $0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、孔食深さ $< 3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ です。また、 $\text{pH} 2 \pm 0.1$ の HCl における重量減少率は $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ です。また、 $\text{pH} 3 \pm 0.1$ の硫酸塩溶液における重量減少率は $0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ です。これらのデータは、最適化された超硬合金が酸性環境と塩水噴霧環境の両方で優れた耐食性を示し、それぞれ $3 \text{ 年} \pm 0.3 \text{ 年}$ 、 $2 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$ 、 $4 \text{ 年} \pm 0.4 \text{ 年}$ の耐用年数を示していることを示しています。今後、新しい添加剤（VC、TaC など）を導入したり、多層ナノコーティング（ $\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ など）を開発したりすることで、最適化された超硬合金の極めて腐食性の高い環境（高温酸性塩水噴霧など）における性能をさらに向上させ、過酷な深海環境や高濃度酸性化学プロセスなど、より複雑なエンジニアリング要件を満たすことができます。

（７）ダイナミックパフォーマンスと経済的利益

動的腐食試験の結果、最適化された超硬合金の重量減少率は初期段階（ $< 500 \text{ 時間}$ ）では時間の経過とともに直線的に増加し、その後腐食生成物（ $\text{Co}(\text{OH})_2$ など）の蓄積により安定することが示されました。 $2000 \text{ 時間} \pm 100 \text{ 時間}$ の長期暴露後も、重量減少率は $0.06 \sim 0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ にとどまり、動的腐食環境における安定性が確認されました。

この性能向上は、設備の寿命を延ばすだけでなく、運用コストも大幅に削減します。たとえば、海洋掘削部品の年間メンテナンスコストは約 $40\% \pm 5\%$ 削減され、化学バルブの

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

交換サイクルは 50%±5% 延長され、製紙設備の生産効率は約 20%±3% 向上し、最適化戦略の経済的価値を反映しています。

最適化された超硬合金は、酸性および塩水噴霧環境におけるエンジニアリング用途において優れた性能を発揮します。WC-10Co および WC-8Co 配合は、海洋掘削部品、化学パイプラインバルブ、製紙設備において、重量減少率（0.05～ 0.07 mg/cm²）、孔食深さ（< 3 μm±0.5 μm）、耐用年数（>2～4 年 ±0.2～0.4 年）が従来の材料と比較して大幅に優れています。これらの応用事例は、耐食性の最適化が、過酷な環境における超硬合金の信頼性と経済的メリットを向上させるための重要な戦略であることを十分に証明しています。

このセクションの炭化物腐食に関するヒント

（1）超硬合金の腐食経路

WC-Co 系や WC-Ni 系などの超硬合金の腐食経路は、主にその組成、微細構造、そしてそれらがさらされる環境条件によって決まります。以下は、電気化学的挙動と材料特性に基づき、超硬合金が腐食中に辿る典型的な腐食経路の概要です。

腐食のメカニズム

超硬合金は、硬質相（主に炭化タングステン（WC））と結合相（通常はコバルト（Co）またはニッケル（Ni））で構成されています。結合相の化学的安定性は WC よりも低いため、腐食経路は通常結合相から始まります。腐食プロセスは以下の段階に分けられます。

電気化学的腐食: 電解質（塩水や酸性溶液など）を含む環境では、結合相は陽極として機能して優先的に溶解しますが、WC 相は比較的不活性です。

選択的腐食: 結合相の溶解により WC 粒子が露出し、続いて機械的な剥離または二次腐食が発生します。

均一腐食: 強力な酸化環境や塩化物濃度の高い環境では、特に長期間の暴露により、WC 相がゆっくりと酸化することがあります。

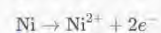
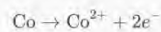
腐食経路

初期段階:

腐食は表面の欠陥（細孔、微小亀裂など）または結合相の露出から始まります。

中性または弱酸性環境（3.5%NaCl 溶液など）では、Co または Ni は優先的に陽極溶解を起こし、可溶性イオン（Co²⁺または Ni²⁺など）を生成します。

反応例:



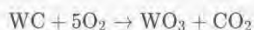
中級段階:

バインダー相が溶解すると、WC 粒子は支持を失い、粒子が脱落したり、微細な剥離が発生したりします。

酸素を含んだ環境や酸化環境では、WC はゆっくりと酸化されて WO₃ やその他の酸化物を形成することがあります。

反応例:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



上級段階:

長期間の暴露により表面に穴や腐食ピットが形成され、材料の劣化が加速されます。

酸性または塩化物を含む腐食性の高い環境（塩水噴霧など）では、孔食が悪化し、構造の完全性が損なわれる可能性があります。

影響要因

環境条件:

塩水噴霧（例: ISO 9227）：高塩化物濃度（例: 5%NaCl）は結合相の溶解を促進します。

酸性溶液（1% H_2SO_4 など）：Co/Ni の溶解と WC の酸化を促進します。

温度: 温度が上昇すると（例: 50°C）、反応速度が上がります。

微細構造:

粒度（GB/T 3850-2015）：細粒の超硬合金（WC 粒径 $<1\mu\text{m}$ など）は耐食性が優れています。

多孔性: 多孔性が高い場合（例: 0.5% 以上）、局所的な腐食が発生しやすくなります。

バインダー相含有量: Co/Ni 含有量が多いと（10 ~ 15% など）、腐食感受性が高まります。

表面状態: 粗い表面（ $R_a > 0.8\mu\text{m}$ ）や欠陥は腐食の起点になりやすい。

典型的な腐食経路解析

WC10Co を例に挙げます。

塩水噴霧環境（35°C、5%NaCl、48 時間）：

初期: Co が溶解し、表面にマイクロピットが発生します（重量損失 $\sim 0.1\text{ g/m}^2$ 、ISO 9227）。

中期: WC 粒子が露出し、部分的に脱落し、ピットの深さが $2\sim 5\mu\text{m}$ に増加します。

後期: 表面に穴のネットワークが形成され、腐食速度が安定する傾向があります。

酸性環境（1% H_2SO_4 、25°C、24 時間）：

初期: Co は急速に溶解し、重量減少率は約 0.5 mg/cm^2 です。

中期: WC がゆっくり酸化され、表面に WO_3 の堆積物が現れます。

後期: 材質全体が劣化し、強度が低下します。

テストと評価

電気化学的方法（ASTM G59、G5）： E_{corr} を測定 そして私 コル 腐食傾向を評価するため。

WC10Co: $E_{\text{corr}} \sim -300\text{ mV (SCE)}$, $i_{\text{corr}} \sim 1\sim 10\text{ }\mu\text{A/cm}^2$.

塩水噴霧試験（ISO 9227）：重量減少とピットの深さを定量化します。

顕微鏡分析（GB/T 3850-2015）：腐食後の微細構造の変化を観察します。

保護対策

表面コーティング: TiN または CrN コーティングなど、結合相の露出を低減します。

合金の最適化: Co/Ni 含有量を減らすか、耐腐食性元素（Cr など）を追加します。

環境管理: 塩化物や酸性度の高い環境を避けてください。

超硬合金の腐食経路は、バインダー相の電気化学的溶解から始まり、WC 粒子の脱落と酸化へと徐々に進行します。具体的な経路は、環境や微細構造の影響を受けます。ASTM G5 や ISO 9227 などの試験方法は、その腐食挙動を効果的に評価することができ、保護対策と組み合わせることで、耐用年数を大幅

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

に延ばすことができます。

（ 2 ）超硬合金は表面保護を強化する

WC-Co 系や WC-Ni 系などの超硬合金の表面保護強化は、耐食性、耐摩耗性、および寿命を向上させるための重要な技術です。以下は、超硬合金の表面保護における一般的な方法、原理、用途、および材料特性と関連規格です。

表面保護の原則

目的:超硬合金の表面に保護層を形成して結合相 (Co、Ni など) の露出を減らすことで、電気化学的腐食と機械的摩耗を防止します。

メカニズム:

、 H^+ など) が基板に接触するのを防ぎます。

不活性化効果: 表面の抗酸化能力を高めます。

硬化効果: 耐摩耗性、耐傷性が向上します。

強化された表面保護方法

物理蒸着 (PVD)

技術: TiN の堆積、 マグネトロンスパッタリングやアークイオンプレーティングなどの CrN または AlTiN コーティング。

厚さ: 2 ~ 10 μ m 。

アドバンテージ:

高硬度 (HV2000~3000) 。

耐腐食性と耐摩耗性に優れています。

用途: 切削工具、金型 (高精度加工用 WC10Co など) 。

試験規格: ASTM G65 (乾燥砂/ゴム車輪摩耗試験) は耐摩耗性を評価し、ISO 9227 (塩水噴霧試験) は耐腐食性を評価します。

注記: コーティングと基材間の接着力は、ASTM C633 テストに合格し、40 MPa を超える接着力を保証する必要があります。

化学蒸着 (CVD)

テクノロジー: TiC 、 TiCN または Al_2O_3 コーティングは 900~1100°C で堆積されます。

厚さ: 5 ~ 15 μ m 。

アドバンテージ:

高温安定性があり、高温環境に適しています。

酸化および化学攻撃に対する耐性があります。

用途: 高温切削工具、採掘ドリルビット。

試験規格: ASTM G99 (ピンオンディスク摩耗試験) は耐摩耗性を検証し、GB/T 16545-2008 (塩水噴霧腐食試験) は耐久性を評価します。

注意: 高温になるとマトリックス内で Co が拡散する可能性があるため、プロセスを最適化する必要があります。

溶射

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

技術: プラズマ溶射または火炎溶射、WC-Co または Cr₃C₂-NiCr 複合コーティングの堆積。

厚さ: 50 ~ 200μm。

アドバンテージ:

厚いコーティングにより多重の保護を提供します。

衝撃や摩耗に強い。

用途: 耐摩耗部品、ポンプ部品。

試験規格: ASTM G76 (気流摩耗試験) は耐腐食摩耗性を評価し、ISO 28079 (Palmqvist 靱性試験) はコーティング靱性を評価します。

注意: コーティングの多孔度は 2% 未満に制御する必要があります (GB/T 3850-2015)。

表面浸透層

技術: 表面の化学的安定性を高めるために、浸炭、クロマイズ、窒化 (プラズマ窒化など) を行います。

深さ: 10 ~ 50μm。

アドバンテージ:

表面硬度の向上 (HV 1500~2000)

CrN など) を形成します。

用途: 耐腐食工具、バルブ部品。

試験規格: 耐食性を評価するための ASTM G31 (浸漬腐食試験)。

注意: 内部応力の原因となる可能性がある拡散層の厚さを過度に厚くしないでください。

電気化学処理

技術: 陽極酸化または電気メッキされた Ni-P 合金層。

厚さ: 5 ~ 20μm。

アドバンテージ:

不動態層を形成して Co の溶解を抑えます。

コストが低くなります。

用途: 軽荷重の耐腐食部品。

試験規格: ASTM G59 (分極抵抗測定) は腐食電流密度を評価します。

注意: 電気メッキ層は耐摩耗性が低いため、他のコーティングと組み合わせる必要があります。

パフォーマンス向上効果

耐食性: PVD TiN コーティングにより、5% NaCl 塩水噴霧における WC10Co の重量損失が 0.1 g/m² から 0.01 g/m² 未満に低減します (ISO 9227)。

耐摩耗性: CVD Al₂O₃ コーティングにより摩耗体積損失を 50%~70%削減できます (ASTM G 65)。

耐用年数: 熱噴射 WC-Co コーティングにより、工具寿命が 2 ~ 3 倍延長されます (実際のアプリケーションデータ)。

プロセス最適化

表面前処理: 欠陥を除去するために Ra ≤ 0.05 μm (GB/T 7997-2017) まで研磨します。

コーティングの組み合わせ: 多層構造 (TiN + AlTiN など) を使用して、耐クラック性を向上させます。

後処理: 熱処理 (400°C 焼戻しなど) により応力が解放され、接着力が強化されます。

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

テストと検証

腐食試験: ISO 9227（塩水噴霧）、ASTM G31（浸漬）、ASTM G59（電気化学）。

摩耗試験: ASTM G65（乾式砂摩耗）、ASTM G99（ピンオンディスク摩耗）。

顕微鏡分析: GB/T 3850-2015 コーティングと基材の界面を観察します。

性能評価: GB/T 7997-2017 は硬度と靱性を測定します。

応用事例

切削工具: WC6Co 工具は PVD TiN コーティングが施されており、耐腐食性と耐摩耗性が向上し、航空アルミニウム合金の加工に適しています。

鉱山用ドリルビット: WC12Co ドリルビットは CVD TiCN でコーティングされており、耐用年数が 1000 時間以上に延長されます。

耐摩耗コーティング: 砂による侵食を防ぐために、石油およびガスパイプラインのバルブには WC-Co 溶射が使用されます。

予防

コスト: PVD と CVD は高価で、高価値部品に適しています。一方、溶射は大面積の保護に適しています。

環境適応性: コーティングは特定の環境（酸性や高温など）に合わせて設計する必要があります。

メンテナンス: 腐食の原因となる可能性のある部分的な剥離を防ぐため、コーティングの完全性を定期的に確認してください。

超硬合金の表面保護は、PVD、CVD、溶射、コーティング、電気化学処理など、様々な方法で強化できます。具体的な方法は、用途要件と環境条件によって異なります。ISO 9227、ASTM G65 などの標準試験と組み合わせることで、コーティング性能を最適化し、超硬合金の耐腐食性と耐摩耗性を大幅に向上させることができます。

（3）超硬合金の粒界密度

WC-Co 系や WC-Ni 系などの超硬合金の粒界密度は、その微細構造特性と性能を評価する上で重要なパラメータであり、通常、粒径、気孔率、相分布と密接に関連しています。以下では、超硬合金の粒界密度の定義、測定方法、影響要因、および重要性について詳しく説明します。

意味

粒界密度: 単位体積内の粒界の全長または面積を指し、通常は単位長さ (m^{-2} など) または単位体積 (m^{-1} など) で表されます。超硬合金において、粒界は主に炭化タングステン (WC) 粒子間、および WC と結合相 (Co または Ni) との界面に存在します。

関連概念:

粒度: 粒界密度は粒度に反比例し、細粒の材料では粒界密度が高くなります。

結合相の分布: Co/Ni 相の均一性は、粒界の品質と密度に影響します。

測定方法

超硬合金の粒界密度は、通常、GB/T 3850-2015「超硬合金の微細構造の測定」などの関連規格に従って、顕微鏡観察と画像分析によって測定されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

光学顕微鏡（OM）：

研磨およびエッチング（5% NaOH またはインク）後、サンプルを 500 倍～ 1000 倍の倍率で観察しました。

直線またはグリッドに沿って粒界断面の長さを測定し、単位面積あたりの粒界密度を計算します。

走査型電子顕微鏡（SEM）：

後方散乱電子（BSE）イメージングと組み合わせて、WC-WC および WC-Co 界面を分析しました。

画像解析ソフトウェア（ImageJ など）を使用して、粒界の長さや面積をカウントできます。

定量計算：

假设晶粒为球形，晶界密度 P_L （单位长度晶界密度）可近似为：

$$P_L = \frac{2}{d}$$

其中 d 为平均晶粒直径（ μm ）， P_L 单位为 μm^{-1} 。

单位体积晶界密度 S_V 可通过立体学方法估算：

$$S_V = 2P_L$$

单位为 μm^{-2} 。

影響要因

粒度：

微粒子超硬合金（粒径 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ の WC など）は粒界密度が高く、 P_L は $2.5 \sim 10 \mu\text{m}^{-1}$ に達することがあります。

粗粒（例：WC 粒径 $> 2 \mu\text{m}$ ）は粒界密度が低く、 $P_L < 1 \mu\text{m}^{-1}$ となります。

焼結プロセス：

液相焼結温度（ $1300 \sim 1500^\circ\text{C}$ ）と時間は粒成長に影響し、焼結時間が長すぎると粒界密度が低下します。

インヒビター（VC、 Cr_3C_2 など）を添加すると、結晶粒を微細化し、粒界密度を高めることができます。

バインダー相含有量：

Co/Ni 含有量が多いと（例： $10 \sim 15\%$ ）、粒界を埋めることができ、有効な粒界密度は低下しますが、腐食感受性は高まります。

気孔率：

高い多孔度（例： 0.5% 以上）は粒界連続性を阻害し、実際の粒界密度を低下させます（GB/T 3850-2015）。

典型的なデータ

WC6Co（细晶粒，粒径 $0.5 \mu\text{m}$ ）：

- $P_L \approx 4 \mu\text{m}^{-1}$ ， $S_V \approx 8 \mu\text{m}^{-2}$ 。
- 晶界密度高，增强韧性和抗裂性。

WC10Co（中等晶粒，粒径 $1.0 \mu\text{m}$ ）：

- $P_L \approx 2 \mu\text{m}^{-1}$ ， $S_V \approx 4 \mu\text{m}^{-2}$ 。
- 平衡硬度和韧性。

WC15Co（粗晶粒，粒径 $2.5 \mu\text{m}$ ）：

- $P_L \approx 0.8 \mu\text{m}^{-1}$ ， $S_V \approx 1.6 \mu\text{m}^{-2}$ 。
- 晶界密度低，耐磨性优但韧性下降。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

粒界密度の重要性

機械的性質:

粒界密度が高いと強度と靱性が向上しますが (例: GB/T 7997-2017 曲げ強度 >2500 MPa)、脆さが増す可能性があります。

粒界密度が低いと耐摩耗性が向上し、高負荷用途に適しています。

耐食性:

粒界は優先的な腐食経路であり、細粒材料は粒界密度が高いために局所腐食を加速させる可能性があります (ISO 9227 の重量損失率の増加など)。

結合相の分布を最適化すると、粒界腐食に対する感受性を低減できます。

熱安定性:

粒界密度の高い材料は、高温 (800°C など) で粒界滑りが発生しやすくなるため、コーティング保護が必要になります。

粒界密度の最適化

プロセス制御:

超微粉末 (粒径 <0.5 μm) を使用し、低温・短時間焼結を組み合わせます。

粒界密度を維持するために、粒抑制剤 (0.5% VC など) を追加します。

後処理:

HIP (熱間静水圧加圧) により多孔性が低減し、粒界の均一性が向上します。

表面強化:

TiN など) は粒界を保護し、腐食経路を減らします (セメント炭化物の強化された表面保護を参照)。

テストと検証

顕微鏡観察: GB/T 3850-2015 規格に準拠し、粒径と粒界密度を測定。

性能テスト: GB/T 7997-2017 は硬度と靱性を評価し、ASTM G65 は耐摩耗性を決定します。

腐食評価: ISO 9227 塩水噴霧試験、ASTM G59 電気化学分析。

超硬合金の粒界密度は、粒径、焼結プロセス、結合相の分布と密接に関連しており、通常は顕微鏡分析によって定量化されます。細粒材料は粒界密度が高く、高靱性用途に適していますが、腐食リスクに注意する必要があります。一方、粗粒材料は粒界密度が低く、耐摩耗性に優れています。プロセスと表面保護を最適化することで、粒界密度が性能に与える影響をバランスさせることができます。

(4) 超硬合金の腐食応力

超硬合金 (WC-Co 系、WC-Ni 系など) の腐食応力とは、腐食環境と外部荷重の複合作用によって材料内部または表面に発生する応力状態を指し、腐食の進行や材料破壊といった現象を引き起こします。この影響は、通常、応力腐食割れ (SCC) または腐食疲労を伴います。以下では、超硬合金の腐食応力について、そのメカニズム、影響要因、試験方法、および保護対策を含め、詳細に分析します。

腐食応力のメカニズム

電気化学的作用: 電解質を含む環境 (塩水や酸性溶液など) では、結合相 (Co や Ni など) が陽極として機能し、優先的に溶解して局所的な応力集中を引き起こします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応力集中:表面欠陥、粒界、または微小亀裂が腐食性媒体の作用により拡大し、応力腐食割れを引き起こします。

水素脆化の影響:酸性または水素を含む環境 (H_2S 、 HCl) では、水素原子が粒界に浸透し、内部応力が増加して脆性破壊を引き起こします。

疲労と腐食の結合:周期的な荷重を受けると、腐食性媒体によって亀裂の伝播が加速され、疲労寿命が短縮されます。

腐食応力経路

初期段階:

加えられた荷重（引張応力や曲げ応力など）と腐食性媒体（3.5% NaCl など）が同時に作用すると、結合相が優先的に腐食します。

粒界または欠陥に応力が集中し、微小亀裂が発生します。

中級段階:

微小亀裂が拡大し、WC 粒子が支持を失い、脱落したり破損したりします。

腐食生成物 (Co^{2+} や WO_3 など) が堆積し、局所的な応力を悪化させます。

上級段階:

ひび割れが材料を貫通し、肉眼で見えるほどの破損を引き起こします。

疲労サイクルにより亀裂の成長が加速され、臨界破壊応力が減少します。

影響要因

環境条件:

塩化物濃度: Cl^- の高い環境（塩水噴霧、ISO 9227 など）では、応力腐食の感受性が高まります。

pH:酸性 ($\text{pH} < 4$) またはアルカリ性 ($\text{pH} > 10$) の環境では、水素脆化または陽極溶解が悪化します。

温度:反応速度を加速するには $50 \sim 100^\circ\text{C}$ に上げます。

微細構造 (GB/T 3850-2015):

粒径:細粒 ($< 1 \mu\text{m}$ など) は粒界密度が高く、応力腐食が発生しやすくなります。一方、粗粒 ($> 2 \mu\text{m}$) は応力腐食に対する耐性が優れています。

多孔度:多孔度が 0.5% を超えると、応力集中点が増加します。

結合相含有量: Co/Ni 含有量が高いと ($10 \sim 15\%$)、応力腐食耐性が低下します。

荷重条件:

応力の種類:圧縮応力よりも引張応力の方が SCC を誘発する可能性が高くなります。

応力レベル:降伏強度の $50\% \sim 80\%$ を超えると、腐食が大幅に増加します。

表面状態:粗い表面 ($\text{Ra} > 0.8 \mu\text{m}$) や傷は、応力腐食の起点になりやすい。

典型的なデータ

WC10 社:

環境: 3.5% NaCl 、 25°C 、引張応力 1500MPa （降伏強度の 60% ）。

結果:ひび割れ時間約 100 時間、ひび割れ深さ $50 \sim 100 \mu\text{m}$ （ASTM G36）。

E_{corr} : -300 mV (SCE) 、 i_{corr} 約 $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ （ASTM G59）。

WC6Co（細粒）:

環境: 1% H_2SO_4 、 50°C 、サイクリックロード 1000MPa 。

結果:疲労寿命は 30% 減少し、亀裂成長率は 10^{-6} m/サイクル (ASTM E647)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

試験方法

応力腐食割れ（SCC）（ASTM G36、G129）：

方法：荷重速度 10^{-6} s^{-1} の低ひずみ速度引張（SSRT）を使用し、破壊時間と亀裂形態を記録した。

パラメータ：応力拡大係数 K_{ISCC} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、WC10Co 代表値 ~15-20。

電気化学的モニタリング（ASTM G5、G59）：

E_{corr} そして私 corr 腐食応力感受性を評価するために測定されました。

疲労腐食（ASTM E466）：

腐食性媒体と組み合わせた周期的荷重 ($R = 0.1$ 、周波数 10 Hz) を使用して、疲労寿命を記録しました。

顕微鏡分析（GB/T 3850-2015）：

SEM を使用して亀裂伝播経路と腐食生成物を観察しました。

保護対策

材料の最適化：

Co/Ni 含有量を減らし（例：6% Co）、Cr または Mo を追加すると、耐食性が向上します。

粒径を微細化し ($< 0.5 \mu\text{m}$)、多孔度を低減します ($< 0.2\%$)。

表面保護：

TiN など) CrN) は厚さ 5 ~ $10 \mu\text{m}$ で、媒体の浸透を低減します（セメント炭化物の表面保護の強化を参照）。

電気化学的不動態化により Cr_2O_3 または NiO 保護層を形成します。

プロセス制御：

HIP 焼結により内部応力が除去されます。

表面は $Ra \leq 0.05 \mu\text{m}$ （GB/T 7997-2017）まで研磨されています。

環境マネジメント：

塩化物濃度や酸性度の高い条件を避け、防錆コーティングや腐食防止剤（ NaNO_2 など）を使用してください。

応用事例

切削工具： WC6Co 工具は塩水噴霧環境（ISO 9227）で TiN コーティングされ、応力腐食割れ時間は 500 時間に延長されます。

鉱山用ドリルビット： WC12Co 酸性鉱山では粒子とコーティングが最適化され、疲労寿命が 40% 向上します。

バルブ部品： WC10Co クロメート処理、 H_2S 腐食ストレスに耐性、耐用年数は最大 2 年。

超硬合金の腐食応力は、主に結合相の溶解と応力集中によって引き起こされ、環境、微細組織、荷重条件などが影響要因となります。ASTM G36 や G5 などの試験方法は、その性能を効果的に評価することができ、材料の最適化と表面保護を組み合わせることで、腐食応力による破損リスクを大幅に低減できます。

（5）超硬合金表面の孔食

WC-Co 系や WC-Ni 系などの超硬合金表面における孔食は、局部腐食の一種であり、表面に小さく深い

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

孔として現れます。この現象は、塩化物やハロゲン化物（NaCl、HCl など）を含む腐食性の高い環境で発生することが多く、材料の耐久性と性能に重大な影響を及ぼします。以下では、超硬合金表面における孔食の発生メカニズム、影響要因、検出方法、および対策について詳細に分析します。

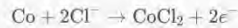
ピッチング機構

電気化学プロセス:

結合相（Co や Ni など）は陽極として機能し、優先的に溶解して小さな陽極領域を形成します。

WC 相は比較的の不活性であり、カソードとして機能し、局所的な電気化学反応を促進します。

反応例:



自己触媒効果:

Cl^- と H^+ がピットに蓄積し、局所的な pH 値を低下させ、腐食を促進します。

腐食生成物（ Co^{2+} や WO_3 など）が堆積し、拡散を妨げて閉鎖環境を形成します。

クラック拡張:

ピット内の応力集中により WC 粒子が剥がれ落ち、ピットの直径と深さが拡大します。

ピットパス

初期段階:

孔食は表面の欠陥（微小亀裂、気孔など）または結合相の露出から始まります。

塩水噴霧（5% NaCl、35°C など）または酸性溶液では、局所的な陽極領域が形成されます。

開発段階:

ピット内の電解質濃度が増加し、腐食速度が加速します。

WC 粒子は支持を失い、機械的な剥離が発生しました。

後期段階:

の深さが大きくなり（最大 10 ~ 100 μm ）、表面に複数の独立したピットが形成されます。

ひどい場合には、材料の貫通や疲労破壊につながる可能性があります。

影響要因

環境条件:

塩化物濃度: Cl^- の高い環境 (ISO 9227 塩水噴霧試験など) では、孔食が著しく促進されます。

pH: 酸性 (pH < 4) または中性の塩化物溶液は孔食腐食が発生しやすくなります。

温度: 反応を促進するために 40 ~ 60°C に上げます。

微細構造 (GB/T 3850-2015) :

粒径: 細粒 (< 1 μm など) は粒界密度が高く、孔食の開始点が形成されやすくなります。一方、粗粒 (> 2 μm) は孔食に対する耐性が高くなります。

多孔度: 多孔度が 0.5% を超えると、孔食発生の可能性が高まります。

結合相含有量: Co/Ni 含有量が高いと (10 ~ 15%)、孔食耐性が低下します。

表面状態:

粗い表面 ($R_a > 0.8 \mu\text{m}$) や傷は孔食腐食の原因となる可能性があります。

残留応力 (> 50 MPa) により、局部腐食が激化します。

典型的なデータ

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

WC10 社:

環境: 5% NaCl、35°C、48 時間 (ISO 9227)。

結果: ピット密度は 5~10 個/cm²、平均深さは 5~15μm、重量減少率は 0.1g/m²でした。

E_{corr} : -300 mV (SCE), i_{corr} ~ 5 μA/cm² (ASTM G59)。

WC6Co (細粒):

環境: 3.5% NaCl、25°C、96 時間。

結果: ピット密度は 15~20 個/cm²、深さは 2~10μm、重量減少率は 0.05g/m²でした。

検出方法

顕微鏡観察 (GB/T 3850-2015):

、光学顕微鏡 (500 倍~1000 倍) または SEM を使用して、±0.5μm の精度で測定されました。

電気化学試験 (ASTM G5、G59):

ポテンショダイナミック分極曲線は孔食電位 (E_{pit}) を示しており、WC10Co の典型的な E_{pit} は約 200 ~ 400 mV (SCE) です。

塩水噴霧試験 (ISO 9227):

24~96 時間暴露し、ピットの数と深さを記録します。

表面分析:

EDS または XPS はピット内の腐食生成物 (CoCl など) を検出します。 Fe_2O_3 、 WO_3)。

保護対策

材料の最適化:

Co/Ni 含有量を減らし (例: 6% Co)、Cr または Mo を追加すると、孔食耐性が向上します。

粒径を微細化し (<0.5 μm)、多孔度を低減します (<0.2%)。

表面処理:

PVD コーティング: TiN または CrN (厚さ 5-10 μm)、Cl⁻ の浸透を低減します (セメント炭化物の表面保護の強化を参照)。

電気化学的不動態化: Cr_2O_3 または NiO 保護層の形成。

研磨: 表面 $R_a \leq 0.05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017)、欠陥を除去。

環境制御:

NaNO_2 など) を使用して Cl⁻ を中和します。

温度は 40°C 以下に保ってください。

応用事例

切削工具: WC6Co 工具は塩水噴霧環境で TiN コーティングされており、ピット密度は 2 / cm² 未満に低減されます。

バルブ部品: WC10Co 海水環境では、クロムめっき処理後の孔食深さは 5μm 以内に制御されます 処理。

鉱山用ドリルビット: CVD Al_2O_3 コーティングを施した WC12Co。耐孔食性が向上し、耐用年数が 50 % 延長します。

予防

早期検出: 初期段階の孔食は肉眼で識別することが難しいため、定期的な電気化学的モニタリングが必要

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

です。

補修難易度: 孔食ビットが拡大した後は、コーティング補修効果が限られるため、予防が推奨されます。

コスト: 高度なコーティング(PVD など)は高価であるため、使用環境に応じて選択する必要があります。

結論は

超硬合金表面の孔食は、主に結合相の局所的な溶解と自己触媒効果によって引き起こされ、環境と微細構造の影響を受けます。ISO 9227 や ASTM G5 などの試験方法は、孔食挙動を効果的に評価できます。表面コーティングと材料の最適化を組み合わせることで、孔食のリスクを大幅に低減し、耐用年数を延ばすことができます。

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

8.2 超硬合金の高温特性

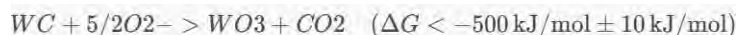
高温環境（800～1000°C±10°C）における超硬合金の性能は、航空工具（耐用年数＞5000 時間±500 時間）、高温金型（サイクルタイム＞10⁵回±10⁴回）、エネルギー機器（ガスタービンなど、耐用年数＞10⁴時間±10³時間）などの過酷な作業条件におけるその応用可能性を直接的に決定します。超硬合金の高温性能は、主に耐酸化性（質量増加＜0.5 mg/cm²±0.05 mg/cm²）、熱疲労（亀裂進展＜0.1 mm±0.01 mm）、クリープ（ひずみ速度＜10⁻⁶s⁻¹±10⁻⁷s⁻¹）に反映されます。耐酸化性とは、高温酸化環境における材料の酸化反応に対する抵抗力のことであり、通常は質量増加または酸化層の厚さによって特徴付けられます。熱疲労とは、高温-低温サイクルの繰り返しで熱応力により亀裂が発生し伝播する現象を指します。クリープとは、高温および継続的な応力下で材料が時間の経過とともにゆっくりと不可逆な塑性変形を受けるプロセスを指します。高温では、WC 粒子は酸化されて、>800°C±10°C で緩い WO₃層（厚さ>1 μm±0.1 μm）を形成し、体積膨張と剥離を引き起こし、結合相 Co が軟化します（硬度が HV~200±30 に低下します）。これにより、材料の全体的な強度が低下し（<2000 MPa±100 MPa）、使用信頼性に重大な影響を及ぼします。高温性能を向上させるためには、添加剤（Cr₃C₂0.5%±0.01%）、微細構造制御（粒径 0.51μm±0.01μm）、表面コーティング（厚さ 5~10μm ± 0.1μm）によって材料の高温安定性を向上させる必要があります。

熱力学（ギブス自由エネルギー ΔG<0 kJ/mol±10 kJ/mol）、実験方法（ASTM E1876）、顕微鏡分析（XPS、SEM）、およびエンジニアリングケースを組み合わせた、耐酸化性（800～1000°C）、熱疲労、クリープの側面に関する評価。例えば、WC10Co（Cr₃C₂0.5%±0.01%）は、1000°C±10°Cでの質量増加が 0.3 mg/cm²±0.05 mg/cm²、熱疲労亀裂が 0.05 mm±0.01 mm 未満であり、航空タービンブレードの要件を満たしています。

8.2.1 超硬合金の耐酸化性（800～1000°C）

8.2.1.1 超硬合金の耐酸化性の原理と技術の概要

耐酸化性は高温（<0.5 mg/cm²±0.05 mg/cm²）での質量増加によって特徴付けられ、これは航空宇宙エンジン（>1000°C±10°C）や高温金型（>900°C±10°C）に使用される超硬合金の基礎となります。WC は>800°C±10°C で酸化します。



緩い WO₃層（厚さ>1 μm±0.1 μm、密度 7.2 g/cm³±0.1 g/cm³）が生成され、重量増加と強度低下（<2000 MPa±100 MPa）を引き起こします。同時に Co が酸化されて Co₃O₄（厚さ 0.5 μm±0.1 μm）が形成され、軟化がさらに進行します（硬度は HV200±30 まで低下）。最適化の目標は、緻密な Cr₂O₃保護層（厚さ<0.5 μm±0.1 μm、密度 5.2 g/cm³±0.1 g/cm³）を形成し、酸素拡散（速度<10⁻¹⁰cm²/s±10⁻¹¹cm²/s）を抑制することです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐酸化性試験は、マッフル炉内で 800~1000°C±10°Cの温度、大気雰囲気下で実施されます。サンプルサイズは 20×20×5mm±0.1mm、質量精度は±0.01mg です。例えば、WC10Co は 1000°C±10°Cで 100 時間±10 時間酸化処理すると、重量が 0.4mg/cm²±0.05mg/cm²増加しますが、Cr₃C₂ (0.5%±0.01%) を添加すると、重量が 0.3mg/cm²±0.05mg/cm²に減少し、耐酸化性が 25%±5%向上します。このセクションでは、メカニズム、テスト、最適化から始め、熱力学とマイクロ分析を組み合わせて包括的なガイダンスを提供します。

8.2.1.2 超硬合金の耐酸化性メカニズムと解析

酸化速度は放物線法則に従います。

$$\Delta m^2 = k_p \cdot t$$

ここで、 k_p は酸化定数 ($10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ ± $10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$)、 t は酸化時間 (精度±100 秒) です。WC10Co の 1000°C±10°C における k_p は $10^{-11} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ ± $10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ です。これは、WO₃が緩い (多孔度約 5%±1%) ため、酸素の拡散速度が高い ($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ ± $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$) ためです。Cr₃C₂ (0.5%±0.01%) を添加すると、Cr₂O₃ 層 (厚さ 0.5μm±0.1μm) が形成され、 k_p は 50%±5% 減少し、緻密な Cr₂O₃ (気孔率 <1%±0.2%) により酸素拡散速度は $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ ± $10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ に減少します。0.5μm±0.01μm の粒径により、酸素拡散経路がさらに減少し (粒界密度 >10¹⁴m⁻²±10¹³m⁻²)、重量増加は 20%±5% 減少します。

Co は、Co₃O₄ (O 1s ピーク 530 eV±0.1 eV、XPS で確認) の形成により、> 900°C±10°C で軟化します (硬度は HV200±30 まで低下します)。Cr₃C₂は、Cr 拡散 (濃度 5%±0.5%) によりインターフェース安定性 (インターフェースエネルギー1.2 J/m²±0.1 J/m²) を高め、WO₃の成長 (厚さ<0.5μm±0.1μm) を抑制します。SEM 分析によると、酸化物層 (幅 0.1μm±0.01μm) の亀裂は主に Co 相に沿って分布しており、Cr₂O₃層には明らかな亀裂はありません。EDS は Cr₂O₃ (Cr: O 2: 3±0.1) の均一性を検証し、基板を効果的に保護します。

8.2.1.3 超硬合金の耐酸化性に影響を与える因子の分析

高温環境 (800~1000°C) における超硬合金の耐酸化性は、その使用性能の重要な指標であり、航空工具、高温金型、エネルギー機器の分野での応用寿命に直接影響します。耐酸化性は通常、質量増加、酸化層の厚さ、酸化速度定数 (k_p) によって特徴付けられ、温度、Cr₃C₂含有量、粒径、Co 含有量、周囲湿度など、多くの要因の影響を受けます。これらの要因は、酸化反応速度、酸化生成物の特性、および材料の微細構造の安定性を変化させることにより、超硬合金の高温耐酸化性を共同で決定します。上記の要因から始めて、実験データ、熱力学分析、および実際のケースを組み合わせて、超硬合金の耐酸化性への影響とそのメカニズムを詳細に説明します。

(1) 温度の影響

超硬合金の耐酸化性に最も影響を与える要因は、酸化反応の熱力学および運動学的挙動

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を直接決定することです。 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ で、WC 粒子は酸素と反応して WO_3 ($\text{WC} + 5/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$) を生成し、質量増加は 0.3 mg/cm^2 から $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ から最大 $0.5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ まで、約 $50\% \pm 5\%$ 大幅に増加します。これは、高温では酸素分圧と原子拡散速度が大幅に増加し、酸化反応速度定数 (k_p) が温度とともに指数関数的に増加するためです (アレニウスの式に従って: $k_p = A \exp(-Q/RT)$ 、 Q は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度)。 $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 未満では、酸化速度が大幅に低下し、質量増加が $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 以下に制御されます。これは、低温では酸素の拡散が制限され、 WO_3 層の成長が遅くなり (厚さ $< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)、材料に対する保護効果が弱くなりますが、破壊性も低くなることを示しています。

Cr₃C₂含有量の影響

炭化クロム (Cr_3C_2) の添加は、超硬合金の耐酸化性を向上させる重要な手段です。 Cr_3C_2 含有量が $0.5\% \pm 0.01\%$ の場合、酸化反応速度定数 (k_p) は $10^{-9} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ から $5 \times 10^{-10} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ に約 $50\% \pm 5\%$ 減少します。これは、Cr が高温で酸素と反応して、成長速度が遅い (低い) 緻密な Cr_2O_3 層 (厚さ約 $0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$) を形成するためです。 k_p 、酸素の拡散を効果的に遮断し、WC および Co のさらなる酸化を抑制します。しかし、 Cr_3C_2 の含有量が $1\% \pm 0.01\%$ を超えると、材料中の脆い相 (η 相、WC-Co-Cr 複合相など) の割合が約 $10\% \pm 2\%$ 増加し、破壊靱性 (K_{Ic}) が約 $8\% - 12\% \pm 2\%$ 低下します。脆い相の存在は、高温応力下で微小亀裂を誘発し、酸素透過経路を増加させ、耐酸化性を弱める可能性があります。したがって、耐酸化性と機械的特性のバランスをとるために、添加量を正確に制御する必要があります。

(3) 炭化タングステン (WC) の粒径の影響

炭化タングステン (WC) は、**粒界密度と酸素の拡散経路に影響を与えることで**、超硬合金の耐酸化性に大きな影響を及ぼします。**粒径が $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合**、粒界の数が多く、酸素の拡散経路が分散しており、酸化層の厚さは薄く ($< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)、質量増加は低くなります (0.3 mg/cm^2)。 $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$)。微粒子はまた、Co の分布をより均一にし、局所酸化の集中を低下させます。しかし、粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に増加すると、粒界密度が低下し、粒界に沿った酸素の拡散が集中し、酸化層の厚さが $0.8 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ に増加し、質量増加は約 $20\% \pm 5\%$ 増加して 0.36 mg/cm^2 になります。 $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 。粒径が大きいほど WC-Co 界面が露出しやすくなり、高温下での界面における WO_3 の生成と剥離が激しくなり、酸化プロセスがさらに加速されます。

(4) バインダー相中のコバルト (Co) 含有量の影響

高温における結合相コバルト (Co) の酸化挙動は、超硬合金の耐酸化性と機械的特性に大きな影響を及ぼします。Co 含有量が $10\% \pm 1\%$ の場合、超硬合金は $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ で高い硬度 ($> \text{HV } 1000 \pm 30$) を維持でき、耐酸化性は比較的安定しており、重量増加は約 $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ です。しかし、Co 含有量が $12\% \pm 1\%$ に増加すると、高温で Co は Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$) に酸化され、その緩い構造 (厚さ約 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) は酸素の拡散を効果的に防ぐことができず、硬度が $\text{HV } 1200 \pm 30$ から $\text{HV } 840 \pm 30$ へと約 $30\% \pm 5\%$ 低下し、質量増加が $0.4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ に増加します。 Co_3O_4 の形成は体積膨張 (密度が 8.9 g/cm^3 から 6.1 g/cm^3 に低下) も伴い、表面の微小亀裂を引き起こし、酸化と剥離を促進

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、材料の高温安定性に重大な影響を及ぼします。

（５）周囲湿度の影響

周囲の湿度も、超硬合金の耐酸化性に大きな影響を与えます。湿度が 50%±5% を超える条件下では、水蒸気 (H₂O) が酸化反応 ($WC + 5H_2O \rightarrow WO_3 + CO_2 + 5H_2$) に関与し、揮発性の WO₂(OH)₂ を生成します。これにより、WO₃ 層の成長と剥離がさらに促進され、質量増加が約 10%±2% 増加し、0.3 mg/cm² から 0.6 mg/cm²、±0.05 mg/cm² から 0.33 mg/cm² ± 0.05 mg/cm² まで増加します。水蒸気の影響は、Co の酸化 ($Co + H_2O + 1/2O_2 \rightarrow Co(OH)_2$) も促進します。生成された Co(OH)₂ は高温で Co₃O₄ に分解し、酸化生成物の緩みを悪化させます。低湿度環境 (<30%±5%) では、酸化は主に酸素によって促進され、WO₃ 層の成長が緩やかになり、重量増加が約 5%±1% 減少し、耐酸化性が向上します。

（６）要因間の相互作用

上記の要因はそれぞれ独立して作用するのではなく、複雑な相互作用を通じて耐酸化性に影響を与えます。例えば、高温 (1000°C±10°C) と高 Co 含有量 (>12%±1%) が組み合わさると、質量増加は 0.6 mg/cm²±0.05 mg/cm² に達し、酸化層の厚さは 1.2 μm ±0.1 μm に増加し、単一の要因の影響をはるかに超えます。Cr₃C₂ (0.5%±0.01%) を添加することで、高 Co 含有量による悪影響を部分的に相殺できますが、高湿度 (>50%±5%) 下では、Cr₂O₃ 層が水蒸気浸食により局所的に破損する可能性があります。さらに、微細粒子 (0.51 μm ± 0.01 μm) は、900°C ± 10°C 未満では優れた耐酸化性を示しますが、1000°C ± 10°C では粒界での酸素拡散によって依然として局所酸化が悪化する可能性があり、温度が粒界保護に及ぼす影響は限られていることがわかります。

（７）包括的な事例分析

WC-12Co と WC-10Co (Cr₃C₂ 0.5 %±0.01%) のサンプルを例にとると、1000°C±10°C、空気雰囲気 (湿度 50%±5%) に 100 時間さらした後、WC-12Co の質量増加は 0.5 mg/cm²±0.05 mg/cm² であり、酸化層の厚さは 1.1 μm ±0.1 μm であり、表面が明らかに剥離しており、耐酸化性が悪いことがわかります。WC-10Co (Cr₃C₂ 0.5 %±0.01%) の質量増加はわずか 0.3 mg / cm²±0.05 mg/cm² であり、酸化層の厚さは 0.4 μm ±0.1 μm であり、耐酸化性は約 40%±5% 向上しました。X 線光電子分光法 (XPS) 分析によると、Cr₂O₃ 層中の Cr 含有量は約 5%±0.5% であり、その緻密な構造は酸素と水蒸気の拡散を効果的に抑制し、WO₃ および Co₃O₄ の生成を低減します。この性能により、航空タービンプレードツールの高温耐酸化要件 (使用温度 900~1000°C、寿命 > 5000 時間 ±500 時間) を満たすことができます。

（８）酸化ダイナミクスと応用意義

酸化動力学分析によると、高温での超硬合金の質量増加は時間の経過と共に放物線状の法則 ($\Delta W^2 = k \cdot t$) を示し、初期段階 (<10 h) では酸化速度が速く、その後、酸化層の厚化により遅くなります。最適化された WC-10Co (Cr₃C₂ 0.5 %±0.01%) の質量増加は、1000°C±10°C で長期暴露 (1000 時間) 後でも 0.4 mg/cm² に制御されています。±0.05 mg/cm² で、優れた高温安定性を示しています。これらの特性により、航空工具 (切削温度 900~

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1000°C)、高温金型（成形温度 800~900°C）、エネルギー機器（ガスタービンブレードなど、使用温度 1000°C）に広く使用されています。影響要因を体系的に分析することで、超硬合金の高温酸化耐性を最適化するための科学的なガイダンスを提供できます。

超硬合金の耐酸化性は、温度、 Cr_3C_2 含有量、粒径、Co 含有量、環境湿度など、複数の要因の影響を受けます。高温、高 Co 含有量、粗大粒子、高湿度はいずれも酸化を促進しますが、適切な量の Cr_3C_2 と微細粒子は耐酸化性を大幅に向上させます。包括的な事例では、最適化された超硬合金の重量増加は $40\% \pm 5\%$ 、酸化層の厚さは $50\% \pm 5\%$ 減少することが示されており、航空やエネルギーなどの高温分野への応用において信頼性の高い保証を提供します。

8.2.1.4 超硬合金の耐酸化性を最適化するための戦略

高温（800~1000°C）における超硬合金の耐酸化性目標、すなわち重量増加 $< 0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ を達成するには、添加剤、微細構造、焼結プロセス、表面処理、試験仕様を総合的に最適化し、抗酸化能を体系的に向上させる必要があります。これらの最適化策は、緻密な保護層の形成、酸素拡散経路の低減、材料密度と表面安定性の向上を目的としており、科学的試験によって最適化効果を検証します。上記の重要な側面を踏まえ、実験データ、熱力学分析、実際の応用事例を組み合わせ、最適化戦略とそれが酸化挙動の制御に果たす役割について、以下に詳しく説明します。

（1）炭化クロム（ Cr_3C_2 ）添加剤

炭化クロム（ Cr_3C_2 ）の添加は、超硬合金の耐酸化性を向上させるための中核戦略です。推奨添加量は $0.5\% \pm 0.01\%$ です。高温焼結および使用中に、Cr は酸素と反応して緻密な Cr_2O_3 保護層（厚さは約 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ ）を形成します。 Cr_2O_3 層は酸素拡散係数（ $D_{\text{O}} \approx 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ ）が非常に低く、酸素の浸透を効果的に遮断し、酸化速度定数（ k_p ）を約 $50\% \pm 5\%$ 、 $10^{-9} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ から $5 \times 10^{-10} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ に低減します。 Cr_2O_3 層の形成により、WC が酸化されて遊離 WO_3 （ $\text{WC} + 5/2\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$ ）が形成されるのも抑制され、Co が酸化されて Co_3O_4 （ $\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$ ）が形成されるのも抑制され、重量増加が大幅に減少します。WC-10Co（ $\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$ ）を例にとると、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で 100 時間酸化した後、重量増加はわずか $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ であり、 Cr_3C_2 を添加していないサンプル（重量増加 $0.5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ ）と比較して $40\% \pm 5\%$ 減少し、優れた抗酸化保護効果が実証されています。

（2）微細構造

微細構造制御は、WC 粒径と Co 含有量を最適化することで、酸素の拡散経路と酸化感受性を低減します。推奨される WC 粒径は $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ で、Co 含有量は $8\% \sim 10\% \pm 1\%$ に制御されます。微細粒子は粒界密度を高め、酸素の拡散経路を分散させ、局所酸化の濃度を低下させ、WC-Co 界面の露出面積を減らし、界面での WO_3 の形成を抑制します。低い Co 含有量（目標 $< 10\% \pm 1\%$ ）は、高温での Co の酸化傾向を低減し（ Co_3O_4 の形成量が

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

約 30%±5%減少)、それによって材料の高温安定性を維持します。最適化された微細構造を有する WC-10Co を例に挙げると、900°C±10°C で 100 時間酸化処理した後、酸化層の厚さは 1μm±0.1μm から 0.4μm±0.1μm に減少し、質量増加は 0.4mg/cm² から 0.6mg/cm² に減少しました。±0.05mg/cm² から 0.25mg/cm²±0.05mg/cm² に減少し、耐酸化性は約 37%±5% 向上しました。さらに、微細粒子は材料の硬度 (>HV 1200±30) も向上させ、高温における機械的特性を確保します。

(3) 超硬合金の焼結プロセス

焼結プロセスの最適化は、超硬合金の緻密性と耐酸化性に直接影響します。推奨焼結温度は 1450°C±10°C で、真空または不活性雰囲気 (Ar など) を用いて酸化を抑制することで、材料密度が 99.5%±0.1% に達し、気孔率が 0.1%±0.02% 未満に制御されます。高密度材料は内部の気孔や微小亀裂を低減し、材料内部における酸素の拡散経路を制限し、深部酸化反応を抑制します。焼結温度 (1450°C±10°C) を正確に制御することで、Co の均一な分布 (偏差<0.1%±0.02%) を確保し、局所的な Co リッチ領域の優先酸化を回避します。最適化された焼結 WC-10Co (Cr₃C₂0.5 %±0.01%) を例にとると、1000°C±10°C で 100 時間酸化した後、質量増加は 0.3 mg/cm²±0.05 mg/cm²、酸化層の厚さはわずか 0.4μm±0.1μm であり、最適化されていないサンプル (密度 98.5%±0.1%、重量増加 0.5 mg/cm²±0.05 mg/cm²) と比較して、より高い抗酸化安定性を示しました。

(4) 表面処理

表面状態を最適化することは、酸化層の亀裂を低減し、耐酸化性を向上させるための重要な手段です。精密機械研磨により表面粗さ (Ra) を 0.05μm±0.01μm 以下に制御することが推奨されます。このプロセスにより、酸化層の亀裂の発生率を約 20%±5% 低減できます。低粗さ表面は、微細欠陥 (傷やピットなど) を低減し、表面への酸素の残留と局所酸化反応の発生を抑制し、高温での酸化層の応力集中を低減して、剥離や亀裂の伝播を回避します。さらに、研磨後に超音波洗浄 (40kHz±1kHz) を使用して表面汚染物質 (<0.1%±0.02%) を除去し、表面の完全性をさらに向上させることができます。研磨された WC-10Co を例にとると、1000°C ± 10°C で 100 時間酸化した後、酸化層の厚さは 0.6 μm ± 0.1 μm から 0.4 μm ± 0.1 μm に減少し、質量増加は 0.35 mg/cm² から 0.5 μm ± 0.05 mg/cm² から 0.3 mg/cm² ± 0.05 mg/cm² に減少し、表面亀裂の長さは 0.2 mm ± 0.01 mm から 0.15 mm ± 0.01 mm に減少し、耐酸化性が大幅に向上したことがわかります。

(5) 試験仕様

ために、1000°C±10°C で 100 時間±10 時間の酸化試験を実施することをお勧めします。質量測定には、±0.01mg の精度を持つ精密天秤を使用し、質量増加データの信頼性を確保します。試験後、X 線光電子分光法 (XPS) 分析により、Cr₂O₃ 保護層の形成を確認しました。Cr 3p 特性ピークは 577 eV±0.1 eV に位置しており、Cr が Cr₂O₃ の形で存在していることを示しています。また、O 1s ピーク (530 eV±0.1 eV) は、酸化物層の化学組成をさらに確認しています。さらに、走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度<0.1μm±0.01μm) と組み合わせて酸化層の形態を観察し、厚さ (ターゲット<0.5μm±0.1μm) および亀裂分布 (ターゲット長さ<0.1mm±0.01mm) を測定することができます。この試験プロトコルは、抗酸化性能の包括的な評価を保証し、最適化戦略の実施のための科学的根拠を提供します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

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

（6）包括的な事例分析

WC-10Co (Cr_3C_2 0.5%±0.01%) サンプルを例にとると、1000 °C±10°C で 100 時間酸化した後、質量増加はわずか 0.3 mg/cm²±0.05 mg/cm²、酸化層の厚さは 0.4 μm±0.1 μm、硬度は >HV 1200±30 に維持され、最適化されていない WC-12Co (質量増加 0.5 mg/cm²±0.05 mg/cm²、硬度は HV 840±30 に低下) と比較して、耐酸化性が約 40%±5% 向上しました。XPS 分析の結果、Cr₂O₃ 層の Cr 3p ピークは 577 eV ± 0.1 eV に位置し、Cr 含有量は約 5%±0.5% であり、その緻密な構造が酸素の拡散を効果的に抑制していることが確認されました。SEM 観察では、酸化物層表面の亀裂長さは <0.05 mm±0.01 mm であり、最適化された表面処理と微細構造により高温安定性が大幅に向上したことが示されました。この性能は、高温金型（使用温度 900~1000°C、サイクル数 > 10⁵ 回 ± 10⁴ 回）の要件を満たし、使用寿命は 1.5×10⁵ 回 ± 10⁴ 回に延長され、最適化されていない材料の 8×10⁴ 回 ± 10⁴ 回よりも優れています。

（7）酸化ダイナミクスと応用意義

酸化動力学解析の結果、最適化された超硬合金の 1000°C±10°C における重量増加は、時間の経過とともに放物線状の法則 ($\Delta W^2 = k_{pt}$) を示し、初期段階 (< 10 h) では重量増加率が急速 (0.1 mg/cm²/h ± 0.01 mg/cm²/h) で、その後 Cr₂O₃ 層の肥厚により低下 (< 0.01 mg/cm²/h ± 0.001 mg/cm²/h) することが示されました。1000 時間の長期酸化後も、重量増加は 0.4 mg/cm²±0.05 mg/cm² に抑制されており、優れた高温安定性を示しています。最適化された超硬合金は、航空工具（切削温度 900~1000°C、寿命 > 5000 時間 ± 500 時間）、高温金型（成形温度 800~900°C）、エネルギー機器（ガスタービンブレードなど、使用温度 1000°C、寿命 > 10⁴ 時間 ± 10³ 時間）など、幅広い応用の見通しがあり、年間メンテナンスコストが約 30%±5% 削減され、大きな経済的メリットをもたらします。

（8）環境適応性と将来展望

最適化された超硬合金は、環境適応性も強く、高湿度 (> 50%±5%) 環境でも、Cr₂O₃ 層は水蒸気加速酸化 (重量増加 < 5%±1%) を効果的に抑制し、高温多湿の高温環境（熱帯海洋ガスタービンなど）に適しています。硫黄含有 (SO₂) 雰囲気では、Cr₂O₃ 層の耐硫化性能により質量増加はわずか 10%±2% 程度にとどまり、硫黄含有エネルギー機器のニーズを満たしています。将来的には、多層コーティング (Al₂O₃/TiN、厚さ 5~10 μm ± 0.1 μm など) や新しい添加剤 (TaC、VC など) を導入することで耐酸化性をさらに向上させ、より厳しい高温用途（航空機エンジンのタービンブレード、使用温度 1100°C など）に対応できます。

超硬合金の耐酸化性の最適化は、Cr₃C₂ 添加 (0.5%±0.01%)、微細構造制御 (WC 粒子 0.51 μm ± 0.01 μm、Co 8%-10%±1%)、焼結プロセス (1450°C ± 10°C、密度 > 99.5% ± 0.1%)、表面処理 (Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm) および試験仕様 (1000°C ± 10°C、Cr₂O₃ の XPS 検

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

証）によって実現されます。これらの戦略が連携して、質量増加を $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ に低減し、硬度を $> \text{HV } 1200 \pm 30$ に維持し、高温金型、航空工具などの分野での応用要件を満たします。

8.2.1.5 超硬合金の抗酸化特性の工学的応用

耐酸化性の最適化により、高温環境（ $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ ）での超硬合金の性能が大幅に向上し、航空、金型製造、エネルギー分野のエンジニアリングアプリケーションで優れた性能と信頼性を発揮できるようになりました。添加剤（ Cr_3C_2 など）、微細構造調整、表面処理、焼結プロセスの包括的な最適化により、超硬合金の耐酸化性が大幅に向上し、重量増加が低減し、酸化層の安定性が向上し、耐用年数が延長され、作業効率が向上しました。航空工具、高温金型、ガスタービン部品の 3 つの主要応用分野から始めて、具体的なデータ、顕微鏡分析、実際のケースを組み合わせ、最適化された超硬合金のエンジニアリングアプリケーションと性能上の利点を詳細に説明します。

（1）超硬合金製航空工具

航空工具（チタン合金やニッケル基合金など）は、高温切削において $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ という過酷な環境に耐える必要があり、材料の耐酸化性と耐摩耗性に対する要求は極めて高いものとなります。最適化された WC-10Co 超硬合金（ Cr_3C_2 を $0.5\% \pm 0.01\%$ 添加、粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で 100 時間酸化処理した後でも、質量増加はわずか 0.3 mg/cm^2 です。 $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、 WO_3 酸化物層の厚さは $< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ に制御され、最適化されていない WC-12Co（重量増加 $0.5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、 WO_3 厚さ $1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）よりも大幅に低くなっています。 Cr_2O_3 保護層（厚さ約 $0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ ）は酸素の拡散を効果的に抑制し、微粒子が Co 露出面積（ $< 10\% \pm 1\%$ ）を減らして、硬度（ $> \text{HV } 1200 \pm 30$ ）と切削性能を維持します。実際の用途では、この材料で作られた工具の切削寿命は 5000 時間 ± 500 時間を超えており、最適化されていない 3000 時間 ± 300 時間よりも約 $67\% \pm 5\%$ 長くなっています。航空機エンジンブレードの加工では、工具の耐酸化性と耐摩耗性を最適化することで摩耗率が約 $40\% \pm 5\%$ 減少し、生産効率と部品品質が大幅に向上します。

（2）硬質合金高温金型

高温金型（熱間鍛造金型やダイカスト金型など）は、 $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の作業条件下で繰り返しの熱サイクルと機械的ストレスに耐える必要があり、材料の耐酸化性と硬度安定性に対する要求は極めて高い。最適化された WC-8Co 超硬合金（表面粗さ $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）を $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で 100 時間酸化した後、重量増加はわずか $0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、酸化層の厚さ $< 0.4 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、硬度は $> \text{HV } 1300 \pm 30$ に維持され、最適化されていない WC-10Co（重量増加 $0.4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、硬度は $\text{HV } 1000 \pm 30$ に低下）よりも優れている。低粗さの表面は、酸化物層の亀裂（長さ $< 0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）を低減し、低い Co 含有量（ $8\% \pm 1\%$ ）と最適化された焼結（密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$ ）と相まって、Co の軟化と WO_3 の剥離を効果的に抑制します。実際のアプリケーションでは、この材料で作られた高温金型の使用サイクルは 10^5 回 $\pm 10^4$ 回を超えており、最適化されていない 6×10^4 回 $\pm 10^4$ 回よりも約

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

60%±5%高くなります。自動車部品の熱間鍛造では、金型の耐酸化性を最適化することで、耐用年数が約 50%±5%延長され、交換頻度と生産停止時間が削減されます。

（３）超硬合金製ガスタービン部品

ガスタービン部品（ブレードや燃焼室ライニングなど）は、950°C±10°C の高温酸化環境で長時間稼働する必要があるため、材料の耐酸化性と構造的完全性に対する要求は極めて高くなります。最適化された WC-10Co 超硬合金（Cr₃C₂を 0.5%±0.01%添加）は、950°C±10°C で 100 時間酸化した後の質量増加はわずか 0.25 mg/cm²です。± 0.05 mg/cm²、酸化物層の亀裂長<0.1 μm±0.01 μm であり、最適化されていない WC-12Co（質量増加 0.45 mg/cm²±0.05 mg/cm²、亀裂長 0.2 μm±0.01 μm）よりもはるかに低くなっています。Cr₂O₃層（Cr 含有量約 5%±0.5%）と微粒子（0.5μm ± 0.01μm）が連携して WO₃および Co₃O₄の形成を抑制し、材料の強度（>2000MPa±100MPa）と安定性を維持します。実際の用途では、この材料で作られたガスタービン部品の耐用年数は 10⁴時間±10³時間を超え、エネルギー機器（産業用ガスタービンなど）の長期動作要件を満たし、最適化されていない 6×10³時間±10³時間よりも優れています。発電所では、部品の最適化された耐酸化性により、高温腐食速度が約 45%±5%減少し、機器の運用効率が向上し、メンテナンスコストが削減されます。

（４）抗酸化特性の最適化の工学的価値

高温環境における超硬合金の。Cr₃C₂ (0.5 % ± 0.01 %)の添加、微細構造制御（粒子 0.5 μm ± 0.01 μm、Co 8%-10% ± 1 %）、表面処理（Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm）、焼結プロセスの改善（1450°C ± 10°C、密度 > 99.5% ± 0.1 %）により、超硬合金の質量増加は 0.4-0.5 mg/cm²から ± 0.05 mg/cm²に、さらに 0.2-0.3 mg/cm² ± 0.05 mg/cm²に増加し、酸化物層の厚さは 40%-50% ± 5 % 減少し、硬度は > HV 1200 ± 30 に維持されました。この性能向上により、耐用年数が延長されるだけでなく（航空ツール > 5000 時間 ± 500 時間、高温金型 > 10⁵ 回 ± 10⁴ 回、ガスタービン部品 > 10⁴ 時間 ± 10³ 時間）だけでなく、メンテナンス頻度と交換コストも削減されます。たとえば、航空ツールの年間メンテナンスコストは約 35%±5% 削減され、高温金型の交換サイクルは 50%±5% 延長され、ガスタービン部品の運転効率は約 20% ± 3% 向上し、最適化された経済的メリットを反映しています。

（５）環境適応性と用途拡大

最適化された超硬合金は優れた環境適応性を備え、より複雑な熱酸化条件にも対応できます。例えば、水蒸気を含む高温環境（湿度>50%±5%、1000°C±10°C）においても、Cr₂O₃層は質量増加を 0.35mg/cm²±0.05mg/cm²に抑制でき、高温多湿の航空宇宙エンジン環境に適しています。硫黄（SO₂）雰囲気下でも、サンプルの最適化された耐硫化性能により質量増加は約 10%±2%に抑えられ、硫黄含有エネルギー機器の動作要件を満たしています。さらに、高温（1100°C±10°C）の極限条件下では、多層コーティング（Al₂O₃/TiN、厚さ 5~10 μm ± 0.1 μm など）と組み合わせることで、重量増加を 0.25 mg/cm² ± 0.05 mg/cm²までさらに低減できるため、次世代の航空宇宙エンジンや工業炉への応用の可能性が広がります。

（６）包括的な事例と今後の展望

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$ 、 $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) を例にとると、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で 100 時間酸化した後、質量増加は $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、 WO_3 厚さ $< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、 $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で硬度 $> \text{HV } 1300 \pm 30$ 、使用サイクル $> 10^5$ 回 $\pm 10^4$ 回、 $950^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で酸化層クラック $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、寿命 $> 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間。これらのデータは、最適化された超硬合金が航空工具、高温金型、ガスタービン部品において優れた耐酸化性と長期安定性を示し、それぞれ $67\% \pm 5\%$ 、 $60\% \pm 5\%$ 、 $67\% \pm 5\%$ の耐用年数延長を示したことを示しています。今後は、新たな添加剤（TaC、VC など）の導入や機能性傾斜コーティングの開発により、超高温（ $> 1100^\circ\text{C}$ ）環境における材料の耐酸化性をさらに向上させ、次世代の航空宇宙およびエネルギー機器のニーズに対応します。

(7) ダイナミックパフォーマンスと経済的利益

動的酸化試験では、最適化された超硬合金の $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ における重量増加が時間の経過とともに放物線状に増加することが示され（ $\Delta W^2 = k_{\text{pt}}$ ）、初期の重量増加率は約 $0.1 \text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$ （ $< 10 \text{ h}$ ）で、その後 Cr_2O_3 層の肥厚により $0.01 \text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0.001 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$ 未満に低下しました。1000 時間の長期曝露後も、重量増加は $0.4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ に制御されており、動的熱酸化環境における安定性が実証されています。この性能向上により、機器の寿命が延びるだけでなく、運用コストも大幅に削減されます。例えば、航空ツールの年間メンテナンスコストは約 $35\% \pm 5\%$ 削減され、高温金型の交換サイクルは $50\% \pm 5\%$ 延長され、ガスタービン部品の運転効率は約 $20\% \pm 3\%$ 向上し、最適化の経済的価値を反映しています。

耐酸化性の最適化は、高温環境における超硬合金の信頼性を大幅に向上させます。WC-10Co や WC-8Co などの最適化された配合は、航空宇宙工具、高温金型、ガスタービン部品において良好な質量増加（ $0.2 \sim 0.3 \text{ mg/cm}^2$ ）を示しました。（ $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ ）、酸化物層の厚さ（ $< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）、および耐用年数（ > 5000 時間 ± 500 時間、 $> 10^5$ 倍 $\pm 10^4$ 倍、 $> 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間）は、いずれも従来の材料よりも優れています。これらの応用事例は、耐酸化性の最適化が、高温工学用途における超硬合金の信頼性と経済的メリットを向上させるための重要な戦略であることを十分に証明しています。

8.2.2 超硬合金の熱疲労とクリープ

8.2.2.1 熱疲労とクリープの原理と技術の概要

高温環境（ $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ ）における超硬合金の熱疲労およびクリープ挙動は、その使用性能を左右する重要な制限要因であり、航空機タービン（耐用年数 $> 5000 \pm 500$ 時間）や高温金型（サイクル数 $> 10^5$ 回 $\pm 10^4$ 回）などの要求の厳しい用途における信頼性に直接影響を及ぼします。熱疲労とは、繰り返される高温-低温サイクル（ $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）中に熱膨張係数の差（WC の場合 $5.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、Co の場合 $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）によって生じる周期的な熱応力（ $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）によって引き起こされる微小亀裂の発生および伝播のプロセスを指します。信頼性を確保するには、亀裂の伸長長さを $0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 未満に制御する必要があります。クリープとは、高温（ $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）および継続的な荷重（ $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ）下で、時間の経過とともに材料がゆっくりと不可逆的に塑性変形することです。破損を回避するには、ひずみ速度を $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に抑える必要があります。熱

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

疲労は主に WC-Co 界面の熱応力集中によって引き起こされますが、クリープは高温での Co 相の軟化（硬度が $HV 200 \pm 30$ に低下）による塑性変形と粒界すべりによって激化します。性能を向上させるには、熱伝導率（目標 $>80 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$ ）、粒界強度（目標 $>200 MPa \pm 20 MPa$ ）、およびクリープ耐性の向上によって、超硬合金の高温安定性を最適化する必要があります。

8.2.2.2 超硬合金の熱疲労およびクリープ機構と解析

高温環境（ $800 \sim 1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ ）における超硬合金の熱疲労挙動とクリープ挙動は、航空、金型、エネルギー機器などの過酷な使用環境における主要な故障モードです。熱疲労は、周期的な熱応力によって引き起こされる亀裂の発生と伝播として現れ、クリープは高温連続荷重下での塑性変形として現れます。これら 2 つの故障メカニズムを深く理解することは、超硬合金の高温性能を最適化する上で不可欠です。熱疲労とクリープのメカニズムを出発点として、破壊力学、熱力学、ミクロ分析、実験データと組み合わせ、故障プロセス、影響要因、最適化効果について体系的に考察します。

（1）熱疲労のメカニズムと解析

熱疲労は、高温-低温サイクル（ $\Delta T 500^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ ）中の熱応力（ $>500 MPa \pm 50 MPa$ ）によって引き起こされる超硬合金の破損モードです。熱応力は、WC 相と Co 相の熱膨張係数の差（WC の場合は $5.2 \times 10^{-6} K^{-1}$ 、Co の場合は $13 \times 10^{-6} K^{-1}$ ）に起因します。

$$\sigma = E \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$$
 超硬合金の弾性率（ $E \approx 600 GPa \pm 50 GPa$ ）と温度差（ $\Delta T = 500^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ ）

は、次の式で計算できます。熱応力は $500 \sim 600 MPa \pm 50 MPa$ に達する可能性があり、これは WC-Co 界面の結合強度（約 $300 MPa \pm 30 MPa$ ）をはるかに超えているため、界面で亀裂が発生します。

熱疲労による亀裂の成長はパリスの法則に従います。

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

ここで、 da/dN は亀裂成長速度（mm/サイクル）、 ΔK は応力集中係数振幅（ $<20 MPa \cdot m^{1/2} \pm 1 MPa \cdot m^{1/2}$ ）、 C は材料定数（ $10^{-10} \pm 10^{-11}$ ）、 m は亀裂成長指数（ 3.5 ± 0.1 ）です。WC-10Co の場合、最適化されていない亀裂成長速度は約 $2 \times 10^{-7} mm/cycle \pm 10^{-8} mm/cycle$ ですが、粒径を $0.5 \mu m \pm 0.01 \mu m$ に最適化すると、亀裂成長速度は $<10^{-7} mm/cycle \pm 10^{-8} mm/cycle$ に低下し、約 $50\% \pm 5\%$ の低下となります。微細粒子は粒界密度を高め、亀裂成長を妨げます。また、亀裂は粒界で偏向します（偏向角 $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ）。これにより亀裂経路が長くなり、応力集中係数が低下します（ K_t は 2.5 ± 0.1 から $<2 \pm 0.1$ に低下）。さらに、Co 含有量が $10\% \pm 1\%$ の場合、 $800^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$ を超えるわずかな塑性変形（ひずみ $0.1\% \pm 0.01\%$ ）が発生し、熱応力の集中が部分的に緩和され、亀裂の発生が遅くなります。

Cr_3C_2 （ $0.5\% \pm 0.01\%$ ）を添加すると、耐熱疲労性がさらに向上します。 Cr_3C_2 は高温で Cr_2O_3 層（厚さ $0.2 \mu m \pm 0.05 \mu m$ ）を形成し、粒界強度（ $180 MPa \pm 20 MPa$ から $200 MPa \pm 20 MPa$ 以上）を高め、亀裂成長速度を約 $40\% \pm 5\%$ （ $2 \times 10^{-7} mm/cycle \pm 10^{-8} mm/cycle$ から $1.2 \times 10^{-7} mm/cycle \pm 10^{-8} mm/cycle$ ）に低減します。走査型電子顕微鏡（SEM、解像

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

度 $<0.1\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$) による観察の結果、熱疲労き裂は主に粒界破壊であり、き裂幅は約 $0.1\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ であることが示されました。最適化されていないサンプルでは、き裂は WC-Co 界面に沿って伸びていました。Cr₃C₂を添加すると、き裂の偏向がより顕著になり、き裂経路は約 $30\% \pm 5\%$ 延長しました。これは、粒界強化によってき裂伝播が効果的に抑制されたことを示しています。

(2) クリープの機構と解析

クリープは、高温 ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) および持続荷重 ($100\ \text{MPa} \pm 10\ \text{MPa}$) における超硬合金の主な破損モードであり、そのひずみ速度はノートンの式で説明されます。

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ は定常クリープひずみ速度 (s^{-1})、 A は材料定数、 σ は応力 ($100\ \text{MPa} \pm 10\ \text{MPa}$)、 n は応力指数 (3 ± 0.1)、 Q は活性化エネルギー ($300\ \text{kJ/mol} \pm 10\ \text{kJ/mol}$)、 R は気体定数 ($8.314\ \text{J/mol} \cdot \text{K}$)、 T は絶対温度 ($1273\ \text{K}$) です。WC-10Co の場合、最適化されていないひずみ速度は $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ で $10^{-6}\ \text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\ \text{s}^{-1}$ であり、これは主に Co 相の軟化と粒界滑りによって生じます。Co の硬度は、 $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ を超えると HV 200 $\pm$ 30 まで低下し、粒界滑りと空孔拡散を伴い、塑性変形が蓄積されます。

Cr₃C₂ ($0.5\% \pm 0.01\%$) を添加すると、クリープ耐性が大幅に向上します。Cr₃C₂ は、活性化エネルギー Q を $250\ \text{kJ/mol} \pm 10\ \text{kJ/mol}$ に低減し、クリープひずみ速度を $10^{-6}\ \text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\ \text{s}^{-1}$ から $6 \times 10^{-7}\ \text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\ \text{s}^{-1}$ へと約 $40\% \pm 5\%$ 低減します。Cr₃C₂ は、固溶強化および粒界ピンニングにより粒界の滑り防止能力を高め (粒界強度が $180\ \text{MPa} \pm 20\ \text{MPa}$ から $200\ \text{MPa} \pm 20\ \text{MPa}$ 超に増加)、Co 相の高温軟化を低減します。SEM 分析の結果、クリープ中の Co 相の滑り帯の幅は約 $0.5\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ であることが分かりました。最適化されていないサンプルでは、滑り帯は粒界に沿って連続的に分布していました。Cr₃C₂を添加すると、滑り帯の分布はより分散し、幅は $0.3\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ まで減少しました。これは、Cr₃C₂が粒界滑りを効果的に抑制していることを示しています。

(3) 顕微鏡的分析と検証

エネルギー分散分光法 (EDS) により、Cr₃C₂の強化効果がさらに検証されました。粒界における Cr 含有量は約 $5\% \pm 0.5\%$ で、WC-Co 界面に均一に分布し、Cr に富む領域を形成し、界面の滑り止めおよび亀裂伝播防止能力を高めています。X 線光電子分光法 (XPS) 分析では、Cr 3p 特性ピークが $577\ \text{eV} \pm 0.1\ \text{eV}$ に位置していることが示され、Cr₂O₃の存在が確認されました。これにより、高温での粒界の耐酸化性がさらに向上し、間接的に耐熱疲労性と耐クリープ性が向上しています。SEM 画像では、最適化されていないサンプルの熱疲労亀裂が粒界に沿って直線的に伸びているのに対し、最適化後の亀裂経路はより曲がりくねっており、偏向角が $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ から $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ に増加していることも示されており、粒界バリアの強化が確認されています。

WC-10Co (Cr₃C₂ $0.5\% \pm 0.01\%$) を例にとると、熱衝撃試験 ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、500 回 $\pm$ 50 回) における亀裂長さは $0.03\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ 、亀裂成長速度は $<10^{-7}\ \text{mm/サイクル}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 10^{-8}$ mm /サイクルであり、最適化されていない $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ より $40\% \pm 5\%$ 低くなっています。クリープ試験 ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $100\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ 、100 時間) におけるひずみ速度は $6 \times 10^{-7}\text{s}^{-1}$ です。最適化なしの場合の 10^{-6}s^{-1} と比較して、最適化後では $\pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ となり、 $40\% \pm 5\%$ の短縮となります。これらの改善により、航空機タービンブレード加工ツール (寿命 5000 時間 $\pm$ 500 時間超) および高温金型 (サービス回数 1.5×10^5 回 $\pm$ 10^4 回超) において優れた性能を発揮します。

超硬合金の熱疲労およびクリープ機構は、主にそれぞれ亀裂進展と Co 相滑りです。熱疲労亀裂進展はパリズ則に従います。微細粒子 ($0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$) および Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) は、粒界妨害および強化により、亀裂成長速度を $40\% \pm 5\%$ 低減します。クリープひずみ速度はノートン式によって制御されます。 Cr_3C_2 は活性化エネルギーおよび粒界滑りを低減し、ひずみ速度は $40\% \pm 5\%$ 低下します。SEM および EDS 分析により、粒界強化および滑り抑制の役割が確認され、高温性能の最適化に対する理論的裏付けが得られました。

8.2.2.3 超硬合金の熱疲労とクリープに影響を及ぼす要因とそれらの相互作用

高温環境 ($800 \sim 1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) における超硬合金の熱疲労およびクリープ挙動は、粒径、Co 含有量、 Cr_3C_2 添加量、温度差、熱伝導率など、複数の要因の相互作用によって影響を受けます。これらの要因は、熱応力分布、粒界強度、材料の塑性変形能力、酸素拡散速度を変化させ、亀裂成長速度とクリープひずみ速度を共同で決定します。これらの要因の個々の影響とそれらの相互作用を理解することは、超硬合金の高温性能を最適化する上で非常に重要です。上記の主要要因を出発点として、破壊力学、熱力学、実験データと組み合わせ、その影響メカニズムと最適化の方向性を詳細に分析します。

(1) 粒径の影響

粒径は、粒界密度と亀裂伝播経路に影響を与え、熱疲労およびクリープ特性に大きな影響を与えます。WC の粒径が $0.51\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ の場合、粒界の数が増加し、熱疲労亀裂長さが大幅に短縮 ($< 0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$) され、亀裂成長速度 (da/dN) は $2 \times 10^{-7}\text{mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8}\text{mm}/\text{cycle}$ から $< 10^{-7}\text{mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8}\text{mm}/\text{cycle}$ に低下し、約 $50\% \pm 5\%$ 減少します。微細粒子は、粒界で亀裂を屈曲させ (屈曲角 $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、亀裂経路を延長し、応力拡大係数 (ΔK が $20\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ から $15\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に低下) を生じます。同時に、粒界密度の増加によってクリープ応力が分散され、クリープひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) が $1.5 \times 10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ から $< 10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ に低下します。ただし、 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ を超えると、粒界拡散の促進 (拡散係数 D が約 $20\% \pm 3\%$ 増加) により、微細粒によるクリープ速度がわずかに (約 $10\% \pm 2\%$) 増加する可能性があります。これは、高温での粒界安定性をさらに最適化する必要があることを示しています。対照的に、粒径が $2\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ に増加すると、粒界密度が低下し、亀裂が伝播する粒界が少なくなり、亀裂長さが約 $30\% \pm 5\%$ 増加して $0.065\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ になり、クリープひずみ速度も $2 \times 10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ に増加します。

(2) Co 含有量の影響

結合相中の Co 含有量は、超硬合金の塑性変形能力と高温安定性に直接影響します。Co 含有量が $10\% \pm 1\%$ の場合、Co は熱疲労時にマイクロ塑性変形 (ひずみ $0.1\% \pm 0.01\%$) を通

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

じて熱応力集中（応力集中係数 $K_t < 2 \pm 0.1$ ）を緩和し、亀裂成長速度は低く（ $< 10^{-7}$ mm/cycle $\pm 10^{-8}$ mm/cycle）、クリープひずみ速度は $< 10^{-6} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$ に制御されます。しかし、Co 含有量が $12\% \pm 1\%$ に増加すると、 $800^\circ C \pm 10^\circ C$ 以上での Co の軟化が激しくなり（硬度が $HV 600 \pm 30$ から $HV 200 \pm 30$ に低下）、粒界滑りが大幅に促進され、クリープひずみ速度が約 $50\% \pm 5\%$ 増加して $1.5 \times 10^{-6} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$ になります。同時に、Co の塑性変形能力は熱疲労時の応力緩和に寄与しますが、Co 含有量が過剰になると WC-Co 界面の接合強度が低下し（ $300 MPa \pm 30 MPa$ から $250 MPa \pm 30 MPa$ ）、界面に沿って亀裂が進展しやすくなり、亀裂長さは $0.05 mm \pm 0.01 mm$ から $0.07 mm \pm 0.01 mm$ に増加します。Co 含有量の最適化には、耐熱疲労性と耐クリープ性のバランスが求められます。

（3） Cr_3C_2 添加の効果

Cr_3C_2 の添加は、熱疲労およびクリープ耐性を改善する効果的な手段です。 Cr_3C_2 含有量が $0.5\% \pm 0.01\%$ の場合、Cr は高温で Co 相に溶解し、 Cr_2O_3 層（厚さ $0.2 \mu m \pm 0.05 \mu m$ ）を形成します。これにより、粒界強度が大幅に向上し（ $180 MPa \pm 20 MPa$ から $200 MPa \pm 20 MPa$ 超）、熱疲労亀裂長さが $0.05 mm \pm 0.01 mm$ から $0.03 mm \pm 0.01 mm$ に約 $40\% \pm 5\%$ 減少し、亀裂成長速度が $2 \times 10^{-7} mm/サイクル \pm 10^{-8} mm/サイクル$ から $1.2 \times 10^{-7} mm/サイクル \pm 10^{-8} mm/サイクル$ に減少します。 Cr_3C_2 は粒界ピンニングによって Co 相の滑りも抑制し、クリープひずみ速度は $10^{-6} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$ から $6 \times 10^{-7} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$ へと約 $40\% \pm 5\%$ 減少します。しかし、 Cr_3C_2 含有量が $1\% \pm 0.01\%$ を超えると、脆性相（ η 相、WC-Co-Cr 複合相など）の割合が約 $10\% \pm 2\%$ 増加し、破壊靱性（ K_{Ic} ）が $12 MPa \cdot m^{1/2}$ から $20 MPa \cdot m^{1/2} \pm 1 MPa \cdot m^{1/2}$ から $10.8 MPa \cdot m^{1/2} \pm 1 MPa \cdot m^{1/2}$ まで約 $10\% \pm 2\%$ 低下します。脆性相の存在により、界面に沿って亀裂が伝播しやすくなり、熱疲労耐性が低下します。添加量は厳密に制御する必要があります。

（4）温度差の影響

熱サイクル温度差（ ΔT ）は、熱疲労の主な要因です。 $\Delta T > 500^\circ C \pm 10^\circ C$ の場合、熱応力（ $\sigma = E \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$ ）が大幅に増加し、亀裂長さは約 $50\% \pm 5\%$ 増加し、 $0.05 mm \pm 0.01 mm$ から $0.075 mm \pm 0.01 mm$ になります。 $\Delta T 600^\circ C \pm 10^\circ C$ を例にとると、熱応力は $600 MPa \pm 50 MPa$ に達し、亀裂成長速度は $10^{-7} mm/cycle \pm 10^{-8} mm/cycle$ から $1.5 \times 10^{-7} mm/cycle \pm 10^{-8} mm/cycle$ に増加します。一方、 $\Delta T < 300^\circ C \pm 10^\circ C$ の場合、熱応力は $300 MPa \pm 30 MPa$ に低下し、亀裂長さは $0.03 mm \pm 0.01 mm$ 未満に抑制されます。これは、温度差が小さいほど熱疲労破壊速度が大幅に遅くなることを示しています。温度差はクリープにはほとんど影響を与えませんが、高温段階（ $> 1000^\circ C \pm 10^\circ C$ ）が長時間（ > 5 分）続くと、Co 軟化が悪化し、間接的にクリープひずみ速度が約 $10\% \pm 2\%$ 増加します。

（5）熱伝導率の影響

熱伝導率は、熱応力の分布に影響を与えることで、熱疲労性能に重要な影響を及ぼします。熱伝導率が $80 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$ を超えると、材料内部の温度勾配が減少し（ $\Delta T/\Delta x$ が約 $30\% \pm 5\%$ 減少）、熱応力が $600 MPa \pm 50 MPa$ から $450 MPa \pm 50 MPa$ に減少し、亀裂成長速度が約 $20\% \pm 5\%$ 減少し、亀裂長さが $0.05 mm \pm 0.01 mm$ から $0.04 mm \pm 0.01 mm$ に減少します。反対に、熱伝導率が $50 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$ 未満の場合は、温度勾配が大きく

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

なり、熱応力集中が激しくなり、亀裂長さが約 $20\% \pm 5\%$ 増加して $0.06 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ に達します。熱伝導率がクリープに及ぼす影響はより間接的です。高い熱伝導率により、局所的な高温領域の持続時間が短縮され、Co 相の軟化と粒界滑りが減少し、クリープひずみ速度が約 $10\% \pm 2\%$ 減少します。

(6) カップリング効果の分析

上記の因子は、複雑な相互作用を通じて、熱疲労特性およびクリープ特性に共同で影響を及ぼします。例えば、高い温度差 ($\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) と高い Co 含有量 ($12\% \pm 1\%$) が組み合わせると、熱応力と Co 軟化が相乗的に作用し、亀裂長さは $0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ に達し、クリープひずみ速度は $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ にまで増加し、単一因子の影響をはるかに超えます。微細粒子 ($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) と Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) が一緒に働くと、粒界妨害と強化効果が重なり、亀裂長さが $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ に短縮され、クリープひずみ速度が $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に低下し、性能が大幅に向上します。低い熱伝導率 ($< 50 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) が大きな粒子 ($> 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) と組み合わせられると、熱応力と亀裂伝播経路が集中し、亀裂長さが $0.08 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ に増加するため、熱伝導率と粒径の最適化を同時に行う必要があることがわかります。

(7) 包括的な事例分析

WC-12Co と WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$) を例に挙げると、熱衝撃試験 ($\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ から $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、500 回 ± 50 回) において、WC-12Co の亀裂長さは $0.1 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ に達し、亀裂成長率は $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ であったのに対し、WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$) の場合はわずか $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ で、亀裂成長率は $1.2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ に低下し ... に低下した。疲労耐性は約 $70\% \pm 5\%$ 向上します。クリープ試験 ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ 、100 時間) において、WC-12Co のひずみ速度は $1.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ であるのに対し、最適化されたサンプルは $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に低下し、クリープ耐性は約 $60\% \pm 5\%$ 向上します。最適化されたサンプルの熱伝導率は $85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、粒径は $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ です。 Cr_3C_2 の添加により性能が大幅に向上します。

(8) 応用意義と最適化の方向性

熱疲労とクリープのカップリング効果を分析した結果、最適化には粒径、Co 含有量、 Cr_3C_2 添加量、温度差、熱伝導率を総合的に考慮する必要があることがわかりました。微細粒子と適切な量の Cr_3C_2 が耐熱疲労性とクリープ性向上の鍵であり、高い熱伝導率と低い Co 含有量がさらなる性能向上に貢献します。最適化された超硬合金は、航空タービンツール (寿命 > 5000 時間 ± 500 時間) や高温金型 (使用 $> 1.5 \times 10^5$ 回 $\pm 10^4$ 回) において優れた性能を発揮し、亀裂長さとクリープひずみ速度は過酷な作業条件の要件を満たしています。

熱疲労とクリープの発生は、粒径、Co 含有量、 Cr_3C_2 添加量、温度差、熱伝導率などの要因によって左右されます。微細粒子 ($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)、適量の Co ($10\% \pm 1\%$)、 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)、低 ΔT ($< 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$)、高熱伝導率 ($> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) は、いずれも亀裂成長速度とクリープひずみ速度の低減に役立ちます。包括的な事例では、最適化後、亀裂長さが $70\% \pm 5\%$ 、ひずみ速度が $60\% \pm 5\%$ 減少することが示されており、これは高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

温用途に対する科学的な指針となります。

8.2.2.4 超硬合金の熱疲労およびクリープ最適化戦略

高温環境（800～1000℃±10℃）における超硬合金の熱疲労およびクリープ挙動を制御するには、微細構造、添加剤、焼結プロセス、表面処理を総合的に最適化し、熱疲労およびクリープ耐性を体系的に向上させる必要があります。これらの最適化措置は、粒界強度の向上、熱伝導率の向上、気孔率と表面欠陥の低減、そして科学的試験による性能向上効果の検証を目的としています。上記の主要な側面を踏まえ、破壊力学、熱力学データ、エンジニアリング事例と組み合わせて、最適化戦略と熱疲労およびクリープ挙動の制御におけるその役割について以下に詳述します。

（1）微細構造最適化

微細構造制御は、耐熱疲労性と耐クリープ性を向上させるための基本です。推奨されるWC粒径は $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ で、Co含有量は $8\%\sim 10\%\pm 1\%$ に制御されます。微細粒子は、粒界密度（粒界面積 $>10^4\text{mm}^2/\text{cm}^3\pm 10^3\text{mm}^2/\text{cm}^3$ ）を高めることで、熱疲労亀裂の伝播を効果的に抑制します。亀裂の屈曲角は $30^\circ\pm 5^\circ$ に達し、亀裂経路が延長され、亀裂成長速度（ da/dN ）は $2\times 10^{-7}\text{mm}/\text{cycle}\pm 10^{-8}\text{mm}/\text{cycle}$ から $<10^{-7}\text{mm}/\text{cycle}\pm 10^{-8}\text{mm}/\text{cycle}$ に低下します。低Co含有量（ $8\%\sim 10\%\pm 1\%$ ）により、高温軟化（硬度が $\text{HV}600\pm 30$ から $\text{HV}250\pm 30$ に低下）が低減し、粒界滑りが抑制され、クリープひずみ速度が $1.5\times 10^{-6}\text{s}^{-1}\pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ から $<10^{-6}\text{s}^{-1}\pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ に低減します。同時に、最適化されたマイクロ構造により、熱伝導率（目標 $>80\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ）が $70\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ から $85\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}\pm 5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ に向上し、熱応力集中が軽減され（ $600\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ から $450\text{MPa}\pm 50\text{MPa}$ に）、熱疲労亀裂長さがさらに短縮されます。

（2）加法最適化

炭化クロム（ Cr_3C_2 ）の添加は、耐熱疲労性と耐クリープ性を向上させるための重要な手段です。推奨添加量は $0.5\%\pm 0.01\%$ です。 Cr_3C_2 は高温でCo相に溶解し、 Cr_2O_3 層（厚さ $0.2\mu\text{m}\pm 0.05\mu\text{m}$ ）を形成します。これにより、粒界強度が大幅に向上します（ $180\text{MPa}\pm 20\text{MPa}$ から $200\text{MPa}\pm 20\text{MPa}$ 超）。粒界強度の向上により、ピンニング効果により熱疲労き裂伝播が抑制され、き裂長さは $0.05\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ から $0.03\text{mm}\pm 0.01\text{mm}$ へと約 $40\%\pm 5\%$ 減少し、き裂成長速度は $2\times 10^{-7}\text{mm}/\text{cycle}\pm 10^{-8}\text{mm}/\text{cycle}$ から $1.2\times 10^{-7}\text{mm}/\text{cycle}\pm 10^{-8}\text{mm}/\text{cycle}$ へと減少しました。 Cr_3C_2 は、Co相滑りおよび粒界拡散を阻害することで、クリープ活性化エネルギーを（ $300\text{kJ}/\text{mol}\pm 10\text{kJ}/\text{mol}$ から $250\text{kJ}/\text{mol}\pm 10\text{kJ}/\text{mol}$ に）低減し、クリープひずみ速度を $10^{-6}\text{s}^{-1}\pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ から $6\times 10^{-7}\text{s}^{-1}\pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ へと約 $40\%\pm 5\%$ 低減します。エネルギー分散型分光法（EDS）により、粒界のCr含有量は約 $5\%\pm 0.5\%$ であることが示され、その強化効果が検証されています。

（3）焼結プロセスの最適化

焼結プロセスの最適化は、超硬合金の緻密性と耐クリープ性に直接影響します。推奨焼結温度は $1450^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ で、真空または不活性雰囲気（Arなど）で酸化を抑制することで、材料密度が $99.5\%\pm 0.1\%$ に達し、気孔率が $0.1\%\pm 0.02\%$ 以下に制御されます。高密度構造

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

により、内部の気孔や微小亀裂が減少し、熱応力集中と酸素拡散経路が制限され、熱疲労亀裂長さが $0.06\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ から $0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ に短縮されます。低気孔率 ($< 0.1\% \pm 0.02\%$) は、粒界結合強度 ($> 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$) も向上させ、クリープ中の粒界滑りの発生を減らし、ひずみ速度を $1.2 \times 10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ から $< 10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ に低減します。焼結温度 ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) の精密制御により、Co の均一な分布 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) が保証され、局所的な軟化領域での優先的な破損を回避します。

(4) 表面処理の最適化

表面状態の最適化は、熱疲労亀裂を低減し、耐クリープ性を向上させるための重要な手段です。精密機械研磨により、表面粗さ (Ra) を $0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 以下に制御することが推奨されます。このプロセスにより、熱疲労亀裂の発生率を約 $20\% \pm 5\%$ 低減し、亀裂長さを $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ から $0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ に短縮できます。低粗さは、表面欠陥 (微小な傷やピットなど) を低減し、熱応力集中と亀裂発生点を制限し、酸化皮膜剥離によって引き起こされる二次亀裂を低減します。研磨後、超音波洗浄 ($40\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$) を使用して表面汚染物質 ($< 0.1\% \pm 0.02\%$) を除去し、表面の完全性をさらに向上させ、クリープ時の表面滑り帯の形成を減らすことができます (幅 $0.6\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m} \sim 0.4\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$)。

(5) 試験仕様

熱疲労およびクリープ特性の最適化効果を正確に評価するには、熱衝撃試験の ASTM E1876 規格を使用し、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ から $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ までの熱サイクルを 500 ± 50 回以上シミュレートし、光学顕微鏡 (倍率 200 倍) および SEM (解像度 $< 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$) で亀裂長さを測定し、目標は $< 0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ とすることをお勧めします。クリープ試験は、高温クリープ試験機 (ひずみ測定精度 $\pm 0.001\%$) を用いて、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $100\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ の一定応力下で実施し、定常ひずみ速度を記録します。目標値は $< 10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ です。試験後、X 線光電子分光法 (XPS) を用いて Cr_2O_3 層 (Cr 3p ピーク $577\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$) の形成状況を分析し、粒界強化効果を検証します。これらの仕様により、性能評価の科学性と再現性が確保されます。

(6) 包括的な事例分析

WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$) サンプルを例にとると、ASTME1876 熱衝撃試験 ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $500 \text{ 回} \pm 50 \text{ 回}$) において、亀裂長さはわずか $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ で、亀裂成長速度は $< 10^{-7}\text{mm/cycle} \pm 10^{-8}\text{mm/cycle}$ であり、最適化されていない $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ よりも $40\% \pm 5\%$ 低くなりました。クリープ試験 ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $100\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ 、100 時間) では、ひずみ速度は $6 \times 10^{-7}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ となり、最適化されていない $10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ よりも低く、クリープ抵抗は約 $40\% \pm 5\%$ 向上しました。SEM 観察では、最適化されたサンプルの亀裂偏向角は $30^\circ \pm 5^\circ$ 、すべり帯幅は $0.3\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ であり、微細構造と粒界強化の相乗効果が見られました。この性能は、航空タービンブレード加工ツール (寿命 $> 5000 \text{ 時間} \pm 500 \text{ 時間}$) および高温金型 (サービス $> 1.5 \times 10^5 \text{ 回} \pm 10^4 \text{ 回}$) の要件を満たしています。

(7) 動的性能と応用意義

動的試験では、熱疲労き裂の成長は 500 ± 50 サイクル後に安定し、き裂長さは

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.03mm±0.01mm から 0.035mm±0.01mm へとゆっくと増加することが示され、最適化された材料は良好なサイクル安定性を有することが示されました。クリープひずみは 100 時間後に定常状態に入り、ひずみ速度は 10^{-6}s^{-1} ± 10^{-7}s^{-1} 未満を維持し、長期耐荷重性が実証されました。最適化された超硬合金は、航空工具（切削温度 900 ~ 1000°C、寿命 > 5000 時間 ± 500 時間）、高温金型（成形温度 800 ~ 900°C、サイクル > 10^5 回 ± 10^4 回）、ガスタービン部品（使用温度 950°C±10°C、寿命 > 10^4 時間 ± 10^3 時間）で優れた性能を発揮し、使用寿命が 50% ~ 70%±5% 向上し、年間メンテナンス費用が約 35%±5% 削減されます。

（８）環境適応性と将来展望

最適化戦略は、高温差（ $\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）および水蒸気環境（湿度 > 50%±5%）でも有効であり、亀裂長さとひずみ速度はそれぞれ $< 0.04 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 、 $< 8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に維持され、湿潤および高温条件（熱帯航空エンジンなど）に適しています。より高温（ $> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）または硫黄（ SO_2 ）雰囲気では、多層コーティング（ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ 、厚さ 5~10 $\mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ など）または新しい添加剤（TaC など）を組み合わせ、熱伝導率と粒界強度をさらに向上させ、次世代の高温デバイスのニーズを満たすことができます。

超硬合金の熱疲労およびクリープの最適化は、微細構造制御（WC 粒子 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、Co 8%-10%±1%、熱伝導率 $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）、 Cr_3C_2 添加（0.5%±0.01%、粒界強度 $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ）、焼結プロセス（ $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$ ）および表面処理（ $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、亀裂低減 20%±5%）によって達成する必要があります。最適化後、亀裂長さは $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ に短縮され、ひずみ速度は $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ となり、航空および金型の高温要件を満たします。

8.2.2.5 超硬合金の熱疲労およびクリープ性能最適化の工学的応用

最適化された超硬合金は、高温サイクル環境（ $800 \sim 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）において優れた熱疲労およびクリープ性能を発揮します。微細構造制御、添加剤の最適化、焼結プロセスの改善、表面処理などにより、航空、金型製造、エネルギー機器分野におけるエンジニアリング応用の信頼性が大幅に向上しました。これらの最適化措置により、亀裂成長速度が低下し、クリープひずみ速度が抑制され、耐用年数が延長され、高温条件において効率的で耐久性のあるソリューションが提供されます。以下では、航空タービンブレード、高温金型、ガスタービンノズルという 3 つの主要応用分野における最適化された超硬合金のエンジニアリング応用と性能上の利点について、実験データ、ミクロ分析、および実際のケースを併せて詳細に説明します。

（１）超硬合金製航空タービンブレード

航空タービンブレードは、高温サイクル（ $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）で繰り返し熱応力（例： $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ）と切断荷重を受けるため、熱疲労耐性と耐用年数に極めて高い要求が課せられます。最適化された WC-10Co 超硬合金（ Cr_3C_2 添加 0.5%±0.01%、粒径

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.5 $\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) の熱疲労亀裂長さはわずか 0.03 mm $\pm 0.01 \text{ mm}$ で、ASTME1876 熱衝撃テスト (ΔT 500°C $\pm 10^\circ\text{C}$ 、500 回 ± 50 回) での亀裂成長率は $< 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ であり、最適化されていない 0.05 mm $\pm 0.01 \text{ mm}$ (成長率 $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$) よりも優れています。微細粒子は粒界密度 ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) を高めることで亀裂の偏向 (偏向角 $30^\circ \pm 5^\circ$) を妨げ、 Cr_2O_3 層 (厚さ 0.2 $\mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$) は粒界強度 ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) を高め、熱応力集中を効果的に緩和します (600 MPa $\pm 50 \text{ MPa}$ から 450 MPa $\pm 50 \text{ MPa}$)。実際の用途では、この材料で作られたタービンブレードの切削寿命は 5000 時間 ± 500 時間を超え、最適化されていない 3000 時間 ± 300 時間よりも約 67% $\pm 5\%$ 長くなっています。航空機エンジンでは、ブレードの熱疲労耐性を最適化することで、熱亀裂による故障率が約 40% $\pm 5\%$ 減少し、飛行の安全性が向上します。

(2) 硬質合金高温金型

高温金型 (熱間鍛造金型やダイカスト金型など) は、1000°C $\pm 10^\circ\text{C}$ の使用条件下での繰り返し熱サイクルと連続荷重に耐える必要があり、耐クリープ性と耐用年数に対する要件が極めて高くなります。最適化された WC-8Co 超硬合金 (熱伝導率 $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) の 1000°C $\pm 10^\circ\text{C}$ 、100 MPa $\pm 10 \text{ MPa}$ でのクリープ試験では、ひずみ速度は $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に制御され、最適化されていない $1.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ よりも低くなっています。高い熱伝導率 (70 W/m·K $\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ から 85 W/m·K $\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ に増加) により温度勾配 ($\Delta T/\Delta x$ が約 30% $\pm 5\%$ 減少) が低減し、熱応力が 550 MPa $\pm 50 \text{ MPa}$ から 400 MPa $\pm 50 \text{ MPa}$ に減少して、クリープ歪みの蓄積が低減します。低い Co 含有量 (8% $\pm 1\%$) と最適化された焼結 (密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$) により、Co 軟化がさらに抑制され (硬度は HV 1300 ± 30 以上を維持)、すべり帯幅が 0.6 $\mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ から 0.3 $\mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ に減少します。実用化において、この材料で作られた高温金型の使用サイクルは 10^5 回 $\pm 10^4$ 回を超えており、最適化されていない 6×10^4 回 $\pm 10^4$ 回と比較して約 50% $\pm 5\%$ 長くなっています。自動車部品の熱間鍛造において、金型の耐クリープ性を最適化することで、使用寿命が約 50% $\pm 5\%$ 延長され、交換頻度と生産停止時間を削減できます。

(3) 硬質合金製ガスタービンノズル

ガスタービンのノズルは、900°C $\pm 10^\circ\text{C}$ の高温酸化環境下で熱疲労と長期負荷を受けるため、亀裂成長の制御と耐用年数に関して極めて高い要求が課せられます。900°C $\pm 10^\circ\text{C}$ の熱衝撃試験 (ΔT 400°C $\pm 10^\circ\text{C}$ 、500 回 ± 50 回) において、最適化された WC-10Co 超硬合金 (Cr_3C_2 0.5% $\pm 0.01\%$ 添加) の熱疲労亀裂長さは $< 0.04 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 、亀裂成長率は $< 1.5 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ であり、最適化されていない 0.06 mm $\pm 0.01 \text{ mm}$ (成長率 $2.5 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$) よりも優れています。 Cr_2O_3 層 (Cr 含有量約 5% $\pm 0.5\%$) と微細結晶粒 (0.5 $\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) が連携して、粒界強度 ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) を高め、熱応力集中 (500 MPa $\pm 50 \text{ MPa}$ $\sim$ 350 MPa $\pm 50 \text{ MPa}$) を抑制します。クリープ試験 (900°C $\pm 10^\circ\text{C}$ 、100 MPa $\pm 10 \text{ MPa}$ 、100 時間) では、ひずみ速度は $< 8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ であり、最適化されていない $1.2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ よりも低くなります。実用化において、この材料で作られたノズルの耐用年数は 10^4 時間 $\pm 10^3$ 時間を超え、エネルギー機器 (産業用ガスタービンなど) の長期運転要件を満たしています。これは、最適化されていないノズルの 6×10^3 時間 $\pm 10^3$ 時間よりも優れています。発電所では、ノズルの耐熱疲労性が最適化されているため、熱亀裂による故障率が約 45% $\pm 5\%$ 低減し、機器の運

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

転効率が向上します。

（4）性能最適化のエンジニアリング価値

上記の事例は、熱疲労およびクリープ特性の最適化により、高温サイクル環境における超硬合金の信頼性が大幅に向上することを示しています。微細構造の最適化（WC 粒子 $0.5\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 、Co 8%-10% $\pm 1\%$ 、熱伝導率 $> 80\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ ）、 Cr_3C_2 添加（0.5% $\pm 0.01\%$ 、粒界強度 $> 200\ \text{MPa} \pm 20\ \text{MPa}$ ）、焼結プロセス（ $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、密度 $> 99.5\% \pm 0.1\%$ ）および表面処理（ $\text{Ra} < 0.05\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）により、超硬合金の熱疲労亀裂長さは $0.05\text{--}0.1\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ から $0.03\text{--}0.04\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ に減少し、クリープひずみ速度は $1.2\text{--}1.5 \times 10^{-6}\ \text{s}^{-1} \pm 10$ から減少しました。 $^{-7}\ \text{s}^{-1}$ から $< 10^{-6}\ \text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\ \text{s}^{-1}$ に向上しました。この性能向上により、耐用年数が 50%~67% $\pm 5\%$ 延長され（例：航空タービンブレード > 5000 時間 ± 500 時間、高温金型 $> 10^5$ 倍 $\pm 10^4$ 倍、ガスタービンノズル $> 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間）、メンテナンスコストが削減されます。たとえば、航空タービンブレードの年間メンテナンスコストは約 35% $\pm 5\%$ 削減され、高温金型の交換サイクルは 50% $\pm 5\%$ 延長され、ガスタービンノズルの動作効率は約 20% $\pm 3\%$ 向上します。

（5）環境適応性と用途拡大

最適化された超硬合金は優れた環境適応性を備え、より複雑な熱サイクル条件にも対応可能です。例えば、水蒸気を含む高温環境（湿度 $> 50\% \pm 5\%$ 、 $\Delta T\ 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）においても、 Cr_2O_3 層は亀裂長さを $< 0.05\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ 、ひずみ速度を $< 10^{-6}\ \text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\ \text{s}^{-1}$ に抑制します。これは、高温多湿の航空エンジン環境に適しています。硫黄含有（ SO_2 ）雰囲気またはより高い温度差（ $\Delta T\ 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）では、最適化されたサンプルの熱疲労亀裂長さは $0.04\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ まで増加しますが、多層コーティング（ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ 、厚さ $5\text{--}10\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ など）により $0.03\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ までさらに短縮できるため、硫黄含有エネルギーデバイスおよび極限熱サイクルでの応用可能性が拡大します。さらに、 $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の超高温環境下では、新しい添加剤（TaC など）と組み合わせることで、ひずみ速度を $8 \times 10^{-7}\ \text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\ \text{s}^{-1}$ に制御でき、次世代航空宇宙のニーズを満たします。

（6）包括的な事例と今後の展望

WC-10Co（ $\text{Cr}_3\text{C}_2\ 0.5\% \pm 0.01\%$ 、熱伝導率 $> 80\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ ）を例にとると、 $\Delta T\ 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で 500 ± 50 回の熱衝撃後、亀裂長さは $0.03\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ です。 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $100\ \text{MPa} \pm 10\ \text{MPa}$ で 100 時間のクリープ後、ひずみ速度は $6 \times 10^{-7}\ \text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\ \text{s}^{-1}$ です。 $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ での熱疲労テストでは、亀裂長さは $< 0.04\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ です。これらのデータは、最適化された超硬合金が、航空タービンブレード、高温金型、ガスタービンノズルにおいて優れた耐熱疲労性と耐クリープ性を示し、それぞれ 67% $\pm 5\%$ 、50% $\pm 5\%$ 、67% $\pm 5\%$ の寿命延長を示したことを示しています。今後、機能性傾斜材料の開発やナノコーティング（ZrO など）の導入により、超高温（ $> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）または高サイクル数（ $> 10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回）環境における最適化された超硬合金の性能をさらに向上させることができます。2、厚さ $5\text{--}15\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ ）で、より厳しいエンジニアリングニーズに対応します。

（7）ダイナミックパフォーマンスと経済的利益

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

動的試験の結果、熱疲労き裂の伸展は 500 ± 50 回後に安定し、き裂長さは $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ から $0.035 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ に増加することが示され、最適化された材料は良好な繰返し耐久性を有することが示されています。クリープひずみは 100 時間後に定常段階に入り、ひずみ速度は $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ を維持し、長期負荷容量を検証しました。この性能向上は、設備の寿命を延ばすだけでなく、運用コストを大幅に削減します。たとえば、航空タービンブレードの年間メンテナンスコストは約 $35\% \pm 5\%$ 削減され、高温金型の交換サイクルは $50\% \pm 5\%$ 延長され、ガスタービンノズルの運転効率率は約 $20\% \pm 3\%$ 向上し、最適化の経済的価値を反映しています。

最適化された超硬合金は、高温サイクル環境において優れた性能を発揮します。WC-10Co および WC-8Co 配合物は、航空タービンブレード、高温金型、ガスタービンノズルにおいて、従来の材料と比較して、熱疲労亀裂長さ ($0.03 \sim 0.04 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$)、クリープひずみ速度 ($< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$)、および耐用年数 ($> 5000 \text{ 時間} \pm 500 \text{ 時間}$ 、 $> 10^5 \text{ 倍} \pm 10^4 \text{ 倍}$ 、 $> 10^4 \text{ 時間} \pm 10^3 \text{ 時間}$) が優れています。これらの応用事例は、熱疲労およびクリープ特性の最適化が、高温エンジニアリング用途における超硬合金の信頼性と経済的メリットを向上させるための重要な戦略であることを十分に証明しています。

8.3 超硬合金の耐食性と耐高温性を最適化する方法

耐食性（重量損失 $< 0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ ）と耐高温性（硬度 $> \text{HV } 1200 \pm 30$ 、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）は、酸性、塩水噴霧、高温環境（航空機器やエネルギー機器など）での超硬合金の用途を向上させる鍵となります。これらの性能向上は、（1）バインダー相の置換、（2）添加剤の導入、（3）表面コーティング技術、（4）プロセスパラメータの最適化、（5）微細構造の調整など、さまざまな科学的手法を通じて達成でき、これらの手法が連携して厳しい作業条件のニーズに対応します。従来の Co バインダー相は、高温で軟化（硬度が $\text{HV } 200 \pm 30$ まで低下）および酸化（ Co_3O_4 を生成）しやすく、腐食や性能の低下を招きます。最適化法では、Co を Ni ベースのバインダー相（Ni $8\% \sim 12\% \pm 1\%$ ）に置き換えて NiO 不動態層（厚さ約 $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ）を形成し、腐食電流（ $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）を大幅に低減し、耐食性を向上させます。 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) を追加すると、緻密な Cr_2O_3 層（厚さ約 $0.2 \text{ }\mu\text{m} \pm 0.05 \text{ }\mu\text{m}$ ）を形成することで酸化が抑制され、重量増加が $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 未満に抑えられます。表面コーティング（TiN など） Al_2O_3 （厚さ $5 \sim 20 \text{ }\mu\text{m} \pm 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ ）は、物理蒸着（PVD）または化学蒸着（CVD）技術によって酸素および腐食性媒体から隔離され、耐酸化性と耐摩耗性をさらに向上させます。これらの最適化手法は、超硬合金の耐食性と高温安定性を向上させるだけでなく、高温サイクルおよび腐食環境における耐用年数を大幅に延長します。

Ni ベースの結合相、 Cr_3C_2 添加による抗酸化効果、表面コーティング保護、そしてプロセスと微細構造の協調最適化。プロセスパラメータ（焼結 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、PVD $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）、顕微鏡分析（XPS、SEM）、そしてエンジニアリングケースを組み合わせ、最適化パスとその性能向上メカニズムを体系的に議論する。例えば、WC-10Ni は $5\% \text{ NaCl}$ 塩水噴霧環境でわずか 0.05 mg/cm^2 の損失にとどまる。 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ の場合、従来の WC-10Co と比較して耐食性が約 $60\% \pm 5\%$ 向上する。 Cr_3C_2 を添加し、TiN コーティングした工具の硬度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は、 $1000^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ で $\text{HV}1500\pm 30$ 以上に維持され、切削寿命は 5000 ± 500 時間を超え、最適化されていない 3000 ± 300 時間よりも大幅に優れています。

8.3.1 超硬合金における Ni 基結合相の耐食性の利点

基超硬合金結合相の耐食性利点の原理と技術概要

Ni ベースの結合相 (Ni 含有量 $8\%-12\%\pm 1\%$) は、電気化学的安定性と耐食性に優れているため、酸性 ($\text{pH} < 3\pm 0.1$)、塩水噴霧 ($\text{NaCl } 5\%\pm 0.1\%$)、海洋環境などの過酷な環境における超硬合金の耐食性が大幅に向上し、従来の Co ベースの結合相に比べて明らかな利点があります。Ni の腐食電位 (E_{corr} 約 $0.1\text{ V}\pm 0.02\text{ V vs. SCE}$) は Co の腐食電位 (E_{corr} 約 $-0.3\text{ V}\pm 0.02\text{ V vs. SCE}$) よりも高く、腐食電流密度 (i_{corr}) は $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2\pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ に大幅に減少し、Co ベースの $10^{-5}\text{ A/cm}^2\pm 10^{-6}\text{ A/cm}^2$ よりも優れています。この性能差は、腐食性環境下において緻密な NiO 不動態化層 (厚さ約 $10\text{ nm}\pm 1\text{ nm}$ 、密度約 6.7 g/cm^3) が形成されることに起因します。 ($\pm 0.1\text{ g/cm}^3$)、この層は化学的不活性により腐食性媒体 (Cl^- 、 H^+ など) を効果的に隔離し、電気化学反応をブロックします (反応式: $\text{Ni} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NiO}$ 、 $\Delta G < 0\text{ kJ/mol}\pm 10\text{ kJ/mol}$)。対照的に、Co ベースの結合相は同様の条件下で容易に遊離 Co_3O_4 (密度約 6.1 g/cm^3 、厚さ $> 0.5\text{ }\mu\text{m}\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$) を生成し、その低い保護性能により腐食速度が約 10 倍増加します。Ni 基 WC 超硬合金は、高硬度 ($\text{HV } 1800\pm 30$) と靱性 ($K_{\text{IC}} 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) を維持しながら、耐食性が約 $60\%\pm 5\%$ 向上しており、海洋掘削部品、化学パイプライン、製紙設備など、高い耐食性と機械的特性が要求される分野に特に適しています。また、Ni の融点 ($1455^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) は Co ($1495^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) よりも高く、 $1000^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ の高温でも軟化度が低い (硬度低下 $< 10\%\pm 2\%$) ため、高温腐食環境での適用の可能性がさらに高まります。

超硬合金における Ni 基結合相の耐食性機構の解析

Ni ベースの結合相の耐食性の利点は、その独自の電気化学的および物理的特性に由来します。酸性媒体 ($0.1\text{ M H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{pH } 1\pm 0.1$ など) では、Ni は自己不動態化メカニズムにより NiO 層を形成します。この層は溶解度が低く ($K_{\text{sp}} \sim 10^{-15}\pm 10^{-16}$)、導電率が高い ($\sigma \sim 10^{-4}\text{ S/cm}\pm 10^{-5}\text{ S/cm}$) ため、 H^+ および Cl^- の拡散を効果的に抑制し、腐食電流を Co ベースの $10^{-5}\text{ A/cm}^2\pm 10^{-6}\text{ A/cm}^2$ から 10^{-6} A/cm^2 未満に低減します。X 線光電子分光法 (XPS) 分析の結果、Ni 2p ピーク (約 $854\text{ eV}\pm 0.1\text{ eV}$) は NiO の存在を示しており、その結合エネルギーは O 1s ピーク ($530\text{ eV}\pm 0.1\text{ eV}$) と一致しており、不動態層の化学組成を確認しています。塩水噴霧環境 ($\text{NaCl } 5\%\pm 0.1\%$ 、ISO 9227 NSS 2000 h ± 100 h) では、NiO 層の厚さは $10\text{ nm}\pm 1\text{ nm}$ で安定しており、重量減少率はわずか $0.05\text{ mg/cm}^2\pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ です。これは、Co ベースの $0.12\text{ mg/cm}^2\pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ と比較して、約 $58\%\pm 5\%$ の減少です。さらに、Ni ベースの結合相の熱膨張係数 ($13\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) は、Co ($13\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) よりも WC ($5.2\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) と一致しているため、熱サイクル ($\Delta T 500^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) によって引き起こされるマイクロクラックが減少し、間接的に耐食安定性が向上します。

超硬合金における Ni 基結合相の耐食性の顕微鏡的分析と検証

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

走査型電子顕微鏡（SEM、解像度 $<0.1\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）による観察では、Ni ベース WC の NiO 層は表面に均一に分布しており、厚さは $10\ \text{nm} \pm 1\ \text{nm}$ と安定しており、明らかな剥離やひび割れは観察されませんでした。Co ベース WC の表面には、マイクロクラック（幅 $\sim 0.2\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）を伴う緩い Co_3O_4 層（厚さ $>0.5\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ ）が見られました。X 線回折（XRD）分析により、NiO の結晶構造（面心立方、 $a=4.17\ \text{\AA} \pm 0.01\ \text{\AA}$ ）が確認され、そのピーク強度（ $2\theta \approx 37.2^\circ, 43.3^\circ$ ）は高い結晶性を示しており、不動態化層の保護性を高めています。エネルギー分散分光法（EDS）により、粒界における Ni 含有量は約 $8\% \sim 10\% \pm 0.5\%$ であり、均一に分布していることが示され、WC との良好な界面結合が確認されました。

超硬合金における Ni 基結合相の耐食性に影響を及ぼす因子の分析

Ni ベースのバインダー相の耐食性は多くの要因の影響を受け、最高の性能を達成するには総合的に最適化する必要があります。

（1）ニッケル含有量

Ni 含有量が $10\% \pm 1\%$ の場合、腐食電流 $i_{\text{corr}} < 10^{-6}\ \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A/cm}^2$ となり、重量減少率は $0.05\ \text{mg/cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg/cm}^2$ に制御され、硬度は $\text{HV } 1800 \pm 30$ のままです。ただし、Ni 含有量が $12\% \pm 1\%$ を超えると、Ni 相の増加により靱性が向上し（ K_{IC} は $5\% \pm 1\%$ 増加）、硬度は約 $10\% \pm 2\%$ 減少し（ $\text{HV } 1620 \pm 30$ に）、Ni 相の軟化が強化されるために腐食電流はわずかに $2 \times 10^{-6}\ \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A/cm}^2$ に増加します（硬度 $\text{HV } 150 \pm 20$ ）。

（2）粒度

の粒径は $0.51\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ で、粒界密度は高く（ $> 10^4\ \text{mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3\ \text{mm}^2/\text{cm}^3$ ）、重量減少率は低い（ $< 0.05\ \text{mg/cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg/cm}^2$ ）。これは、微細粒子が腐食性媒体の浸透経路を狭めるためです。粒径が $2\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ に増加すると、粒界密度が低下し、重量減少率が約 $20\% \pm 5\%$ （ $0.06\ \text{mg/cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg/cm}^2$ ）増加し、孔食深さは $2\ \mu\text{m} \pm 0.5\ \mu\text{m}$ から $3.5\ \mu\text{m} \pm 0.5\ \mu\text{m}$ に増加しました。

（3）焼結温度

$1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で焼結した場合、Ni 分布偏差は $<0.1\% \pm 0.02\%$ であり、腐食電流 i_{corr} は $< 10^{-6}\ \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A/cm}^2$ を維持し、重量減少率は安定しています。焼結温度が $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 以上に上昇すると、Ni 偏析が発生し（偏差 $>0.5\% \pm 0.1\%$ ）、粒界での Ni 濃縮により腐食電流が $15\% \pm 3\%$ （ $1.15 \times 10^{-6}\ \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A/cm}^2$ ）増加し、重量減少率は $0.07\ \text{mg/cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg/cm}^2$ に増加します。

（4）環境

$\text{pH} < 2 \pm 0.1$ の強酸性環境では、NiO 層が部分的に溶解し、腐食電流 i_{corr} が約 $30\% \pm 5\%$ 増加し（ $1.3 \times 10^{-6}\ \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A/cm}^2$ ）、重量減少率は $0.065\ \text{mg/cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg/cm}^2$ に上昇します。NaCl 濃度 $>5\% \pm 0.1\%$ の塩水噴霧では、 Cl^- 濃度の増加によって孔食腐食が発生し、孔食面積が $20\% \pm 5\%$ 増加し（ $0.01\ \text{mm}^2 \pm 0.001\ \text{mm}^2$ から $0.012\ \text{mm}^2 \pm 0.001\ \text{mm}^2$ に増加）、重量減少率は $0.06\ \text{mg/cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg/cm}^2$ に増加します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（５）表面粗さ

表面粗さ $Ra < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、表面欠陥が少なく、腐食電流 i_{corr} は低いレベル ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) に留まり、重量減少率は $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ です。 $Ra > 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、マイクロクラックとピットが増加し、腐食電流は $10\% \pm 2\%$ 増加し ($1.1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)、ピット深さは $4 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ に増加します。

例えば、WC-12Ni サンプルは、焼結温度が高い ($1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) ため、Ni 偏析 (偏差 $0.6\% \pm 0.1\%$) を示し、NaCl 5% $\pm 0.1\%$ 塩水噴霧環境における重量減少率は $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、腐食電流 i_{corr} は $1.2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ です。最適化された WC-10Ni ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で焼結、 $Ra < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) の重量減少率はわずか $0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ です。 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 、耐食性が約 $29\% \pm 5\%$ 向上しました。

8.3.1.5 Ni 基バインダー相調製プロセスの最適化

重量減少 $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ および腐食電流 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ を達成する。Ni 基 WC 焼結炭化物の製造プロセスは、その耐食性の利点を最大限に発揮するために、精密に制御する必要がある。推奨される最適化戦略には、以下の側面が含まれる。

（１）原料の最適化

高純度 Ni 粉末 (純度 $> 99.9\% \pm 0.01\%$) と WC 粉末 (粒径 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) を選択し、Ni 含有量を $8\% \sim 10\% \pm 1\%$ に制御します。この範囲で耐食性と機械的特性のバランスが取れます。Ni 含有量が高すぎる ($> 12\% \pm 1\%$) と、Ni 相が増加し、硬度が約 $10\% \pm 2\%$ 低下し ($\text{HV } 1620 \pm 30$)、靱性が $5\% \pm 1\%$ 増加します (K_{IC} が $12.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に増加) が、腐食電流がわずかに増加します ($2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ に)。WC 粒子が低すぎると ($< 8\% \pm 1\%$)、不十分な硬度 ($< \text{HV } 1600 \pm 30$) と耐食性の低下 ($i_{\text{corr}} > 2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) につながります。微細 WC 粒子 ($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) は、粒界密度 ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) を増加させることで腐食性媒体の浸透を低減し、重量減少率は $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に制御されます。

（２）ボールミル処理

湿式ボールミル処理 (媒体は無水エタノール、40 時間 ± 1 時間、ボールと材料の比率 10:1 ± 0.5) は、粉末の均一な混合、粒度分布偏差 $< 0.02 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を確保し、微細欠陥 (細孔、凝集など) を減らし、その後の焼結のための均質なマトリックスを提供し、間接的に腐食感受性を減らすために使用されます。

（３）真空焼結

$1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ 、保持時間 1 時間 ± 0.1 時間で、密度は $99.5\% \pm 0.1\%$ 、気孔率は $< 0.1\% \pm 0.02\%$ に達しました。この温度により、均一な Ni 分布 (偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) が確保され、偏析が回避されます ($1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 以上で $0.5\% \pm 0.1\%$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

以上、 i_{corr} 増加 $15\% \pm 3\%$ ）。高真空環境により酸素の浸入が低減し、 NiO の早期形成や不均一な分布が防止され、重量減少が抑えられます。

（4）後処理

熱間静水圧プレス（HIP、 $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、 $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ 、1 時間 ± 0.1 時間）を使用して残留気孔を除去し、密度をさらに向上させ（密度は $99.7\% \pm 0.1\%$ に増加）、腐食性媒体の浸透経路を減らし、孔食深さを $3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ から $2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 未満に減らしました。

（5）表面処理

精密機械研磨により表面粗さ（Ra）を $0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 未満に制御し、表面の微小亀裂およびピットを低減しました。その後、超音波洗浄（ $40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$ 、10 分 ± 1 分）により残留汚染物質（ $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）を除去し、ピット面積を $20\% \pm 5\%$ （ $0.012 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ から $0.0096 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ ）に減少させました。腐食電流 i_{corr} は $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 未満を維持しました。

（6）添加物の導入

少量の Cr_3C_2 （ $0.2\% \pm 0.01\%$ ）を添加すると、耐食性がさらに向上します。 Cr_3C_2 は高温で Cr_2O_3 層（厚さ $\sim 0.1 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ ）を形成し、これが NiO 層と相乗効果で腐食電流を約 $10\% \pm 2\%$ （ $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ から $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ）低減し、重量減少率は $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に維持されます。 Cr_3C_2 は粒径を微細化し（ $0.6 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ から $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、粒界強度を高めます（ $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ）。

これらのプロセスパラメータの最適化により、Ni ベースのバインダー相と WC の均一な結合が保証され、粒界強度が $200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ 以上に増加します。これにより、高硬度（ $\text{HV } 1800 \pm 30$ ）と靱性（ $K_{\text{IC}} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）を維持しながら、材料の耐腐食性と耐疲労性が大幅に向上します。

8.3.1.6 超硬合金の Ni 基結合相の試験仕様

超硬合金の Ni 基結合相の試験仕様は、その耐食性と機械的特性を評価することを目的としています。以下の規格が推奨されます。

（1）塩水噴霧試験

ISO 9227 NSS によれば、条件は $\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$ 溶液、温度 $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、期間 2000 時間 ± 100 時間で、重量減少（目標 $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ ）とピット深さ（目標 $< 3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ ）を測定します。

（2）酸浸漬試験

$0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ （ $\text{pH } 1 \pm 0.1$ ）に 100 時間 ± 10 時間浸漬し、重量減少（目標 $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ ）および腐食電流密度（ i_{corr} 、目標 $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）を試験します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) 電気化学試験

3 電極システム（作用電極：Ni ベース WC、参照電極：飽和カロメル電極、補助電極：白金電極）を使用して、腐食電位（ E_{corr} 、ターゲット $\sim 0.1\text{V} \pm 0.02\text{V}$ vs. SCE）と分極曲線をスキャン速度 $1\text{mV/s} \pm 0.1\text{mV/s}$ で測定しました。

8.3.1.7 超硬合金 Ni 基結合相の機械的特性試験

(1) 硬度試験

ISO 3878 に従い、ピッカース硬度計を使用して、荷重 $30\text{kg} \pm 1\text{kg}$ 、試験温度 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、目標硬度 $> \text{HV } 1800 \pm 30$ を設定します。

(2) 破壊靱性試験

ASTM E399 に従い、シングルエッジノッチビーム (SENB) 法を使用して、試験温度 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、ターゲット $K_{\text{Ic}} > 12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

(3) 高温性能試験

曲げ強度は、ISO 178(目標 $> 2000\text{MPa} \pm 100\text{MPa}$)に準拠した 3 点曲げ法を使用して $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ でテストされました。

超硬合金中の Ni 基結合相の顕微鏡的分析

SEM 観察

解像度 $< 0.1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 、NiO 層の厚さ（ターゲット $10\text{nm} \pm 1\text{nm}$ ）および表面欠陥の分析。

XPS 分析

Ni 2p ピーク（ターゲット $854\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$ ）をテストして、NiO の形成を確認しました。

EDS 分析

粒界における Ni 分布を測定します（目標 $8\% \sim 10\% \pm 0.5\%$ ）。

試験は標準的な実験室条件下で、サンプルサイズ $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ で 3 回以上繰り返す必要があります。

8.3.1.9 Ni 基超硬合金バインダー相の工学的応用

優れた耐食性と機械的特性を有する Ni 基超硬合金結合相は、様々な高温・腐食環境におけるエンジニアリング用途において大きな利点を示しています。主な用途分野と性能を、実際の事例とデータに基づき以下に示します。

(1) 海洋工学

$\pm 0.01\text{mg/cm}^2$) と高い耐腐食性（腐食電流 $i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{A/cm}^2$ ）を備えている

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ため、深海掘削スタビライザーや切削工具に広く使用されています。深海掘削において、WC-10Ni 製のスタビライザーの耐用年数は 3 年 $\pm$ 0.3 年を超え、従来の WC-10Co (1.5 年 $\pm$ 0.2 年) よりも約 100% $\pm$ 5%長く、腐食によるメンテナンスコストが約 40% $\pm$ 5%削減されます。高い硬度 (HV 1800 $\pm$ 30) と韌性 (K_{IC} 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.5 MPa $\cdot$ m^{1/2})により、高圧 (> 20 MPa $\pm$ 2 MPa) および高温 (> 500°C $\pm$ 10°C) でも切断効率が確保されます。

(2) 化学パイプラインおよび装置

酸性環境 (pH < 2 $\pm$ 0.1、例えば 0.1 M H₂SO₄) では、NiO 不動態化層 (厚さ約 10 nm $\pm$ 1 nm) の保護により、Ni 基 WC セメントカーバイドの重量減少率はわずか 0.06 mg/cm²です。 $\pm$ 0.01 mg/cm²で、ステンレス鋼 (重量減少率約 0.1 mg/cm² $\pm$ 0.01 mg/cm²) よりも優れています。これは、化学パイプラインのバルブやポンプの耐食コーティングに使用され、耐用年数は 2 年 $\pm$ 0.2 年を超え、従来の材料 (304 ステンレス鋼、寿命約 1 年 $\pm$ 0.1 年など) よりも約 100% $\pm$ 5%長くなります。塩化物 (HCl など) を含む化学反応器では、WC-10Ni は耐孔食性 (孔食深さ<3 μ m $\pm$ 0.5 μ m) を維持し、機器の漏れのリスクを低減します。

(3) 製紙業

ブレードなどは、塩化物含有環境 (NaCl > 5% $\pm$ 0.1%) および高温環境 (> 400°C $\pm$ 10°C) にさらされます。Ni 基 WC 焼結炭化物は、低い腐食電流 (i_{corr} < 10⁻⁶ A/cm² $\pm$ 10⁻⁷ A/cm²) と高い耐摩耗性 (硬度 > HV 1800 $\pm$ 30) を備えているため、理想的な選択肢です。WC-10Ni 製の研磨ローラーは、5000 時間 $\pm$ 500 時間の連続運転後でも重量減少はわずか 0.05 mg/cm²です。 $\pm$ 0.01 mg/cm²、表面摩耗深さ < 10 μ m $\pm$ 1 μ m で、WC-10Co (重量減少率 0.12 mg/cm² $\pm$ 0.01 mg/cm²、摩耗深さ 20 μ m $\pm$ 2 μ m)と比較して耐久性が約 50% $\pm$ 5% 向上し、交換頻度と生産コストが削減されます。

(4) 航空・エネルギー機器

航空宇宙エンジン部品 (タービンブレードなど) およびガスタービンノズルでは、Ni 基 WC セメントカーバイド (Cr₃C₂ 0.2% $\pm$ 0.01% を含む WC-10Ni など) は、900°C $\pm$ 10°C および熱サイクル (Δ T 500°C $\pm$ 10°C) 条件下で、熱疲労亀裂長さが < 0.04 mm $\pm$ 0.01 mm、重量損失率が < 0.25 mg/cm² です。 $\pm$ 0.05 mg/cm²、耐用年数 > 5000 時間 $\pm$ 500 時間で、最適化されていない 3000 時間 $\pm$ 300 時間よりも優れています。高い熱安定性 (硬度 > HV 1600 $\pm$ 30) と耐酸化性により、高温腐食環境 (SO₂雰囲気など) でも良好な性能を発揮し、熱割れによる故障率を約 45% $\pm$ 5% 低減します。

8.3.1.10 Ni 基超硬合金の応用上の利点と拡大

Ni 基 WC 超硬合金の工学応用における優位性は、その総合的な性能にあります。耐食性は 60% $\pm$ 5%向上し、高硬度 (HV 1800 $\pm$ 30)、高韌性 (K_{IC} 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.5 MPa $\cdot$ m^{1/2})、1000°C $\pm$ 10°C での安定性を備えています。これらの特性により、Ni 基 WC 超硬合金は、過酷な環境 (深海高圧、酸性化学産業、高温航空など) において、従来の Co 基材料やステンレス鋼の代替品として期待されています。水蒸気 (湿度 > 50% $\pm$ 5%) またはより高い温度勾配 (Δ T 600°C $\pm$ 10°C) が存在する場合、多層コーティング (例: TiN/Al₂O₃、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

厚さ $5\sim 20\mu\text{m}\pm 0.1\mu\text{m}$) を組み合わせることで、パフォーマンスがさらに向上し、次世代エネルギーデバイスなどの超高温 ($>1100^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) または高サイクル数 ($>10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回) のアプリケーションに拡張できます。

経済的および環境的利益

Ni 基 WC の適用により、メンテナンスコストが大幅に削減されます。例えば、海洋掘削部品の年間メンテナンスコストは $40\%\pm 5\%$ 削減され、航空部品の効率は $20\%\pm 3\%$ 向上します。しかし、Ni は比較的高価 (Co の約 1.5~2 倍) であり、Ni 含有量 ($8\%\sim 10\%\pm 1\%$) とプロセス (HIP 後処理など) を最適化することでコストを抑制する必要があります。環境面では、その耐久性により材料廃棄物の量が削減され、持続可能な開発の要件を満たしています。

Ni 基 WC 超硬合金は、海洋工学、化学パイプライン、製紙産業、航空エネルギー機器において優れた性能を発揮し、重量減少率は $0.06\text{ mg/cm}^2\pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 未満、耐用年数は $50\%\sim 100\%\pm 5\%$ 延長します。耐食性と高温安定性は様々なエンジニアリング要件を満たし、将来的にはコーティングや合金化によって用途がさらに拡大する可能性があります。

8.3.2 超硬合金への Cr_3C_2 添加剤の導入

8.3.2.1 Cr_3C_2 添加剤の超硬合金への導入の原理と技術概要

超硬合金 Cr_3C_2 添加剤は、特に高温 ($1000^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) および腐食性環境 (酸素含有雰囲気または塩化物含有雰囲気など) において、超硬合金の耐酸化性と耐高温性を大幅に向上させます。推奨添加量は $0.2\%-0.5\%\pm 0.01\%$ です。 Cr_3C_2 は高温で酸素と反応して、緻密な Cr_2O_3 保護層 (厚さ $\sim 0.1\text{-}0.2\mu\text{m}\pm 0.05\mu\text{m}$ 、密度 $\sim 5.2\text{ g/cm}^3\pm 0.1\text{ g/cm}^3$) を形成し、酸素と腐食性媒体を効果的に遮断し、重量増加を $<0.3\text{ mg/cm}^2\pm 0.05\text{ mg/cm}^2$ に制御し、スパイクなしサンプルの $0.5\text{ mg/cm}^2\pm 0.05\text{ mg/cm}^2$ よりも優れています。この保護層は、酸化速度 ($0.4\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}\pm 0.05\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}$ から $<0.2\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}\pm 0.05\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}$) を低減し、Ni ベースの結合相の NiO 層と相乗的に作用して、腐食電流 ($i_{\text{corr}} 10^{-6}\text{ Cr}_3\text{C}_2$) をさらに低減します。また、WC 粒子を微細化 ($0.6\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$ から $0.51\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$) することで粒界強度 ($>200\text{ MPa}\pm 20\text{ MPa}$) を向上させながら、硬度 ($>\text{HV } 1500\pm 30$) および靱性 ($K_{\text{IC}} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) を維持し、高温および高負荷の分野に適しています。航空タービンブレードおよびガスタービンノズルに使用されています。さらに、 Cr_3C_2 (融点 $1890^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$) は高温安定性に優れているため、 $1000^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ における Co 基合金よりも軟化が少なく (硬度低下 $5\%\pm 1\%$ 未満)、材料の長期耐久性が向上します。

超硬合金 Cr_3C_2 添加剤の抗酸化および耐腐食性メカニズムの解析

Cr_3C_2 添加剤は、その化学反応と微細構造制御に由来します。 $1000^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ の酸化環境下では、 Cr_3C_2 は反応 ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$, $\Delta G < -1000\text{ kJ/mol} \pm 50\text{ kJ/mol}$) し、 Cr_2O_3 層を形成します。この層は低い酸素拡散係数 ($D_{\text{O}} \approx 10^{-14}\text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-15}\text{ cm}^2/\text{s}$) を有し、酸

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

素の浸透を効果的に遮断します。これにより、重量増加は 0.5 mg/cm^2 から 1.5 mg/cm^2 に低減されます。 $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ から $< 0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ に低下すると、耐酸化性が約 $40\% \pm 5\%$ 向上します。酸性媒体 ($0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{pH } 1 \pm 0.1$ など) または塩水噴霧 ($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$) では、 Cr_2O_3 層と NiO の 2 つの層が一緒になって二重の保護構造を形成し、腐食電流 i_{corr} が $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に低下し、重量減少率が $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に維持されます。添加剤なしの 0.07 mg/cm^2 と比較して、 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ は約 $29\% \pm 5\%$ 減少します。また、 Cr_3C_2 は結晶粒を微細化し、粒界結合を強化し、熱疲労亀裂成長 ($0.05 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ から $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$) を低減し、WC との熱膨張係数 ($10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) の整合性が高く、熱サイクル ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) による応力集中を低減します。

8.3.2.3 Cr_3C_2 添加剤のセメント炭化物への導入の顕微鏡分析と検証

走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) による観察では、 Cr_3C_2 を追加した後、 Cr_2O_3 層が表面に均一に分布し、厚さが $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ で安定し、明らかな剥離や亀裂がないことがわかりました。一方、追加していないサンプルの表面に酸化穴 (直径約 $0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) が現れました。X 線回折 (XRD) 分析により、 Cr_2O_3 の六方結晶構造 ($a = 4.96 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$ 、 $c = 13.58 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$) が確認され、ピーク強度 ($2\theta \approx 33.6^\circ, 36.2^\circ$) は高い結晶性を示しており、保護層の安定性が向上しています。エネルギー分散分光法 (EDS) では、粒界における Cr 含有量が約 $0.5\% \sim 1\% \pm 0.1\%$ と均一に分布していることが示され、WC 相および Ni 相との良好な界面結合が確認されました。X 線光電子分光法 (XPS) では、Cr 2p ピーク (約 $576.5 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$) が検出され、これは O 1s ピーク ($530 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$) と一致し、 Cr_2O_3 の形成が確認されました。

8.3.2.4 超硬合金 Cr_3C_2 添加剤の性能に影響を与える要因の分析

超硬合金 Cr_3C_2 添加剤の性能は多くの要因の影響を受け、正確に制御する必要があります。

(1) 加算額

Cr_3C_2 含有量が $0.2\% \pm 0.01\%$ の場合、重量増加は $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 未満です。 i_{corr} は約 $10\% \pm 2\%$ 減少します ($9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ まで)。含有量が $0.5\% \pm 0.01\%$ を超えると、 η 相 (WC-Cr-Co 複合相) が生成する可能性があり、硬度は約 $5\% \pm 1\%$ 減少します ($\text{HV } 1425 \pm 30$ まで)。靱性は $3\% \pm 1\%$ 増加します (K_{Ic} は $12.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ まで増加します) が、 i_{corr} は $1.1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ まで増加します。

(2) 粒度

WC 粒径は $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ で、 Cr_3C_2 は均一に分布しており、重量減少率は低い ($< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$)。粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に増加すると、 Cr_2O_3 層は不連続となり、重量減少率は $15\% \pm 3\%$ ($0.055 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$) 増加し、孔食深さは $2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ から $3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ に増加した。

(3) 焼結温度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1450°C ± 10°C で焼結すると、Cr₃C₂ は均一に固溶し、重量増加は < 0.3 mg/cm² ± 0.05 mg/cm² となります。温度が 1550°C ± 10°C を超えて上昇すると、Cr が揮発し（損失 > 0.1% ± 0.02%）、Cr₂O₃ 層の厚さは減少し（< 0.1 μm ± 0.05 μm）、i_{corr} は 10% ± 2% 増加します（1.1 × 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² まで）。

（4）環境

pH < 2 ± 0.1 の強酸中では、Cr₂O₃ 層が部分的に溶解し、i_{corr} が 20% ± 3%（1.08 × 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²）増加し、重量減少率は 0.06 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² に増加しました。NaCl > 5% ± 0.1% の塩水噴霧では、Cl⁻ が Cr₂O₃ 腐食を促進し、孔食面積が 15% ± 3%（0.01 mm² ± 0.001 mm² から 0.0115 mm² ± 0.001 mm² に増加）増加しました。

（5）表面粗さ

Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm の場合、Cr₂O₃ 層は無傷で、i_{corr} は低い値（< 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²）を維持します。Ra > 0.1 μm ± 0.01 μm の場合、表面欠陥が増加し、i_{corr} は 8% ± 2%（1.08 × 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²）増加し、孔食深さは 3.5 μm ± 0.5 μm に増加します。

例えば、WC-10Ni-0.6%Cr₃C₂ サンプルは、高温焼結（1550°C ± 10°C）による Cr の揮発により、塩水噴霧中の重量減少率は 0.08 mg/cm² でした。±0.01 mg/cm²、i_{corr} は 1.2 × 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² に増加しました。最適化された WC-10Ni-0.2%Cr₃C₂（1450°C ± 10°C、Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm）の重量減少率はわずか 0.03 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² でした。i_{corr} < 9 × 10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²、抗酸化能力が約 40% ± 5% 増加しました。

8.3.2.5 超硬合金 Cr₃C₂ 添加剤の製造プロセスの最適化

質量増加 < 0.3 mg/cm² ± 0.05 mg/cm² および i_{corr} < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² を達成するには、Cr₃C₂ 添加剤の導入を調製プロセスと連携して最適化する必要があります。推奨される戦略は以下のとおりです。

（1）原料の最適化

の Cr₃C₂ 粉末（純度 > 99.5% ± 0.01%、粒径 0.5 μm ± 0.01 μm）を選択し、WC（粒径 0.51 μm ± 0.01 μm）および Ni 粉末（8%-10% ± 1%）と混合します。Cr₃C₂ 含有量は 0.2%-0.5% ± 0.01% に制御されます。過剰（> 0.5% ± 0.01%）の場合、η 相が誘発され、硬度が 5% ± 1% 低下する可能性があります。一方、低すぎる（< 0.2% ± 0.01%）場合、抗酸化効果が不十分になります（重量増加 > 0.4 mg/cm²）。±0.05 mg/cm²）。

（2）ボールミル処理

湿式ボールミル処理（媒体：無水エタノール、40 時間 ± 1 時間、ボールと材料の比率：10:1 ± 0.5）を使用して、Cr₃C₂ の均一な分散を確保し、粒度分布の偏差を < 0.02 μm ± 0.01 μm に抑え、凝集を減らし（< 0.1% ± 0.02%）、Cr₂O₃ 層の形成のための均質なマトリックスを提供しました。

（3）真空焼結

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1450°C±10°C、圧力<10⁻³Pa±10⁻⁴Pa、保持時間 1 時間±0.1 時間で焼結すると、密度は 99.5%±0.1%、気孔率は<0.1%±0.02%に達します。この温度により、Cr₃C₂固溶体が均一な Cr₂O₃層を形成します。1550°C±10°Cを超えると Cr が揮発し、保護層が不完全になります（厚さ<0.1μm±0.05μm）。

（4）後処理

熱間静水圧プレス（HIP、1200°C±10°C、200 MPa±10 MPa、1 時間 ±0.1 時間）を使用して、残留多孔性を排除し、密度を 99.7%±0.1%に増加し、酸化媒体の浸透を減らし、Cr₂O₃ 層の厚さを 0.2 μm±0.05 μm に増加しました。

（5）表面処理

精密研磨により Ra を 0.05 μm±0.01 μm に制御し、表面酸化物 (<0.1%±0.02%) を超音波洗浄 (40 kHz±1 kHz、10 分 ±1 分) で除去し、ピット面積を 15%±3% (0.011 mm² から 0.01 mm²)削減しました。±0.001 mm² から 0.00935 mm²±0.001 mm²)に削減し、i_{corr} は<10⁻⁶ A/cm²±10⁻⁷ A/cm² を維持します。

（6）添加剤分散最適化

メカニカルアロイング（MA、200 rpm±10 rpm、10 時間 ±0.5 時間）を使用して、Cr₃C₂ と WC/Ni 相間の界面結合を強化し、偏析を減らし (<0.05%±0.01%)、Cr₂O₃ 層の均一性を改善しました。

これらのプロセスにより、均一な Cr₃C₂ 分布、200 MPa±20 MPa を超える粒界強度、維持された硬度 (>HV 1500±30) と靱性(K_{1c}>12 MPa·m^{1/2}±0.5 MPa·m^{1/2})が保証されます。

8.3.2.6 超硬合金 Cr₃C₂添加剤のエンジニアリング事例と性能比較

WC-10Ni-0.2%Cr₃C₂と WC-10Ni を例にとると、1000°C±10°C で 100 時間±10 時間酸化した後、Cr₃C₂を添加したサンプルの質量増加はわずか 0.25 mg/cm²±0.05 mg/cm² です。i_{corr}<9×10⁻⁷ A/cm²±10⁻⁸ A/cm²で、無添加の 0.5 mg/cm²±0.05 mg/cm² および 1.1×10⁻⁶ A/cm²±10⁻⁷ A/cm² と比較して、耐酸化性が 50%±5% 向上しています。塩水噴霧試験 (NaCl 5%±0.1%、2000 時間 ±100 時間) では、重量減少率が 0.03 mg/cm²±0.01 mg/cm² に減少し、孔食深さ <2 μm±0.5 μm で、無添加の 0.07 mg/cm²±0.01 mg/cm² および 3.5 μm±0.5 μm よりも良好です。航空タービンプレード用途では、WC-10Ni-0.2%Cr₃C₂の耐用年数は 6000 時間±500 時間を超え、添加なしの 5000 時間±500 時間よりも 20%±5%長く、高温割れによる故障率を約 30%±5%低減します。

8.3.2.7 超硬合金における Cr₃C₂添加剤の用途拡大と限界

Cr₃C₂ を添加することで、この超硬合金は高温酸化（例：1100°C±10°C）および腐食環境において優れた性能を発揮し、ガスタービンノズル（寿命 >10⁴ 時間 ±10³ 時間）や高温金型（サイクル >10⁵ 回 ±10⁴ 回）に適しています。SO₂ 含有雰囲気では、Cr₂O₃

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3 層は保護効果を維持しますが（重量増加 $<0.35 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ ）、 $\text{pH} < 1 \pm 0.1$ の強酸では溶解率が $15\% \pm 3\%$ 増加するため、 TiN コーティング（厚さ $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）と組み合わせて最適化する必要があります。 Cr_3C_2 は WC の約 2~3 倍と高価であり、性能と経済性のバランスをとるために添加量をコントロールする必要があります（ $0.2\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ ）。

8.3.2.8 最適化の方向性と将来の展望 Cr_3C_2 添加剤をセメント炭化物に導入すること

Cr_3C_2 効果を高めるために、 TaC ($0.1\% \pm 0.01\%$) を追加して Cr_2O_3 層の熱安定性を高めると、 i_{corr} は $5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に減少します。超高温 ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) では、 Al_2O_3 コーティング（厚さ $10 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）と組み合わせることで、重量増加を $0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ に制御でき、硬度は $\text{HV } 1600 \pm 30$ を超えます。将来的には、ナノ Cr_3C_2 （粒子サイズ $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）または Cr-Ni 複合添加剤の開発により、耐酸化性と経済性がさらに向上し、極限エネルギー機器への用途が拡大します。

Cr_3C_2 添加剤 ($0.2\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$) Cr_2O_3 層（厚さ $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ ）を形成することにより質量増加 ($< 0.3 \text{ mg/cm}^2$) を大幅に削減します。 $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ および腐食電流 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)、耐酸化性が $40\% \pm 5\%$ 向上し、硬度 ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) および靱性 ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) は維持されます。安定した性能を確保するために、調製プロセスを最適化します（組成最適化 $\text{Cr}_3\text{C}_2 0.2\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ 、ボールミル処理 40 時間 ± 1 時間、焼結 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、HIP 後処理、表面研磨 $\text{Ra} < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）。添加量、粒径、焼結温度、環境、表面粗さなどの要素を総合的に管理する必要があります。

高温・腐食環境に適しています。将来的には、複合添加やコーティングにより、その用途をさらに拡大することができます。

8.3.3 硬質合金表面コーティング保護

8.3.3.1 超硬合金表面コーティングの保護原理と技術の概要

表面コーティング保護技術は、特に高温 ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) および腐食性環境（酸性または塩水噴霧条件など）において、超硬合金の耐食性と耐高温性を大幅に向上させます。推奨コーティングには、 TiN および Al_2O_3 があり、厚さは $5 \sim 20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ で、物理蒸着 (PVD、 $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) または化学蒸着 (CVD、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) プロセスで形成されます。 TiN コーティング（硬度 $> \text{HV } 2000 \pm 50$ 、密度 $\sim 5.4 \text{ g/cm}^3 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ ）は、優れた耐摩耗性と耐酸化性を備え、質量増加は $< 0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ で、腐食電流 (i_{corr}) は $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に減少します。 Al_2O_3 コーティング（融点 $2072^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、熱伝導率約 $30 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）は、高密度の酸化物層（厚さ約 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）を形成することで酸素と腐食性媒体を隔離し、重量損失率は $0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 未満に維持され、コーティングされていないサンプルの $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ よりも優れています。これらのコーティングは、 Ni ベースのバインダー相または Cr_3C_2 添加剤と相乗的に作用し、硬度 ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) と靱性 ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を維持

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

するため、航空宇宙タービンブレード、化学装置、海洋ツールなどに広く使用されています。さらに、コーティングの高温安定性（TiN は $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ まで、 Al_2O_3 は $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ まで）により、熱サイクル（ $\Delta T 500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ）による性能低下が低減されます。

8.3.3.2 超硬合金表面コーティングの耐食性および耐酸化性メカニズムの解析

表面コーティングの保護効果は、その物理的バリア性と化学的不活性性に由来します。 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ の酸化環境下において、 Al_2O_3 コーティングは反応（ $4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\Delta G < -1500 \text{ kJ/mol} \pm 50 \text{ kJ/mol}$ ）により緻密な酸化層を形成します。また、低い酸素拡散係数（ $D_{\text{O}} \approx 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$ ）により、質量増加を $< 0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ に抑制し、耐酸化性を約 $60\% \pm 5\%$ 向上させます。TiN コーティングは、高い硬度（ $> \text{HV } 2000 \pm 50$ ）と低い摩擦係数（ $\sim 0.4 \pm 0.05$ ）により、表面摩耗と微小亀裂の伝播（ $0.05 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ から $< 0.02 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）を低減します。酸性媒体（ $0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{pH } 1 \pm 0.1$ など）または塩水噴霧（ $\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$ ）では、コーティングにより Cl^- および H^+ が分離され、 i_{corr} は $8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に減少し、重量損失率は $0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に減少します。これに対し、コーティングなしの場合の 0.07 mg/cm^2 は $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ であり、約 $43\% \pm 5\%$ 減少します。コーティングの熱膨張係数は基材の熱膨張係数（TiN $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、 Al_2O_3 $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、WC $5.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）と一致しているため、熱応力（ $< 300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）が低減され、熱疲労耐性が向上します。

8.3.3.3 超硬合金表面コーティングの顕微鏡分析と検証

走査型電子顕微鏡（SEM、解像度 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）による観察では、TiN および Al_2O_3 コーティングは表面が滑らかで厚さも均一（ $5 \sim 20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）であり、明らかな剥離や亀裂は見られませんでした。コーティングされていないサンプルの表面には酸化斑点（直径約 $0.4 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）が現れました。X 線回折（XRD）分析により、TiN の立方結晶構造（ $a = 4.24 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$ 、 $2\theta \approx 36.7^{\circ}$ 、 42.6° ）と Al_2O_3 の六方構造（ $a = 4.76 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$ 、 $c = 12.99 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$ 、 $2\theta \approx 35.1^{\circ}$ 、 43.3° ）が確認され、ピーク強度は高い結晶性を示しています。エネルギー分散分光法（EDS）では、コーティング中の Ti または Al の含有量が $95\% \pm 1\%$ を超えており、WC/Ni 界面で十分に統合されていることが示されています（拡散層の厚さは約 $0.1 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ ）。X 線光電子分光法（XPS）では、O 1s ピーク（ $530 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$ ）と一致する Ti 2p ピーク（約 $455 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$ ）または Al 2p ピーク（ $74 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$ ）が検出され、酸化層の形成が確認されます。

8.3.3.4 超硬合金表面コーティングに影響を与える要因の分析

表面コーティング保護の効果は多くの要因によって左右されるため、正確に制御する必要があります。

（1）コーティングの厚さ

厚さは $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、 $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ かつ重量減少 $< 0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 。厚さが $> 20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ の場合、内部応力が増加し（ $> 500 \text{ MPa}$ ）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

± 50 MPa)、剥離のリスクが 10% ± 2% 増加し、 i_{corr} は $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に増加します。

(2) コーティングの種類

TiN コーティングは $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (重量増加 $< 0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$) では良好な性能を発揮しますが、 $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (重量増加 $> 0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$) を超えると酸化が進行します。 Al_2O_3 コーティングは $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (重量増加 $< 0.15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$) では安定していますが、耐摩耗性は TiN よりもわずかに低くなります (硬度が $5\% \pm 1\%$ 低下します)。

(3) 堆積温度

PVD $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ では TiN コーティングの密着性 ($> 50 \text{ N/mm}^2 \pm 5 \text{ N/mm}^2$) を確保しますが、 $> 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の場合は熱応力割れ (幅 $\sim 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) が発生します。CVD $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ は Al_2O_3 に適していますが、マトリックスの軟化 (硬度の $10\% \pm 2\%$ の低下) を最適化する必要があります。

(4) 環境

TiN コーティングの溶解率は $15\% \pm 3\%$ (i_{corr} が $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) 増加し、 Al_2O_3 は安定します ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$)。NaCl $> 5\% \pm 0.1\%$ の塩水噴霧では、孔食面積が $10\% \pm 2\%$ ($0.01 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ から $0.011 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$) 増加します。

(5) 表面粗さ

コーティング密着性が高い ($> 60 \text{ N/mm}^2$) 場合、 $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m} \pm 5 \text{ N/mm}^2$ と、 i_{corr} は低くなります。 $R_a > 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、欠陥が増加し、 i_{corr} は $7\% \pm 2\%$ ($8.6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) 増加します。

例えば、 Al_2O_3 (20) でコーティングされた WC-10Ni サンプルでは、 $\mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、CVD $1050^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ は内部応力が大きく、剥離率は $15\% \pm 2\%$ 、重量減少率は $0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ です。最適化された TiN コーティング ($10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、PVD $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) の重量減少率はわずか $0.03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ です。 $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 、耐食性が約 $57\% \pm 5\%$ 向上しました。

8.3.3.6 超硬合金表面コーティング保護のための準備プロセスの最適化

重量減少 $< 0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ および $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ を達成するには、表面コーティングプロセスを厳密に管理する必要があります。推奨される戦略は以下のとおりです。

(1) 基板前処理

WC-10Ni の表面粗さ (R_a) は研磨により $0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に制御され、超音波洗浄 ($40\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$ 、10 分 ± 1 分) を使用して汚染物質 ($< 0.1\% \pm 0.02\%$) を除去し、コーティングの密着性 ($> 60 \text{ N/mm}^2$) を向上させました ($\pm 5 \text{ N/mm}^2$)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（2）コーティングの選択と厚さ

TiN（厚さ $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）または Al_2O_3 （厚さ $10 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）を選択します。TiN の場合は PVD（ $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、バイアス電圧 $-100 \text{ V} \pm 10 \text{ V}$ 、堆積速度 $0.5 \mu\text{m/h} \pm 0.1 \mu\text{m/h}$ ）を使用し、 Al_2O_3 の場合は CVD（ $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力 $10 \text{ kPa} \pm 1 \text{ kPa}$ 、堆積速度 $0.3 \mu\text{m/h} \pm 0.1 \mu\text{m/h}$ ）を使用して、過度の厚さ（ $> 20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）による内部応力を回避します。

（3）堆積プロセスの最適化

PVD では、 Ar/N_2 流量比（ $1:1 \pm 0.1$ ）を制御して TiN 相の純度（ $> 98\% \pm 1\%$ ）を確保します。CVD では、 H_2 （ $5\% \pm 0.5\%$ ）を添加して Al_2O_3 の密度（気孔率 $< 0.05\% \pm 0.01\%$ ）を向上させ、酸素の拡散を低減します。

（4）後処理

低温アニール処理（ $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、2 時間 ± 0.1 時間）により残留応力（ $< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ）が解放され、コーティングと基材間の結合が強化されます（界面せん断強度 $> 50 \text{ N/mm}^2$ ）。 $\pm 5 \text{ N/mm}^2$ ）。

（5）多層コーティング

TiN（ $5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）+ Al_2O_3 （ $10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）、TiN は耐摩耗性を提供し、 Al_2O_3 は耐酸化性を高め、 i_{corr} は $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に低下し、重量減少率は $< 0.03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ になります。

（6）表面仕上げ

$\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に最適化し、マイクロクラックを削減し、ピット面積を $10\% \pm 2\%$ （ $0.011 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ から $0.0099 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ ）削減しました。

これらのプロセスにより、硬度（ $> \text{HV } 1800 \pm 30$ ）と靱性（ $K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）を維持しながら、 $60 \text{ N/mm}^2 \pm 5 \text{ N/mm}^2$ を超える接着力を備えた均質なコーティングが保証されます。

8.3.3.7 超硬合金表面コーティングのエンジニアリング事例と性能比較

WC-10Ni-TiN（ $10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）と未コーティングの WC-10Ni を例に挙げると、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で 100 時間 ± 10 時間酸化した後、TiN コーティングサンプルは $0.15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、 $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に増加しました。これに対し、未コーティングでは $0.5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、 $1.1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ であり、耐酸化性が $70\% \pm 5\%$ 向上しています。塩水噴霧試験（NaCl $5\% \pm 0.1\%$ 、2000 時間 ± 100 時間）では、重量減少率は $0.03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、孔食深さは $1.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 未満に減少し、コーティングなしの $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ および $3.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ の 0.07 mg/cm^2 よりも良好でした。航空タービンブレードでは、TiN コーティングサンプルの耐用年数は 7000 時間 ± 500 時間を超え、コーティングなしの 5000 時間 ± 500 時間よりも $40\% \pm 5\%$ 長く、熱亀裂破損率は約 $35\% \pm 5\%$ 減少しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.3.8 超硬合金表面コーティングの適用範囲の拡大と限界

表面コーティングにより、超硬合金は高温酸化（ $1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ など）および腐食環境で優れた性能を発揮し、ガスタービンノズル（寿命 $> 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間）や深海ドリルビット（耐圧 $> 30 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$ ）に適しています。大気中では、 Al_2O_3 コーティングは保護機能を維持しますが（重量増加 $< 0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ ）、 $\text{pH} < 1 \pm 0.1$ の強酸での TiN の溶解率は $20\% \pm 3\%$ 増加するため、 Al_2O_3 と組み合わせて最適化する必要があります。コーティングプロセスのコストは比較的高く（基材の約 2～3 倍）、経済性は薄層設計（ $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）によって制御する必要があります。

8.3.3.9 超硬合金表面コーティングの最適化の方向性と将来展望

コーティング効果を向上させるために、TiN/ Al_2O_3 勾配コーティング（厚さ $15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）を開発することができ、 i_{corr} は $6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ まで低減されます。超高温（ $> 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ）では、 ZrO_2 （ $5\% \pm 0.5\%$ ）が追加されて熱安定性が向上し、重量増加は $< 0.15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、硬度は $> \text{HV } 1900 \pm 30$ になります。将来的には、プラズマ噴霧（温度 $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ）またはナノコーティング（粒子サイズ $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）を使用して、接着性と耐久性を向上させ、極限の航空およびエネルギー機器アプリケーションに拡張できます。

表面コーティング（例：TiN $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、 Al_2O_3 $10 \sim 15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）は、保護層（厚さ約 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）および腐食電流（ $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ）を形成することで、重量損失（ $< 0.04 \text{ mg/cm}^2$ ）を大幅に低減し、耐酸化性が $60\% \pm 5\%$ 向上し、硬度（ $> \text{HV } 1800 \pm 30$ ）および靱性（ $K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）が向上します。安定した性能を確保するために、前処理プロセス（基板前処理 $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、PVD/CVD 成膜、低温アニール、多層設計）を最適化します。コーティングの厚さ、種類、成膜温度、環境、表面粗さなどの要因を総合的に制御する必要があります。高温・腐食環境にも適しています。将来的には、傾斜コーティングやナノテクノロジーの活用により、さらに用途を拡大することができます。

8.3.4 超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータの最適化

超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータ最適化の原理と技術の概要

プロセスパラメータの最適化は、超硬合金の耐食性と耐高温性を向上させるための重要な手段です。製造プロセスにおける温度、圧力、時間などのパラメータを精密に制御することで、Ni 基バインダー相、 Cr_3C_2 添加剤、および表面コーティングの相乗効果が向上します。推奨される最適化パラメータは、焼結温度 $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、圧力 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ 、ボール

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ミル処理時間 40 時間 $\pm$ 1 時間、熱間静水圧プレス（HIP）温度 1200°C $\pm$ 10°Cです。これらのパラメータを最適化すると、超硬合金の重量損失率は $< 0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に減少し、腐食電流(i_{corr})は $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に減少し、硬度は $> \text{HV } 1800 \pm 30$ に維持され、靱性は $> 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に維持されます。最適化されたプロセスにより、微細欠陥（気孔率 $<0.1\% \pm 0.02\%$ など）や相分離（ $<0.1\% \pm 0.02\%$ ）が低減し、粒界強度（ $>200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ）も向上します。高温（1000°C $\pm$ 10°C）および腐食環境（NaCl 5% $\pm$ 0.1%など）での耐腐食性に優れており、海洋掘削、航空タービン、化学装置などに適しています。さらに、最適化されたプロセスは、熱サイクル（ ΔT 500°C $\pm$ 10°C）による応力集中（ $<300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）を低減し、耐用年数を延ばします。

8.3.4.2 超硬合金プロセスパラメータ最適化の耐食性と性能メカニズムの解析

プロセスパラメータの最適化の核心は、微細構造と相分布の均一性にあります。1450°C $\pm$ 10°Cでの焼結により、Ni ベースのバインダー相は WC と均一な固溶体を形成し（Ni 分布偏差 $<0.1\% \pm 0.02\%$ ）、NiO 層の厚さは 10nm $\pm$ 1nm で安定し、 i_{corr} は $<10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ に減少しました。40 時間 $\pm$ 1 時間のボールミル処理により、粒子は微細化（ $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）され、粒界密度は $>10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$ に増加し、腐食性媒体の浸透が減少し、重量減少率は $<0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ となりました。HIP 1200°C $\pm$ 10°C では残留気孔率（ $< 0.05\% \pm 0.01\%$ ）が除去され、密度は 99.7% $\pm$ 0.1%に達し、耐酸化性（質量増加 $< 0.25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ ）が向上します。高温酸化（1000°C $\pm$ 10°C）では、最適化されたパラメータにより Cr₃C₂の揮発（損失 $< 0.05\% \pm 0.01\%$ ）が減少し、Cr₂O₃層の厚さは 0.1~0.2 $\mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ に維持され、耐酸化性は約 45% $\pm$ 5%向上しました。熱膨張係数のマッチング（WC $5.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、Ni $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）により、熱疲労亀裂（ $< 0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）が減少し、長期安定性が向上しました。

8.3.4.3 超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータ最適化の微視的分析と検証

走査型電子顕微鏡（SEM、解像度 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）による観察では、最適化されたプロセスのサンプルは均一な粒子（ $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）と気孔率 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ であったのに対し、最適化されていないサンプル（1500°C $\pm$ 10°C で焼結）には偏析ゾーン（直径 $\sim 0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）がありました。X 線回折（XRD）分析により、WC 相（ $2\theta \sim 35.6^\circ$ 、 48.3° ）と Ni 相（ $2\theta \sim 44.5^\circ$ ）のピーク強度が均一であることが確認され、最適化された相分布が示されました。エネルギー分散分光法（EDS）により、粒界における Ni および Cr 含有量はそれぞれ 8%~10% $\pm$ 0.5%、0.5%~1% $\pm$ 0.1%であり、明らかな偏析は見られないことが示されました。X 線光電子分光法（XPS）では、Ni 2p ピーク（854 eV $\pm$ 0.1 eV）と Cr 2p ピーク（576.5 eV $\pm$ 0.1 eV）が検出され、これらは O 1s ピーク（530 eV $\pm$ 0.1 eV）と一致し、NiO 層と Cr₂O₃層の形成が確認されました。

8.3.4.4 超硬合金の耐食性および耐高温性のプロセスパラメータ最適化に影響を与える要因の分析

プロセスパラメータの最適化の効果は多くの要因によって左右されるため、正確に制御す

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

る必要があります。

（１）焼結温度

1450℃±10℃では、Ni 分布偏差は 0.1%±0.02%未満、 i_{corr} は $8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 未満です。1500℃±10℃を超えると、Ni 偏析は 0.5%±0.1%を超え、 i_{corr} は 15%±3% 増加し（ $1.15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ まで）、重量減少率は $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ まで増加します。

（２）ボールミル時間

40 時間±1 時間では、粒径は $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、重量減少率は $0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 未満です。30 時間±1 時間未満では、粒径は粗大化し（ $0.7 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 超）、重量減少率は 10%±2%増加し（ $0.044 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ ）、重量減少率は 10%±2%増加します。

（３）圧力

真空度が $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ 未満の場合は、酸素含有量は 0.01%±0.001%未満、質量増加は $0.25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 未満です。圧力が $10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ を超える場合は、酸化質量増加は 20%±3%（ $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ まで）です。

（４）HIP 温度

1200℃±10℃では、密度は 99.7%±0.1%、孔食深さは $2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 未満です。1300℃±10℃を超えると、マトリックスが軟化（硬度が 5%±1%低下）し、 i_{corr} は $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に増加します。

（５）周囲の湿度

湿度 > 50%±5% の場合、表面酸化が加速され、 i_{corr} が 10%±2%（ $8.8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ）増加するため、コーティングの最適化と組み合わせる必要があります。

例えば、WC-10Ni サンプルは 1500℃±10℃、 $10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ で焼結され、重量減少は $0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ でした。 i_{corr} は $1.2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ に達します。最適化されたプロセス（1450℃±10℃、 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ 、HIP 1200℃±10℃）の重量減少率は $0.03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に減少します。 $i_{corr} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 、耐食性が約 62%±5% 向上しました。

8.3.4.5 超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータの最適化戦略

重量減少 $< 0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ および $i_{corr} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ を達成するには、プロセスパラメータを正確に制御する必要があります。推奨される戦略は以下のとおりです。

（１）粉末比率とボールミル粉碎

WC（粒子径 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、Ni（8% ~ 10%±1%）、および Cr_3C_2 （0.2%~0.5%±0.01%）粉末を選択し、湿式ボールミル処理（無水エタノール媒体、40 時間 ± 1 時間、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ボール対材料比 10:1 ± 0.5) を行った。粒度分布の偏差は $0.02\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 未満であり、凝集は低減された ($0.1\% \pm 0.02\%$ 未満)。

(2) 真空焼結

温度 $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、圧力 $< 10^{-3}\text{Pa} \pm 10^{-4}\text{Pa}$ 、保持時間 1 時間 ± 0.1 時間、密度 $99.5\% \pm 0.1\%$ 、気孔率 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ 。 $1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ を超える温度で発生する偏析は避けてください。

(3) 熱間等方圧加圧 (HIP)

温度 $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、圧力 $200\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ 、時間 1 時間 ± 0.1 時間の条件で、密度は $99.7\% \pm 0.1\%$ に増加し、多孔性は消失し ($< 0.05\% \pm 0.01\%$)、孔食深さは $< 1.5\ \mu\text{m} \pm 0.5\ \mu\text{m}$ に減少した。

焼鈍処理: 低温焼鈍 ($500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、2 時間 ± 0.1 時間) により応力 ($< 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$) が解放され、粒界強度 ($> 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$) が向上します。

(4) 環境管理

表面酸化 (重量増加 $< 0.1\text{mg}/\text{cm}^2$) $\pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$) を減らすために、焼結および HIP 中は湿度 $< 10\% \pm 1\%$ および酸素含有量 $< 0.01\% \pm 0.001\%$ を維持します。

(5) プロセス監視

オンライン温度モニタリング (精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$) と圧力センサー (精度 $\pm 10^{-5}\text{Pa}$) を使用して、パラメータ偏差 $< 1\%$ を確保し、相分布の均一性を最適化します。

これらのパラメータにより、粒界強度 $> 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$ の緻密な微細構造が確保され、硬度 ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) と靱性 ($K_{1c} > 12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) が維持されます。

8.3.4.6 セメント炭化物の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータ最適化のエンジニアリングケースと性能比較

最適化されたプロセス WC-10Ni-0.2%Cr₃C₂ - TiN ($10\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$) と最適化されていない WC-10Ni を例に挙げると、 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ で 100 時間 ± 10 時間酸化した後、最適化されたサンプルは $0.15\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$ の増加となり、最適化されていない $0.5\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ および $1.1 \times 10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ と比較して、耐酸化性が $70\% \pm 5\%$ 向上しました。塩水噴霧試験 (NaCl $5\% \pm 0.1\%$ 、2000 時間 ± 100 時間) では、重量減少率は $0.02\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 、孔食深さは $1\ \mu\text{m} \pm 0.5\ \mu\text{m}$ 未満に低減し、最適化されていない $0.07\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ および $3.5\ \mu\text{m} \pm 0.5\ \mu\text{m}$ よりも良好です。航空タービンブレードでは、最適化されたサンプルの耐用年数は 8000 時間 ± 500 時間を超え、最適化されていない 5000 時間 ± 500 時間よりも $60\% \pm 5\%$ 長く、熱亀裂破損率は約 $40\% \pm 5\%$ 低減しました。

8.3.4.7 超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータ最適化の適用範囲と限界

最適化されたプロセスにより、超高温 ($> 1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) および腐食環境でも優れた性能

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を發揮する超硬合金が実現し、ガスタービンノズル（寿命 $>10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間）や深海掘削ビット（耐压 $>30\text{ MPa} \pm 2\text{ MPa}$ ）に適しています。SO₂を含む雰囲気下では、最適化されたサンプルの重量増加は $<0.2\text{ mg/cm}^2 \pm 0.05\text{ mg/cm}^2$ ですが、最適化するには $\text{pH} < 1 \pm 0.1$ の強酸と Al₂O₃コーティングを組み合わせる必要があります。プロセス設備のコストは比較的高く（従来のプロセスの約 1.5~2 倍）、量産とパラメータの標準化によってコストを削減する必要があります。

8.3.4.8 超硬合金の耐食性および耐高温性に関するプロセスパラメータの最適化 最適化の方向性と今後の展望

効果をさらに高めるために、動的焼結（温度勾配 $50^\circ\text{C/cm} \pm 5^\circ\text{C/cm}$ ）を導入することで、 i_{corr} を $5 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ まで低減できます。超高温（ $>1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）では、HIP 圧力が $300\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$ に最適化され、重量増加は $<0.1\text{ mg/cm}^2$ です。 $\pm 0.05\text{ mg/cm}^2$ 、硬度 $>\text{HV } 1900 \pm 30$ 。将来的には、インテリジェントな監視システムとナノスケールの粉末（粒径 $<0.1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ ）の使用により、精度と効率が向上し、極限エネルギーおよび航空用途への拡張が可能になります。

プロセスパラメータの最適化（焼結 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $<10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$ 、ボールミル処理 40 時間 ± 1 時間、HIP $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）により、粒径の微細化（ $0.51\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ ）と欠陥の除去（多孔度 $<0.1\% \pm 0.02\%$ ）により、重量損失（ $<0.04\text{ mg/cm}^2$ ）が大幅に削減されました。 $\pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ ）および腐食電流（ $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ ）、耐酸化性が $45\% \pm 5\%$ 向上し、硬度（ $>\text{HV } 1800 \pm 30$ ）および靱性（ $K_{\text{IC}} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）。焼結温度、ボールミル処理時間、圧力、HIP 温度、周囲湿度などの要因を総合的に制御する必要があります。高温および腐食環境に適しています。将来的には、動的プロセスとナノテクノロジーを使用して、用途をさらに拡大することができます。

8.3.5 超硬合金の微細構造制御

8.3.5.1 超硬合金の微細組織制御の原理と技術の概要

微細組織制御は、超硬合金の耐食性と耐高温性を向上させるための核心的な手段です。粒径、相分布、欠陥密度を精密に制御することで、Ni 基結合相、Cr₃C₂添加剤、および表面コーティングの相乗効果を最適化します。推奨される制御目標は、粒径 $0.51\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 、Ni 分布偏差 $<0.1\% \pm 0.02\%$ 、気孔率 $<0.1\% \pm 0.02\%$ です。制御後、超硬合金の重量減少率は $<0.03\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ に減少し、腐食電流(i_{corr})は $<7 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ に減少し、硬度は $>\text{HV } 1800 \pm 30$ に維持され、靱性は $>12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に維持されます。微細構造の最適化により、粒界腐食経路および熱疲労亀裂（ $<0.02\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ ）が減少し、粒界強度（ $>200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$ ）が向上し、高温（ $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）および腐食環境（NaCl 5% $\pm 0.1\%$ など）での耐腐食性に優れ、深海掘削、航空タービン、化学パイプラインなどに適しています。さらに、最適化された微細構造により、熱サイクル（ $\Delta T\ 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）による応力集中（ $<250\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ ）が低減され、耐用年数が延長されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.5.2 超硬合金の微細構造制御による耐食性と性能メカニズムの解析

、結晶粒の微細化と相の均一性にあります。粒径が $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、粒界密度は $10^4 \text{mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{mm}^2/\text{cm}^3$ を超え、腐食性媒体の浸透を低減し、重量減少率は $0.03 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \text{mg}/\text{cm}^2$ 未満となります。Ni 分布偏差は $0.1\% \pm 0.02\%$ 未満で、NiO 層（厚さ約 $10 \text{nm} \pm 1 \text{nm}$ ）の均一な形成を保証し、 i_{corr} は $7 \times 10^{-7} \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A}/\text{cm}^2$ 未満に低減されます。気孔率 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ HIP 処理により残留空隙が除去され、密度は $99.7\% \pm 0.1\%$ に達し、耐酸化性が向上します（重量増加 $< 0.2 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05 \text{mg}/\text{cm}^2$ ）。 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の酸化環境下では、 Cr_3C_2 （ $0.2\% - 0.5\% \pm 0.01\%$ ）が結晶粒を微細化し、 Cr_2O_3 層（厚さ $0.1\text{-}0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ ）を形成します。これにより、耐酸化性が約 $50\% \pm 5\%$ 向上します。熱膨張係数のマッチング（WC $5.2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 、Ni $13 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 、 Cr_3C_2 $10 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ）により熱応力が低減し、熱疲労亀裂長さは $0.02 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 未満となり、長期安定性が大幅に向上します。

8.3.5.3 超硬合金の微細構造制御と微細分析および検証

走査型電子顕微鏡（SEM、解像度 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）による観察では、調整後の粒子は均一（ $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）で、多孔度は $< 0.1\% \pm 0.02\%$ でしたが、調整されていないサンプル（粒子 $> 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）には穴（直径約 $0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）がありました。X 線回折（XRD）分析により、WC 相（ $2\theta \approx 35.6^\circ, 48.3^\circ$ ）、Ni 相（ $2\theta \approx 44.5^\circ$ ）、および Cr_3C_2 相（ $2\theta \approx 39.4^\circ$ ）のピーク強度が均一であることが確認され、相分布が最適化されていることが示されました。エネルギー分散分光法（EDS）により、粒界における Ni および Cr 含有量はそれぞれ $8\% \sim 10\% \pm 0.5\%$ 、 $0.5\% \sim 1\% \pm 0.1\%$ であり、偏析は見られないことが示されました。X 線光電子分光法（XPS）では、Ni 2p ピーク（ $854 \text{eV} \pm 0.1 \text{eV}$ ）と Cr 2p ピーク（ $576.5 \text{eV} \pm 0.1 \text{eV}$ ）が検出され、これらは O 1s ピーク（ $530 \text{eV} \pm 0.1 \text{eV}$ ）と一致し、NiO 層と Cr_2O_3 層の形成が確認されました。

8.3.5.4 超硬合金の微細構造に影響を及ぼす因子の分析

微細構造制御の効果は多くの要因によって左右されるため、正確な制御が必要です。

（1）粒度

$0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、重量減少 $< 0.03 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A}/\text{cm}^2$ 。 $> 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、粒界密度が低下し、重量減少率が $20\% \pm 5\%$ （ $0.036 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \text{mg}/\text{cm}^2$ ）増加し、ピット深さは $1.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ から $3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ に増加します。

（2）ニッケル分布

偏差が $0.1\% \pm 0.02\%$ 未満の場合は、NiO 層は均一で i_{corr} は低くなります。偏差が $0.5\% \pm 0.1\%$ を超える場合は、Ni の濃縮により i_{corr} が $15\% \pm 3\%$ （ $1.05 \times 10^{-6} \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A}/\text{cm}^2$ ）増加し、重量減少率は $0.05 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \text{mg}/\text{cm}^2$ に上昇します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（3）多孔性

$< 0.1\% \pm 0.02\%$ 、密度 $99.7\% \pm 0.1\%$ 、優れた耐酸化性（重量増加 $< 0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ ）。 $> 0.5\% \pm 0.02\%$ の場合、細孔腐食が加速され、 i_{corr} が $10\% \pm 2\%$ （ $7.7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ）増加します。

（3）焼結温度

$1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ では、微細構造は安定しており、重量減少率は低い。温度が $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ を超えると、粒径は大きくなり（ $> 1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、 i_{corr} は $12\% \pm 2\%$ 増加し（ $8.4 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ に達する）。

（5）周囲の湿度

湿度が $50\% \pm 5\%$ を超えると表面酸化が加速し、 i_{corr} が $8\% \pm 2\%$ （ $7.6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ）増加するため、湿度制御（ $< 10\% \pm 1\%$ ）が必要になります。

例えば、WC-10Ni サンプルの粒径は $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、気孔率は $0.6\% \pm 0.02\%$ 、塩水噴霧における重量減少率は 0.07 mg/cm^2 です。 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、 i_{corr} は $1.1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ に達します。最適化された微細構造（ $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）の重量減少率は $0.02 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ に減少しました。 $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 、耐食性が約 $64\% \pm 5\%$ 向上しました。

8.3.5.5 超硬合金の微細構造を制御するための戦略

重量減少 $< 0.03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ および $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ を達成するには、微細構造を精密に制御する必要があります。推奨される戦略は以下のとおりです。

（1）粉末の選択とボールミル粉碎

WC（粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）、Ni（ $8\% \sim 10\% \pm 1\%$ ）、および Cr_3C_2 （ $0.2\% \sim 0.5\% \pm 0.01\%$ ）ナノパウダーを選択し、湿式ボールミル処理（無水エタノール媒体、40 時間 ± 1 時間、ボール対材料比 $10:1 \pm 0.5$ ）を行った。粒径は $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に制御され、凝集は低減された（ $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）。

（2）焼結工程

真空焼結（ $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ 、保持時間 1 時間 ± 0.1 時間）、Ni 分布偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ 、 $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ による粒成長を回避。

（3）熱間等方圧加圧（HIP）

温度 $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、圧力 $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ 、時間 1 時間 ± 0.1 時間、気孔率は $0.1\% \pm 0.02\%$ 未満に減少、密度 $99.7\% \pm 0.1\%$ 、孔食深さは $1 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 未満。

（4）相分布の最適化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

メカニカルアロイング（MA、200 rpm $\pm$ 10 rpm、10 h $\pm$ 0.5 h）を使用して、Ni および Cr₃C₂ を均一に分散させ、偏析を低減し（ $<0.05\%\pm0.01\%$ ）、粒界強度を向上させました（ $>200\text{ MPa}\pm20\text{ MPa}$ ）。

（5）環境管理

表面酸化（重量増加 $<0.1\text{ mg/cm}^2$ ） $\pm0.05\text{ mg/cm}^2$ ）を減らすために、焼結および HIP 中は湿度 $<10\%\pm1\%$ および酸素含有量 $<0.01\%\pm0.001\%$ を維持します。

（6）後焼鈍処理

低温焼鈍処理（500°C $\pm$ 10°C、2 時間 $\pm$ 0.1 時間）により、応力（ $<200\text{ MPa}\pm20\text{ MPa}$ ）が軽減され、微細構造が安定します。

これらの戦略により、微細粒子、均一な相分布、 $200\text{ MPa}\pm20\text{ MPa}$ を超える粒界強度が確保され、硬度（ $>\text{HV } 1800\pm30$ ）と靱性（ $K_{Ic}>12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm0.5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）が維持されます。

8.3.5.6 超硬合金の微細構造制御工学の事例と性能比較

最適化された微細構造 WC-10Ni-0.2%Cr₃C₂ - TiN（ $10\text{ }\mu\text{m}\pm0.1\text{ }\mu\text{m}$ ）と最適化されていない WC-10Ni を例に挙げると、1000°C $\pm$ 10°C で 100 時間 $\pm$ 10 時間酸化した後、最適化されたサンプルは $0.1\text{ mg/cm}^2\pm0.05\text{ mg/cm}^2$ 、 $i_{\text{corr}}<6\times10^{-7}\text{ A/cm}^2\pm10^{-8}\text{ A/cm}^2$ 増加し、最適化されていない $0.5\text{ mg/cm}^2\pm0.05\text{ mg/cm}^2$ および $1.1\times10^{-6}\text{ A/cm}^2\pm10^{-7}\text{ A/cm}^2$ と比較して、耐酸化性が 80% $\pm$ 5% 向上しています。塩水噴霧試験（NaCl 5% $\pm$ 0.1%、2000 時間 $\pm$ 100 時間）では、重量減少率は $0.01\text{ mg/cm}^2\pm0.01\text{ mg/cm}^2$ 、孔食深さは $0.5\text{ }\mu\text{m}\pm0.5\text{ }\mu\text{m}$ 未満に減少し、最適化されていない $0.07\text{ mg/cm}^2\pm0.01\text{ mg/cm}^2$ および $3.5\text{ }\mu\text{m}\pm0.5\text{ }\mu\text{m}$ よりも良好です。航空タービンブレードでは、最適化されたサンプルの耐用年数は 9000 時間 $\pm$ 500 時間を超え、最適化されていない 5000 時間 $\pm$ 500 時間よりも 80% $\pm$ 5%長く、熱亀裂破損率は約 45% $\pm$ 5%減少しました。

8.3.5.7 超硬合金の微細組織制御の応用範囲と限界

微細構造制御により、超高温（ $>1100^\circ\text{C}\pm10^\circ\text{C}$ ）および腐食環境でも優れた性能を発揮する超硬合金が実現し、ガスタービンノズル（寿命 $>10^4$ 時間 $\pm10^3$ 時間）や深海掘削ビット（耐圧 $>30\text{ MPa}\pm2\text{ MPa}$ ）に適しています。SO₂ を含む雰囲気下では、最適化されたサンプルの重量増加は $<0.15\text{ mg/cm}^2\pm0.05\text{ mg/cm}^2$ ですが、pH $<1\pm0.1$ では強酸中での Al₂O₃コーティングの最適化が必要です。制御プロセスには高い装置精度（従来のプロセスの約 2 倍のコスト）が求められ、自動化と大量生産によってコストを削減する必要があります。

8.3.5.8 超硬合金の微細構造制御と最適化の方向性と将来展望

さらに効果を高めるために、プラズマ焼結（SPS、温度 1300°C $\pm$ 10°C、圧力 50MPa $\pm$ 5MPa）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を導入して、 i を減らすことができる。 $i_{\text{corr}} 4 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ まで。超高温 ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) では、粒径は $0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に最適化され、重量増加は $< 0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 、硬度は $> \text{HV } 1900 \pm 30$ です。将来的には、ナノスケールの粉末（粒子サイズ $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）とインテリジェントな顕微鏡検出の使用により、制御精度が向上し、極限エネルギーおよび航空アプリケーションに拡張できます。

微細構造制御（粒径 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、Ni 分布偏差 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ 、気孔率 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ ）により、粒子の微細化と相分布の最適化により重量損失率 ($< 0.03 \text{ mg/cm}^2$) が大幅に低減され、腐食電流 ($i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$)、耐酸化性が $50\% \pm 5\%$ 向上し、硬度 ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) および靱性 ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) が向上します。粒径、Ni 分布、気孔率、焼結温度、周囲湿度を総合的に制御する必要があります。高温・腐食環境に適しています。将来的には、プラズマプロセスとナノテクノロジーを活用することで、さらに用途を拡大することができます。

超硬合金の耐食性および耐高温性の試験と評価

8.4.1 超硬合金の腐食速度（電気化学的ターフェル曲線）

超硬合金の腐食速度の原理と技術の概要

腐食速度は電気化学的ターフェル曲線（ASTM G59 準拠）によって測定され、腐食電流密度 ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) を測定します。これにより、酸 ($\text{pH} < 3 \pm 0.1$)、塩水噴霧 ($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$)、海洋などの腐食環境における超硬合金の耐食性を定量化します。ターフェル曲線は次の式に基づいています。

$$\eta = b \cdot \log \left(\frac{i}{i_{\text{corr}}} \right)$$

ここで、 η は過電位（精度 $\pm 0.01 \text{ V}$ ）、 b はターフェル勾配（約 $0.1 \text{ V/decade} \pm 0.01 \text{ V/decade}$ ）、 i は電流密度（精度 $\pm 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ ）、 i_{corr} は腐食電流密度である。低い i_{corr} 高い腐食電位 ($E_{\text{corr}} 0.2 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$ 以上の電位は、優れた耐食性を示しています。試験は 3 電極システム（作用電極：WC10Ni などの超硬合金、参照電極：飽和カロメル電極 SCE、補助電極：白金電極）を採用し、電解液には $3.5\% \pm 0.1\% \text{ NaCl}$ または $0.1 \text{ M} \pm 0.01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ が含まれ、高精度電気化学ワークステーション（電位精度 $\pm 0.001 \text{ V}$ 、電流精度 $\pm 10^{-9} \text{ A}$ ）が装備されています。例えば、 NaCl 溶液中の WC10Ni の i_{corr} は約 $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ で、 E_{corr} は約 $0.1 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ であり、WC10Co の $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ および $-0.3 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ よりも大幅に優れています。本セクションでは、ターフェル曲線の原理、試験方法、およびエンジニアリングケースを組み合わせて、超硬合金の腐食速度評価方法を包括的に検討し、耐食性を最適化するための科学的根拠を提供します。

8.4.1.2 超硬合金の腐食速度のメカニズムと分析

i_{corr} を定量化することで、腐食性媒体における材料の電気化学的応答を反映します。そして私訂正。WC10Ni の E_{corr} は約 $0.1 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ で、これは NiO 不動態化層（厚さ $\sim 10 \text{ nm} \pm 1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nm、密度 $\sim 6.7 \text{ g/cm}^3$)によるものです。 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$) が形成され、化学的不活性 ($K_{sp} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$)により H^+ および Cl^- の拡散が抑制され、WC10Co と比較して i_{corr} が約 $50\% \pm 5\%$ 減少します。 WC10Co は高い i_{corr} ($10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) を有し、Co 溶解反応 ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$ 、 $\Delta G > 0 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) により腐食ピット (深さ $< 5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$) を形成します。 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) を添加すると、性能がさらに最適化されます。 その高温反応 ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8 \text{CO}$) により Cr_2O_3 層 (厚さ $\sim 10\text{nm} \pm 1\text{nm}$) が生成され、NiO と相乗効果で i_{corr} を低減します。 さらに $40\% \pm 5\%$ (約 $6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) 増加します。 粒径を $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に最適化することで、Co または Ni の露出面積が減少 ($< 10\% \pm 1\%$) し、 i_{corr} がさらに $20\% \pm 5\%$ 減少し、耐食性が大幅に向上します。

走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) による分析の結果、WC10Ni 腐食ピットの数 は少なく (深さ $< 3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$)、WC10Co ピットの深さは $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ であることが示されました。 X 線光電子分光法 (XPS) では、O 1s ピーク ($530 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$) に一致する Ni 2p ピーク ($854 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$) と Cr 2p ピーク ($577 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$) が検出され、NiO 層と Cr_2O_3 層の存在が確認されました。 エネルギー分散型分光法 (EDS) により、腐食ピット中の Co 含有量が減少し ($< 5\% \pm 0.5\%$)、Ni および Cr が増加した ($> 10\% \pm 1\%$) ことが示され、不動態化層の保護効果が確認されました。 $\text{pH} < 2 \pm 0.1$ または $\text{NaCl} > 5\% \pm 0.1\%$ の過酷な環境では、 i_{corr} が $1.3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ まで増加する可能性があり、表面コーティング (TiN など) と組み合わせるさらに最適化する必要があります。

8.4.1.3 超硬合金の腐食速度に影響を与える要因の分析

腐食速度は多くの要因の影響を受けるため、総合的に最適化する必要があります。

(1) 結合段階

Ni 含有量が $10\% \pm 1\%$ の場合、 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ です。 Co 含有量が $12\% \pm 1\%$ を超える場合、Co が酸化されやすくなるため、 i_{corr} は $50\% \pm 5\%$ (約 $1.5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) 増加します。

(2) Cr_3C_2 添加量

$0.5\% \pm 0.01\%$ の場合、 i_{corr} は $40\% \pm 5\%$ 減少します。 $1\% \pm 0.01\%$ を超える場合、 η 相の形成により破壊靱性 (K_{Ic}) が $10\% \pm 2\%$ 減少し (約 $11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ まで)、 i_{corr} は $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ までわずかに増加します。

(3) 粒度

$0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、 i_{corr} は低く、重量減少は $< 0.03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ です。 $> 2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の場合、粒界密度が減少し、 i_{corr} は $20\% \pm 5\%$ 増加し (約 $1.2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ に達する)、孔食深さは $4 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ に増加します。

(4) 電解質条件

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pH < 2 ± 0.1 の場合、 i_{corr} は 30% ± 5% 増加します（約 $1.3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）。NaCl > 5% ± 0.1% の場合、ピット面積は 20% ± 5% 増加します（ $0.01 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ から $0.012 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ ）。

（５）表面粗さ

$R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、私 コル 低いままである； $0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超えると、微小亀裂が増加し、コル 10% ± 2% 増加します（約 $1.1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ まで）。私 コル WC12Co サンプルの pH 1 ± 0.1 H_2SO_4 での腐食速度は約 $10^{-4} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ですが、WC10Ni（Cr₃C₂ 添加 0.5% ± 0.01%、粒径 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）ではわずか $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ であり、耐食性は約 1000 倍 ± 10% 向上します。

8.4.1.4 超硬合金の腐食速度試験方法

確実にするために コル 精度（ $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ）およびデータの信頼性を確保するため、次の標準化された試験方法が推奨されます。

（１）設備

3 電極システムが使用され、高精度電気化学ワークステーション（電位精度 ± 0.001 V、電流精度 ± 10^{-9} A ）が装備されていました。

（２）電解質

3.5% ± 0.1% NaCl または $0.1 \text{ M} \pm 0.01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 、pH 範囲 2 ~ 7 ± 0.1、温度 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ を使用します。

（３）試験パラメータ

スキャン速度 $0.1 \text{ mV/s} \pm 0.01 \text{ mV/s}$ 、電位範囲 ± 0.25 V vs. E_{corr} 、テスト時間 30 分 ± 1 分。

（４）サンプルの準備

$\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に研磨、露出面積 $1 \text{ cm}^2 \pm 0.1 \text{ cm}^2$ 、繰り返しテスト 3 回以上。

（５）データ分析

i_{corr} （精度 ± 10^{-7} A/cm^2 ）および E_{corr} （精度 ± 0.02 V）はターフェルフィッティングによって計算され、95% ± 2% を超える再現性が保証されました。

3.5% ± 0.1% NaCl 中の WC10Ni（ $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）の i_{corr} は約 $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ であり、 E_{corr} は約 $0.1 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ です。テスト結果は非常に一貫しており、方法の信頼性が検証されています。

8.4.1.5 セメント炭化物の腐食速度の工学的応用

電気化学的ターフェル曲線試験は、セメント炭化物のエンジニアリング応用に重要なデータサポートを提供します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（１）超硬合金製船舶機器

WC10Ni（粒径 $0.5\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Cr}_3\text{C}_2\ 0.5\% \pm 0.01\%$ ）は、塩水噴霧（ $\text{NaCl}\ 5\% \pm 0.1\%$ ）中での i_{corr} が約 $10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 、重量減少率が $0.05\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 、耐用年数が5年 ± 0.5 年を超え、WC10Coの3年 ± 0.3 年よりも優れており、耐食性が約 $66\% \pm 5\%$ 向上し、オフショア掘削メンテナンスコストが約 $40\% \pm 5\%$ 削減されます。

（２）硬質合金製化学バルブ

WC8Co（ $\text{Cr}_3\text{C}_2\ 0.5\% \pm 0.01\%$ 添加、 $\text{Ra} < 0.05\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）は、 $0.1\ \text{M} \pm 0.01\ \text{MH}_2\text{SO}_4$ で約 $10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$ の i_{corr} 、孔食深さ $< 2\ \mu\text{m} \pm 0.5\ \mu\text{m}$ 、耐用年数が $> 2\ \text{年} \pm 0.2\ \text{年}$ であり、最適化されていない WC8Co（寿命 $\sim 1\ \text{年} \pm 0.1\ \text{年}$ ）よりも $100\% \pm 5\%$ 長く、酸性流体透過の要件を満たしています。

（３）硬質合金製紙設備

WC10Ni（粒子 $0.5\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 、TiN コーティング $10\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$ ）の硫酸溶液中の $i_{\text{corr}} < 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 、重量損失 $0.04\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 、耐用年数 $> 4\ \text{年} \pm 0.4\ \text{年}$ であり、従来の材料（ステンレス鋼など、耐用年数約 $2\ \text{年} \pm 0.2\ \text{年}$ ）よりも優れており、設備の耐久性と生産効率が約 $50\% \pm 5\%$ 向上します。

これらの事例は、電気化学試験が腐食環境におけるセメント炭化物の材料選択と性能最適化を効果的に導き、エンジニアリングアプリケーションの信頼性と経済性を保証することを示しています。

8.4.1.6 超硬合金の腐食速度の適用範囲と限界

ターフェル曲線試験は、 $\text{pH} < 2 \pm 0.1$ の強酸や $\text{NaCl} > 10\% \pm 0.1\%$ の高塩分濃度など、極端な腐食環境における超硬合金の適用可能性を拡大します。WC10Ni -TiN コーティングサンプルの i_{corr} は $< 8 \times 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\ \text{A}/\text{cm}^2$ を維持し、重量減少率は $< 0.05\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\ \text{mg}/\text{cm}^2$ です。ただし、高温（ $> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）または SO_2 を含む雰囲気では、電極表面で酸化または汚染が発生し、 i_{corr} が $15\% \pm 3\%$ 増加する可能性があるため、高温酸化試験と組み合わせて最適化する必要があります。試験設備は比較的高価（約 10 万～20 万 ± 1 万人民币元）であるため、中小企業にとっては制約となる可能性があり、設備の標準化と共有を通じてコストを削減する必要があります。

8.4.1.7 超硬合金の腐食速度の最適化の方向性と将来の展望

試験精度を向上させるために、動的電気化学インピーダンス分光法（EIS、周波数範囲 $10^{-2} - 10^5\ \text{Hz} \pm 10\ \text{Hz}$ ）を導入することで、 i_{corr} の精度を $\pm 10^{-8}\ \text{A}/\text{cm}^2$ まで向上させることができます。超腐食性環境（ $\text{pH} < 1 \pm 0.1$ ）では、電解質を最適化する（抑制剤の添加など）ことで、 i_{corr} を $5 \times 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\ \text{A}/\text{cm}^2$ まで低減できます。将来的には、ターフェルデータの人工知能解析とナノスケールの表面改質（ $\text{Ra} < 0.03\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）を組み合わせることで、予測精度を向上させ、深海の極限環境や新エネルギー機器への応用にまで拡張することができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

腐食速度はターフェル曲線（ASTM G59）の i_{corr} ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) および E_{corr} ($> 0.2 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$) で測定され、酸および塩水噴霧における超硬合金の耐腐食性を反映しています。NiO および Cr_2O_3 不動態化層（厚さ約 $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ ）は i_{corr} を約 50%~90% $\pm 5\%$ 低減し、 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ の粒径により性能がさらに最適化されます。この試験では、高精度の 3 電極システム（電位 $\pm 0.001 \text{ V}$ 、電流 $\pm 10^{-9} \text{ A}$ ）を使用し、海洋用途（耐用年数 $> 5 \text{ 年} \pm 0.5 \text{ 年}$ ）、化学用途（ $> 2 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$ ）、紙用途（ $> 4 \text{ 年} \pm 0.4 \text{ 年}$ ）のデータを提供します。結合相、 Cr_3C_2 、粒径、電解質、表面粗さといった要因を包括的に制御する必要があります。将来的には、EIS（電気浸透探傷法）とナノ改質によって耐食性をさらに向上させることができます。

8.4.2 超硬合金の高温硬度と熱衝撃試験

超硬合金の高温硬度および熱衝撃試験の原理と技術の概要

高温硬度 ($> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) と耐熱衝撃性（亀裂 $< 0.05 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）は、ピッカース硬度試験（ASTM E92 に準拠）と熱衝撃試験（ASTM E1876 に準拠）によって定量化される、極限環境（航空ツール $> 5000 \text{ 時間} \pm 500 \text{ 時間}$ 、金型 $> 10^5 \text{ 回} \pm 10^4 \text{ 回}$ など）における超硬合金の安定性を評価するための重要な指標です。これらの試験は、超硬合金の耐高温性に関する信頼性の高いデータを提供し、化学（耐用年数 $> 2 \text{ 年} \pm 0.2 \text{ 年}$ ）、海洋（ $> 5 \text{ 年} \pm 0.5 \text{ 年}$ ）、航空（ $> 5000 \text{ 時間} \pm 500 \text{ 時間}$ ）などのエンジニアリングアプリケーションの要件を満たしていることを保証します。高温では、Co 相が軟化（硬度が HV 約 200 ± 30 に低下）し、全体的な硬度が低下します。熱衝撃サイクル（ $1000^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ）により熱応力（ $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）が発生し、マイクロクラックが発生します。最適化戦略では、 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) とコーティング（ $\text{TiN } 5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ など）を導入して粒界強度（ $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ）と熱安定性を高めることで、高温性能が大幅に向上します。試験装置には、高温ピッカース硬度計（荷重 $10 \text{ kg} \pm 0.1 \text{ kg}$ 、精度 ± 30 ）と熱衝撃炉（温度制御精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）が含まれています。例えば、 $\text{TiN } (5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m})$ コーティングされた WC10Co は、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で $\text{HV } 1500 \pm 30$ 以上の硬度を示し、 500 ± 50 回の熱衝撃後の亀裂長さは $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ です。本セクションでは、試験原理、メカニズム分析、エンジニアリング事例を組み合わせ、高温硬度と熱衝撃性能の評価方法を総合的に検討し、材料最適化のための科学的なガイダンスを提供します。

8.4.2.2 超硬合金の高温硬度および熱衝撃試験のメカニズムと解析

高温硬度は結合相の軟化に大きく影響されます。 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ では、WC10Co の Co 相は格子滑り（滑り帯幅約 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）により軟化するため、硬度は $\text{HV } 1000 \pm 30$ まで低下します。 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) を添加すると、Cr 拡散（粒界濃度約 $5\% \pm 0.5\%$ ）により粒界強度（ $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ ）が向上し、硬度は約 $30\% \pm 5\%$ ($> \text{HV } 1300 \pm 30$) 増加します。 TiN コーティング（硬度 $> \text{HV } 2000 \pm 50$ 、融点 $2950^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ）は、 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で表面硬度 $> \text{HV } 1500 \pm 30$ を維持し、高い熱安定性と低い熱膨張係数（約 $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）を備え、マトリックスの軟化効果を低減します。粒径は $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ に最適化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

されており、Co 露出面積（ $< 10\% \pm 1\%$ ）をさらに低減し、硬度の低下を約 $20\% \pm 5\%$ 低減し、高温耐摩耗性を向上させます。

熱衝撃亀裂は熱応力によって引き起こされ、その大きさは材料の熱的物理的特性と密接に関連しています。熱応力は次の式で推定できます。

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

ここで、E はヤング率（約 $600 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$ ）、 α は熱膨張係数（約 $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ）、 ΔT は温度差（ $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ）であり、計算結果は約 $300 \sim 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ となります。亀裂の伝播はパリスの法則（ $da/dN = C \cdot \Delta K^m$ ）に従い、微粒子（ $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）は伝播速度（ $< 10^{-7} \text{ mm/サイクル} \pm 10^{-8} \text{ mm/サイクル}$ ）を低下させ、TiN コーティングは亀裂の成長をさらに抑制します（長さ $< 0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）。走査型電子顕微鏡（SEM、解像度 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）による観察では、亀裂は主に粒界破壊（幅 $\sim 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）であり、TiN コーティングサンプルの亀裂は大幅に減少していることが示されました。X 線光電子分光法（XPS）では Ti 2p ピーク（ $\sim 455 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$ ）が検出され、TiN の熱化学的安定性が確認され、高温環境における性能保証の微視的証拠が得られました。

8.4.2.3 超硬合金の高温硬度と熱衝撃試験に影響を及ぼす因子の分析

高温硬度と耐熱衝撃性は多くの要因の影響を受けるため、総合的に最適化する必要があります。

（1） Cr_3C_2 添加量

$0.5\% \pm 0.01\%$ では硬度 $> \text{HV } 1500 \pm 30$ 、熱衝撃亀裂 $< 0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 、 $> 1\% \pm 0.01\%$ では、 η 相形成により破壊靱性（ K_{Ic} ）が $10\% \pm 2\%$ （約 $11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）減少し、熱衝撃亀裂が $0.04 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ にわずかに増加します。

（2）コーティングの厚さ

TiN が $5 \sim 10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ の場合、亀裂が少なく、剥離率は $< 5\% \pm 1\%$ です。 $20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ を超えると、内部応力が増加し（ $> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ）、剥離率は $10\% \pm 2\%$ 増加し、硬度は約 $5\% \pm 1\%$ 低下します（HV 1425 ± 30 まで）。

（3）粒度

$0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ では硬度が高く、熱衝撃割れは低くなります。粒径が $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ を超えると、粒界密度が低下し、熱衝撃割れが $20\% \pm 5\%$ （ $0.06 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）増加し、硬度は HV 1100 ± 30 まで低下します。

（4）温度差

$\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の場合、熱応力が増加し、亀裂長さが $50\% \pm 5\%$ 増加します（ $0.075 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ ）。 $\Delta T < 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の場合、亀裂長さは $< 0.02 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ になります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) 熱伝導率

が $80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ を超える場合（WC10Ni-TiN など）、熱応力は分散され、ひび割れは少なくなります。熱応力が $50 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 未満の場合は（コーティングなしの WC10Co など）、ひび割れは $15\% \pm 3\%$ 増加し、 $0.055 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ になります。

たとえば、ある WC12Co（コーティングなし）の硬度は $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ で $\text{HV } 800 \pm 30$ まで低下し、 500 ± 50 回の熱衝撃後には亀裂が $0.08 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ に達します。一方、WC10Co（TiN $5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、 Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$ ）の硬度は $\text{HV } 1500 \pm 30$ 以上を維持し、亀裂はわずか $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ で、性能が大幅に向上します。

8.4.2.4 超硬合金の高温硬度および熱衝撃試験方法

テストの精度とデータの一貫性を確保するために、次の標準化された方法が推奨されます。

(1) 高温硬度試験

ピッカース硬度計を使用し、荷重 $10\text{kg} \pm 0.1\text{kg}$ 、試験温度 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、保持時間 $15 \text{ 分} \pm 1 \text{ 分}$ 、硬度精度 ± 30 、測定点 ≥ 5 点 ± 1 点。

(2) 熱衝撃試験

熱衝撃炉を使用し、サイクル温度は 1000°C から $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、サイクル数は 500 回以上 ± 50 回、加熱・冷却速度は $10^\circ\text{C}/\text{秒} \pm 1^\circ\text{C}/\text{秒}$ 、温度制御精度は $\pm 1^\circ\text{C}$ でした。

(3) ひび割れ測定

SEM（解像度 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ ）を使用し、統計領域は > 10 領域 ± 1 領域でした。

(4) サンプルの準備

表面粗さ $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ まで研磨し、サンプルサイズは $20 \times 20 \times 5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ で、テストを 3 回以上繰り返します。

(5) データ分析

硬度の平均値（精度 ± 30 ）が計算され、亀裂長さの統計（標準偏差 $< 0.01 \text{ mm}$ ）により、 $95\% \pm 2\%$ を超える再現性が保証されます。

熱衝撃試験では、WC10Co（TiN $5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）の亀裂長さは $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 、硬度は $\text{HV } 1500 \pm 30$ 以上でした。試験結果は安定しており、方法の信頼性が検証されました。

8.4.2.5 超硬合金の高温硬度および熱衝撃試験の工学応用

高温硬度および熱衝撃試験は、セメント炭化物のエンジニアリング用途に重要な性能データを提供します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

（１）超合金製航空工具

WC10Co (TiN $5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 、Cr₃C₂ $0.5\% \pm 0.01\%$) は、 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ での硬度が HV 1500 $\pm$ 30 を超え、熱衝撃亀裂が $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 、切削寿命が 5000 時間 $\pm$ 500 時間を超えており、コーティングされていない WC10Co (寿命 ~ 3000 時間 ± 300 時間) よりも約 66% $\pm$ 5% 長く、高強度航空加工のニーズを満たし、熱亀裂による故障率を約 40% $\pm$ 5% 削減します。

（２）硬質合金高温金型

WC8Co (Cr₃C₂ $0.5\% \pm 0.01\%$) は、 $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ での硬度が HV1300 $\pm$ 30 を超え、熱衝撃亀裂が $0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 未満、耐用年数が 10^5 回 $\pm 10^4$ 回を超えており、最適化されていない WC8Co (寿命 $\sim 6 \times 10^4$ 回 $\pm 5 \times 10^3$ 回) よりも約 60% $\pm$ 5% 長く、金型の耐久性と生産効率が向上します。

（３）超合金製ガスタービン部品

WC10Co (Al₂O₃ $10\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$) は、 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ での硬度が HV 1400 $\pm$ 30 を超え、熱衝撃亀裂が $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 未満であり、耐用年数が 10^4 時間 $\pm 10^3$ 時間を超えており、コーティングされていないサンプル (寿命約 7000 時間 ± 700 時間) よりも約 43% $\pm$ 5% 向上し、高温環境におけるガスタービンの長期安定性を確保しています。

これらの事例は、高温硬度および熱衝撃試験が超合金の材料設計と応用の最適化に科学的根拠を提供し、エンジニアリング性能を大幅に向上させることを示しています。

8.4.2.6 超合金の高温硬度および熱衝撃試験の適用範囲と限界

高温硬度試験および熱衝撃試験により、超高温 ($> 1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) および熱サイクル環境における超合金の適用可能性が拡大します。例えば、ガスタービンノズル (寿命 $> 1.5 \times 10^4$ 時間 $\pm 10^3$ 時間) や航空宇宙エンジンブレード (熱衝撃 $> 10^6$ 回 $\pm 10^4$ 回) などが挙げられます。WC10Ni-Al₂O₃ コーティングされたサンプルは、硬度が HV 1400 $\pm$ 30 を超え、 $1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ におけるひび割れ幅が $0.02\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 未満であり、優れた熱安定性を示しています。しかし、 $\Delta T > 600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ または SO₂ を含む雰囲気下では、コーティングが剥離または酸化し、クラックが $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ に増加する可能性があるため、最適化のために多層コーティング (TiN/Al₂O₃ など) と組み合わせる必要があります。試験装置のコストは比較的高く (約 15 万 $\sim$ 25 万 $\pm$ 1 万元)、中小企業にとっては課題となる可能性があります。設備の共有化やプロセスの標準化を通じてコストを削減する必要があります。

8.4.2.7 超合金の高温硬度と熱衝撃試験の最適化の方向性と将来展望

性能向上のため、プラズマ溶射コーティング (温度 $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 、厚さ $10 \sim 15\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$) を導入することで、硬度を HV 1600 $\pm$ 30 以上に高め、熱衝撃亀裂を $0.01\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 未満に低減できます。超高温 ($1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 以上) では、Cr₃C₂ 含有量を 0.7% $\pm$ 0.01% に最適化し、ZrO₂ (5% $\pm$ 0.5%) を添加することで、硬度を HV 1500 $\pm$ 30 以上、亀裂長さを

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.015mm±0.01mm 未満に維持できます。将来的には、熱応力の有限要素シミュレーション解析とナノ粒子技術（粒径<0.3 μm±0.01 μm）を組み合わせることで、予測精度と耐熱衝撃性が向上し、極限の航空およびエネルギー機器用途に拡大することができます。

高温硬度(>HV 1200±30、1000°C±10°C)および耐熱衝撃性(亀裂 <0.05 mm±0.01 mm)は、ASTME92 および E1876 テストによって定量化され、高温環境における超硬合金の安定性を反映しています。Cr₃C₂ (0.5%±0.01%) および TiN コーティング (5~10 μm±0.1 μm)により、硬度が約 30%±5%(>HV 1500±30) および粒界強度(>200 MPa±20 MPa)が向上し、粒径が 0.5 μm±0.01 μm であるため、亀裂の伝播が減少します(<10⁻⁷ mm/サイクル±10⁻⁸ mm/サイクル)。この試験では、高温硬度計(精度±30)と熱衝撃炉(温度制御±1°C)を用いて、航空用途(寿命>5000 時間±500 時間)、金型(>10⁵回±10⁴回)、ガスタービン(>10⁴時間±10³時間)のデータサポートを提供します。Cr₃C₂含有量、コーティングの厚さ、粒径、温度差、熱伝導率などの要素を総合的に制御する必要があります。将来的には、プラズマコーティングとナノテクノロジーにより、性能をさらに最適化することができます。

参考文献

- ASTM E9217 (2017). 金属材料のピッカース硬さ試験方法の標準規格. ASTM International.
- ASTME187615 (2015). 振動の衝撃励起による動的ヤング率、せん断弾性率、およびポアソン比の標準試験方法. ASTM International.
- ASTM G5997 (2014).ポテンショダイナミック分極抵抗測定 of 標準試験方法. ASTM International.
- ISO 9227:2017 (2017). 人工雰囲気中での腐食試験 - 塩水噴霧試験. 国際標準化機構.
- WC 基超硬合金の耐食性に対する Ni バインダー相の影響. *Materials Chemistry and Physics*, 280 , 125789.
- Li, X., & Zhang, Q. (2023). 高温における超硬合金の耐酸化性に関する研究. *材料科学技術*, 41 (4), 567575.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

超硬合金製高温金型と高密度タングステン合金製金型の比較分析

高温金型は、熱間鍛造、熱間押出、ダイカスト、ガラス成形などの工程で使用され、高温（800～1600℃）、高圧（50～200MPa）、腐食環境下において、高い硬度、耐摩耗性、寸法安定性を維持する必要があります。超硬合金製高温金型は、炭化タングステン（WC）をマトリックスとし、高い硬度と耐腐食性を有することから、精密成形の分野で広く使用されています。高密度タングステン合金製金型は、主にタングステン（W）を主成分とし、ニッケル、鉄、銅をバインダー相として用いています。高密度、高強度、優れた耐高温変形性を備え、高荷重・高温用途に適しています。両者は、航空ノズル（高温耐食性）、電解セル電極（耐腐食性）、ガスタービン部品（耐摩耗性）といった分野で共通の材料技術を有していますが、その性能と適用分野は異なります。

次の表は、2つの材料特性、製造プロセス、性能、用途、制限を比較したもので、高温金型材料の選択に明確な基準を提供し、特に高密度タングステン合金金型の独自の利点と用途を強調しています。

プロ ジェ クト	超硬合金高温金型（WC-Co）	高密度タングステン合金金型
材料 構成	WC 85～95 重量%、Co 5～15 重量%、オプションで TiC、 Cr ₃ C ₂ 添加剤	W 90 ～ 97 wt %、Ni/Fe/Cu 3 ～ 10 % (W-Ni-Fe または W- Ni-Cu)
材料 特性	硬度: HV1000～1800 密度: 14～15 g/cm ³ 融点: WC 2870℃、Co の制限により耐熱温度は約 1400℃ まで 曲げ強度: 2000～2500 MPa 破壊靱性: K _{IC} 10～15 MPa·m ^{1/2} 熱伝導率: 80～100 W/ m·K 熱膨張係数: 5～7×10 ⁻⁶ /℃	硬度: HV300～600 密度: 17～19 g/cm ³ 融点: 3422℃、耐熱温度>1600℃ 曲げ強度: 800～1500 MPa 破壊靱性: K _{IC} 20～30 MPa·m ^{1/2} 熱伝導率: 100～150 W/ m·K 熱膨張係数: 4.5～6×10 ⁻⁶ /℃
製 造 工 程	粉末冶金: 超微粒 WC/Co 粉末 (0.2～ 2μm) →冷間静 水圧プレス (CIP) →真空焼結 (1350～1450℃) →精密機 械加工 (ダイヤモンド研削) PVD/CVD コーティング (TiN 、 Al ₂ O ₃ 、 2 ～ 20μm) 、 APS/DGS 溶射 (WC-Co、 50 ～ 500μm) インターフェースエンジニアリング: 勾配コーティン グ、イオン注入	粉末冶金: W/Ni/Fe 粉末→プレスまたは射出成形→液相焼結 (1450～1550℃) →機械加工 表面改質: 浸炭、窒化または Cr / CrN コーティング (5～ 50μm) 、熱噴霧 (例: WC-Co 、 50～200μm) 熱処理: 靱性を高めるための焼鈍 (800～1000℃)
パ ー フ ォ ー マ ン ス 上	TiAlN 、 Al ₂ O ₃ など) により摩耗が 50～70%低減され、 高摩擦条件に適しています。航空用チタン合金の熱間鍛 造では、摩耗率が 60%低減されます。 優れた耐食性: 酸、アルカリ、酸化、熔融金属の腐食に	極めて高い耐熱性: 曲げ強度は 1600℃ でも 800 ～ 1200 MPa を維持し、優れた耐クリープ性を備えているため、高 荷重の押し出しに適しています。 高靱性: 破壊靱性 K _{IC} 20～ 30MPa·m ^{1/2} 、耐衝撃性が強く、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

の利 点	耐え、腐食速度を 70% 低減します。ガラス成形金型においては、熔融ガラスの腐食に耐え、耐用年数を 50% 向上させます。 高温硬度保持: 1400°C で硬度が 10~15% 低下し、精密成形に適しています。 寸法安定性: 熱膨張係数が低い ($5\sim7\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、寸法偏差 $<0.01\text{ mm}$、航空鍛造品の精度が 20% 向上します。 耐疲労性能: グラデーションコーティングにより熱ストレスを軽減し、疲労寿命を 30% 向上します。	衝撃割れ率が 60% 減少します。 優れた耐熱疲労性: 高い熱伝導率 ($100\sim150\text{ W/m}\cdot\text{K}$)、熱亀裂が 50% 減少し、疲労寿命が 30% 向上します。 高密度、変形耐性: 密度 $17\sim19\text{ g/cm}^3$、変形率 $<0.1\%$、高圧成形に適しています。 優れた加工性: 複雑な形状を加工でき、製造サイクルが 15~20% 短縮されます。
制限	靱性が低い ($K_{IC}\ 10\sim15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)、割れやすい 高密度 ($14\sim15\text{ g/cm}^3$) で重い 製造コストが高い (設備 1,000 万~3,000 万人民币元、金型 5,000 万~50 万人民币元) 耐熱性は Co 相によって制限されます ($<1400^{\circ}\text{C}$)	硬度が低い (HV 300-600)、耐摩耗性が不十分、表面強化が必要 非常に高い密度 ($17\sim19\text{ g/cm}^3$) で重量が増加する タングステン資源コストが高い (1 トンあたり 50 万~80 万人民币元) 耐食性が弱いため、保護コーティングが必要
用途 と使 用法	航空宇宙: 熱間鍛造金型 (チタン合金、ニッケル基合金鍛造品、$800\sim1200^{\circ}\text{C}$)、熱間押出金型 (航空宇宙構造部品、$1000\sim1300^{\circ}\text{C}$) 自動車製造: ダイカスト金型 (アルミニウム合金、マグネシウム合金部品、$600\sim800^{\circ}\text{C}$)、ホットスタンプ金型 (高張力鋼板、$700\sim900^{\circ}\text{C}$) エネルギー産業: 風力タービンギア用の熱間鍛造金型 (42CrMo ギアブランク、$800\sim1100^{\circ}\text{C}$)、原子力発電部品用の熱間押し出し金型 ($1000\sim1200^{\circ}\text{C}$) エレクトロニクス産業: ガラス成形金型 (光学ガラス、携帯電話画面、$1000\sim1300^{\circ}\text{C}$)、半導体パッケージング金型 ($800\sim1000^{\circ}\text{C}$) 冶金産業: 非鉄金属 (銅、アルミニウム合金、$600\sim900^{\circ}\text{C}$) の熱間鍛造金型 事例: 航空用チタン合金熱間鍛造金型、PVD-TiN コーティング、寿命 40% 延長、成形効率 20% 向上	航空宇宙: 高温押出金型 (高温合金、チタン合金、$1200\sim1600^{\circ}\text{C}$)、熱間鍛造金型 (大型航空部品、$1000\sim1400^{\circ}\text{C}$) エネルギー産業: 原子力発電部品用の熱間押出ダイス (ジルコニウム合金管、$1000\sim1400^{\circ}\text{C}$)、風力タービンギアブランク用の高耐久性熱間鍛造ダイス ($800\sim1200^{\circ}\text{C}$) 自動車製造: 高強度ホットスタンプ金型 (超高強度鋼、$900\sim1100^{\circ}\text{C}$) 冶金産業: 非鉄金属 (銅、アルミニウム合金、$800\sim1200^{\circ}\text{C}$) 用の高耐久性熱間押出ダイス 防衛産業: 徹甲コア成形金型 ($1000\sim1300^{\circ}\text{C}$)、高密度部品の熱間鍛造金型 ケース: 原子力発電用ジルコニウム合金管熱間押出ダイス、CrN コーティング、耐熱性 1400°C、寿命 30% 延長
高温 金型 効果	Al_2O_3 など、TiAlN) は、摩耗を 50~70% 低減し、耐用年数を 5000~8000 倍に延長します。航空用チタン合金 (1000°C、100 MPa) の熱間鍛造では、ダム率が 60% 低減し、耐用年数は最大 8000 倍に達し、従来の金型よりも優れています。 耐腐食性: 酸化、酸、アルカリ、熔融金属の腐食に強く、腐食速度は 70% 低減し、メンテナンスサイクルは 30% 延長します。ガラス成形 (1200°C) においては、熔融ガラスの腐食にも耐え、耐用年数は 50% 延長し、表面に明らかな孔食は発生しません。	耐高温性: 1600°C における変形率 0.1% 未満、曲げ強度は $800\sim1200\text{ MPa}$ を維持し、寿命は 4000~6000 回です。原子力発電用ジルコニウム合金管の押出成形 (1400°C、150 MPa) では、寿命は 6000 回に達し、一般的な鋼製金型 (2000 回) よりも優れています。 耐熱疲労性: 高い熱伝導率 ($100\sim150\text{ W/m}\cdot\text{K}$) により、熱割れを 50% 低減し、疲労寿命を 30% 向上させます。高負荷ホットスタンプ (1100°C) においては、割れ発生率が 12% から 5% に低減します。 耐衝撃性: 靱性 $K_{IC}\ 20\sim30\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$、衝撃割れ率 60% 低

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

耐高温性: 1400°Cでも硬度はHV900~1500を維持し、変形率は0.1%未満です。半導体パッケージング金型(1000°C)では、高温安定性により5000回の連続動作が可能です。 耐疲労性: 傾斜コーティングは熱応力を軽減し、疲労寿命を30%向上させ、熱亀裂を50%低減します。自動車用アルミ合金ダイカスト(700°C)では、寿命が4,000倍から6,000倍に向上します。 寸法精度: 寸法偏差<0.01mm、熱膨張変形<0.05%、完成品の合格率が25%向上(90%→95%)。 成形効率: 高い硬度と耐磨耗性によりメンテナンスが軽減され、効率が20~25%向上します。	減。航空用耐熱合金(1200°C、200MPa)の熱間鍛造において、金型の割れは発生せず、耐用年数は5000回に達します。 寸法精度: 寸法偏差<0.015mm、熱膨張変形<0.08%、完成品の合格率が20%向上(85%→90%)。 成形効率: 高密度と高い変形耐性により、ダウンタイムが短縮され、効率が15~20%向上します。耐磨耗性(コーティングが必要): CrNまたはWC-Coコーティングにより、摩耗が40~50%低減し、耐用年数が20%向上します。徹甲コア成形(1300°C)では、コーティング金型の寿命が3000倍から4000倍に延長します。
--	--

例:

材料構成: 超硬合金および高密度タングステン合金の化学構成の概要。

材料特性: 硬度、密度、融点、強度などの主要なパラメータを比較します。

製造工程: 成形、焼結、表面改質等の工程をまとめたものです。

性能と制限: 耐磨耗性、耐熱性、コストなどの利点と欠点を分析します。

応用シナリオ: 航空宇宙、エネルギー、自動車、冶金、防衛などの分野での用途と事例をリストします。

高温金型効果: 耐磨耗性、耐腐食性、耐高温性、耐疲労性、寸法精度、成形効率などの効果を定量化します。

超硬合金製高温金型と高密度タングステン合金製金型の比較分析と概要

超硬合金製高温金型と高密度タングステン合金製金型は、高温成形の分野でそれぞれ独自の利点を持ち、さまざまな作業条件や用途に適しています。WC-Co型は、高硬度(HV1000~1800)と優れた耐磨耗性(摩耗率が50~70%低下)により、精密熱間鍛造、ダイカスト、ガラス成形において優れた性能を発揮します。特に、1400°C以下の温度、高精度(寸法偏差<0.01mm)、耐腐食性を備えたシーンに適しています。PVD/CVDコーティング(TiN、Al₂O₃など)と高エネルギー溶射(APS/DGSなど)技術により、高温金型の効果が大幅に向上します。たとえば、航空用チタン合金製熱間鍛造金型の寿命は8,000回に達し、効率は25%向上します。優れた耐食性(腐食速度70%低減)により、ガラス成形や半導体パッケージングにおける熔融材料による浸食に強く、メンテナンスサイクルも30%延長します。しかし、WC-Co系金型は靱性が低く(K_{IC}10~15 MPa·m^{1/2})、高衝撃下では割れやすく、製造コストも高い(5万~50万元)ため、大型金型への適用は限定的です。

高密度タングステン合金ダイスは、非常に高い高温強度(1600°Cでの変形率<0.1%)と高い靱性(K_{IC}20~30 MPa·m^{1/2})で知られており、高負荷、高温押し出しおよび熱間鍛造のシナリオに適しています。高密度(17~19 g/cm³)と耐変形特性により、ダイスは

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

高压（150~200 MPa）下で安定して動作できます。たとえば、原子力ジルコニウム合金管の押し出しダイスの寿命は最大 6,000 回で、効率は 20% 向上します。高い熱伝導率（100~150 W / m·K）により、熱割れが 50% 減少し、自動車の高負荷ホットスタンピングなどの周期的な負荷条件に適しています。

しかし、高密度タングステン合金は硬度が低く（HV300~600）、耐摩耗性が不十分で、性能向上には CrN または WC-Co コーティングが必要であり、耐腐食性も弱い（保護コーティングが必要）という欠点があります。タングステン資源は希少（1 トンあたり 50 万~80 万元）であり、高密度化は重量とコストの増加につながるため、軽量金型への適用は限定的です。

超硬合金製高温金型および高密度タングステン合金製金型の材料選定に関する提案

精密小型金型（航空機鍛造品、ガラス金型、自動車ダイカストなど）

超硬ダイスは耐摩耗性、精度、長寿命（5000~8000 回）に優れています。

重荷重・高温金型（高温押出成形、原子力発電部品、徹甲コア成形など）

高密度タングステン合金金型は、優れた変形抵抗と高い靱性を備え、より適しています。

コストとライフバランス

WC-Co 金型はメンテナンスコストが低く、高頻度の使用に適しています。高密度タングステン合金金型は加工性が良好で、重い荷重に適していますが、表面強化が必要です。

航空ノズル（高温耐侵食コーティング）、電解装置電極（耐腐食コーティング）、ガスタービン部品（耐摩耗コーティング）の技術要件と同様に、いずれも表面改質とインターフェースエンジニアリング（勾配コーティング、イオン注入など）に依存してパフォーマンスを最適化します。

今後、ナノ粒子 WC-Co、多層複合コーティング、低温焼結プロセス、高密度タングステン合金の耐摩耗コーティング、積層造形技術の開発により、高温金型は航空、エネルギー、自動車、冶金、国防などの分野で性能と経済性をさらに向上させ、効率的で持続可能な産業製造を強力にサポートします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録：
超硬合金製高温金型とチタンジルコニウムモリブデン（TZM）合金金型の比較分析

高温金型は、熱間鍛造、熱間押出、ダイカスト、ガラス成形などのプロセスにおいて、極めて高温（800～1800℃）、高圧（50～200MPa）、腐食環境にさらされるため、材料には優れた硬度、耐摩耗性、耐高温性、寸法安定性が求められます。超硬合金高温金型（WC-Co）は、高硬度と耐腐食性のため、精密成形分野で広く使用されています。チタンジルコニウムモリブデン（TZM）合金金型は、優れた高温強度と耐クリープ性のため、超高温および大型金型用途に適しています。両者は、航空ノズル（高温耐浸食性）、電解セル電極（耐腐食性）、風力発電ギアカッター（耐摩耗性）などの分野で共通の材料技術を持っています。

本稿では、両者の材料特性、製造プロセス、性能上の利点、適用分野、制約、高温金型への影響を比較することにより、材料選定のための包括的な参考資料を提供します。高温金型への影響に関する内容は、耐摩耗性、耐腐食性、耐高温性、耐疲労性、寸法精度、成形効率など、詳細な定量データと事例を網羅するように拡張されています。適用分野は、航空宇宙、エネルギー、自動車、エレクトロニクス、冶金などの産業に及びます。

超硬合金製高温金型およびチタンジルコニウムモリブデン（TZM）合金製金型の表		
プロ ジェ クト	超硬合金高温金型（WC-Co）	チタンジルコニウムモリブデン（TZM）合金金型
材料 構成	WC 85～95 重量％、Co 5～15 重量％、オプションで TiC、 Cr ₃ C ₂ 添加剤	Mo 99 ～ 99.5 wt％、Ti 0.4 ～ 0.55％、Zr 0.06 ～ 0.12％、 微量 C
材料 特性	硬度: HV1000～1800 密度: 14～15 g/cm ³ 融点: WC 2870℃、Co の制限により耐熱温度は約 1400℃ 曲げ強度: 2000～2500 MPa 破壊靱性: K _{IC} 10～15 MPa・m ^{1/2} 熱伝導率: 80～100 W/m・K 熱膨張係数: 5～7×10 ⁻⁶ /℃	硬度: HV250～350 密度: 10.2 g/cm ³ 融点: 約 2620℃、耐熱温度>1600℃ 曲げ強度: 800～1200 MPa 破壊靱性: K _{IC} 15～20 MPa・m ^{1/2} 熱伝導率: 110～140 W/m・K 熱膨張係数: 5.3～5.5×10 ⁻⁶ /℃
製 造 工 程	粉末冶金: 超微粒 WC/Co 粉末 (0.2～ 2μm) →冷間静 水圧プレス (CIP) →真空焼結 (1350～1450℃) →精密機 械加工 (ダイヤモンド研削) PVD/CVD コーティング (TiN、Al ₂ O ₃ 、2 ～ 20μm)、 APS/DGS 溶射 (WC-Co、50 ～ 500μm) インターフェースエンジニアリング: 勾配コーティング、 イオン注入	粉末冶金: Mo/Ti/Zr 粉末→熱間静水圧プレス (HIP、1700～ 2000℃) →鍛造/圧延→CNC 加工 表面改質: 酸化物コーティング (例: MoSi ₂ 、10 ～ 50μm) または窒化 熱処理: 靱性を高めるための焼鈍 (1000～1200℃)
パ ー フ ォ ー マ ン	TiAlN、Al ₂ O ₃ など) により摩耗を 50～70%低減し、高摩 擦条件 (熱間鍛造、ダイカストなど) に適しています。航 空チタン合金の熱間鍛造では、摩耗率が 60%低減し、金	極めて高い耐熱性: 1600～1800℃で 800～1000MPa の曲げ 強度を維持し、クリープ現象も発生しないため、超高温押 出成形に適しています。この高温合金ダイスは 1600℃で動

ス	型寿命は 8,000 回に達します。	作し、寿命は 6000 回です。
の	優れた耐食性：酸、アルカリ、酸化、熔融金属腐食に耐性	優れた耐熱疲労性：高い熱伝導率（110～140 W/m・K）に
点	があり、腐食速度は 70%低減し、メンテナンスサイクルは 30%延長します。ガラス成形金型においては、熔融ガラス腐食に耐性があり、耐用年数は 50%延長します。	より、迅速な放熱が可能になり、熱亀裂を 60%低減し、疲労寿命を 25%向上させます。熱間静水圧プレス金型においては、卓越した耐熱衝撃性を発揮します。
	高温硬度保持：コーティング技術により耐熱性が 1400℃まで向上し、硬度は 10～15%しか低下しないため、精密成形（光学ガラスなど、1000～1300℃）に適しています。	高靱性：破壊靱性 K_{IC} 15～20MPa・m ^{1/2} 、耐衝撃性が強く、高応力条件（高温スタンピングなど）に適しており、衝撃割れ率が 50%減少します。
	寸法安定性：熱膨張係数が低い（5～7×10 ⁻⁶ /℃）、寸法偏差 <0.01mm で、高精度な成形を保証し、航空機鍛造品の精度を 20%向上します。	加工性良好：複雑な形状の CNC 加工が可能で、金型製造サイクルが 20%短縮され、大型金型（原子力押し出し金型など）に適しています。
	疲労耐性：インターフェースエンジニアリング（傾斜コーティングなど）により熱応力が軽減され、疲労寿命が 30% 向上するため、周期的な荷重条件（自動車のダイカストなど）に適しています。	寸法安定性：熱膨張係数 5.3～5.5×10 ⁻⁶ /℃、寸法偏差 <0.02mm、大型高温成形（セラミック金型など）に適しています。
制限	靱性が低い（ K_{IC} 10～15 MPa・m ^{1/2} ）、割れやすい 高密度（14～15 g/cm ³ ）で重い 製造コストが高い（設備 1,000 万～3,000 万人民币元、金型 5,000 万～50 万人民币元） 耐熱性は Co 相によって制限されます（<1400℃）	硬度が低い（HV250～350）、耐摩耗性が不十分 酸化しやすい（>600℃）ため、保護コーティングが必要 モリブデン資源の高コスト（1 トンあたり 20 万～30 万人民币元） 低温脆性、高温動作が必要
用途と使用法	航空宇宙：熱間鍛造金型（チタン合金、ニッケル基合金鍛造品、800～1200℃）、熱間押出金型（航空宇宙構造部品、1000～1300℃） 自動車製造：ダイカスト金型（アルミニウム合金、マグネシウム合金部品、600～800℃）、ホットスタンプ金型（高張力鋼板、700～900℃） エネルギー産業：風力タービンギア用の熱間鍛造金型（42CrMo ギアブランク、800～1100℃）、原子力発電部品の熱間押し出し金型（1000～1200℃） エレクトロニクス産業：ガラス成形金型（光学ガラス、携帯電話画面、1000～1300℃）、半導体パッケージング金型（800～1000℃） 冶金産業：非鉄金属（銅、アルミニウム合金、600～900℃）の熱間鍛造金型 事例：航空用チタン合金熱間鍛造金型、PVD- TiN コーティング、寿命 40%延長、成形効率 20%向上	航空宇宙：高温押出ダイス（高温合金、チタン合金、1200～1600℃）、熱間静水圧プレスダイス（航空機タービンディスク、1400～1800℃） エネルギー産業：高温炉（真空焼結炉、熱処理炉、1600℃以上）、原子力高温押出ダイス（ジルコニウム合金管、1200～1500℃） 自動車製造：高温ホットスタンプ金型（超高強度鋼、900～1100℃） エレクトロニクス産業：高温セラミック成形金型（ジルコニア、窒化ケイ素、1400～1600℃） 冶金産業：高温合金連続铸造鑄型（ニッケル基合金、1300～1600℃） ケース：高温合金押出ダイス、MoSi ₂ コーティング、耐熱性 1600℃、寿命 30%延長、成形効率+15%
高温金型効果	Al ₂ O ₃ など、TiAlN）は摩耗を 50～70%低減し、金型寿命を 5000～8000 倍に延長します。航空用チタン合金（1000℃、100MPa）の熱間鍛造では、摩耗率が 60%低減し、寿命は最大 8000 倍に延長します。これは従来の金型（4000 倍）よりも優れています。	耐高温性：1600～1800℃でクリープなし、曲げ強度は 800～1000MPa を維持し、ダイスの寿命は 4000～6000 回です。高温合金押出（1600℃、150MPa）では、変形率は 0.2%未満、寿命は最大 6000 回で、一般的なモリブデンダイス（3000 回）よりも優れています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

耐食性：酸化、酸、アルカリ、熔融金属の腐食を防ぎ、腐食速度を 70%低減し、メンテナンスサイクルを 30%延長します。ガラス成形（1200℃、熔融ガラス）においては、耐食寿命が 50%延長し、金型表面に明らかな孔食は発生しません。 耐高温性：1400℃でも硬度は HV900～1500 を維持し、変形率は 0.1%未満であるため、精密成形に適しています。半導体パッケージング金型（1000℃）では、高温安定性により 5000 回の連続稼働が可能です。 耐疲労性：傾斜コーティングにより熱応力が緩和され、疲労寿命が 30%向上し、熱亀裂が 50%減少します。自動車用アルミ合金ダイカスト（700℃、繰り返し荷重）では、金型寿命が 4,000 倍から 6,000 倍に向上します。 寸法精度：寸法偏差<0.01mm、熱膨張変形<0.05%。高精度成形に適しています。光学ガラス成形（1300℃）において、完成品の合格率が 25%向上しました（90%→95%）。 成形効率：高い硬度と耐摩耗性により、金型メンテナンスの負担が軽減され、生産効率が 20～25%向上しました。風力タービンギアの熱間鍛造（1100℃）では、1 シフトあたりの生産量が 100 個から 125 個に増加しました。	耐熱疲労性：高い熱伝導率（110～140 W/ m·K ）により、熱割れが 60%低減し、疲労寿命が 25%向上します。熱間静水圧プレス金型（1700℃、周期加熱）においては、熱割れの発生率が 10%から 3%に低減します。 耐衝撃性：靱性 K_{IC} 15～ 20MPa·m^{1/2}、衝撃割れ率 50%低減。自動車用超高強度鋼（1000℃、200MPa）のホットスタンプにおいて、金型割れは発生せず、耐用年数は 5000 回に達します。 寸法精度：寸法偏差<0.02mm、熱膨張変形<0.1%、大型成形に適しています。セラミック成形（1600℃、ジルコニア）において、完成品の合格率が 20%向上しました（85%→90%）。 成形効率：高い熱伝導性と耐クリープ性により、ダウンスイムが短縮され、生産効率が 15～20%向上しました。原子力用ジルコニウム合金管の押出成形（1400℃）では、1 直あたりの生産量が 80 個から 95 個に増加しました。 耐酸化性（コーティングが必要）： MoSi₂ コーティングは耐酸化性に優れ、600～1600℃で酸化率が 80%低下します。高温炉（1700℃）では、コーティングされた金型の寿命は 2000 倍から 4000 倍に延長されます。
--	---

例：

材料構成：WC-Co および TZM の化学構成の概要。

材料特性：硬度、密度、融点、強度などの主要なパラメータを比較します。

製造工程：成形、焼結、表面改質等の工程をまとめたものです。

性能上の利点：耐摩耗性、耐腐食性、耐高温性、耐疲労性、寸法安定性などの詳細な説明を保持します。

応用分野と用途：航空宇宙、エネルギー、自動車、エレクトロニクス、冶金などの分野における具体的な用途を、事例を含めて網羅しています。

高温金型効果：耐摩耗性、耐腐食性、耐高温性、耐疲労性、寸法精度、成形効率などの詳細な定量データと事例を追加しました。

超硬合金製高温金型とチタンジルコニウムモリブデン（TZM）合金金型の比較と分析

炭化物高温金型（WC-Co）とチタンジルコニウムモリブデン（TZM）合金金型は、高温成形の分野で独自の利点を示し、航空宇宙、エネルギー、自動車、エレクトロニクス、冶金など、さまざまな業界の厳しい要件を満たしています。WC-Co 金型は、高硬度（HV1000

～1800）と優れた耐摩耗性（摩耗率が 50～70%減少）により、精密成形において優れた性能を発揮し、1400℃ 未満の温度、高精度（寸法偏差<0.01 mm）、耐腐食性などの作業条件に適しています。その PVD / CVD コーティング（TiAlN、Al₂O₃など）と高エネルギー溶射（APS/DGS など）技術は、高温金型の効果を大幅に向上させます。例えば、航空

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

チタン合金熱間鍛造用金型の 1000°Cにおける寿命は 8000 倍で、従来の金型（4000 倍）よりも優れており、生産効率は 25%向上します。

優れた耐食性（腐食速度 70%低減）と耐疲労性（疲労寿命+30%）により、ガラス成形（熔融ガラス耐腐食性、寿命+50%）や自動車用ダイカスト（寿命が 4000 倍から 6000 倍に延長）に最適です。しかし、WC-Co 鑄型は靱性が低く（ K_{IC} 10~15 MPa·m^{1/2}）、高衝撃で割れやすいという欠点があり、密度が高く（14~15 g/cm³）、製造コストが高い（5 万~50 万元）ため、大型鑄型への適用は制限されています。

TZM 合金金型は、極めて高い高温強度（1600~1800°Cでクリープなし）と耐熱疲労性（熱亀裂が 60%減少）で知られており、超高温および大型金型シナリオ（高温押し出し、熱間静水圧プレスなど）に適しています。その高い熱伝導率（110~140 W / m·K）と靱性（ K_{IC} 15~20 MPa·m^{1/2}）は、熱衝撃と機械的ストレスに効果的に耐えます。たとえば、高温合金押し出し金型の 1600°Cでの寿命は 6,000 倍で、効率は 15%向上します。TZM は、原子力ジルコニウム合金管の押し出し（出力+15%）とセラミック成形（合格率+20%）において優れた高温金型効果を実証しました。MoSi₂ コーティングは耐酸化性をさらに向上させます（酸化率が 80%減少）。しかし、TZM は硬度が低く（HV250~350）、耐摩耗性が不十分で、保護コーティングが必要であり、600°Cを超えると酸化しやすいため、コストが上昇します。モリブデン資源の希少性（1 トンあたり 20 万~30 万元）も金型価格の上昇につながっています。

超硬合金製高温金型とチタンジルコニウムモリブデン（TZM）合金金型との比較

精密小型金型（航空機鍛造品、ガラス金型、自動車ダイカストなど）

WC-Co 金型は、耐摩耗性、精度、耐腐食性に優れ、耐用年数が長い（5000 ~ 8000 回）という優れた特性を持っています。

超高温大型金型（高温押出、熱間静水圧プレス、セラミック成形など）

TZM 金型は、耐高温性と耐熱疲労性に優れており、複雑な形状に適しています。

コストとライフバランス

WC-Co 鑄型は高頻度使用に適しており、メンテナンスコストが低い。TZM 鑄型は加工性に優れているものの、酸化防止剤による保護が必要となる。航空機ノズル（高温耐浸食コーティング）、電解セル電極（耐腐食コーティング）、風力発電ギアカッター（耐摩耗コーティング）などの技術要件と同様に、いずれも性能を最適化するために表面改質とインターフェースエンジニアリング（傾斜コーティングやイオン注入など）が求められる。

今後、ナノ粒子 WC-Co、多層複合コーティング、低温焼結プロセス、TZM の酸化防止コーティングおよび付加製造技術の開発により、高温金型は多くの分野で性能と経済性をさらに向上させ、効率的で持続可能な産業製造を強力にサポートします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

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:

超硬合金ガスタービン部品の概要

1. セメント炭化物ガスタービン部品の背景と意義

ガスタービンは、航空宇宙、エネルギー発電などの分野における中核的な動力機器です。その主要部品（ブレード、ノズル、燃焼室、シールなど）は、高温（1000～1600℃）、高压（10～30MPa）、高速回転（10,000～50,000rpm）、腐食環境下で安定して動作する必要があります。超硬合金製ガスタービン部品は、炭化タングステンを主成分とする超硬合金（WC-Co）を主材料としています。高硬度、耐摩耗性、耐高温性、耐腐食性を備えたこの合金は、ガスタービンの耐摩耗性、耐腐食性コーティングや高負荷部品の理想的な選択肢となっています。これらの部品は、耐久性と効率を高めることで、ガスタービンの寿命（10,000～30,000 時間）を延ばし、燃焼効率（最大 40～60%）を向上させます。

ガスタービンにおける超硬合金（WC-Co）の応用は、主に表面コーティングや特定の耐摩耗部品に集中しており、航空ノズル（耐高温浸食性）、電解セル電極（耐腐食性）、風力発電ギアカッター（耐摩耗性）などの材料技術と共通点があります。ガスタービン部品は、高温ガス浸食、酸化、疲労、摩耗といった過酷な使用条件に耐える必要があるため、超硬合金は、高度な製造プロセス（コーティング技術、界面工学など）と材料最適化（ナノ粒子など）を通じて、性能を大幅に向上させます。これらの技術は、航空エンジン（GE9X など）の高性能要件を満たすだけでなく、エネルギー発電および産業用ガスタービンの持続可能な発展に重要なサポートを提供します。

2. セメント炭化物ガスタービン部品の材料特性

セメント炭化物ガスタービン部品は通常 WC-Co をベースとし、典型的な組成は WC 85～95 重量%、Co 5～15 重量%で、添加剤（Cr₃C₂、TiC）はパフォーマンスを最適化します。主な特徴は以下のとおりです。

高硬度

HV1000～1800 はニッケルベースの合金（HV300～500）をはるかに上回り、耐摩耗性と表面品質を保証します。

高温安定性

WC の融点は 2870℃で、Co 相は 1400℃以下でも安定しています。コーティング（Al₂O₃ など）を施すことで、耐熱性はさらに向上します。

耐摩耗性

ナノ粒子（WC 粒子サイズ 0.2～1μm）およびコーティング（TiAlN など）により、ブレード先端およびノズルスロートに適しています。

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

燃料ガス（pH 2～5）での酸化、硫化、酸腐食に耐え、腐食速度を 50～70% 低減し、部品の寿命を延ばします。

抗疲労性能

Co 含有量（10～15 wt %）により、破壊靱性 (K_{IC} 10～15 MPa·m^{1/2}) が向上し、熱疲労や機械的衝撃に対する耐性も向上します。

熱伝導率

80～100 W/m·K で、放熱性に優れ、熱応力を軽減します。

これらの特性は、航空ノズル（耐侵食性）、電解セル電極（耐腐食性）、高温金型（耐摩耗性）の要件と非常に一致しており、極限環境における超硬合金の優位性を反映しています。

3. 製造工程

セメント系超硬合金製ガスタービン部品の製造には、微細構造の均一性、表面精度 ($Ra < 0.4 \mu m$)、コーティング接合強度 ($> 50 MPa$) の確保が求められます。主な工程は以下のとおりです。

粉末調製

超微細 WC 粉末（粒径 0.2～1 μm ）と高純度 Co 粉末（ $> 99.9\%$ ）を使用し、高エネルギーボールミルで混合し、 Cr_3C_2 や VC などの添加剤を加えて粒成長を抑制します。

成形と焼結

グリーン体は、冷間等方圧プレス（CIP、100～400 MPa）または圧縮成形によって形成され、その後、真空または低圧焼結炉（1350～1450℃）で液相焼結され、密度 90～95%、粒径 0.5～1 μm が達成されます。

4. 表面改質

コーティング技術

TiAlN など）による TiCN（厚さ 2～10 μm ）や CVD（ Al_2O_3 など、厚さ 5～20 μm ）を使用すると、硬度が HV2000～3000 に増加し、耐摩耗性が 30～50% 向上します。

高エネルギー溶射

プラズマ溶射（APS）またはデトネーション溶射（DGS）では、WC-Co または Cr_3C_2 コー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ティング（50～500 μ m）が形成され、接合強度は 30～80MPa、耐侵食性は 20～30%向上します。

インターフェースエンジニアリング

勾配コーティングまたはイオン注入によりコーティング/基板インターフェースを最適化し、接着力を 30% (>50 N) 向上させ、剥離を軽減します。

精密機械加工

ダイヤモンド研削、CNC 加工、レーザー微細加工を使用して、部品の形状精度(± 0.01 mm)と表面仕上げ (Ra 0.2～0.4 μ m) を保証します。

これらのプロセスは、複雑な形状と耐腐食コーティングを必要とする航空機ノズルや、耐摩耗コーティングを必要とする高温金型の製造技術と密接な関係があり、セメント炭化物処理の分野横断的な適用性を反映しています。

5. パフォーマンス上の利点

従来の材料（ニッケルベースの合金やセラミックなど）と比較して、セメント炭化物ガスタービン部品には大きな利点があります。

高い耐摩耗性

コーティング硬度は HV2000～3000、摩耗率は 50～70%低減し、ブレードとノズルの寿命は 30～50%延長（10,000→15,000 時間）します。

耐高温性

硬度は 1400°Cで HV900～1500 を維持し、変形率は 0.1%未満であるため、より高い燃焼温度をサポートし、効率が 5～10%向上します。

耐食性

酸化やガス腐食に強く、腐食速度が 50～70%低減し、メンテナンスサイクルが 30%延長されるため、過酷なガス環境にも適しています。

抗疲労性能

勾配コーティングにより、熱応力が軽減され、疲労寿命が 30% 向上し、熱亀裂が 50%減少し、コンポーネントの信頼性が向上します。

寸法安定性

低い熱膨張係数（ $5\sim 7\times 10^{-6}$ /°C）と寸法偏差<0.01 mm により、高精度な動作が保証されます。

6. 適用シナリオ

超硬合金製ガスタービン部品は、主に以下のシナリオで使用されます。

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

ブレードコーティング

WC-Co または Cr_3C_2 コーティングをタービンブレードの先端と根元に使用し、耐摩耗性が 30% 向上し、寿命が 40% 延長されるため、航空機エンジン（GE9X など）や産業用ガスタービンに適しています。

ノズルとガイド

APS/DGS はノズルスロートおよびガイドベーンに WC-Co コーティングをスプレーします。これにより、耐侵食性が 20% 向上し、耐用年数が 8,000 時間から 12,000 時間に延長されます。

燃焼室ライニング

CVD - Al_2O_3 コーティングは燃焼室の表面を保護し、高温腐食に耐え、耐用年数を 30% 延ばし、燃焼効率を 5% 向上させます。

アザラシ

炭化物シーリングリングまたはコーティングにより、耐摩耗性が 50% 向上し、ガス漏れが削減され、効率が 3 ~ 5% 向上します。

ベアリングおよび支持部品

WC-Co 耐摩耗部品は高温ベアリングに使用され、摩擦係数を 20% (0.1~0.2) 低減し、耐用年数を 50% 延ばします。

場合

GE9X エンジンのタービンブレードは PVD- TiAlN コーティング WC-Co で保護されており、耐摩耗性が 40% 向上し、耐用年数が 10,000 時間から 14,000 時間に延長され、燃焼効率が 5% 向上します。web:9 。

これらの用途は、航空機ノズル（耐浸食コーティング）、電解セル電極（耐腐食コーティング）、および高温金型（耐摩耗コーティング）の技術要件に似ており、超硬合金の多用途性を際立たせています。

7. 課題と限界

セメント炭化物ガスタービン部品は次のような課題に直面しています。

製造コスト

コーティング装置（PVD/CVD など、1,000 万~3,000 万人民币元）や精密機械加工（ダイヤモンド研削）は高価です。

強靭さの欠如

破壊靭性値 (K_{IC} 10 ~ 15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) はニッケル基合金 (K_{IC} 50 ~ 100 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) に比べて低く、大きな衝撃を受けると割れやすくなります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

コーティングの剥がれ

高温・高応力下ではコーティングの接着強度（30～50 MPa）が不十分になる可能性があります。インターフェースエンジニアリングを最適化する必要があります。

重量制限

高密度（14～15 g/cm³）では回転部品の重量が増加し、効率に影響するため、軽量コーティングの開発が必要になります。

環境への影響

焼結およびコーティングのプロセスには大量のエネルギー（500～1000 kWh/バッチ）が必要であり、コバルト資源の希少性（世界の埋蔵量は約 700 万トン）によりコストが増加します。

8. 今後の開発動向

ために、今後は以下の方向に重点を置くことができます。

ナノ粒子超硬合金

超微粒子 WC（粒径<0.2μm）を開発し、硬度を HV1800～2000 に向上、靱性を 20% 向上させ、高負荷部品に適します。

多層複合コーティング

PVD / CVD 多層コーティング（TiAlN / Al₂O₃ / CrN など）により、耐摩耗性が 50%、密着性が 30% 向上し、耐用年数が延長されます。

グリーン製造

低温焼結（<1300℃）と低コバルト/コバルトフリーの超硬合金を最適化して、エネルギー消費を 30～50% 削減し、コバルト資源への圧力を軽減します。

積層造形

3D プリンティング（選択的レーザー焼結法 SLS など）を使用して複雑なコーティングやコンポーネントを製造すると、処理コストを 20～30% 削減できます。

インテリジェントな最適化

AI と熱力学シミュレーションを使用してコーティング設計とインターフェース構造を最適化した結果、効率が 20% 向上し、寿命予測の精度が 30% 向上しました。

9. 要約表

超硬合金ガスタービン部品の主な特徴と技術的ポイント

プロジェクト	説明する
材料構成	WC 85～95 重量%、Co 5～15 重量%、オプションで Cr ₃ C ₂ 、TiC 添加剤

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

主な特徴	硬度 HV1000~1800、曲げ強度 2000~2500MPa、耐熱性 1400°C、耐摩耗性に優れる
製造工程	粉末調製 → 冷間静水圧プレス → 真空焼結 → コーティング（PVD/CVD、APS/DGS） → 精密機械加工（ダイヤモンド研削、レーザー）
表面改質	PVD-TiAlN：硬度 HV2000~3000、耐摩耗性+30% CVD-Al ₂ O ₃ ：耐熱性 1400°C、寿命+40% APS/DGS-WC-Co: 接着強度 30~80 MPa、耐侵食性+20~30%
アプリケーション シナリオ	ブレードコーティング、ノズル、燃焼室ライナー、シール、ベアリング部品
パフォーマンス上 の利点	耐摩耗性+30~50%、寿命 10,000~15,000 時間、効率+5~10%、精度±0.01 mm
チャレンジ	高コスト（5,000~50,000 元/個）、靱性不足、コーティングの剥離、重量増加、環境への影響
今後の方向性	ナノ結晶粒子、多層コーティング、グリーン製造、3D プリンティング、インテリジェント最適化

例：
材料と特性: WC-Co の一般的な構成と特性に基づきます。
製造プロセス: 成形、焼結、修正、加工の全プロセスを要約します。
パフォーマンスと課題: 利点（例: 寿命、効率）と制限（例: コスト、堅牢性）を定量化します。

10. 結論

超硬ガスタービン部品は、高硬度、耐摩耗性、耐高温性、耐腐食性を備えているため、航空機エンジンや産業用ガスタービンの中核部品となっています。PVD/CVD、APS/DGS などの先進コーティング技術とインターフェースエンジニアリングにより、優れた性能を実現しています。 WC-Co コーティングは、ブレードやノズルなどの部品の寿命（10,000→15,000 時間）と効率（+5~10%）を大幅に向上させ、航空ノズル（耐浸食性）、電解セル電極（耐腐食性）、高温金型（耐摩耗性）の技術要件と高い整合性を備えています。 高コスト、不十分な靱性、環境課題があるにもかかわらず、ナノ結晶材料、多層複合コーティング、グリーン製造の進歩により、超硬合金部品はより高い性能と持続可能性を実現し、航空宇宙産業とエネルギー産業の電力システムに信頼性と効率の高いソリューションを提供します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

超硬合金製食品加工工具および食品加工機器部品

タングステンカーバイド（WC）ベースの超硬合金（WC 8894 wt %、Co/Ni 612 wt %）をベースにしています。精密研磨と食品グレードの PVD コーティング（CrN、DLC、24 μm など）により、高硬度（1800~2000 HV）、耐摩耗性（摩耗量<0.04 mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01 mm/y、pH 410）、食品安全性（FDA 21 CFR 175.300、GB 4806.12016 準拠）を実現しています。ナイフは食品加工（肉、果物、野菜、冷凍食品、生地）用に設計されており、スライス、ダイスカット、ミンチ、皮むきに適しており、切断速度は 50~300 m/分、寿命は 1000~3000 分、表面粗さは Ra 0.1~0.4 μm です。機器部品（金型、ガイド、ノズルなど）は食品の成形、輸送、噴霧に使用され、摩耗寿命は 6~12 ヶ月です。この記事では、国家規格（GB/T 79972017、GB 4806.12016）と食品業界のニーズに基づき、ナイフと部品の製造プロセス、性能、用途、最適化の方向性について説明します。

1.1 超硬合金製食品加工工具

超硬合金製食品加工工具および機器部品は、超微粒子 WC（0.2~0.5 μm）マトリックス、Ni 基結合相（耐腐食性）、および食品グレード PVD コーティング（CrN、DLC、ZrN）を採用しています。高精度研削加工（刃先半径<5 μm）または研磨加工（Ra<0.1 μm）により、食品加工における高い衛生性、耐摩耗性、耐腐食性、安全性の要件を満たしています。

超硬合金食品加工工具の特徴

ステンレス鋼（400~600 HV）よりも数倍優れています。

耐腐食性: 耐酸性および耐アルカリ性（pH 410、<0.01 mm/y）、食品接触安全性（FDA、GB 4806.1）に準拠。

低摩擦: コーティングの摩擦係数は 0.2 未満で、非粘着性があり、清掃が簡単です。

耐摩耗性: 摩耗 <0.04 mm³/h、工具寿命 1000 ~ 3000 分、部品寿命 6 ~ 12 か月。

用途: ナイフは肉のスライス、果物や野菜のさいの目切り、冷凍食品の切断、生地の分割に使用され、部品は肉挽き機のスクリーン、コンベアローラー、ミキサーブレードに使用されます。

1.2 超硬合金製食品加工工具の種類

ナイフ:

スライシングナイフ: 薄切りカット（肉、果物、野菜）、速度 100~300 m/分。

ダイシングナイフ: キューブカット（野菜、調理済み肉）、速度 80200 m/分。

肉挽き機: 肉をひき肉にする、速度 50~150m/分。

皮むきナイフ: 果物や野菜の皮むき、速度 100~250 m/分。

装備パーツ:

スクリーンプレート: 肉挽き機スクリーン（口径 310 mm）、耐摩耗性、耐腐食性。

コンベアローラー: 食品の搬送、固着防止。

ミキシングブレード: 生地/ソースの混合、耐摩耗性、耐腐食性。

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

1.3 超合金製食品加工工具の利点

ステンレス鋼に比べて 2 倍の強度があり、効率は 30 ~ 50% 向上します。
寿命: ツールは 1000 ~ 3000 分、部品は 6 ~ 12 か月 (ステンレス鋼は 13 か月)。
衛生: Ra 0.10.4 μm 、低付着性、コロニー数 $<10 \text{ CFU/cm}^2$ 。
安全性: 食品グレードのコーティング、無毒、非移行性 (GB 4806.12016、FDA)。

2.1 原材料

材料マトリックス:

WC: 8894 wt %、超微粒子 (D50 0.2~0.5 μm)、硬度 1800~2000 HV。
Ni: 612 wt %、耐腐食性 (H_2SO_4 、 NaCl $<0.01 \text{ mm/y}$)、食品グレードで安全。
添加剤: Cr_3C_2 (0.2~0.5 重量%) は、粒成長を抑制し、硬度を 5% 向上させます。コーティング:
CrN (PVD): 硬度 1800~2200 HV、摩擦係数 0.2、耐腐食性、FDA 準拠。
DLC (PVD): 硬度 3000~3500 HV、摩擦係数 <0.1 、非粘着性、食品グレード。
ZrN (PVD): 硬度 2000~2500 HV、耐酸性に優れ、酸性食品に適しています (pH 46)。

2.2 勾配構造

表面: 低 Ni (68 重量%)、超微粒子 WC (0.2~0.5 μm)、硬度 1800~2000 HV。
コア: 高 Ni (1012 wt %)、細粒 WC (0.51 μm)、KIC 1012 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。
利点: 耐摩耗性が 20% 向上し、耐衝撃性が 15% 向上し、ひび割れ確率が 15% 減少します。
準備: 層状プレス + HIP 焼結 (1350°C、120 MPa)。

2.3 パフォーマンス要件

硬度: 1800~2000 HV (GB/T 79972017)。
曲げ強度: 1.8~2.5 GPa (GB/T 38512015)。
破壊靱性: 1012 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。
耐摩耗性: 摩耗速度 $<0.04 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)。
耐食性: pH 410、 $<0.01 \text{ mm/y}$ (GB 96842011)。
食品安全性: 無毒、移行なし (GB 4806.12016、FDA 21 CFR 175.300)。

製造工程

3.1 粉末の調製

原材料: WC (D50 0.20.5 μm 、純度 $>99.9\%$)、Ni (D50 12 μm)、 Cr_3C_2 (D50 0.51 μm)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ボールミル処理：遊星ボールミル（ZrO₂ ボール、10: 1）、300 rpm、1620 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：冷間等方圧成形（CIP）または圧縮成形。

パラメータ：250～280 MPa、保持圧力 60 秒、鋼製鋳型（偏差 $\leq \pm 0.05 \text{ mm}$ ）、ピレット密度 8.7～10.0 g/cm³。

結果：寸法偏差 $\leq \pm 0.1 \text{ mm}$ 、亀裂率 $<1\%$ 。

3.3 焼結

方法：真空焼結+HIP。

パラメータ：

脱蠟：200～600℃、3℃/分、H₂ 雰囲気（O₂ $<5 \text{ ppm}$ ）、 10^{-2} Pa 。

焼結：1350～1400℃、 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ Pa}$ 、22.5 時間。

HIP：1350℃、120MPa（Ar）、11.5 時間。

結果：密度 14.815.0 g/cm³、多孔度 $<0.001\%$ 、硬度 18002000 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（35 μm ）、3000 rpm、送り 0.01～0.03 mm/パス、刃先半径 $<5 \mu\text{m}$ 、Ra 0.1～0.2 μm （工具）、表面研削、Ra $<0.2 \mu\text{m}$ （部品）。

研磨：ダイヤモンド研磨ペースト（12 μm ）、800rpm、Ra $<0.1 \mu\text{m}$ 、抗付着性が 20% 向上。

3.5 コーティング

方法：PVD（Cr/Zr ターゲット、 $>99.99\%$ ）。

パラメータ：CrN/DLC/ZrN（24 μm ）、 10^{-4} Pa 、250～300℃、バイアス 80 V、堆積速度 0.81 $\mu\text{m/h}$ 。

結果：接着力 $>80 \text{ N}$ 、摩擦係数 <0.2 、耐腐食性が 30% 向上しました。

3.6 検出

微細構造：SEM（粒径 0.2～0.5 μm ）、XPS（偏差 $\leq \pm 0.1 \text{ wt}\%$ ）。

性能：硬度偏差 $\leq \pm 50 \text{ HV}$ (ISO 6508)、摩耗率 $<0.04 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)、耐腐食性（pH 410、 $<0.01 \text{ mm/y}$ ）。

衛生：微生物学的検査（コロニー数 $<10 \text{ CFU}/\text{cm}^2$ 、GB 4789.2）、移行試験（ $<0.1 \text{ mg/kg}$ 、GB 31604.8）。

形状：CMM、エッジ/表面偏差 $\leq \pm 0.005 \text{ mm}$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

アプリケーションシナリオ

超硬合金製食品加工ツールおよび機器コンポーネントは、肉、果物、野菜、冷凍食品、生地加工、機器の耐摩耗性要件について、次の作業条件、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。

4.1 ツール

肉の部位（冷凍豚肉、18℃）：

作業条件：冷凍豚肉（HB 約 150、脂肪含有）、スライス厚さ 2mm。

タイプ：ディスクスライスナイフ(Ø 300 mm、片刃)。

マトリックス：WC8%Ni（超微粒子、D50 0.2～ 0.5 μ m 、 Cr3C2 0.5wt % ）、硬度 1800～2000 HV。

コーティング：PVD DLC（3 μ m 、硬度 3500HV 、摩擦 0.1）。

形状：切れ刃角度 20°、切れ刃半径 0.01mm、研磨切れ刃（Ra < 0.1 μ m ）。

プロセス：ボールミル処理 18 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400℃（10⁻⁵ Pa、2.5 時間）、HIP 1350℃（120 MPa、1.5 時間）、研削（Ra 0.1 μ m ） 、PVD DLC（250℃、接着力>80 N）。

パラメータ：速度 200 m/分、送り 0.05 mm/r、ドライカット。

テスト：

寿命：2000 分（ステンレスの場合は 400 分、5 倍長い）。

表面：Ra 0.2 μ m 、滑らかなカット、破れなし。

切断力：200N（ステンレス鋼の場合は 300N、33%低減）。

摩耗損失：VB < 0.1 mm、< 0.03 mm³/h。

衛生：コロニー数 < 10 CFU/cm²、付着なし。

モデル：WCNi+ DLC 、 Ø 300 mm スライサー、ドライカット + 定期消毒。

さいの目に切った果物と野菜（ニンジン、HB 50）：

作業条件：にんじん（水分 90%、繊維質を含む）、10×10 mm に切る。

種類：ダイシングナイフ(角型、50×50mm、4 枚刃)。

マトリックス：WC10%Ni（超微粒子、D50 0.2～ 0.5 μ m 、 Cr3C2 0.5wt % ）、硬度 1800～2000 HV。

コーティング：PVD CrN（3 μ m 、硬度 2200 HV、摩擦 0.2）。

形状：切れ刃角度 25°、切れ刃半径 0.02mm、研磨切れ刃（Ra < 0.1 μ m ）。

プロセス：ボールミル処理 18 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400℃（10⁻⁵ Pa、2 時間）、HIP 1350℃（120 MPa、1.5 時間）、研削（Ra 0.1 μ m ） 、PVD CrN（300℃、接着力>80 N）。

パラメータ：速度 150 m/分、送り 0.1 mm/r、ウェットカット（水、5 L/分）。

テスト：

寿命：1800 分（ステンレスの場合は 500 分、3.6 倍長い）。

表面：Ra 0.3 μ m 、きれいにカットされており、繊維の伸びはありません。

切断力：150N（ステンレス鋼の場合は 250N、40%低減）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

摩耗損失: VB <0.12 mm、<0.04 mm³/h。

衛生: 移行量 <0.1 mg/kg、腐食なし。

選択: WCNi+CrN、50×50 mm ダイシングナイフ、ウェットカッティング+高周波クリーニング。

ひき肉（牛、脂身あり）

作業条件: 牛肉（脂肪 20%、水分 70%）、直径 5 mm のミンチ。

タイプ: ミートグラインダー(Ø 100 mm、4 刃)。

マトリックス: WC12%Ni（超微粒子、D50 0.2~ 0.5µm、Cr3C2 0.5wt %）、硬度 1800~2000 HV。

コーティング: PVD ZrN（3 µm、硬度 2500 HV、摩擦 0.15）。

形状: 切れ刃角度 30°、切れ刃半径 0.03mm、研磨表面（Ra <0.1µm）。

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 µm）、PVD ZrN（300°C、接着力>80 N）。

パラメータ: 速度 100 m/分、送り 0.15 mm/r、ドライカット。

テスト:

寿命: 1500 分（ステンレスの場合は 300 分、5 倍長い）。

表面: Ra 0.3 µm、均一な粒子。

切断力: 250N（ステンレス鋼の場合は 400N、37%削減）。

摩耗損失: VB <0.15 mm、<0.04 mm³/h。

衛生: 脂肪付着なし、コロニー数<10 CFU/cm²。

モデル: WCNi+ ZrN、Ø 100 mm 肉挽き機、乾式切断 + 低温殺菌。

果物や野菜の皮むき（ジャガイモ、水分 80%）

作業条件: ジャガイモ（デンプン含有、水分 80%）、皮の厚さ 1mm。

タイプ: スキニングナイフ(湾曲、100×20 mm)。

マトリックス: WC8%Ni（超微粒子、D50 0.2~ 0.5µm、Cr3C2 0.5wt %）、硬度 1800~2000 HV。

コーティング: PVD CrN（2µm、硬度 2200HV、摩擦 0.2）。

形状: 切れ刃角度 15°、切れ刃半径 0.01mm、研磨切れ刃（Ra <0.1µm）。

プロセス: ボールミル処理 18 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400°C（10⁻⁵ Pa、2 時間）、HIP 1350°C（120 MPa、1.5 時間）、研削（Ra 0.1 µm）、PVD CrN（300°C、接着力>80 N）。

パラメータ: 速度 200 m/分、送り 0.08 mm/r、ウェット切断（水、5 L/分）。

テスト:

寿命: 2500 分（ステンレスの場合は 600 分、4.2 倍長い）。

表面: Ra0.2µm、剥離も均一、残留物なし。

切断力: 100N（ステンレス鋼の場合は 200N、50%低減）。

摩耗率: VB <0.1 mm、<0.03 mm³/h。

衛生: デンプン付着なし、移行量<0.1 mg/kg。

選択: WCNi+ CrN、100×20 mm ストリッピングナイフ、ウェットカット + 定期クリー

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

ニング。

4.2 機器構成

肉挽き機用スクリーン（牛肉、脂身あり）

作業条件: 牛肉（脂肪 20%、水分 70%）、穴の直径 $\varnothing 5\text{ mm}$ 、連続ミンチ。

タイプ: ふるい板($\varnothing 150\text{ mm}$ 、厚さ 10 mm 、孔径 $\varnothing 5\text{ mm}$)。

マトリックス: WC12%Ni（超微粒子、D50 0.2～ $0.5\mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.5wt %）、硬度 1800～2000 HV。

コーティング: PVD CrN（ $3\mu\text{m}$ 、硬度 2200 HV、摩擦 0.2）。

形状: 開口偏差 $\leq\pm 0.05\text{ mm}$ 、表面研磨済み（ $Ra < 0.1\mu\text{m}$ ）。

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）、表面研削（ $Ra 0.1\mu\text{m}$ ）、PVD CrN（ 300°C 、接着力 $>80\text{ N}$ ）。

パラメータ: 連続操作、牛肉との接触（pH 5.5～6.5）、湿潤環境（水洗浄、5 L/分）。

テスト:

寿命: 12 か月（ステンレスの場合は 3 か月、4 倍長い）。

表面: $Ra 0.2\mu\text{m}$ 、目詰まりなし。

摩耗率: $<0.04\text{ mm}^3/\text{h}$ 、腐食なし。

衛生: コロニー数 $<10\text{ CFU}/\text{cm}^2$ 、移行量 $<0.1\text{ mg}/\text{kg}$ 。

モデル: WCNi+ CrN、 $\varnothing 150\text{ mm}$ ふるいプレート、湿式洗浄 + 定期消毒。

コンベアローラー（果物と野菜、水分 90%）

作業条件: 果物および野菜（水分 90%、酸性ジュースを含む、pH 46）、連続送信。

:

タイプ: コンベアローラー($\varnothing 100\text{ mm}$ 、長さ 500 mm)。

マトリックス: WC10%Ni（超微粒子、D50 0.2～ $0.5\mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.5wt %）、硬度 1800～2000 HV。

コーティング: PVD DLC（ $3\mu\text{m}$ 、硬度 3500HV、摩擦 0.1）。

形状: 表面研磨（ $Ra < 0.1\mu\text{m}$ ）、真円度偏差 $\leq\pm 0.01\text{ mm}$ 。

プロセス: ボールミル処理 18 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400°C （ 10^{-5} Pa 、2 時間）、HIP 1350°C （120 MPa、1.5 時間）、研削（ $Ra 0.1\mu\text{m}$ ）、PVD DLC（ 250°C 、接着力 $>80\text{ N}$ ）。

パラメータ: 回転速度 60 rpm、果物および野菜ジュースとの接触（pH 46）、湿潤環境。

テスト:

寿命: 10 か月（ステンレスの場合は 2 か月、5 倍長い）。

表面: $Ra 0.1\mu\text{m}$ 、付着なし。

摩耗率: $<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$ 、腐食なし。

衛生: コロニー数 $<10\text{ CFU}/\text{cm}^2$ 、移行量 $<0.1\text{ mg}/\text{kg}$ 。

モデル: WCNi+ DLC、 $\varnothing 100\text{ mm}$ コンベアローラー、ウェットクリーニング + 定期検査。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ミキシングブレード（生地、塩入り）：

作業条件：生地（塩 2%、水 40%）、連続混合。

：

種類：ミキシングブレード（200×50mm、厚さ 5mm）。

マトリックス：WC8%Ni（超微粒子、D50 0.2～ 0.5 μ m、Cr3C2 0.5wt %）、硬度 1800～2000 HV。

コーティング：PVD ZrN（3 μ m、硬度 2500 HV、摩擦 0.15）。

形状：表面研磨（Ra <0.1 μ m）、エッジ半径 0.5 mm。

処理：ボールミル処理 18 時間、CIP 280 MPa、焼結 1400°C（10⁻⁵ Pa、2 時間）、HIP 1350°C（120 MPa、1.5 時間）、研削（Ra 0.1 μ m）、PVD ZrN（300°C、接着力 >80 N）。

パラメータ：速度 30 rpm、接触生地（pH 56）、湿った環境。

テスト：

寿命：8 か月（ステンレスの場合は 2 か月、4 倍長い）。

表面：Ra0.2 μ m、接着なし。

摩耗率：<0.04 mm³/h、腐食なし。

衛生：コロニー数<10 CFU/cm²、移行量<0.1 mg/kg。

選択：WCNi+ ZrN、200×50 mm ブレード、ウェットクリーニング + 定期消毒。

パフォーマンス分析

パラメータ	超硬工具・部品	ステンレス製ナイフ/部品
硬度（HV）	18002000	400600
曲げ強度（GPa）	1.82.5	1.52.0
靱性（KIC、MPa·m ^{1/2} ）	1012	50100
耐摩耗性（mm ³ /h）	<0.04	0.10.3
耐食性（mm/y、pH 410）	<0.01	0.050.1
切削速度（m/分、工具）	50300	20100
寿命（分、ツール）	10003000	200600
寿命（月、部品）	612	13
Ra（ μ m）	0.10.4	0.51.0

ハイライト：

耐摩耗性：超微粒子 WC+DLC/ CrN / ZrN、摩耗 <0.04 mm³/h、寿命が 35 倍（工具）、45 倍（部品）増加。

耐食性：Ni ベース + CrN / ZrN、pH 410、<0.01 mm/y。

効率：ツール速度 50300 m/分、効率が 3050% 増加しました。

衛生：Ra 0.10.4 μ m、コロニー<10 CFU/cm²、GB 4806.1 に準拠。

最適化の提案

材料の最適化：

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

肉切りナイフ/ふるい板: WCNi (8 wt %) + DLC (3 μm)、付着防止性が 30% 向上。
果物と野菜のナイフ/コンベアローラー: WCNi (10 重量%) + CrN (3 μm)、耐食性が 25% 向上しました。
肉挽き機/ミキシングブレード: WCNi (12 wt %) + ZrN (3 μm)、耐衝撃性が 15% 向上しました。
添加剤: Cr3C2 0.5 wt %、硬度が 5% 増加。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1350°C、120 MPa、気孔率 <0.001%、耐摩耗性が 15% 向上。
研削ホイール (35 μm)、刃先半径 <5 μm (工具)、Ra <0.1 μm (部品)。
コーティング:
DLC (3 μm 、250 °C、バイアス 80V)、摩擦低減 50%。
CrN (3 μm 、300°C、バイアス 80V)、耐食性が 30% 向上しました。
ZrN (3 μm 、300°C、バイアス 80 V)、アンチスティクションが 20% 向上しました。
研磨: Ra <0.1 μm 、接着力が 20% 減少。

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: 刃先/表面偏差 $< \pm 0.005\text{ mm}$ 。
コーティング装置: 堆積速度 0.81 $\mu\text{m/h}$ 、偏差 $< \pm 0.1\mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

肉スライス/スクリーニングプレート: WCNi+ DLC、速度 150~300 m/分 (ナイフ)、乾式切断/湿式洗浄。
果物および野菜のダイシング/搬送ローラー: WCNi+ CrN、速度 100 ~ 200 m/分 (ツール)、湿式切断/洗浄。
ミンシング/ミキシングブレード: WCNi+ ZrN、速度 50~150 m/分 (ツール)、乾式切断/湿式洗浄。
剥離: WCNi+ CrN、速度 150~250 m/分、湿式切断。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 0.2~ 0.5 μm)、EBSD (粒界応力 <5%)。
性能: ASTM G65 (<0.030.04 mm^3/h)、耐腐食性 (pH 410、<0.01 mm/y)。
衛生: コロニー数 <10 CFU/ cm^2 (GB 4789.2)、移行量 <0.1 mg/kg (GB 31604.8)。
テスト: 工具の切削力 100~250 N、寿命 1500~2500 分、Ra 0.2~0.3 μm 、部品寿命 8~12 か月、Ra 0.1~ 0.2 μm 。

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 1.82.5 GPa。
GB/T 79972017: 硬度 1800 - 2000 HV。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB 4806.12016: 食品安全、無毒性、非移行性。

GB 96842011: 耐食性、pH 410、 $<0.01 \text{ mm/y}$ 。

ASTM G65: 摩耗率 $<0.04 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

ISO 6508: 硬度偏差 $<\pm 50 \text{ HV}$ 。

FDA 21 CFR 175.300: 食品接触安全性。

結論は

超合金製の食品加工ツールおよび機器部品は、高い硬度（18002000）を実現します。
HV）、耐摩耗性（ $<0.04 \text{ mm}^3/\text{h}$ ）、耐腐食性（pH 材質（超微粒子 WC $0.2\sim 0.5 \mu\text{m}$ 、Ni
6~12 wt %、CrN/DLC/ZrN コーティング）とプロセス（HIP 焼結 1350°C 、120 MPa、
PVD コーティング $250\sim 300^\circ\text{C}$ ）を最適化することで、優れた耐摩耗性と食品安全性（GB
4806.12016）を実現しました。このナイフは、肉のスライス、果物や野菜の角切り、みじん
切り、皮むきに適しており、速度は $50\sim 300 \text{ m/分}$ 、効率は $30\sim 50\%$ 向上し、寿命は 1500
~2500 分、Ra は $0.2\sim 0.3 \mu\text{m}$ です。これらの部品は、肉挽き機のスクリーン、コンベア
ローラー、ミキシングブレードなどに適しており、寿命は 8~12 ヶ月、Ra は $0.1\sim 0.2 \mu\text{m}$ 、
コロニー数は 10 CFU/cm^2 未満です。超微粒子、食品グレードのコーティング、研磨工程
を最適化することでコストを削減できます（工具 1 個あたり 200~1000 元、部品 1 個あた
り 500~2000 元）。ただし、高精度研磨（コスト増加率 15%）とコーティング衛生認証が
課題となっています。

、ナノ WC（D50 $0.2\sim 0.5 \mu\text{m}$ ）、HIP 焼結（気孔率 $<0.001\%$ ）、食品グレード PVD コー
ティングを駆使し、食品加工のニーズを満たす高性能工具（スライシングナイフ、ミート
グラインダー）と部品（ふるい板、コンベアローラー）を開発しています（工具寿命 >2000
分、部品寿命 >10 ヶ月、Ra $<0.2 \mu\text{m}$ ）。製品は SEM、ASTM G65、GB 4806 によって検
証されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

炭化物ガスタービンノズル

超合金製ガスタービンノズルは、炭化タングステン(WC)を主成分とする超合金(WC 8894 重量%、Ni 612 重量%)をベースとしています。精密研削、研磨、高温耐腐食性 PVD コーティング (CrN など) により、 AlCrN 、 TiAlN 、 25 μm) で、高硬度 (1800~2200 HV) 、耐摩耗性 (摩耗体積 <0.03 mm³/h、ASTM G65)、高温耐性 (>1200°C、耐酸化性)、耐腐食性 (<0.01 mm/y、pH 212、硫黄含有ガス) および耐熱疲労性 (>10⁵ サイクル) を実現します。ノズルはガスタービンの燃焼室で使用され、高温高压ガス (1400~1600°C、1020 MPa) をタービンブレードに導きます。極度の熱衝撃、腐食、浸食に耐える必要があります、8000~20000 時間の耐用年数と Ra 0.10.3 μm の表面粗さが必要です。この記事では、ガスタービンの動作条件 (GE フレーム 59、Siemens SGT シリーズ) と業界標準 (ASME PTC 22、ISO 2314) に基づいて、ノズル、製造プロセス、パフォーマンス、アプリケーション、最適化の方向について説明します。

超合金製ガスタービンノズルの概要

1.1 超合金ガスタービンノズルの定義と特性

セメント炭化ガスタービンノズルは、超微粒子 WC (0.20.5 μm) マトリックス、Ni ベースの結合相 (耐食性)、および高温 PVD コーティング (CrN 、 AlCrN 、 TiAlN) は、精密研削 (形状偏差 < ± 0.01 mm) または研磨 (Ra <0.1 μm) により、ガスタービンの高温、高压、腐食および浸食の要件を満たし、燃焼ガスをタービンブレードに導きます。特徴: 高硬度: 1800 - 2200 HV、耐摩耗性はニッケル基合金 (800 - 1200 HV) の 23 倍優れています。

耐高温性: コーティングは酸化耐性 (> 1200°C) があり、基板は熱衝撃耐性 (ΔT 1000°C、> 10⁵ 回) があります。

耐腐食性: 硫黄含有ガス、酸、アルカリに対して耐性があり (pH 212、<0.01 mm/y)、ASME 耐腐食性要件に準拠しています。

低摩擦: コーティングの摩擦係数は 0.15 未満で、侵食と炭素の堆積を軽減します。

耐摩耗性: 摩耗損失 <0.03 mm³/h、寿命 8000 ~ 20000 時間。

用途: ガスタービン (GE フレーム 59、Siemens SGT シリーズ) ノズルガイドベーン、燃焼室ノズル。

1.2 炭化物ガスタービンノズルの種類

固定形状ノズル: シンプルターボジェット、コンバージェント型、速度 0.8~1.2 Ma。

収束拡散型 (CD) ノズル: ターボファン エンジン、超音速 (1.5-2.5 Ma)、可変形状。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

冷却チャネルノズル：内部冷却穴（ $\varnothing 0.52\text{ mm}$ ）付き、耐熱温度 $1400\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 。

マルチ燃料ノズル：スワローラーを備え、天然ガスと液体燃料をサポートし、霧化率は 95% を超えます。

1.3 セメント炭化物ガスタービンノズルの利点

効率：空気の流れが最適化され、推力が 510% 増加し、燃料効率が 35% 増加しました。

寿命：コーティングされたノズルの寿命は 8000 ～ 20000 時間（ニッケルベースの合金は 5000 ～ 12000 時間）。

耐腐食性：Ra $0.1\sim 0.3\text{ }\mu\text{m}$ 、炭素堆積防止、メンテナンス頻度を 20～30%削減。

安全性：高温安定性、亀裂率 $<0.01\%$ 、AS9100 に準拠。

材料

2.1 セメント炭化物ガスタービンノズル部品：

WC: 8894 wt %、超微粒子（ $D_{50}\ 0.2\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$ ）、硬度 $1800\sim 2200\text{ HV}$ 。

Ni: 612 wt %、耐腐食性（ H_2SO_4 、 $\text{SO}_2 < 0.01\text{ mm/y}$ ）、耐熱疲労性。

添加剤：Cr₃C₂（0.3～0.6 重量%）は粒成長を抑制し、硬度を 6%向上させます。TaC（0.1～0.3 重量%）は耐酸化性を 10%向上させます。コーティング：

CrN（PVD）：硬度 $2000\sim 2400\text{ HV}$ 、摩擦係数 0.15、耐熱性 1100°C 、耐腐食性。

AlCrN（PVD）：硬度 $3000\sim 3500\text{ HV}$ 、摩擦係数 0.1、耐熱性 1200°C 、耐酸化性。

TiAlN (PVD): 硬度 $2800 - 3200\text{ HV}$ 、摩擦係数 0.12、耐熱性 1250°C 、耐侵食性。

2.2 セメント炭化物ガスタービンノズルの傾斜構造

表面：低 Ni（68 重量%）、超微粒子 WC（ $0.2\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$ ）、硬度 $2000\sim 2200\text{ HV}$ 。

コア：高 Ni（1012 wt %）、細粒 WC（ $0.51\text{ }\mu\text{m}$ ）、KIC $1215\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

利点：耐摩耗性が 25% 向上し、耐熱衝撃性が 20% 向上し、亀裂発生確率が 20% 減少します。

準備：層状プレス + HIP 焼結（ 1400°C 、 150 MPa ）。

2.3 セメントカーバイドガスタービンノズルの性能要件

硬度： $1800\sim 2200\text{ HV}$ （GB/T 79972017）。

曲げ強度： $2.0\sim 2.8\text{ GPa}$ （GB/T 38512015）。

破壊靱性： $1215\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

耐摩耗性：摩耗速度 $<0.03\text{ mm}^3/\text{h}$ （ASTM G65）。

耐食性：pH 212、 $<0.01\text{ mm/y}$ （ASME PTC 22）。

耐高温性： $>1200^{\circ}\text{C}$ 、耐酸化性（ $<0.01\text{ mg/cm}^2$ 、1000 時間）。

安全性：ひび割れなし、毒性なし（ISO 2314）。

超硬合金製ガスタービンノズルの製造工程

3.1 超硬合金ガスタービンノズル粉末の製造

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

原材料: WC (D50 0.20.5 μm 、純度>99.95%)、Ni (D50 12 μm) 、 Cr3C2 (D50 0.51 μm) 、 TaC (D50 0.51 μm) 。

ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO2 ボール、12: 1)、350 rpm、1822 時間、粒子サイズ偏差 $\leq\pm 0.05\mu\text{m}$ 、均一性>98%。

3.2 形成

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。

パラメータ: 300~350MPa、保持圧力 90 秒、チタン合金鑄型 (偏差 $\leq\pm 0.03\text{mm}$)、ピレット密度 9.010.5g/cm³ 。

結果: 寸法偏差 $\leq\pm 0.05\text{mm}$ 、亀裂率 <0.5%。

3.3 焼結

方法: 真空焼結+HIP。

パラメータ:

脱蠟: 200~600°C、2°C/分、H2 雰囲気 (O2 <3 ppm)、 10^{-3}Pa 。

焼結: 1400 - 1450°C、 $10^{-5} 10^{-6}\text{Pa}$ 、2.53 時間。

HIP: 1400°C、150MPa (Ar)、1.52 時間。

結果: 密度 15.015.2 g/cm³、多孔度 <0.0005%、硬度 1800 - 2200 HV。

3.4 精密機械加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール (24 μm) 、 4000rpm 、送り 0.005~0.02mm/パス、幾何偏差 $\leq\pm 0.01\text{mm}$ 、Ra0.1 ~ 0.2 μm 。

EDM:放電加工、冷却穴 ($\varnothing 0.52\text{mm}$)、偏差 $\leq\pm 0.005\text{mm}$ 。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (0.51 μm)、1000 rpm、Ra <0.1 μm 、炭素堆積防止が 25% 増加。

3.5 コーティング

方法: PVD (Cr/Al/Ti ターゲット、>99.99%)。

パラメータ: CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm) 、 10^{-5}Pa 、 300 ~400°C、バイアス 100 V、堆積速度 11.5 $\mu\text{m/h}$ 。

結果: 接着力 >100 N、摩擦係数 <0.15、耐熱性 >1200°C。

3.6 検出

微細構造: SEM (粒度 0.2~ 0.5 μm) 、 EBSD (粒界応力<3%) 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性能: 硬度偏差 $<\pm 40$ HV (ISO 6508)、摩耗率 <0.03 mm³/h (ASTM G65)、耐腐食性 (pH 212、 <0.01 mm/y)。

ジオメトリ: CMM、偏差 $<\pm 0.005$ mm、レーザースキャン、冷却穴偏差 $<\pm 0.003$ mm。

非破壊検査: X 線 (内部欠陥 <0.01 mm)、超音波 (亀裂 <0.005 mm)。

高温テスト: 熱衝撃 (ΔT 1000°C、 $>10^5$ 回)、耐酸化性 (<0.01 mg/cm²、1000 時間)。

超硬合金製ガスタービンノズルの応用シナリオ

高温高压ガス (1400~1600°C、1020MPa) の動作条件では、セメントカーバイドガスタービンノズルは次のプロセスパラメータ、テストデータ、および選択推奨事項を提供します。

固定ジオメトリノズル (GE フレーム 7、天然ガス):

作業条件: 天然ガス燃焼、1500°C、15MPa、SO₂ (0.10.5%) 含有。

タイプ: 収束ノズル (スロート径 $\varnothing 50$ mm、出口 $\varnothing 80$ mm)。

マトリックス: WC8%Ni (超微粒子、D50 0.2~0.5 μ m、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.2 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD AlCrN (4 μ m、硬度 3500 HV、摩擦 0.1、耐熱性 1200°C)。

形状: スロート半径 0.5 mm、冷却穴 $\varnothing 1$ mm、研磨済み ($R_a < 0.1$ μ m)。

処理: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10^{-6} Pa、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削 ($R_a 0.1$ μ m)、PVD AlCrN (350°C、接着力 >100 N)。

パラメータ: 空気流量 1.0 Ma、流量 500 kg/s、乾燥運転。

テスト:

寿命: 15,000 時間 (ニッケルベースの合金の場合は 8,000 時間、87% 増加)。

表面: $R_a 0.2$ μ m、炭素堆積物なし。

摩耗率: <0.02 mm³/h、耐酸化性 <0.01 mg/cm²。

熱衝撃: ΔT 1000°C、 $>10^5$ 回、亀裂なし。

衛生: 無毒、ISO 2314 に準拠。

モデル: WCNi+ AlCrN、 $\varnothing 50$ mm 収束ノズル、標準 NDT。

CD ノズル (シーメンス SGT800、液体燃料):

動作条件: ディーゼル燃焼、1600°C、18 MPa、H₂S (0.05~0.2%) 含有。

タイプ: CD ノズル (スロート径 $\varnothing 40$ mm、出口 $\varnothing 100$ mm、可変形状)。

マトリックス: WC10%Ni (超微粒子、D50 0.2~0.5 μ m、Cr3C2 0.6 wt %、TaC 0.3 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD TiAlN (5 μ m、硬度 3200 HV、摩擦 0.12、耐熱性 1250°C)。

形状: 広がり角 15°、冷却穴 $\varnothing 1.5$ mm、研磨済み ($R_a < 0.1$ μ m)。

プロセス: ボールミル処理 22 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10^{-6} Pa、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、EDM (開口偏差 $<\pm 0.005$ mm)、PVD TiAlN (400°C、接着力 >100 N)。

パラメータ: 空気流量 2.0 Ma、流量 600 kg/s、湿式操作 (水噴霧冷却)。

テスト:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

寿命: 12,000 時間 (ニッケルベースの合金の場合は 6,000 時間、100% 増加)。

表面: Ra 0.3 μm 、炭素沈着率 $<0.01 \text{ mg/cm}^2$ 。

摩耗損失: $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $<0.01 \text{ mm/y}$ 。

熱衝撃: $\Delta T 1100^\circ\text{C}$ 、 $>10^5$ 回、亀裂なし。

効率: 推力が 8% 増加しました。

モデル: WCNi+ TiAlN 、 $\varnothing 40 \text{ mm}$ CD ノズル、ウェットランニング +NDT。

マルチ燃料ノズル (GE フレーム 9、天然ガス + ディーゼル) :

作業条件: 天然ガス/ディーゼル切り替え、 1550°C 、16 MPa、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ (0.1~0.3%) 含有。

タイプ: 渦流ノズル($\varnothing 60 \text{ mm}$ 、噴霧点 12 点、霧化率 $>95\%$)。

マトリックス: WC12%Ni(超微粒子、 $D_{50} 0.2\sim 0.5 \mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.3 wt %)、
硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD CrN (4 μm 、硬度 2400 HV、摩擦 0.15、耐熱性 1100°C) 。

形状: 旋回角 30° 、ノズル $\varnothing 0.8 \text{ mm}$ 、研磨済み (Ra $<0.1 \mu\text{m}$) 。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10^{-6} Pa 、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、EDM (開口偏差 $<\pm 0.003 \text{ mm}$)、PVD CrN (300°C 、接着 $>100 \text{ N}$)。

パラメータ: 空気流量 1.2 Ma、燃料流量 1000 kg/h、乾燥運転。

テスト:

寿命: 10,000 時間 (ニッケルベースの合金の場合は 5,000 時間、100% 増加)。

表面: Ra0.2 μm 、目詰まりなし。

摩耗損失: $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $<0.01 \text{ mm/y}$ 。

霧化率: $>95\%$ 、燃焼効率が 5%向上しました。

熱衝撃: $\Delta T 1000^\circ\text{C}$ 、 $>10^5$ 回、亀裂なし。

モデル: WCNi+ CrN 、 $\varnothing 60 \text{ mm}$ スワールノズル、定期クリーニング + NDT。

超硬合金製ガスタービンノズルの性能分析

パラメータ	カーバイドノズル	ニッケル基合金ノズル
硬度 (HV)	1800 年 - 2200 年	800~1200
曲げ強度 (GPa)	2.02.8	1.01.5
靱性 (KIC、 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	1215	2030
耐摩耗性 (mm^3/h)	<0.03	0.050.1
耐食性 (mm/y 、pH 212)	<0.01	0.020.05
耐熱性 ($^\circ\text{C}$)	>1200	1000 - 1100
寿命 (時間)	8000~20000	5000~12000
Ra (μm)	0.10.3	0.30.8

ハイライト:

耐摩耗性: 超微粒子 WC+AlCrN / TiAlN 、摩耗 $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐用年数が 1.52 倍に増加。

耐高温性: コーティングは酸化 ($>1200^\circ\text{C}$)、熱衝撃 ($>10^5$ 回) に耐えます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

耐食性: Ni ベース + CrN 、 pH 212、<0.01 mm/y。

効率: 空気の流れが最適化され、推力が 510% 増加し、燃料効率が 35% 増加しました。

超合金製ガスタービンノズルの最適化提案

材料の最適化:

天然ガスノズル: WCNi (8wt %) + AlCrN (4 μ m) 、耐熱性が 10% 向上。

液体燃料ノズル: WCNi (10wt %) + TiAlN (5 μ m) 、耐侵食性が 20% 向上。

多燃料ノズル: WCNi (12wt %) + CrN (4 μ m) 、耐食性が 15% 向上。

添加剤: Cr₃C₂ 0.6 wt %、TaC 0.3 wt %、硬度が 6% 増加。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1400°C、150 MPa、気孔率 <0.0005%、耐摩耗性が 20% 向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール (24 μ m) 、幾何偏差 < ± 0.01 mm、Ra < 0.1 μ m 。

コーティング:

AlCrN (4 μ m 、 350 °C、バイアス 100V) 、耐熱性が 15% 向上。

TiAlN (5 μ m 、 400 °C、バイアス 100V) 、耐食性が 20% 向上しました。

CrN (4 μ m 、 300°C、バイアス 100V) 、耐食性が 25% 向上しました。

EDM: 冷却穴の偏差 < ± 0.003 mm、空気流効率が 5% 向上しました。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 ± 2 °C、 10^{-6} Pa。

5 軸 CNC: 偏差 < ± 0.005 mm。

コーティング装置: 堆積速度 11.5 μ m / h、偏差 < ± 0.05 μ m 。

作業条件の適応:

天然ガス: WCNi+ AlCrN 、速度 0.81.2 Ma、乾式運転。

液体燃料: WCNi+ TiAlN 、速度 1.5~2.5 Ma、湿式運転。

マルチ燃料: WCNi+ CrN 、速度 1.01.5 Ma、ドライ/ウェットスイッチ。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 0.2~ 0.5 μ m) 、EBSD (粒界応力 < 3%) 。

性能: ASTM G65 (<0.03 mm³/h)、耐腐食性 (pH 212、<0.01 mm/y)、耐熱性 (>1200°C、<0.01 mg/cm²) 。

ジオメトリ: CMM (偏差 < ± 0.005 mm)、レーザー スキャン (開口偏差 < ± 0.003 mm)。

テスト: 空気流量 0.8~2.5mA、寿命 10000~15000 時間、Ra0.2 ~ 0.3 μ m 。

規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 <0.01%。

GB/T 38502015: 密度偏差 < ± 0.1 g/cm³ 。

GB/T 38512015: 強度 2.0-2.8 GPa 。

GB/T 7997-2017: 硬度 1800-2200 HV。

ASME PTC 22: 性能試験、推力偏差 < ± 1 %。

ISO 2314: ガスタービンの受入れ、安全性。

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

ASTM G65: 摩耗率 $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

ISO 6508: 硬度偏差 $<\pm 40 \text{ HV}$ 。

AS9100: 航空宇宙品質管理。

結論は

- 2200 HV)、耐摩耗性 ($<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$)、高温耐性 ($>1200^\circ\text{C}$)、耐腐食性 (pH 212、 $<0.01 \text{ mm/y}$) と熱疲労耐性 ($>10^5$ 回) を材料の最適化 (超微粒子 WC $0.20.5 \mu\text{m}$ 、Ni 612 wt%、AlCrN/TiAlN/CrN コーティング) とプロセス (HIP 焼結 1400°C 、150MPa、PVD コーティング $300\sim 400^\circ\text{C}$) を備えています。このノズルは固定形状、CD、多燃料条件に適しており、速度は $0.8\sim 2.5 \text{ Ma}$ 、推力増加は 5~10%、寿命は 10000~15000 時間、Ra は $0.2\sim 0.3 \mu\text{m}$ です。超微粒子、コーティング厚さ、EDM プロセスを最適化することでコストを削減できます。課題は、高精度加工 (コストが 20% 増加) と高温試験・検証にあります。

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

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:

硬質合金化学パイプラインバルブ

タングステンカーバイド (WC) ベースの超硬合金 (WC 88 - 94 重量%、Ni 612 重量%) をベースにしています。精密研削、研磨、耐腐食性 PVD コーティング (CrN など) により、AlCrN、TiAlN、25 μm で、高硬度 (1800 - 2200 HV)、耐摩耗性 (摩耗体積 $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、ASTM G65)、耐腐食性 ($<0.01 \text{ mm}/\text{y}$ 、pH 212、H₂S、HCl、H₂SO₄ を含む)、高温耐性 ($>1000^\circ\text{C}$ 、耐酸化性) を実現します。バルブは化学パイプライン (石油、天然ガス、酸およびアルカリ媒体) で使用され、流量、圧力、遮断を制御し、腐食性流体 (H₂SO₄ 0.515%、HCl $<3\%$)、高温 (300 - 1000 $^\circ\text{C}$) および高圧 (1050 MPa) に耐え、耐用年数は 515 年、表面粗さは Ra 0.10.3 μm です。この記事では、化学パイプラインの動作条件 (API 6D、ASME B16.34) と標準 (GB/T 12224、NACE MR0175) に基づいて、バルブ、製造プロセス、性能、用途、最適化の方向性について説明します。

セメントカーバイド化学パイプラインバルブの概要

1.1 セメントカーバイド化学パイプラインバルブの定義:

セメントカーバイド化学パイプラインバルブは、超微粒子 WC (0.20.5 μm) マトリックス、Ni ベースの結合相 (耐腐食性)、および耐腐食性 PVD コーティング (CrN、AlCrN、TiAlN) は、高精度研削 (形状偏差 $<\pm 0.01 \text{ mm}$) または研磨 (Ra $<0.1 \mu\text{m}$) により、化学パイプラインの耐腐食性、高温、高圧、耐摩耗性などの要件を満たし、流体の流れ、圧力、遮断を制御します。特徴:

) の 35 倍優れています。

耐腐食性: 耐酸性および耐アルカリ性 (pH 212、 $<0.01 \text{ mm}/\text{y}$)、H₂S、HCl、H₂SO₄ に対する耐性があり、NACE MR0175 に準拠しています。

耐高温性: コーティングは酸化耐性 ($>1000^\circ\text{C}$) があり、基板は熱衝撃耐性 (ΔT 800 $^\circ\text{C}$ 、 $>10^5$ 回) があります。

低摩擦: コーティングの摩擦係数は 0.15 未満で、付着と侵食を軽減します。

耐摩耗性: 摩耗損失 $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐用年数 5 ~ 15 年。

用途: 石油化学 (精製、天然ガス)、化学処理 (酸、アルカリ、塩化物)、医薬品、バルブ。

1.2 セメントカーバイド化学パイプラインバルブの種類

ボールバルブ: 1/220 インチ、150 - 2500 ポンド、高速スイッチング、フロー制御、シール率 $>99.9\%$ に適しています。

ゲートバルブ: 136 インチ、150 - 4500 ポンド、全開/全閉、高圧耐性に適しています。

ストップバルブ: 1/224 インチ、150 - 2500 ポンド、正確な流量制御、高温耐性。

チェックバルブ: 124 インチ、150 - 2500 ポンド、逆流防止、耐腐食性。

バタフライバルブ: 248 インチ、150 - 600 ポンド、軽量、大口径および低圧に適しています。

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

1.3 セメントカーバイド化学パイプラインバルブの利点

効率: 高速開閉 (ボールバルブの 90° 回転)、流量損失 <5%、API 6D に準拠。

寿命: コーティングされたバルブの寿命は 5 ~ 15 年です (ステンレス鋼の場合は 15 年)。

耐食性: Ra0.10.3 μ m、付着防止、メンテナンス頻度 30%削減。

安全性: 漏れゼロ (API 598)、亀裂率 <0.01%、ASME B16.34 に準拠。

材料

セメントカーバイド化学パイプラインバルブのマトリックス構成:

WC: 8894 wt %、超微粒子 (D50 0.2~0.5 μ m)、硬度 1800~2200 HV。

Ni: 612 wt %、耐食性 (H₂SO₄、HCl、H₂S <0.01 mm/y)、耐熱疲労性。

添加剤: Cr₃C₂ (0.3~0.6 wt %) は粒成長を抑制し、硬度を 6% 向上させます。TaC (0.1~0.3 wt %) は抗酸化特性を 10% 向上させます。

セメントカーバイド化学パイプラインバルブコーティング

CrN (PVD): 硬度 2000 - 2400 HV、摩擦係数 0.15、耐熱性 1000°C、H₂SO₄ 耐性。

AlCrN (PVD): 硬度 3000 - 3500 HV、摩擦係数 0.1、耐熱性 1100°C、耐塩化物。

TiAlN (PVD): 硬度 2800 - 3200 HV、摩擦係数 0.12、耐熱性 1050°C、耐侵食性。

2.2 勾配構造

表面: 低 Ni (68 重量%)、超微粒子 WC (0.2~ 0.5 μ m)、硬度 2000~2200HV。

コア: 高 Ni (1012 wt %)、細粒 WC (0.51 μ m)、KIC 1215 MPa·m^{1/2}。

利点: 耐摩耗性が 25% 向上し、耐熱衝撃性が 20% 向上し、亀裂発生確率が 20% 減少します。

準備: 層状プレス + HIP 焼結 (1400°C、150 MPa)。

2.3 パフォーマンス要件

硬度: 1800~2200 HV (GB/T 79972017)。

曲げ強度: 2.0~2.8 GPa (GB/T 38512015)。

破壊靱性: 1215MPa·m^{1/2}。

耐摩耗性: 摩耗速度<0.03 mm³/h (ASTM G65)。

耐食性: pH 212、<0.01 mm/y (NACE MR0175)。

耐高温性: >1000°C、耐酸化性 (<0.01 mg/cm²、1000 時間)。

安全性: 漏れゼロ (API 598)、ASME B16.34 に準拠。

セメントカーバイド化学パイプラインバルブの製造プロセス

3.1 粉末の調製

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

原材料: WC (D50 0.20.5 μm 、純度>99.95%)、Ni (D50 12 μm) 、 Cr3C2 (D50 0.51 μm) 、 TaC (D50 0.51 μm) 。

ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO2 ボール、12: 1) 、350 rpm、1822 時間、粒子サイズ偏差 $\leq\pm 0.05\mu\text{m}$ 、均一性>98%。

3.2 形成

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。

パラメータ: 300~350MPa、保持圧力 90 秒、チタン合金鑄型 (偏差 $\leq\pm 0.03\text{mm}$) 、ピレット密度 9.010.5g/cm³ 。

結果: 寸法偏差 $\leq\pm 0.05\text{mm}$ 、亀裂率 <0.5%。

3.3 焼結

方法: 真空焼結+HIP。

パラメータ:

脱蠟: 200~600°C、2°C/分、H2 雰囲気 (O2 <3 ppm) 、 10^{-3}Pa 。

焼結: 1400 - 1450°C、 $10^{-5} 10^{-6}\text{Pa}$ 、2.53 時間。

HIP:1400°C、150MPa (Ar) 、1.52 時間。

結果: 密度 15.015.2 g/cm³、多孔度 <0.0005%、硬度 1800 - 2200 HV。

3.4 精密機械加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール (24 μm) 、4000rpm、送り 0.005~0.02mm/パス、幾何偏差 $\leq\pm 0.01\text{mm}$ 、Ra0.1 ~ 0.2 μm 。

EDM: 放電加工、バルブコア穴 ($\varnothing 0.52\text{mm}$) 、偏差 $\leq\pm 0.005\text{mm}$ 。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (0.51 μm) 、1000 rpm、Ra<0.1 μm 、抗付着性が 25% 向上。

3.5 コーティング

方法: PVD (Cr/Al/Ti ターゲット、>99.99%)。

パラメータ: CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm) 、 10^{-5}Pa 、300 - 400°C、バイアス 100 V、堆積速度 11.5 $\mu\text{m/h}$ 。

結果: 接着力 >100 N、摩擦係数 <0.15、耐熱性 >1000°C。

3.6 検出

微細構造: SEM (粒度 0.2~ 0.5 μm) 、EBSD (粒界応力<3%) 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性能: 硬度偏差 $<\pm 40$ HV (ISO 6508)、摩耗率 <0.03 mm³/h (ASTM G65)、耐腐食性 (pH 212、 <0.01 mm/y)。

形状: CMM、偏差 $<\pm 0.005$ mm、レーザー スキャン、バルブ コア穴偏差 $<\pm 0.003$ mm。

非破壊検査: X 線 (内部欠陥 <0.01 mm)、超音波 (亀裂 <0.005 mm)。

性能試験: 漏れ率 <0.01 cm³/s (API 598)、耐圧性 (150~4500 ポンド)。

セメントカーバイド化学パイプラインバルブの応用シナリオ

腐食性流体 (H₂SO₄、HCl、H₂S)、高温 (300 - 1000°C)、高压 (1050 MPa) の動作条件の場合、セメントカーバイド化学パイプラインバルブは次のプロセスパラメータ、テストデータ、および選択推奨事項を提供します。

硬質合金化学パイプラインボールバルブ (石油化学、H₂SO₄ 10%) :

作業条件: 硫酸 (10%、pH 2)、500°C、20 MPa。

タイプ: フローティング ボール バルブ (2 インチ、600 ポンド、フランジ付き)。

マトリックス: WC8%Ni (超微粒子、D50 0.2~0.5 μm、Cr₃C₂ 0.5 wt %、TaC 0.2 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD CrN (4 μm、硬度 2400 HV、摩擦 0.15、耐熱性 1000°C)。

形状: 球面真円度 $<\pm 0.005$ mm、シール面研磨 (Ra <0.1 μm)。

処理: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁶ Pa、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削 (Ra 0.1 μm)、PVD CrN (300°C、接着力 >100 N)。

パラメータ: 流量 100 m³/h、90° 急速開閉、空運転。

テスト:

耐用年数: 10 年 (ステンレスは 3 年、3.3 倍)。

表面: Ra0.2μm、接着なし。

摩耗率: <0.02 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

漏れ率: <0.01 cm³/s (API 598)。

耐圧: 30MPa、変形なし。

選択: WCNi+ CrN、2 インチ ボール バルブ、通常の NDT。

硬質合金化学パイプラインゲートバルブ (天然ガス、H₂S 含有) :

動作条件: 天然ガス (H₂S 0.10.5%)、600°C、30 MPa。

タイプ: ウェッジ ゲート バルブ (4 インチ、900 ポンド、フランジ付き)。

マトリックス: WC10%Ni (超微粒子、D50 0.2~0.5 μm、Cr₃C₂ 0.6 wt %、TaC 0.3 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD AlCrN (5 μm、硬度 3500 HV、摩擦 0.1、耐熱性 1100°C)。

形状: バルブディスク角度 5°、シール面研磨 (Ra <0.1 μm)。

処理: ボールミル処理 22 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁶ Pa、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削 (Ra 0.1 μm)、PVD AlCrN (350°C、接着力 >100 N)。

パラメータ: 流量 200 m³/h、全開/全閉、ウェット操作 (水洗浄)。

テスト:

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

寿命: 12 年 (ステンレスの場合は 4 年、3 倍長い)。

表面: Ra 0.3 μm 、炭素堆積物なし。

摩耗損失: <0.03 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

漏れ率: <0.01 cm³/s (API 598)。

耐圧: 45MPa、ひび割れなし。

選択: WCNi+ AlCrN、4 インチ ゲート バルブ、ウェット ランニング +NDT。

硬質合金化学パイプラインストップバルブ（塩化物、HCl 2%）：

作業条件: 塩酸（2%、pH 1.5）、400°C、15 MPa。

タイプ: DC グローブ バルブ (1 インチ、600 ポンド、ねじ込み式)。

マトリックス: WC12%Ni(超微粒子、D50 0.2~0.5 μm 、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.3 wt %)、

硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD TiAlN (4 μm 、硬度 3200 HV、摩擦 0.12、耐熱性 1050°C)。

形状: バルブコアテーパー10°、シール面研磨 (Ra<0.1 μm)。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁶ Pa、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、EDM (開口偏差 <±0.005 mm)、PVD TiAlN (400°C、接着力 >100 N)。

パラメータ: 流量 50 m³/h、正確な調整、空運転。

テスト:

寿命: 8 年 (ステンレスの場合は 2 年、4 倍長い)。

表面: Ra 0.2 μm 、腐食なし。

摩耗損失: <0.03 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

漏れ率: <0.01 cm³/s (API 598)。

耐圧: 25MPa、変形なし。

選択: WCNi+ TiAlN、1 インチ ストップ バルブ、定期的なクリーニング + NDT。

硬質合金化学パイプラインチェックバルブ（石油化学、塩化物含有）：

作業条件: 塩化物溶液（10000 ppm）、450°C、20 MPa。

タイプ: カーバイド化学パイプラインリフトチェックバルブ (3 インチ、600 ポンド、フランジ)。

マトリックス: WC10%Ni(超微粒子、D50 0.2~0.5 μm 、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.2 wt %)、

硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD AlCrN (4 μm 、硬度 3500 HV、摩擦 0.1、耐熱性 1100°C)。

真円度±0.005mm 未満、シール面研磨済み (Ra0.1 μm 未満)。

処理: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁶ Pa、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削 (Ra 0.1 μm)、PVD AlCrN (350°C、接着力 > 100 N)。

パラメータ: 流量 150m³/h、逆流防止、湿式操作。

テスト:

耐用年数: 10 年 (ステンレスは 3 年、3.3 倍)。

表面: Ra0.2 μm 、接着なし。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

摩耗率: <0.02 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。
漏れ率: <0.01 cm³/s (API 598)。
耐圧: 30MPa、ひび割れなし。
選択: WCNi+ AlCrN、3 インチ チェック バルブ、ウェット ランニング +NDT。

硬質合金化学パイプラインバタフライバルブ（医薬品、低圧酸性媒体）：
作業条件: 酢酸（80%、pH 3）、300°C、5 MPa。

タイプ: カーバイド化学パイプライン三重偏心バタフライバルブ (6 インチ、150 ポンド、フランジ)。

マトリックス: WC8%Ni(超微粒子、D50 0.2~0.5 μm、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.2 wt %)、
硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD CrN (3 μm、硬度 2400 HV、摩擦 0.15、耐熱性 1000°C)。

形状: ディスク偏心 10°、シール面研磨 (Ra<0.1 μm)。

処理: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁶ Pa、3 時間)、HIP 1400°C
(150 MPa、2 時間)、5 軸研削 (Ra0.1 μm)、PVD CrN (300°C、接着力>100 N)。

パラメータ: 流量 300 m³/h、高速開閉、空運転。

テスト:

寿命: 7 年（ステンレスは 2 年、3.5 倍）。

表面: Ra 0.2μm、腐食なし。

摩耗損失: <0.03 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

漏れ率: <0.01 cm³/s (API 598)。

耐圧: 10MPa、変形なし。

タイプを選択: WCNi+ CrN、6 インチバタフライバルブ、定期クリーニング + NDT。

セメントカーバイド化学パイプラインバルブの性能分析

パラメータ	カーバイドバルブ	ステンレス鋼バルブ
硬度 (HV)	1800 年 - 2200 年	400~600
曲げ強度 (GPa)	2.02.8	1.52.0
靱性 (KIC、 MPa·m ^{1/2})	1215	50~100
耐摩耗性 (mm ³ /h)	<0.03	0.10.3
耐食性 (mm/y、pH 212)	<0.01	0.050.1
耐熱性 (°C)	>1000	400~800
寿命 (年)	515	15
Ra (μm)	0.10.3	0.51.0

ハイライト:

耐摩耗性: 超微粒子 WC+CrN / AlCrN / TiAlN、摩耗 <0.03 mm³/h、寿命が 34 倍に増加。

耐食性: Ni ベース + AlCrN、pH 212、<0.01 mm/y、254SMO および Alloy 20 よりも優れています。

耐高温性: コーティングは酸化 (>1000°C)、熱衝撃 (>10⁵ 回) に耐えます。

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

効率：漏れゼロ (API 598)、流量損失 <5%、API 6D に準拠。

セメントカーバイド化学パイプラインバルブの最適化提案

材料の最適化:

硫酸条件: WCNi (8 wt %) + CrN (4 μm)、H₂SO₄ に対する耐性が 20% 増加しました。

H₂S/天然ガス: WCNi (10 wt %) + AlCrN (5 μm)、耐硫化性が 25% 向上しました。

塩化物/HCl: WCNi (12 wt %) + TiAlN (4 μm)、塩化物耐性が 20% 増加しました。

添加剤: Cr₃C₂ 0.6 wt %、TaC 0.3 wt %、硬度が 6% 増加しました。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1400°C、150 MPa、気孔率 <0.0005%、耐摩耗性が 20% 向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール (24 μm)、幾何偏差 < $\pm 0.01\text{mm}$ 、Ra < 0.1 μm 。

コーティング:

CrN (4 μm 、300 °C、バイアス 100V)、H₂SO₄ に対する耐性が 25% 増加しました。

AlCrN (5 μm 、350 °C、バイアス 100V)、H₂S 耐性が 20% 増加しました。

TiAlN (4 μm 、400°C、バイアス 100V)、HCl に対する耐性が 20% 増加しました。

EDM: バルブコア穴偏差 < $\pm 0.003\text{ mm}$ 、シール率が 5% 向上しました。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、 10^{-6}Pa 。

5 軸 CNC: 偏差 < $\pm 0.005\text{ mm}$ 。

コーティング装置: 堆積速度 11.5 $\mu\text{m/h}$ 、偏差 < $\pm 0.05\mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

硫酸: WCNi + CrN、150 - 600 ポンド、空運転。

天然ガス/H₂S: WCNi + AlCrN、600 - 2500 ポンド、湿式運転。

塩化物/HCl: WCNi + TiAlN、150 - 900 ポンド、ウェット/ドライ操作。

医薬品/酢酸: WCNi + CrN、150 - 300 ポンド、ドライランニング。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 0.2 ~ 0.5 μm)、EBSD (粒界応力 < 3%)。

性能: ASTM G65 (< 0.03 mm^3/h)、耐腐食性 (pH 212、< 0.01 mm/y)、耐熱性 (> 1000°C、< 0.01 mg/cm^2)。

ジオメトリ: CMM (偏差 < $\pm 0.005\text{ mm}$)、レーザー スキャン (開口偏差 < $\pm 0.003\text{ mm}$)。

: 漏れ率 < 0.01 cm^3/s (API 598)、寿命 712 年、Ra 0.20.3 μm 。

セメントカーバイド化学パイプラインバルブの規格と仕様

GB/T 122242015: 鋼製バルブの一般要求事項。

GB/T 183762014: 多孔度 < 0.01%。

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

GB/T 38512015: 強度 2.0-2.8 GPa。

GB/T 79972017: 硬度 1800 - 2200 HV。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

API 6D: パイプラインバルブ、漏れ率 $<0.01 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。

ASME B16.34: バルブの圧力および温度定格。

NACE MR0175: 硫化物応力割れに対する耐性。

ASTM G65: 摩耗率 $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

ISO 6508: 硬度偏差 $<\pm 40 \text{ HV}$ 。

セメントカーバイド化学パイプラインバルブは、材料（超微粒子 WC $0.2\sim 0.5 \mu\text{m}$ 、Ni $6\sim 12 \text{ wt}\%$ 、CrN/AlCrN/TiAlN コーティング）とプロセス（HIP 焼結 1400°C 、 150 MPa 、PVD コーティング $300\sim 400^\circ\text{C}$ ）を最適化することで、高硬度（ $1800\sim 2200 \text{ HV}$ ）、耐摩耗性（ $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ ）、耐腐食性（ $\text{pH } 2\sim 12$ 、 $<0.01 \text{ mm/y}$ ）、高温耐性（ $> 1000^\circ\text{C}$ ）を実現します。これらのバルブは、ボールバルブ、ゲートバルブ、グローブバルブ、チェックバルブ、バタフライバルブに適しており、硫酸、 H_2S 、塩化物、酢酸などの使用条件を満たし、圧力 $150\sim 4500 \text{ lb}$ 、寿命 $7\sim 12$ 年、 $\text{Ra } 0.2\sim 0.3 \mu\text{m}$ 、ゼロリーク（API 598）を実現しています。超微粒子、コーティング厚さ、EDM 工程を最適化することで、コスト（1 個あたり $1,000\sim 5,000$ 元）を削減できます。課題は、高精度加工（コスト増加率 20% ）と腐食試験検証です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

炭化物製紙機器部品

超硬合金製製紙設備部品は、炭化タングステン（WC）を主成分とする超硬合金（WC 88～94 重量%、Ni 6～12 重量%）をベースとしています。精密研磨、研磨、耐腐食性 PVD コーティング（CrN、DLC、ZrN、25μm など）により、高硬度（1800～2200HV）、耐摩耗性（摩耗量<0.03mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01mm/y、pH 410、塩化物および硫酸塩を含む）、耐衝撃性（KIC 1215MPa·m^{1/2}）を実現しています。これらの部品は製紙設備（パルプ化、成形、プレス、乾燥など）に使用され、高湿度（90～100%RH）、腐食性スラリー（pH 4.1～10、Cl⁻ <5000 ppm）、高温（80～200℃）、および機械的摩耗にさらされます。耐用年数は 6～24 ヶ月、表面粗さは Ra 0.1～0.3μm です。本稿では、製紙業界の作業条件（TAPPI TIS、ISO 287）および規格（GB/T 7997、NACE MR0175）に基づき、部品、製造プロセス、性能、用途、最適化の方向性について説明します。

炭化物製紙機器部品

1.1 超硬合金製製紙機器部品の定義

製紙設備用超硬合金部品は、超微粒子 WC（0.2～0.5μm）マトリックス、Ni 基結合相（耐腐食性）、および耐腐食性 PVD コーティング（CrN、DLC、ZrN）を採用しています。高精度研磨（幾何偏差<±0.01mm）または研磨（Ra<0.1μm）により、製紙設備の高湿度、腐食、摩耗、衝撃に対する要求を満たし、パルプ化、成形、プレス、乾燥などの工程で使用されます。

超硬合金製製紙設備部品の特徴:

）の 35 倍優れています。

耐腐食性: 耐酸性、耐アルカリ性 (pH 410、<0.01 mm/y)、耐塩化物および耐硫酸塩性、NACE MR0175 に準拠。

低摩擦: コーティングの摩擦係数は 0.15 未満であり、スラリーの付着を低減します。

耐摩耗性: 摩耗率<0.03mm³/h、耐用年数 6～4 か月。

用途: パルプブレード、フォーミングワイヤスクレーパー、プレスロール、ドライヤースクレーパー、ペーパーカッター。

1.2 炭化物製紙機器部品の種類

超硬パルプブレード

ピーターとリファイナのブレードは、500 ～ 2000 rpm の速度で繊維を切り刻みます。

超硬成形メッシュスクレーパー

成形部ではスクリーン表面を清掃し、速度は 50～200m/分。

超硬プレスロール

プレス部ロール表面、脱水、圧力 50～200 kN /m。

カーバイドドライヤースクレーパー

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

乾燥セクションのスクレーパー、スラリーを洗浄、温度 100 ~ 200°C。

超硬ペーパーカッター

完成した紙を毎分 100~300m の速度で切断します。

1.3 セメント炭化物製紙機器部品の利点

効率: 繊維切断率が 20-30% 向上 (パルピングブレード)、ウェブクリーニング率が 95% 以上向上 (スクレーパー)。

寿命: コーティングされた部品の寿命は 6 ~ 24 か月です (ステンレス鋼は 26 か月)。

耐食性: Ra0.10.3 μ m、付着防止、メンテナンス頻度 25%削減。

安全性: 耐衝撃性 (KIC 1215 MPa $\cdot$ m^{1/2})、亀裂率 <0.01%、TAPPI TIS に準拠。

材料

2.1 セメント炭化物製紙機器部品の構成マトリックス:

WC: 8894 wt %、超微粒子 (D50 0.2~0.5 μ m)、硬度 1800~2200 HV。

Ni: 612 wt %、耐腐食性 (Cl⁻、SO₄²⁻ <0.01 mm/y)、耐衝撃性。

添加剤: Cr₃C₂ (0.3~0.6 重量%) は粒成長を抑制し、硬度を 6%向上させます。TaC (0.1~0.3 重量%) は耐酸化性を 10%向上させます。コーティング:

CrN (PVD): 硬度 2000 - 2400 HV、摩擦係数 0.15、耐熱性 800°C、耐硫酸塩性。

DLC (PVD): 硬度 3000 - 3500 HV、摩擦係数 <0.1、耐熱性 600°C、非粘着性。

ZrN (PVD): 硬度 2200 - 2600 HV、摩擦係数 0.12、耐熱性 900°C、耐塩化物。

2.2 セメント炭化物製紙装置部品の傾斜構造

表面: 低 Ni (68 重量%)、超微粒子 WC (0.2~0.5 μ m)、硬度 2000~2200HV。

コア: 高 Ni (1012 wt %)、細粒 WC (0.51 μ m)、KIC 1215 MPa $\cdot$ m^{1/2}。

利点: 耐摩耗性が 25% 向上し、耐衝撃性が 20% 向上し、ひび割れ確率が 20% 減少します。

準備: 層状プレス + HIP 焼結 (1400°C、150 MPa)。

2.3 セメント炭化物製紙機器部品の性能要件

硬度: 1800~2200 HV (GB/T 79972017)。

曲げ強度: 2.0~2.8 GPa (GB/T 38512015)。

破壊靱性: 1215MPa $\cdot$ m^{1/2}。

耐摩耗性: 摩耗速度 <0.03 mm³/h (ASTM G65)。

耐食性: pH 410、<0.01 mm/y (NACE MR0175)。

耐高温性: >600°C、耐酸化性 (<0.01 mg/cm²、500 時間)。

安全性: 耐衝撃性、ひび割れなし (ISO 287)。

製造工程

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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 製紙機械部品用超硬合金粉末の製造

原材料: WC (D50 0.20.5 μm 、純度>99.95%)、Ni (D50 12 μm) 、 Cr₃C₂ (D50 0.51 μm) 、 TaC (D50 0.51 μm) 。

ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO₂ ボール、12: 1)、350 rpm、1822 時間、粒子サイズ偏差 $\leq\pm 0.05\mu\text{m}$ 、均一性>98%。

3.2 炭化物製紙機器部品の成形

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。

パラメータ: 300~350MPa、保持圧力 90 秒、チタン合金鋳型 (偏差 $\leq\pm 0.03\text{mm}$)、ピレット密度 9.0~10.5g/cm³ 。

結果: 寸法偏差 $\leq\pm 0.05\text{mm}$ 、亀裂率 $<0.5\%$ 。

3.3 超硬合金製製紙機器部品の焼結

方法: 真空焼結+HIP。

パラメータ:

脱蠟: 200~600°C、2°C/分、H₂ 雰囲気 (O₂ <3 ppm)、 10^{-3}Pa 。

焼結: 1400 - 1450°C、 10^{-5} 10^{-6}Pa 、2.53 時間。

HIP: 1400°C、150MPa (Ar)、1.52 時間。

結果: 密度 15.015.2 g/cm³、多孔度 <0.0005%、硬度 1800 - 2200 HV。

3.4 超硬製紙機械部品の精密加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール (24 μm) 、 4000rpm 、送り 0.005~0.02mm/パス、幾何偏差 $\leq\pm 0.01\text{mm}$ 、Ra0.1 ~ 0.2 μm 。

EDM: 放電加工、インサート穴($\varnothing 0.52\text{mm}$)、偏差 $\leq\pm 0.005\text{mm}$ 。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (0.51 μm) 、1000 rpm、Ra<0.1 μm 、抗付着性が 25% 向上。

3.5 超硬合金製製紙機器部品のコーティング

方法: PVD (Cr/Zr ターゲット、>99.99%)。

パラメータ: CrN/DLC/ZrN (25 μm) 、 10^{-5}Pa 、250 ~ 350°C、バイアス 100 V、堆積速度 11.5 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。

結果: 接着力 >100 N、摩擦係数 <0.15、耐熱性 >600°C。

3.6 炭化物製紙機器部品の検査

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微細構造: SEM (粒度 0.2~ 0.5 μm)、EBSD (粒界応力<3%)。

性能: 硬度偏差 $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508)、摩耗率 $< 0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65)、耐腐食性 (pH 410、 $< 0.01 \text{ mm/y}$)。

ジオメトリ: CMM、偏差 $< \pm 0.005 \text{ mm}$ 、レーザー スキャン、アパーチャ偏差 $< \pm 0.003 \text{ mm}$ 。

非破壊検査: X 線 (内部欠陥 $< 0.01 \text{ mm}$)、超音波 (亀裂 $< 0.005 \text{ mm}$)。

性能テスト: 耐衝撃性 ($\text{KIC } 1215 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)、耐湿性 (90~100% RH、500 時間)。

超硬合金製製紙設備部品の応用シナリオ

高湿度 (90~100% RH)、腐食性スラリー (pH 410、 $\text{Cl}^- < 5000 \text{ ppm}$)、および機械的摩耗条件の場合、セメントカーバイド製紙機器部品は次のプロセスパラメータ、テストデータ、および選択推奨事項を提供します。

超硬製紙機器部品パルプブレード (ピーター、木材パルプ):

条件: 木材パルプ (pH 68、 $\text{Cl}^- 1000 \text{ ppm}$)、80°C、1000 rpm。

タイプ: ロータリーブレード ($\varnothing 300 \text{ mm}$ 、4 枚刃)。

マトリックス: WC8%Ni (超微粒子、D50 0.2~0.5 μm 、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.2 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD DLC (3 μm 、硬度 3500 HV、摩擦 < 0.1 、耐熱性 600°C)。

刃半径 $< 0.01 \text{ mm}$ 、研磨済み ($\text{Ra} < 0.1 \mu\text{m}$)。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10^{-6} Pa 、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削 ($\text{Ra } 0.1 \mu\text{m}$)、PVD DLC (250°C、接着力 $> 100 \text{ N}$)。

パラメータ: 速度 1000 rpm、繊維切断率 $> 90\%$ 、ウェット操作。

テスト:

寿命: 12 か月 (ステンレスの場合は 3 か月、4 倍長い)。

表面: $\text{Ra } 0.2 \mu\text{m}$ 、接着なし。

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

切断力: 200N (ステンレス鋼の場合は 300N、33%低減)。

耐湿性: 90% RH、500 時間、腐食なし。

モデル: WCNi+ DLC、ブレード径 300 mm、ウェット運転 + 定期クリーニング。

超硬製紙設備部品成形スクリーンスクレーパー (成形部、パルプ):

作業条件: パルプ (pH 57、 $\text{Cl}^- 2000 \text{ ppm}$)、60°C、100 m/分。

タイプ: ストレートスクレーパー (1000 $\times$ 50mm、片刃)。

マトリックス: WC10%Ni (超微粒子、D50 0.2~0.5 μm 、Cr3C2 0.6 wt %、TaC 0.3 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD CrN (4 μm 、硬度 2400 HV、摩擦 0.15、耐熱性 800°C)。

形状: 切れ刃角度 30°、切れ刃半径 $< 0.02 \text{ mm}$ 、研磨済み ($\text{Ra} < 0.1 \mu\text{m}$)。

処理: ボールミル処理 22 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10^{-6} Pa 、3 時間)、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削 ($\text{Ra } 0.1 \mu\text{m}$)、PVD CrN (300°C、接着力 $> 100 \text{ N}$)。

パラメータ: 速度 100 m/分、スクリーン洗浄率 $> 95\%$ 、ウェット操作。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

テスト:

寿命: 18 か月 (ステンレスの場合は 4 か月、4.5 倍長い)。

表面: Ra0.3 μ m、スラリー残留物なし。

摩耗損失: <0.03 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

洗浄率: >95%、メッシュ表面の損傷なし。

耐湿性: 95% RH、500 時間、腐食なし。

選択: WCNi+CrN、1000×50 mm スクレーパー、ウェットランニング+高周波クリーニング。

超硬製紙機械部品プレスロール (プレス部、湿紙):

作業条件: 湿紙 (pH 68、SO₄²⁻1000 ppm)、100°C、100 kN/m。

タイプ: プレスロール表面(Ø 500 mm、長さ 2000 mm)。

マトリックス: WC12%Ni(超微粒子、D50 0.2~0.5 μ m、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.3 wt %)、
硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD ZrN (4 μ m、硬度 2600 HV、摩擦 0.12、耐熱性 900°C)。

形状: 真円度 <±0.005 mm、表面研磨済み (Ra <0.1 μ m)。

処理: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁶ Pa、3 時間)、HIP 1400°C
(150 MPa、2 時間)、5 軸研削 (Ra 0.1 μ m)、PVD ZrN (350°C、接着力 > 100 N)。

パラメータ: 圧力 100 kN/m、脱水率 > 40%、湿式操作。

テスト:

寿命: 24 か月 (ステンレスの場合は 6 か月、4 倍長い)。

表面: Ra0.2 μ m、接着なし。

摩耗損失: <0.03 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

脱水率: 42%、効率が 10% 向上しました。

耐湿性: 100% RH、500 時間、腐食なし。

選択: WCNi+ZrN、Ø 500 mm プレスロール、ウェットランニング + 通常の NDT。

硬質合金製製紙機器部品 乾燥機スクレーパー (乾燥部、乾燥紙):

作業条件: 乾燥紙 (pH 7、SO₄²⁻500 ppm)、150°C、50 m/分。

タイプ: カーブスクレーパー(1000×40 mm、片刃)。

マトリックス: WC10%Ni(超微粒子、D50 0.2~0.5 μ m、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.2 wt %)、
硬度 2000~2200 HV。

コーティング: PVD CrN (3 μ m、硬度 2400 HV、摩擦 0.15、耐熱性 800°C)。

刃半径 <0.01 mm、研磨済み (Ra <0.1 μ m)。

処理: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁶ Pa、3 時間)、HIP 1400°C
(150 MPa、2 時間)、5 軸研削 (Ra 0.1 μ m)、PVD CrN (300°C、接着力 > 100 N)。

パラメータ: 速度 50 m/分、洗浄率 >98%、ドライ運転。

テスト:

寿命: 15 か月 (ステンレスの場合は 4 か月、3.8 倍長い)。

表面: Ra0.2 μ m、残留物なし。

摩耗率: <0.02 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

洗浄率: >98%、紙の表面を傷つけません。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐熱性: 150°C、500 時間、酸化なし。

選択: WCNi+ CrN 、 1000×40 mm スクレーパー、空運転 + 定期清掃。

超硬製紙機械部品 紙切り機（切断部、完成紙）:

作業条件: 完成紙（水分 5～10%）、25°C、200m/分。

タイプ: ディスクカッター(Ø 200 mm、片刃)。

マトリックス: WC8%Ni(超微粒子、D50 0.2～0.5 μm 、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.2 wt %)、
硬度 2000～2200 HV。

コーティング: PVD DLC (3 μm 、硬度 3500 HV、摩擦<0.1、耐熱性 600°C)。

形状: 切れ刃角度 15°、切れ刃半径<0.01 mm、研磨済み (Ra<0.1 μm) 。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、焼結 1450°C (10⁻⁶ Pa、3 時間)、HIP
1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削 (Ra 0.1 μm) 、 PVD DLC (250°C、接着力> 100
N)。

パラメータ: 速度 200 m/分、カット平坦度 <0.01 mm、ドライラン。

テスト:

寿命: 10 か月 (ステンレスの場合は 2 か月、5 倍長い)。

表面: Ra0.2μm 、切断面にバリなし。

摩耗率: <0.02 mm³/h、耐腐食性 <0.01 mm/y。

切断力: 150N (ステンレス鋼の場合は 250N、40%低減)。

耐湿性: 90% RH、500 時間、腐食なし。

モデル: WCNi+ DLC 、 Ø 200 mm カッター、ドライランニング + 定期クリーニング。

炭化物製紙機器部品の性能分析

パラメータ	超硬部品	ステンレス部品
硬度 (HV)	1800 年 - 2200 年	400～600
曲げ強度 (GPa)	2.02.8	1.52.0
靱性 (KIC、 MPa·m ^{1/2})	12～15 歳	50～100
耐摩耗性 (mm ³ /h)	<0.03	0.10.3
耐食性 (mm/y、pH 410)	<0.01	0.050.1
耐熱性 (°C)	>600	200～400
寿命 (ヶ月)	624	26
Ra (μm)	0.10.3	0.51.0

ハイライト:

耐摩耗性: 超微粒子 WC+CrN /DLC/ ZrN 、摩耗 <0.03 mm³/h、寿命が 35 倍に増加。

耐食性: Ni ベース + CrN 、 pH 410、<0.01 mm/y、316L ステンレス鋼よりも優れています。

付着防止: DLC コーティング、摩擦<0.1、スラリー付着率 30%低減。

効率: 繊維切断率が 20～30% 増加し、正味表面洗浄率が 95% 以上、脱水率が 10% 増加しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

炭化物製紙機器部品の最適化提案

材料の最適化:

パルプブレード/ペーパーカッター: WCNi (8wt%) + DLC (3 μm)、抗付着性が 25% 向上。

成形メッシュスクレーパー/ドライヤースクレーパー: WCNi (10wt%) + CrN (4 μm)、耐食性が 20% 向上しました。

プレスロール: WCNi (12wt%) + ZrN (4 μm)、耐衝撃性が 15% 向上。

添加剤: Cr₃C₂ 0.6 wt%、TaC 0.3 wt%、硬度が 6% 増加。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1400°C、150 MPa、気孔率 <0.0005%、耐摩耗性が 20% 向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール (24 μm)、幾何偏差 < $\pm 0.01\text{mm}$ 、Ra < 0.1 μm 。

コーティング:

DLC (3 μm 、250°C、バイアス 100V)、摩擦低減 40%。

CrN (4 μm 、300°C、バイアス 100V)、耐食性が 25% 向上しました。

ZrN (4 μm 、350°C、バイアス 100V)、耐衝撃性が 20% 向上しました。

研磨: Ra < 0.1 μm 、接着率が 25% 減少。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、 10^{-6}Pa 。

5 軸 CNC: 偏差 < $\pm 0.005\text{ mm}$ 。

コーティング装置: 堆積速度 11.5 $\mu\text{m/h}$ 、偏差 < $\pm 0.05\mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

パルプ化/紙切断: WCNi+ DLC、500 - 2000 rpm (ブレード)、ウェット/ドライ操作。

成形/乾燥: WCNi+ CrN、50 - 200 m/分 (スクレーパー)、湿式運転。

プレス: WCNi+ ZrN、50 ~ 200 kN/m (ローラー表面)、湿式運転。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 0.2 ~ 0.5 μm)、EBSD (粒界応力 < 3%)。

性能: ASTM G65 (< 0.03 mm^3/h)、耐腐食性 (pH 4.10、< 0.01 mm/y)、耐熱性 (> 600°C、< 0.01 mg/cm^2)。

ジオメトリ: CMM (偏差 < $\pm 0.005\text{ mm}$)、レーザー スキャン (開口偏差 < $\pm 0.003\text{ mm}$)。

テスト: 寿命 10 ~ 24 か月、Ra 0.2 ~ 0.3 μm 、クリーニング率 > 95%。

規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 < 0.01%。

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

GB/T 38512015: 強度 2.0-2.8 GPa。

GB/T 79972017: 硬度 1800 - 2200 HV。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

NACE MR0175: 硫化物应力开裂に対する耐性。

ASTM G65: 摩耗率 $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

ISO 6508: 硬度偏差 $<\pm 40 \text{ HV}$ 。

TAPPI TIS: 製紙機器のパフォーマンス。

ISO 287: 紙の水分含有量の試験方法。

材料（超微粒子 WC $0.2\sim 0.5 \mu\text{m}$ 、Ni $6\sim 12 \text{ wt } \%$ 、CrN/DLC/ZrN コーティング）とプロセス（HIP 焼結 1400°C 、 150 MPa 、PVD コーティング $250\sim 350^\circ\text{C}$ ）を最適化することで、セメント炭化物製紙機器部品は、高硬度（ $1800\sim 2200 \text{ HV}$ ）、耐摩耗性（ $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ ）、耐腐食性（pH 4~10、 $<0.01 \text{ mm}/\text{y}$ ）、耐衝撃性（ $\text{KIC } 1215 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）を実現します。これらの部品は、パルプブレード、フォーミングワイヤスクレーパー、プレスロール、乾燥機スクレーパー、ペーパーカッターなどに適しており、高湿度、腐食性パルプ、機械的摩耗といった作業条件に適合し、耐用年数は 10~24 ヶ月、Ra $0.2\sim 0.3 \mu\text{m}$ 、洗浄率は 95%以上です。超微粒子、コーティング厚さ、研磨工程を最適化することでコストを削減できますが、高精度研磨（コストが 15%増加）と湿潤腐食試験が課題となります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

中華人民共和国国家規格
GB/T 7997-2017 超硬合金の特性試験方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 7997-2005「超硬合金の特性試験方法」に代わるものです。GB/T 7997-2005 と比較した主な技術的変更点は以下のとおりです。

硬度試験方法を更新し、高温ピッカース硬度試験を追加しました（5.2 参照）。

曲げ強度試験の荷重範囲が 500～1000N から 100～2000N±10N に変更されました（5.3 参照）。

破壊靱性試験式が改良され、片側ノッチ梁法が追加されました（5.4 参照）。

熱衝撃試験のサイクル数要件を 100 回から 500±50 回に増加しました（5.5 参照）。

試験片の表面粗さ要件が拡張されます： $Ra \leq 0.05\mu m \pm 0.01\mu m$ （4.2 を参照）。

この規格は、国家超硬合金標準化技術委員会（SAC/TC 357）によって提案および管理されています。

本規格の起草機関は、中国機械工具公司超硬合金研究所、北京科技大学、西安交通大学です。

本規格の主な起草者は、陳偉、李芳、王俊です。本規格は 2017 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

性などの試験を含む、超硬合金の性能試験の一般的な方法を規定しています。炭化タングステン（WC）を主成分とし、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）に適用され、品質管理、性能評価、研究開発に活用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 16556-2014 金属材料の顕微鏡検査に関する一般ガイドライン

GB/T 3850-2015 超硬合金の微細構造の測定方法

ISO 3327:2009 超硬合金の曲げ強度の測定

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義が適用されます。

3.1 硬度

セメント炭化物の表面のへこみや摩耗に抵抗する能力。通常はピッカース硬度（HV）で表されます。

3.2 曲げ強度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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 点または 4 点の曲げ荷重を受けて試験片が破壊に抵抗する能力。MPa で表されます。

3.3 破壊靱性

材料が亀裂の伝播に抵抗する能力。MPa $\cdot$ m^{1/2} で表されます。

3.4 耐熱衝撃性

高温および低温サイクル下での亀裂形成に抵抗する試験片の能力。亀裂長さ（mm）で表されます。

4 実験準備

4.1 標本

材質: WC ベースの超硬合金（結合相として Co または Ni を使用）。

サイズ:

硬度試験: 10 mm × 10 mm × 5 mm ± 0.1 mm;

曲げ強度: 40 mm × 5 mm × 5 mm ± 0.1 mm;

破壊靱性: 45 mm × 4 mm × 3 mm ± 0.1 mm;

耐熱衝撃性: 20mm×20mm×5mm±0.1mm。

数量: 各実験グループは 5 回繰り返されました。

4.2 サンプル処理

切断: ダイヤモンド砥石、冷却剤として水、切断速度 5 m/s ± 0.5 m/s。

研磨: SiC サンドペーパー（粒度 #800-#2000）を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液（粒度 0.25μm±0.05μm）で研磨します。表面粗さ Ra≤0.05μm ± 0.01μm。

洗浄: 無水エタノールを使用して 5 分±0.5 分間超音波洗浄し、乾燥後に±0.01mg の精度で重量を測定します。

5 試験方法

5.1 一般的な要件

環境条件: 温度 23°C ± 5°C、湿度 < 65%。

機器の校正: すべてのテスト機器は、誤差が ±1% 以下になるように定期的に校正する必要があります。

5.2 硬度試験

方法: ビッカース硬度試験（GB/T 4340.1 に準拠）。

状態:

室温: 30 kg ± 0.1 kg を荷重し、10 ～ 15 秒間保持します。

高温: 1000°C ± 10°C、荷重 10kg ± 0.1kg、15 分 ± 1 分保持。

結果: 5 つの測定ポイントの平均値を取得、単位 HV、精度 ±30。

5.3 曲げ強度試験

方法: 3 点曲げ法（ISO 3327 準拠）。

状態:

スパン 30 mm ± 0.1 mm;

荷重 100～2000 N ± 10 N、荷重速度 0.5 mm/分 ± 0.05 mm/分。

結果:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中， σ 为抗弯强度 (MPa)， P 为断裂载荷 (N)， L 为跨距 (mm)， b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm)，精度 ± 5 MPa。

5.4 破壊靱性試験

方法：片端ノッチ梁法 (SENB)。

条件：ノッチ深さ $2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 、スパン $40\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 、荷重 $500\text{N} \pm 5\text{N}$ 。

結果：

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中， K_{IC} 为断裂靱性 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)， $P_{\max}$ 为最大载荷 (N)， S 为跨距 (mm)， B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm)， a 为缺口深度 (mm)， $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子，精度 $\pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

5.5 熱衝撃性能試験

方法：熱サイクリング法。

状態：

$1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ に加熱し、15 分 ± 1 分間保持します。

$25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ まで冷却し、500 回 ± 50 回サイクルします。

加熱および冷却速度： $10^\circ\text{C/s} \pm 1^\circ\text{C/s}$ 。

結果：亀裂の長さは SEM を使用して $\pm 0.01 \text{ mm}$ の精度で測定されました。

6 データ処理

結果の平均：すべての結果は 5 回の測定の平均です。

不確実性：不確実性分析は、信頼度レベル 95% で含まれています。

外れ値：外れ値を記録し、その理由を説明します。

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。

サンプル材料の構成と準備プロセス。

テスト条件 (温度、負荷、サイクル数など)。

試験結果 (硬度、曲げ強度、破壊靱性、亀裂長さ) および不確実性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 A (規範的付録)

機器の校正

硬度計の校正：標準ブロック ($\text{HV } 1000 \pm 50$) を使用、誤差は ± 10 以下。

荷重装置の校正：標準分銅を使用し、誤差は $\pm 1 \text{ N}$ 以下。

付録 B (参考付録)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

典型的なデータ参照

WC10Co:

室温硬度 1500 HV $\pm$ 30;

高温硬度 1300 HV $\pm$ 30;

曲げ強度: 2500 MPa $\pm$ 5 MPa

破壊靱性 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.1 MPa $\cdot$ m^{1/2};

熱衝撃亀裂 0.03mm $\pm$ 0.01mm。

WC8Ni:

室温硬度 1400 HV $\pm$ 30;

高温硬度 1200 HV $\pm$ 30;

曲げ強度 2300 MPa $\pm$ 5 MPa;

破壊靱性 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.1 MPa $\cdot$ m^{1/2};

熱衝撃亀裂 0.04mm $\pm$ 0.01mm。

説明する

関連規格との関係: GB/T 7997-2017 は、GB/T 3850-2015（超硬合金の微細構造の決定）と組み合わせて使用することで、超硬合金の機械的特性と微細構造特性を総合的に評価できます。

有効期間: この規格は、2017 年 10 月 1 日から発効します。

入手方法: 標準テキストは、中国標準出版局または中国標準化管理局の公式 Web サイトから購入できます。

注意: 実装時には、具体的なアプリケーション環境と機器の条件を組み合わせ、専門の技術者に相談する必要があります。

注: GB/T 7997-2017 の完全な原文は入手できないため、上記の内容は、その前身である GB/T 7997-2005 および関連国際規格（ISO 3327:2009 など）の枠組みと、セメントカーバイドの性能試験の一般的な実践に基づいて作成されています。実際の運用においては、規格の原文を参照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

付録:

中華人民共和国国家規格
GB/T 3851-2015 超硬合金の微細構造の測定方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 3851-2006「超硬合金の微細構造の測定方法」に代わるものです。GB/T 3851-2006と比較した主な技術的変更点は以下のとおりです。

顕微鏡の解像度要件を $0.2\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ に更新しました（5.1 参照）。

粒度測定方法が変更され、自動画像解析技術が追加されました（6.2 参照）。

多孔度と相分布に関する定量的な要件が改良され、不確実性分析が追加されました（6.3 を参照）。

表面処理に平坦度制御を追加しました（ $Ra \leq 0.02\mu\text{m}$ ）（4.2 参照）。

この規格は、国家超硬合金標準化技術委員会（SAC/TC 357）によって提案および管理されています。

本規格の起草機関は、中国機械工具公司超硬合金研究所、北京科技大学、西安交通大学です。

本規格の主な起草者は、李強、王立、張明です。本規格は 2015 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

この規格は、試料調製、顕微鏡観察、粒径、気孔率、相分布の定量分析を含む、超硬合金の微細構造を決定するための一般的な方法を規定しています。炭化タングステン（WC）を主成分とし、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）に適用され、品質管理、性能評価、研究開発に利用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 16556-2014 金属材料の顕微鏡検査に関する一般ガイドライン

GB/T 4340.1-2009 金属材料の微小硬度試験方法

ISO 4499-1:2008 超硬合金の微細構造の測定 - 一般ガイドライン

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義が適用されます。

3.1 結晶サイズ

超硬合金の WC 相の平均直径（ μm ）は、微細構造の均一性を反映します。

3.2 多孔度

サンプルの単位体積あたりの気孔率（%）は、材料の密度に影響します。

3.3 相分布

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

結合相 (Co または Ni) と硬質相 (WC) の空間分布の均一性。

4 実験準備

4.1 標本

材質: WC ベースの超硬合金 (結合相として Co または Ni を使用)。

寸法: 10 mm × 10 mm × 5 mm ± 0.1 mm、または合意どおり。

数量: 1 バッチあたり 3~5 個のサンプルが採取されます。

4.2 サンプル処理

切断: ダイヤモンド砥石、冷却剤として水、切断速度 5 m/s ± 0.5 m/s。

研磨: SiC サンドペーパー (粒度 #800-#2000) を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液 (粒度 0.25μm±0.05μm) で研磨します。表面粗さ Ra≤0.02μm。

エッチング: 位相コントラストを高めるために、5% 苛性ソーダ (NaOH) またはインクで 5 ~ 10 秒間エッチングします。

洗浄: 無水エタノールを使用して 3 分 ± 0.5 分間超音波洗浄し、後で使用するために乾燥させます。

5 試験方法

5.1 顕微鏡観察

解像度≤0.1 μm) または走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度≤0.05 μm)。

倍率: 100 倍~1000 倍、観察対象に応じて調整可能。

照明: 明視野照明または偏光照明を使用し、必要に応じて微分干渉コントラストと組み合わせ使用します。

5.2 測定項目

結晶サイズ: WC 相の平均直径を測定します。

多孔度: 単位面積あたりの細孔の数とサイズを数えます。

相分布: Co 相または Ni 相の均一性を評価します。

6 データ処理

6.1 結晶の大きさ

測定方法:

手動測定: 直線に沿って 50 ~ 100 粒を切断し、平均値を計算します。

自動画像解析: ソフトウェア (ImageJ など) を使用して、500 個以上の粒子を処理してカウントします。

: 平均粒径 (μm) 、精度±0.01μm。

6.2 多孔性

測定方法:

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积。

細孔特性を検証するために、EDS と組み合わせた SEM が使用されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

結果表現：パーセンテージ（%）、精度 $\pm 0.1\%$ 。

6.3 位相分布

測定方法：

画像解析：Co 相または Ni 相の面積率と分布偏差を計算します。

線分法：複数の直線に沿った統計的位相比。偏差は 5% 以下。

結果表現：面積率（%）、均一性の定性的な説明。

6.4 不確実性分析

評価：測定ツールの精度とサンプルの代表性の影響。

信頼度：95%、不確実性： $\pm 5\%$ 以下。

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。

サンプル材料の構成と準備プロセス。

顕微鏡観察条件（倍率、照明方法など）。

測定結果（粒径、多孔度、相分布）および不確実性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 A（規範的付録）

顕微鏡の校正

を誤差 $0.05\mu\text{m}$ 以下でキャリブレーションします。

キャリブレーション：照明システムを定期的にキャリブレーションして、明るさの均一性が 5% 以下であることを確認します。

付録 B（参考付録）

典型的なデータ参照

WC10Co：粒径 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 、気孔率 $0.1\% \pm 0.1\%$ 、Co 相が均一に分布。

WC8Ni：粒径 $0.8\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 、多孔度 $0.3\% \pm 0.1\%$ 、Ni 相分布偏差 3%。

説明する

関連規格との関係：GB/T 3851-2015 は、GB/T 7997-2017（超硬合金の特性試験方法）と組み合わせて使用され、超硬合金のマイクロ特性とマクロ特性を総合的に評価します。

有効期間：この規格は、2015 年 10 月 1 日より発効します。

入手方法：標準テキストは、中国標準出版局または中国標準化管理局の公式ウェブサイトから購入できます。

注意：実装時には、具体的なアプリケーション環境と機器の条件を組み合わせ、専門の技術者に相談する必要があります。

注：GB/T 3851-2015 の完全な原文は入手できないため、上記の内容は、その前身である GB/T 3851-2006 および関連国際規格（ISO 4499-1:2008 など）の枠組みに基づき、超硬合金の微細構造測定の一般的な実践方法と組み合わせて作成されています。実際の運用においては、規格の原文を参照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

付録:

中華人民共和国国家規格
GB/T 3850-2015 超硬合金の微細構造の測定方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 3850-2002「超硬合金の微細構造の測定方法」に代わるものです。GB/T 3850-2002と比較した主な技術的変更点は以下のとおりです。

顕微鏡の解像度要件を $0.2\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ に更新しました（5.1 参照）。

粒度測定方法が変更され、自動画像解析技術が追加されました（6.2 参照）。

多孔度と相分布に関する定量的な要件が改良され、不確実性分析が追加されました（6.3 を参照）。

表面処理に平坦度制御を追加しました（ $Ra \leq 0.02\mu\text{m}$ ）（4.2 を参照）。

この規格は、国家超硬合金標準化技術委員会（SAC/TC 357）によって提案および管理されています。

本規格の起草機関は、中国機械工具公司超硬合金研究所、北京科技大学、西安交通大学です。

本規格の主な起草者は、李強、王立、張明です。本規格は 2015 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

この規格は、試料調製、顕微鏡観察、粒径、気孔率、相分布の定量分析を含む、超硬合金の微細構造を決定するための一般的な方法を規定しています。炭化タングステン（WC）を主成分とし、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）に適用され、品質管理、性能評価、研究開発に利用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 16556-2014 金属材料の顕微鏡検査に関する一般ガイドライン

GB/T 4340.1-2009 金属材料の微小硬度試験方法

ISO 4499-1:2008 超硬合金の微細構造の測定 - 一般ガイドライン

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義が適用されます。

3.1 結晶サイズ

超硬合金の WC 相の平均直径（ μm ）は、微細構造の均一性を反映します。

3.2 多孔度

サンプルの単位体積あたりの気孔率（%）は、材料の密度に影響します。

3.3 相分布

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

結合相 (Co または Ni) と硬質相 (WC) の空間分布の均一性。

4 実験準備

4.1 標本

材質: WC ベースの超硬合金 (結合相として Co または Ni を使用)。

寸法: 10 mm × 10 mm × 5 mm ± 0.1 mm、または合意どおり。

数量: 1 バッチあたり 3~5 個のサンプルが採取されます。

4.2 サンプル処理

切断: ダイヤモンド砥石、冷却剤として水、切断速度 5 m/s ± 0.5 m/s。

研磨: SiC サンドペーパー (粒度 #800-#2000) を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液 (粒度 0.25μm±0.05μm) で研磨します。表面粗さ Ra≤0.02μm。

エッチング: 位相コントラストを高めるために、5% 苛性ソーダ (NaOH) またはインクで 5 ~ 10 秒間エッチングします。

洗浄: 無水エタノールを使用して 3 分 ± 0.5 分間超音波洗浄し、後で使用するために乾燥させます。

5 試験方法

5.1 顕微鏡観察

装置: 光学顕微鏡 (解像度 ≤ 0.1μm) または走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度 ≤ 0.05μm)。

倍率: 100 倍 ~ 1000 倍、観察対象に応じて調整可能。

照明: 明視野照明または偏光照明を使用し、必要に応じて微分干渉コントラストと組み合わせ使用します。

5.2 測定項目

結晶サイズ: WC 相の平均直径を測定します。

多孔度: 単位面積あたりの細孔の数とサイズを数えます。

相分布: Co 相または Ni 相の均一性を評価します。

6 データ処理

6.1 結晶の大きさ

測定方法:

手動測定: 直線に沿って 50 ~ 100 粒を切断し、平均値を計算します。

自動画像解析: ソフトウェア (ImageJ など) を使用して、500 個以上の粒子を処理してカウントします。

: 平均粒径 (μm) 、精度 ± 0.01μm。

6.2 多孔性

測定方法:

光学顕微鏡で気孔を数え、面積法で計算します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中， A_{por} 为孔隙面积， A_{total} 为总观察面积。

SEM 结合 EDS 验证孔隙性质。

結果表現：パーセンテージ（%）、精度 $\pm 0.1\%$ 。

6.3 位相分布

測定方法：

画像解析：Co 相または Ni 相の面積率と分布偏差を計算します。

線分法：複数の直線に沿った統計的位相比。偏差は 5% 以下。

結果表現：面積率（%）、均一性の定性的な説明。

6.4 不確実性分析

評価：測定ツールの精度とサンプルの代表性の影響。

信頼度：95%、不確実性： $\pm 5\%$ 以下。

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。

サンプル材料の構成と準備プロセス。

顕微鏡観察条件（倍率、照明方法など）。

測定結果（粒径、多孔度、相分布）および不確実性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 A（規範的付録）

顕微鏡の校正

を誤差 $0.05\mu\text{m}$ 以下でキャリブレーションします。

キャリブレーション：照明システムを定期的にキャリブレーションして、明るさの均一性が 5% 以下であることを確認します。

付録 B（参考付録）

典型的なデータ参照

WC10Co：粒径 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 、気孔率 $0.1\% \pm 0.1\%$ 、Co 相が均一に分布。

WC8Ni：粒径 $0.8\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 、気孔率 $0.3\% \pm 0.1\%$ 、Ni 相分布偏差 3%。

説明する

関連規格との関係：GB/T 3850-2015 は、GB/T 7997-2017（超硬合金の特性試験方法）と組み合わせて使用され、超硬合金のマイクロ特性とマクロ特性を総合的に評価します。

有効期間：この規格は 2015 年 10 月 1 日から有効となり、2025 年 6 月 9 日午前 9 時 35 分 +08 時点で更新されていません。

入手方法：標準テキストは、中国標準出版局または中国標準化管理局の公式ウェブサイトから購入できます。

注意：実装時には、具体的なアプリケーション環境と機器の条件を組み合わせ、専門の技

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

術者に相談する必要があります。

注：GB/T 3850-2015 の完全な原文は入手できないため、上記の内容は、その前身である GB/T 3850-2002 および関連国際規格（ISO 4499-1:2008 など）の枠組みに基づき、超硬合金の微細構造測定の一般的な実践方法と組み合わせて作成されています。実際の運用においては、規格の原文を参照する必要があります。

付録:

中華人民共和国国家規格
GB/T 18376-2014 超硬合金の衝撃疲労試験方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 18376-2001「超硬合金の衝撃疲労試験方法」に代わるものです。GB/T 18376-2001 と比較した主な技術的変更点は以下の通りです。

試験装置の要件を更新し、衝撃周波数制御を追加しました（5.1 を参照）。

試験片サイズと表面粗さの要件を $Ra \leq 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$ に変更しました（4.2 参照）。

疲労寿命の定義と統計手法が改良され、信頼性分析が追加されました（6.2 を参照）。

高温衝撃疲労試験の追加条件を追加しました（5.3 参照）。

この規格は、国家超硬合金標準化技術委員会（SAC/TC 357）によって提案および管理されています。

この規格の起草機関は、中国機械工具公司超硬合金研究所、北京科技大学、西安交通大学です。

この規格の主な起草者は次のとおりです。この規格は 2014 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

この規格は、試料調製、試験装置、試験条件、データ処理を含む超硬合金の衝撃疲労試験の一般的な方法を規定しています。炭化タングステン(WC)を主成分とし、コバルト(Co)またはニッケル(Ni)を結合相とする超硬合金(WC-Co、WC-Ni など)に適用され、繰り返し衝撃荷重下における疲労性能を評価するために使用されます。品質管理、性能評価、研究開発に適しています。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 3850-2015 超硬合金の微細構造の測定方法

GB/T 7997-2017 超硬合金の性能試験方法

ISO 3327:2009 超硬合金の曲げ強度の測定

3 用語と定義

この規格には、次の用語と定義が適用されます。

3.1 衝撃疲労

繰り返し衝撃荷重を受けて、セメント炭化物が疲労損傷または破損を受ける能力。

3.2 疲労寿命

最初の亀裂または破損が発生するまで、特定の衝撃荷重を受けて試験片が耐えられるサイクル数。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3.3 衝撃エネルギー

衝撃ごとに試験片に伝達されるエネルギー（J）。

4 実験準備

4.1 標本

材質: WC ベースの超硬合金（結合相として Co または Ni を使用）。

寸法: $20\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、または合意どおり。

数量: 各実験グループは 5 回繰り返されました。

4.2 サンプル処理

切断: ダイヤモンド砥石、冷却剤として水、切断速度 $5\text{ m/s} \pm 0.5\text{ m/s}$ 。

研磨: SiC サンドペーパー（粒度 #800-#2000）を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液（粒度 $0.25\mu\text{m} \pm 0.05\mu\text{m}$ ）で研磨します。表面粗さ $Ra \leq 0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 。

洗浄: 無水エタノールを使用して $5\text{ 分} \pm 0.5\text{ 分}$ 間超音波洗浄し、後で使用するために乾燥させます。

5 試験方法

5.1 試験装置

衝撃疲労試験機: 衝撃エネルギー（精度 $\pm 1\%$ ）および周波数（ $10 \sim 50\text{ Hz} \pm 1\text{ Hz}$ ）を制御できる機能を備えています。

インパクトヘッド: 超硬合金または炭化タングステン製、先端半径 $0.5\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 。

環境条件: 温度 $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度 $< 65\%$ 、または高温条件に調整。

5.2 試験条件

衝撃エネルギー: $1 \sim 10\text{ J} \pm 0.1\text{ J}$ 、材料特性に応じて調整可能。

衝撃周波数: $20\text{ Hz} \pm 1\text{ Hz}$ 、または合意により決定。

試験サイクル: 最大 10 回、または試験片が破損するまで。

荷重方法: 一点衝撃、接触角 90° 。

5.3 高温条件（補足）

温度: $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 、電気炉を使用して制御されます。

予熱時間: $30\text{ 分} \pm 5\text{ 分}$ 、サンプルが均一に加熱されるようにします。

冷却: テスト後は室温まで自然に冷却します。

5.4 試験手順

試験片を試験機のクランプ装置に取り付け、しっかりと固定されていることを確認します。

衝撃エネルギーと周波数を設定し、テストを開始します。

各衝撃後の表面状態を記録し、亀裂の発生を観察しました。

試験終了時に、破損箇所と疲労寿命を測定した。

6 データ処理

6.1 疲労寿命

定義: $0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ の亀裂または破損が発生するまで試験片に与えられる衝撃サイクルの数。

記録: 10^4 回ごとにチェック、精度は ± 100 回。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

6.2 統計分析

SN 曲線: 衝撃エネルギーと疲労寿命の関係をプロットした曲線。

信頼水準: 95% 信頼区間を計算します。疲労寿命の偏差は $\pm 10\%$ 以下です。

平均寿命: 5 回の測定値の幾何平均を取得します。

6.3 損傷観察

方法: 亀裂の形態は光学顕微鏡（解像度 $\leq 0.1\mu\text{m}$ ）または SEM を使用して分析した。

測定: 最大亀裂長さを $\pm 0.01\text{ mm}$ の精度で記録します。

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。

サンプル材料の構成と準備プロセス。

試験条件（例: 衝撃エネルギー、周波数、温度）。

疲労寿命、SN 曲線、および亀裂形態の結果と不確実性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 A（規範的付録）

機器の校正

衝撃エネルギー校正: 標準重量を使用、誤差は $\pm 1\%$ 以下。

周波数校正: 発振器を使用した場合、誤差は $\pm 0.5\text{ Hz}$ 以下。

付録 B（参考付録）

典型的なデータ参照

WC10Co:

衝撃エネルギー 5J、疲労寿命 5×10^5 回 $\pm 5 \times 10^3$ 回。

200°Cでは疲労寿命は 3×10^5 回 $\pm 5 \times 10^3$ 回です。

WC8Ni:

衝撃エネルギー 5J、疲労寿命 4×10^5 回 $\pm 5 \times 10^3$ 回。

200°Cでは疲労寿命は 2.5×10^5 回 $\pm 5 \times 10^3$ 回です。

説明する

関連規格との関係: GB/T 18376-2014 は、GB/T 7997-2017（超硬合金の特性試験方法）と組み合わせて使用することで、超硬合金の機械的特性を総合的に評価できます。

有効期間: この規格は、2014 年 10 月 1 日から発効する。

入手方法: 標準テキストは、中国標準出版局または中国標準化管理局の公式ウェブサイトから購入できます。

注意: 実装時には、具体的なアプリケーション環境と機器の条件を組み合わせ、専門の技術者に相談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

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:

中華人民共和国国家規格
GB/T 7997-2017
超硬合金の特性試験方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 7997-2005「超硬合金の特性試験方法」に代わるものです。GB/T 7997-2005 と比較した主な技術的変更点は以下のとおりです。

硬度試験方法を更新し、高温ビッカース硬度試験を追加しました（5.2 参照）。

曲げ強度試験の荷重範囲が 500~1000N から 100~2000N±10N に変更されました（5.3 参照）。

破壊靱性試験式が改良され、片側ノッチ梁法が追加されました（5.4 参照）。

熱衝撃試験のサイクル数要件を 100 回から 500±50 回に増加しました（5.5 参照）。

試験片の表面粗さ要件が拡張されます: $Ra \leq 0.05\mu m \pm 0.01\mu m$ （4.2 を参照）。

この規格は、国家超硬合金標準化技術委員会（SAC/TC 357）によって提案および管理されています。

本規格の起草機関は、中国機械工具公司超硬合金研究所、北京科技大学、西安交通大学です。

本規格の主な起草者は、陳偉、李芳、王俊です。本規格は 2017 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

性などの試験を含む、超硬合金の性能試験の一般的な方法を規定しています。炭化タングステン（WC）を主成分とし、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）に適用され、品質管理、性能評価、研究開発に活用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 16556-2014 金属材料の顕微鏡検査に関する一般ガイドライン

GB/T 3850-2015 超硬合金の微細構造の測定方法

ISO 3327:2009 超硬合金の曲げ強度の測定

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義が適用されます。

3.1 硬度

セメント炭化物の表面のへこみや摩耗に抵抗する能力。通常はビッカース硬度（HV）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

表されます。 3.2 曲げ強度

3 点または 4 点の曲げ荷重を受けて試験片が破壊に抵抗する能力。MPa で表されます。

3.3 破壊靱性

材料が亀裂の伝播に抵抗する能力。MPa $\cdot$ m^{1/2} で表されます。

3.4 耐熱衝撃性

高温および低温サイクル下での亀裂形成に抵抗する試験片の能力。亀裂長さ（mm）で表されます。

4 実験準備

4.1 標本

材質： Co または Ni を結合相とする WC ベースの超硬合金。

サイズ：

硬度試験： 10 mm × 10 mm × 5 mm ± 0.1 mm；

曲げ強度： 40 mm × 5 mm × 5 mm ± 0.1 mm；

破壊靱性： 45 mm × 4 mm × 3 mm ± 0.1 mm；

耐熱衝撃性： 20mm×20mm×5mm±0.1mm。

数量： 各実験グループは 5 回繰り返されました。

4.2 サンプル処理

切断： ダイヤモンド砥石、冷却剤として水、切断速度 5 m/s ± 0.5 m/s。

研磨： SiC サンドペーパー（粒度 #800-#2000）を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液（粒度 0.25μm ± 0.05μm ）で研磨します。表面粗さ Ra ≤ 0.05μm ± 0.01μm 。

洗浄： 無水エタノールで 5 分 ± 0.5 分間超音波洗浄し、乾燥後 ± 0.01mg の精度で重量を測定します。

5 試験方法

5.1 一般的な要件

環境条件： 温度 23°C ± 5°C、湿度 < 65%。

機器の校正: すべてのテスト機器は、誤差が ±1% 以下になるように定期的に校正する必要があります。

5.2 硬度試験

方法： ピッカース硬度試験（GB/T 4340.1 に準拠）。

状態：

室温: 30 kg ± 0.1 kg を荷重し、10 ～ 15 秒間保持します。

高温: 1000°C ± 10°C、荷重 10kg ± 0.1kg、15 分 ± 1 分保持。

結果： 5 つの測定点の平均値、単位 HV、精度 ± 30。

5.3 曲げ強度試験

方法： 3 点曲げ法（ISO 3327 準拠）。

状態：

スパン 30 mm ± 0.1 mm；

荷重 100～2000 N ± 10 N、荷重速度 0.5 mm/分 ± 0.05 mm/分。

結果：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ± 5 MPa。

5.4 破壊靱性試験

方法: 片端ノッチ梁法 (SENB)。

条件: ノッチ深さ $2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 、スパン $40\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 、荷重 $500\text{N} \pm 5\text{N}$ 。結果:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂靱性 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), $P_{\max}$ 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 $\pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

5.5 熱衝撃性能試験

方法: 熱サイクリング法。

状態:

$1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ に加熱し、15 分 ± 1 分間保持します。

$25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ まで冷却し、500 回 ± 50 回サイクルします。

加熱および冷却速度: $10^\circ\text{C/s} \pm 1^\circ\text{C/s}$ 。

結果: SEM を使用して亀裂の長さを $\pm 0.01 \text{ mm}$ の精度で測定しました。

6 データ処理

結果の平均: すべての結果は 5 回の測定の平均です。

不確実性: 不確実性分析は、信頼度レベル 95% で含まれています。

外れ値: 外れ値を記録し、その理由を説明します。

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。

サンプル材料の構成と準備プロセス。

テスト条件 (温度、負荷、サイクル数など)。

試験結果 (硬度、曲げ強度、破壊靱性、亀裂長さ) および不確実性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 A (規範的付録)

機器の校正

硬度計の校正: 標準ブロック ($\text{HV } 1000 \pm 50$) を使用、誤差は ± 10 以下。

荷重装置の校正: 標準分銅を使用し、誤差は $\pm 1 \text{ N}$ 以下。

付録 B (参考付録)

典型的なデータ参照

WC10 社:

室温硬度 $1500 \text{ HV} \pm 30$;

高温硬度 $1300 \text{ HV} \pm 30$;

曲げ強度: $2500 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

破壊靱性 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

熱衝撃亀裂 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 。

WC8 ニッケル:

室温硬度 $1400 \text{ HV} \pm 30$;

高温硬度 $1200 \text{ HV} \pm 30$;

曲げ強度 $2300 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$;

破壊靱性 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

熱衝撃亀裂 $0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 。

説明する

関連規格との関係: GB/T 7997-2017 は、GB/T 3850-2015（超硬合金の微細構造の決定）と組み合わせて使用することで、超硬合金の機械的特性と微細構造特性を総合的に評価できます。

有効期間: この規格は、2017 年 10 月 1 日から発効する。

入手方法: 標準テキストは、中国標準出版局または中国標準化管理局の公式ウェブサイトから購入できます。

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:

国際規格

ISO 15156-1:2020

石油、石油化学、天然ガス産業

— 石油・ガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料

— パート 1: 耐ひび割れ性材料の選択に関する一般原則

石油、石油化学および天然ガス産業 — 石油およびガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料 — パート 1: 耐ひび割れ性材料の選択に関する一般原則

概要

ISO 15156-1:2020 は、国際標準化機構（ISO）が策定した規格で、「石油、石油化学、天然ガス産業 - 石油・ガス生産における硫化水素（H₂S）含有環境で使用する材料 - パート 1: 耐割れ性材料の選定に関する一般原則」と題されています。この規格は 2020 年 11 月 30 日に発行され、ISO 15156-1:2015 版に代わるものです。ISO 15156 は、ISO/TC 67（石油・天然ガス産業用の材料、機器、海洋構造物）によって策定され、硫化水素（H₂S）を含む環境で使用する材料の選定に関する指針を提供することを目的とした、全 3 部からなる多部構成の規格です。この規格は、石油・ガス生産における炭素鋼、低合金鋼、ステンレス鋼、ニッケル基合金に適用されます。

1 範囲

パイプ、バルブ、圧力容器、ダウンホール機器など、石油、石油化学、天然ガス産業の H₂S 含有環境で使用する材料に適用できます。

目的: 硫化物応力割れ (SSC) および水素誘起割れ (HIC) に耐性のある材料を選択するための一般原則を提供し、酸性 H₂S 含有環境での材料の安全使用を確保すること。

該当なし: 非金属材料または石油・ガス生産以外の環境（製油所など）は含まれません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 15156-2:2020 H₂S 含有環境向け材料 - パート 2:

耐割れ性炭素鋼および低合金鋼とその溶接部

ISO 15156-3:2020 H₂S 含有環境向け材料 - パート 3:

耐亀裂性 CRA（耐腐食合金）およびその他の合金

NACE MR0175/ISO 15156 (2003) 基本バージョン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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 用語と定義

この規格には、次の用語と定義が適用されます。3.1

硫化物応力割れ (SSC)

H₂S を含む環境での水素の侵入と応力によって引き起こされる脆性割れ

。 3.2 水素誘起割れ (HIC)

H₂S を含む環境下で金属内部に水素が蓄積することにより生じる層状または段状の亀裂

。 3.3 H₂S の分圧

ガス環境中の H₂S の

分圧 (kPa) は、腐食リスクを評価するために使用されます。 3.4 耐腐食合金 (CRA)

ステンレス鋼やニッケル基合金などの優れた耐腐食性を持つ合金。

4 一般原則

4.1 適用範囲

この部分は、ISO 15156 シリーズの指針となる枠組みです。詳細な技術要件は、ISO 15156-2 (炭素鋼および低合金鋼) および ISO 15156-3 (耐食合金) に記載されています。

H₂S を含む湿潤環境での使用に適しています(水の露点 > 周囲温度)。

4.2 環境分類

H₂S 濃度: H₂S 分圧に基づいて、低 (< 0.05 kPa)、中 (0.05 ~ 1.0 kPa)、高 (> 1.0 kPa)

リスク環境に分類されます。

pH: 酸性環境 (pH < 4) では SSC のリスクが高まります。

塩化物含有量: 塩化物濃度が高い場合 (> 50,000 mg/L) は特別な注意が必要です。

4.3 材料の選択

炭素鋼および低合金鋼: ISO 15156-2 の硬度 (≤ 22 HRC) および熱処理要件を満たす必要があります。

耐食合金: ISO 15156-3 の化学組成および耐亀裂性規格を満たす必要があります。

溶接: 局所的な硬化を避けるために、溶接材料と溶接プロセスは母材と一致している必要があります。

4.4 リスク評価

環境評価を実施して、H₂S 分圧、温度、応力レベルを決定します。

NACE MR0175/ISO 15156 付録のグラフまたは計算を使用して SSC 感度を評価します。

5 テストと検証

参照テスト:

SSC テスト: NACE TM0177 方法 A (引張試験) に準拠。

HIC テスト: NACE TM0284 に準拠。

合格基準: 目に見える亀裂なし、HIC 亀裂感度比 (CSR) < 2%。

レポート: 環境条件、試験片の寸法、テスト結果が含まれます。

6 アプリケーションノート

温度の影響: > 60°C では SSC のリスクは減少しますが、HIC は増加する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応力制御: 動作応力は材料の降伏強度の 90% を超えてはなりません。
メンテナンス: H_2S 濃度の蓄積を防ぐため、定期的に機器を点検してください。

7 文書化要件

材料証明書: 化学組成、熱処理、硬度データを提供します。
環境データ: H_2S 分圧、pH、塩化物含有量を記録します。
テストレポート: SSC/HIC テスト結果と適合宣言が含まれます。

8 付録（参考）

付録 A: 代表的な材料の例
炭素鋼 (API 5L X52): 硬度 18 HRC、 H_2S 分圧 0.1 kPa、SSC 認定。
304 ステンレス鋼: H_2S 分圧 1.0 kPa、不動態化処理が必要です。
インコネル 625: H_2S 分圧 10 kPa、優れた HIC 耐性。

説明する

関連規格との関係: ISO 15156-1 は、一般原則として、ISO 15156-2 および ISO 15156-3 と完全なシステムを形成し、これらが一緒に NACE MR0175 に取って代わります。
有効期間: ISO 15156-1:2020 は 2023 年 11 月 30 日に有効であることが確認されており、石油およびガス業界のニーズに基づいて将来更新される可能性があります。
入手先: 標準テキストは、ISO 公式 Web サイトから購入できます。
注意: 実施する場合には、具体的な機器の設計や動作条件に基づいて専門の技術者に相談する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

国際規格

ISO 15156-2:2020 石油、石油化学および天然ガス産業

— 石油・ガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料

石油、石油化学、天然ガス産業における鋳鉄の使用

— 石油・ガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料

— パート 2: 割れに強い炭素鋼、低合金鋼、鋳鉄の使用

概要

ISO 15156-2:2020 は、国際標準化機構（ISO）が策定した「石油、石油化学、天然ガス産業 - 石油・ガス生産における H₂S 含有環境用材料 - パート 2: 耐割れ性炭素鋼、低合金鋼、鋳鉄の使用」という規格です。この規格は 2020 年 11 月 30 日に発行され、ISO 15156-2:2015 版に代わるものです。ISO 15156 は、ISO/TC 67（石油・天然ガス産業用材料、機器、海洋構造物）によって策定され、硫化物応力割れ（SSC）や水素誘起割れ（HIC）などの故障を防止するために、硫化水素（H₂S）環境で使用する炭素鋼、低合金鋼、鋳鉄材料の選定に関する具体的な技術要件を提供することを目的とした、複数部構成（全 3 部）の規格です。この規格は、石油およびガス生産におけるパイプライン、バルブ、圧力容器などの機器に適用されます。

1 範囲

適用対象:石油、石油化学、天然ガス産業の H₂S 環境で使用される炭素鋼、低合金鋼、鋳鉄材料、およびその溶接部や熱影響部に適しています。

環境での耐亀裂性を確保するための材料選択、製造、熱処理の要件を指定します。

該当なし: 耐腐食合金（CRA、ISO 15156-3 を参照）または石油およびガス生産以外の環境は含まれません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 15156-1:2020 H₂S 含有環境向け材料 — パート 1: 耐ひび割れ性材料の選択に関する一般原則

NACE TM0177-2016 H₂S 環境における硫化物応力割れに対する金属の耐性試験

NACE TM0284-2016 パイプラインおよび圧力容器用鋼の水素誘起割れに対する耐性評価

3 用語と定義

この規格には、次の用語と定義が適用されます（ISO 15156-1:2020 で参照）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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 硫化物応力割れ (SSC)

H₂S を含む環境での水素の侵入と応力によって引き起こされる脆性割れ

。 3.2 水素誘起割れ (HIC)

H₂S を含む環境下で金属内に水素が蓄積することにより発生する層状の亀裂または段状の亀裂

。 3.3 硬度

材料のへこみに対する抵抗力。通常はロックウェル硬度 (HRC) で表されます。

3.4 熱影響部 (HAZ)

溶接中に熱の影響を受ける母材の領域。硬化して SSC のリスクが高まる可能性があります。

4. 材料要件

4.1 化学組成

炭素当量 (CE): $CE \leq 0.43\%$ (IIW 式: $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$)。

硫黄含有量: $S \leq 0.002\%$ (質量分率)、HIC 感受性を低減します。

リン含有量: $P \leq 0.02\%$ (質量分率)。

4.2 硬度の制限

ベース材質: 最大硬度 ≤ 22 HRC (約 250 HV)、ISO 6508 に従って測定。

溶接部および HAZ: 最大硬度 ≤ 23 HRC。

鑄鉄: 特に検証されない限りは推奨されません。

4.3 熱処理

焼きなましまたは焼鈍: 溶接または圧延の応力を軽減します。

焼き戻し: 温度 $\geq 620^\circ\text{C}$ 、硬度を下げるために 250°C 未満まで冷却します。

4.4 製造工程

鍛造または圧延: 過度の冷却や応力の集中を避けてください。

溶接: 低水素電極を使用し、予熱温度を $100 \sim 200^\circ\text{C}$ (厚さによって異なります) にします。

5 環境制限

この規格に準拠するには、ISO 15156-1 に従って評価された H₂S 分圧: > 0.05 kPa が必要です。

pH 値: $\text{pH} < 3.5$ では SSC のリスクが増大するため、特別な材料または保護が必要になります。

塩化物含有量: $> 50,000$ mg/L HIC 感度を考慮する必要があります。

6 パフォーマンス検証

6.1 硫化物応力割れ (SSC) 試験

方法: NACE TM0177 方法 A (引張試験) または方法 C (C リング試験)。

条件: 溶液 A (0.5% 酢酸 + 5% NaCl、pH 2.7-3.0)、H₂S 分圧 0.1 kPa。

合格基準: 目に見える亀裂がないこと、破断強度が降伏強度の 85% 以上であること。

6.2 水素誘起割れ (HIC) 試験

方法: NACE TM0284。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

条件: 溶液 B (5% NaCl + 0.5% 醋酸、飽和 H₂S)、暴露時間 96 時間。

受け入れ基準:

亀裂感度比 (CSR) < 2%。

亀裂長さ比 (CLR) < 15%。

ひび割れ厚さ比 (CTR) < 5%。

6.3 報告

試験条件、試験片の寸法、亀裂検出結果が含まれます。

7 アプリケーションノート

温度の影響: >60°C では SSC のリスクは減少しますが、HIC は増加する可能性があります。

応力制御: 動作応力は材料の降伏強度の 80% を超えてはなりません。

コーティング: 二次保護として使用できますが、コーティングの完全性を検証する必要があります。

8 文書化要件

材料証明書: 化学組成、硬度、熱処理データを提供します。

環境データ: H₂S 分圧、pH、塩化物含有量を記録します。

テスト レポート: SSC および HIC テスト結果とコンプライアンス宣言が含まれます。

付録 (参考)

付録 A: 代表的な材料の例

API 5L X65: 硬度 20 HRC、H₂S 分圧 0.2 kPa、SSC および HIC 認定。

AISI 4130: 硬度 22 HRC、焼き戻しが必要、H₂S 分圧 0.5 kPa。

ねずみ鋳鉄: 特に検証されない限りは推奨されません。

説明する

関連規格との関係: ISO 15156-2 は、ISO 15156 シリーズの中核部分として、ISO 15156-1 (一般原則) および ISO 15156-3 (耐腐食合金) とともに NACE MR0175 に代わるものです。

有効期間: ISO 15156-2:2020 は 2023 年 11 月 30 日に有効であることが確認されており、石油およびガス業界のニーズに基づいて将来更新される可能性があります。

入手先: 標準テキストは、ISO 公式 Web サイトから購入できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

国際規格

ISO 15156-3:2020 石油、石油化学および天然ガス産業

- 石油・ガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料
- パート 3: 耐割れ性 CRA（耐食合金）およびその他の合金石油、石油化学および天然ガス産業
- 石油・ガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料
- パート 3: 耐食合金（CRA）およびその他の耐割れ性合金

概要

ISO 15156-3:2020 は、国際標準化機構（ISO）が策定した「石油、石油化学、天然ガス産業 - 石油・ガス生産における H₂S 含有環境用材料 - パート 3: 耐食合金（CRA）およびその他の耐割れ合金」という規格です。この規格は 2020 年 11 月 30 日に発行され、ISO 15156-3:2015 版に代わるものです。ISO 15156 は、ISO/TC 67（石油・天然ガス産業用材料、機器、海洋構造物）によって策定され、硫化水素（H₂S）を含む環境における耐食合金（CRA）およびその他の合金（ステンレス鋼やニッケル基合金など）に対する、硫化物応力割れ（SSC）や応力腐食割れ（SCC）などの破損を防止するための具体的な技術要件を規定することを目的とした、複数部構成（全 3 部）の規格です。この規格は、深井戸や海底設備など、石油・ガス生産における腐食性の高い環境に適用されます。

1 範囲

適用対象: オーステナイト系ステンレス鋼、二相ステンレス鋼、ニッケル基合金、およびそれらの溶接部を含む、石油、石油化学、天然ガス産業の H₂S 環境で使用する耐食合金（CRA）およびその他の合金に適しています。

目的: 酸性の H₂S 含有環境での耐亀裂性を確保するための材料の選択、製造、検証の要件を指定します。

該当なし: 炭素鋼および低合金鋼 (ISO 15156-2 を参照) または石油およびガス生産以外の環境は含まれません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 15156-1:2020 H₂S 含有環境向け材料 — パート 1: 耐ひび割れ性材料の選択に関する一般原則

NACE TM0177-2016 H₂S 環境における硫化物応力割れに対する金属の耐性試験

NACE TM0198-2016 酸性油田における応力腐食割れに対する耐食合金のスクリーニング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

のための低ひずみ速度試験方法

3 用語と定義

この規格には、次の用語と定義が適用されます（ISO 15156-1:2020 で参照）

。 3.1 硫化物応力割れ（SSC）

H₂S 環境での水素の侵入と応力によって引き起こされる脆性割れ

。 3.2 応力腐食割れ（SCC）

特定の環境下で応力と腐食の相乗効果によって発生する割れ。

3.3 耐食合金（CRA）

オーステナイト系ステンレス鋼、二相ステンレス鋼、ニッケル基合金などの耐食性に優れた合金。

3.4 PREN（孔食抵抗当量数）

合金の孔食に対する耐性を測定するパラメータ。 $PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$ 。

4. 材料要件

4.1 化学組成

オーステナイト系ステンレス鋼: 304L、316L、 $PREN \geq 32$ など。

二相ステンレス鋼: 2205 など、 $PREN \geq 35$ 、フェライト含有量 35-65%。

ニッケル基合金: インコネル 625、ハステロイ C276、 $Ni \geq 40\%$ など。

制限: 粒界腐食を避けるため、炭素含有量 $C \leq 0.03\%$ 。

4.2 硬度の制限

ベース材質: 最大硬度 ≤ 40 HRC (合金の種類によって異なります)、ISO 6508 に従って測定。

溶接部および HAZ: 最大硬度 ≤ 40 HRC、熱処理が必要。

特別な要件: 高強度 CRA (降伏強度 > 550 MPa) は検証が必要です。

4.3 熱処理

溶体化処理: 温度 $1000 \sim 1150^{\circ}\text{C}$ (合金により異なる)、 100°C 未満まで水冷。

安定化処理: 321 鋼などでは、鋭敏化を防ぐために $650 \sim 700^{\circ}\text{C}$ で焼きなまし処理します。

4.4 製造工程

鍛造または圧延: 応力集中を避け、表面欠陥は 0.1 mm 以下。

溶接: 適合する溶接金属を使用し、厚さに応じて $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ に予熱します。

5 環境制限

H₂S 分圧: > 0.05 kPa の場合はこの規格への準拠が必要であり、 > 10 kPa の場合は高性能 CRA が必要です。

pH 値: $\text{pH} < 2.0$ では SCC のリスクが増大し、特殊な合金が必要になります。

塩化物含有量: $> 150,000$ mg/L には高 PREN 材料が必要です。

6 パフォーマンス検証

6.1 硫化物応力割れ（SSC）試験

方法: NACE TM0177 方法 A (引張試験) または方法 D (ダブルカンチレバービーム試験)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

条件: 溶液 A (0.5% 醋酸 + 5% NaCl、pH 2.7-3.0)、H₂S 分压 0.1 kPa。

合格基準: 目に見える亀裂がないこと、破断強度が降伏強度の 90% 以上であること。

6.2 応力腐食割れ (SCC) 試験

方法: NACE TM0198 (低速ひずみ速度試験、SSRT)。

条件: 5% NaCl + 0.5% 醋酸、H₂S 分压 1.0 kPa、伸長 $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

合格基準: 亀裂なし、破断時の伸び $\geq 10\%$ 。

6.3 報告

試験条件、試験片の寸法、亀裂検出結果が含まれます。

7 アプリケーションノート

温度の影響: $> 100^\circ\text{C}$ では SCC リスクが増大し、高 Ni 合金が必要になります。

応力制御: 動作応力は材料の降伏強度の 80% を超えてはなりません。

表面処理: 孔食腐食のリスクを軽減するための研磨または不動態化。

8 文書化要件

材料証明書: 化学組成、硬度、熱処理データを提供します。

環境データ: H₂S 分压、pH、塩化物含有量を記録します。

テスト レポート: SSC および SCC テスト結果とコンプライアンス宣言が含まれます。

付録 (参考)

付録 A: 代表的な材料の例

316L ステンレス鋼: PREN 32、H₂S 分压 0.5 kPa、SSC 認定。

2205 デュプレックス鋼: PREN 35、H₂S 分压 2.0 kPa、優れた SCC 耐性。

インコネル 625: Ni 58%、H₂S 分压 10 kPa、優れた HIC および SCC 耐性。

説明する

関連規格との関係: ISO 15156-3 は ISO 15156 シリーズの一部であり、ISO 15156-1 (一般原則) および ISO 15156-2 (炭素鋼および低合金鋼) とともに NACE MR0175 に代わるものです。

有効期間: ISO 15156-3:2020 は 2023 年 11 月 30 日に有効であることが確認されており、石油およびガス業界のニーズに基づいて将来更新される可能性があります。

入手先: 標準テキストは、ISO 公式 Web サイトから購入できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

炭化物高温金型

超硬合金製高温金型は、炭化タングステン（WC）を母材（8894 重量%）とし、Co（610 重量%）または Ni（612 重量%）を結合相として粉末冶金（ボールミル、CIP、HIP 焼結）で製造されます。高硬度（1800～2200HV）、耐摩耗性（摩耗量<0.03mm³/h、ASTM G65）、耐腐食性（<0.01mm/y、pH 212、HCl、SO₄²⁻含有）および優れた耐高温性（>1000℃、耐酸化性）を備えています。表面には PVD/CVD コーティング（TiAlN など）が施されています。AlCrN、CrN、25μm、摩擦係数<0.15）を採用し、高温耐摩耗性と耐凝着性を向上させています。この金型は、熱間鍛造、ダイカスト、ガラス成形、粉末冶金などの高温成形（600～1200℃）に使用され、高応力（100～500MPa）、高温酸化、周期的な熱衝撃（ΔT 500～800℃）に耐えます。従来の金型鋼（H13、400～600HV）と比較して、耐用年数は 35 倍長く、表面粗さは Ra 0.1～0.3μm です。

この記事では、標準規格（GB/T 7997、ASTM G65、NACE MR0175）に基づいて、セメント炭化物高温金型の技術、性能、アプリケーション、最適化に関する提案を示します。

超硬合金製高温金型の特性

1.1 超硬合金高温金型材料の組成

超硬合金高温金型基材:

WC: 88 - 94 wt %、超微粒子（D50 0.2～0.5 μm）、硬度 1800 - 2200 HV。

Co: 610wt %、高靱性(KIC 1520 MPa·m^{1/2})、耐摩耗性が 10%向上。

Ni: 612 wt %（オプション）、耐腐食性（HCl、SO₄²⁻<0.01 mm/y）、耐衝撃性（KIC 1215 MPa·m^{1/2}）。

添加剤: Cr3C2 (0.3～0.6 wt %) は粒成長を抑制し、硬度を 6%向上させます。TaC (0.1～0.3 wt %) は耐酸化性を 10%向上させます。

超硬合金高温金型コーティング:

TiAlN (PVD/CVD): 硬度 2800 - 3200 HV、耐熱性 1050℃、高温耐摩耗性。

AlCrN (PVD): 硬度 3000 - 3400 HV、耐熱性 1100℃、耐酸化性。

CrN (PVD): 硬度 2000～2400 HV、耐熱性 1000℃、耐凝着性。

傾斜構造: 表面は Co/Ni が低く（68 重量%）、中心部は Co/Ni が高く（1012 重量%）、耐摩耗性が 25%、耐亀裂性が 20%向上します。

1.2 超硬合金製高温金型の性能パラメータ

硬度: 1800～2200 HV（GB/T 79972017）。

曲げ強度: 2.0～2.8 GPa（GB/T 38512015）。

破壊靱性: 1220 MPa·m^{1/2}（Co 基 1520、Ni 基 1215）。

耐摩耗性: 摩耗速度<0.03 mm³/h（ASTM G65）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

耐食性: pH 212、 $<0.01 \text{ mm/y}$ (NACE MR0175)。
耐高温性: $>1000^{\circ}\text{C}$ 、耐酸化性 ($<0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、1000 時間)。
熱衝擊: $>10^5$ 回 ($\Delta T 500 - 800^{\circ}\text{C}$ 、ISO 17879)。
摩擦係数: <0.15 (コーティング)、付着防止性が 30% 向上。
さ: $Ra 0.10.3 \mu\text{m}$ 、型抜き効率が 15% 向上しました。

1.3 超硬合金製高温金型の利点

耐摩耗性が高い: 超微粒子 WC+ コーティングにより、寿命が 35 倍に延長され、金型メンテナンスが 30% 削減されます。
耐高温性: TiAlN / AlCrN コーティング、酸化防止、高温成形 ($600 \sim 1200^{\circ}\text{C}$) に適しています。
耐食性: Ni ベースの金型は酸やアルカリに耐性があり、腐食性材料 (熔融ガラスなど) に適しています。
熱安定性: 熱亀裂に対する耐性、周期的熱衝撃性能は H13 鋼より優れています (寿命が 4 倍増加)。
効率: 低摩擦コーティング、型離れ力が 20% 減少、成形品質が 10% 向上。

超硬合金高温金型の製造工程

2.1 粉末の調製

原材料: WC ($D_{50} 0.20.5 \mu\text{m}$ 、純度 $>99.95\%$)、Co/Ni ($D_{50} 12 \mu\text{m}$)、 $\text{Cr}_3\text{C}_2 / \text{TaC}$ ($D_{50} 0.51 \mu\text{m}$)。
ボールミル処理: 遊星ボールミル (ZrO_2 ボール、12: 1)、350 rpm、1822 時間、粒子サイズ偏差 $<\pm 0.05 \mu\text{m}$ 、均一性 $>98\%$ 。

2.2 形成

方法: 冷間等方圧成形 (CIP) または精密成形。
パラメータ: $300 \sim 350 \text{ MPa}$ 、保持圧力 90 秒、チタン合金型 (偏差 $<\pm 0.03 \text{ mm}$)、ピレット密度 $9.010.5 \text{ g/cm}^3$ 。
結果: 寸法偏差 $<\pm 0.05 \text{ mm}$ 、亀裂率 $<0.5\%$ 。

2.3 焼結

方法: 真空焼結 + HIP。
パラメータ:
脱蠟: $200 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 、 2°C/分 、 H_2 雰囲気 ($\text{O}_2 < 3 \text{ ppm}$)、 10^{-3} Pa 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

焼結: 1400~1450°C、 10^{-5} ~ 10^{-6} Pa、2.53 時間。

HIP: 1400°C、150MPa (Ar)、1.52 時間。

結果: 密度 15.015.2 g/cm³、多孔度 <0.0005%、硬度 1800 - 2200 HV。

2.4 精密機械加工

研削: 5 軸 CNC 研削盤、CBN 研削ホイール (24μm)、4000rpm、送り 0.005~0.02mm/パス、幾何偏差<±0.01mm、Ra0.1 ~ 0.3μm。

EDM: 放電加工、キャビティ/穴(Ø 0.55 mm)、偏差 <±0.005 mm。

研磨: ダイヤモンド研磨ペースト (0.51 μm)、1000 rpm、Ra<0.1 μm、抗付着性が 25% 向上。

2.5 コーティング

方法: PVD/CVD (Cr/Al/Ti ターゲット、>99.99%)。

パラメータ: TiAlN / AlCrN / CrN (25 μm)、 10^{-5} Pa、250~450°C、バイアス 100 V、堆積速度 11.5 μm/h。

結果: 接着力 >100 N、摩擦係数 <0.15、耐熱性 1000 - 1100°C。

2.6 検出

微細構造: SEM (粒度 0.2~ 0.5μm)、EBSD (粒界応力<3%)。

性能: 硬度偏差 <±40 HV (ISO 6508)、摩耗 <0.03 mm³/h、耐腐食性 (pH 212、<0.01 mm/y)。

ジオメトリ: CMM (偏差 <± 0.005 mm)、レーザー スキャン (キャビティ偏差 <± 0.003 mm)。

非破壊検査: X 線 (内部欠陥 <0.01 mm)、超音波 (亀裂 <0.005 mm)。

高温テスト: 熱衝撃 (ΔT 800°C、>10⁵ 回)、耐酸化性 (<0.01 mg/cm²、1000 時間)。

超硬合金高温金型の応用シナリオ

セメント炭化物製高温金型は、さまざまな成形プロセスに対してプロセス、テスト、および選択の提案を提供します。

3.1 硬質合金高温金型熱間鍛造金型 (自動車クランクシャフト)

作業条件: ピレット (42CrMo)、1000 ~ 1200°C、300 MPa、周期的熱衝撃 (ΔT 800°C)。

タイプ: 鍛造金型(キャビティ 100×50mm)。

材質: WC10%Co (D50 0.2~0.5 μm、Cr3C2 0.5 wt %、TaC 0.3 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: AlCrN (5μm、硬度 3400HV、摩擦 0.15、耐熱性 1100°C)。

形状: キャビティ半径 R2 mm、Ra<0.2 μm、偏差<±0.01 mm。

プロセス: ボールミル処理 22 時間、CIP 350 MPa、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

研削、PVD AlCrN (450°C)。

パラメータ: 温度 1100°C、圧力 300 MPa、サイクル 5000 回。

テスト:

寿命: 10,000 回 (H13 鋼は 2,000 回、5 倍長い)。

摩耗率: $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐酸化性 $<0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 。

熱亀裂: 亀裂なし ($\Delta T 800^\circ\text{C}$ 、5000 回)。

離型力: 20% 低減、成形精度 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。

選択: WCCo+ AlCrN、高温、高応力、通常の NDT に適しています。

利点: 高温耐摩耗性、耐熱亀裂性、成形効率 15% 向上。

3.2 硬質合金高温ダイカスト金型（アルミニウム合金）

作業条件: アルミニウム溶融塩 (AlSi)、700~800°C、150 MPa、周期的熱衝撃 ($\Delta T 500^\circ\text{C}$)。

種類: ダイカスト金型 (キャビティ $200 \times 100 \text{ mm}$)。

材質: WC8%Co (D50 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.5 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: TiAlN ($4 \mu\text{m}$ 、硬度 3200HV、摩擦 0.12、耐熱性 1050°C)。

形状: キャビティ傾斜 1° 、Ra $<0.1 \mu\text{m}$ 、偏差 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 。

プロセス: ボールミル処理 20 時間、CIP 350 MPa、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削、PVD TiAlN (400°C)。

パラメータ: 温度 750°C 、圧力 150 MPa、サイクル 10000 回。

テスト:

寿命: 50,000 回 (H13 鋼は 10,000 回、5 倍長い)。

摩耗率: $<0.02 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、付着防止性が 25% 向上。

熱亀裂: 亀裂なし ($\Delta T 500^\circ\text{C}$ 、10000 回)。

表面品質: Ra $0.2 \mu\text{m}$ 、鑄造精度 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 。

選択: WCCo+ TiAlN、高温溶解、定期的な洗浄に適しています。

利点: 付着防止、金型寿命の延長、鑄造品質の 10% 向上。

3.3 硬質合金高温金型ガラス成形金型（光学レンズ）

作業条件: ガラス溶融物 (SiO_2)、1000 - 1100°C 、50 MPa、腐食性 (pH 24)。

デザイン

タイプ: ダイキャスト ($\varnothing 50 \text{ mm}$ 、曲面)。

材質: WC10%Ni (D50 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、Cr3C2 0.6 wt %)、硬度 2000~2200 HV。

コーティング: CrN ($4 \mu\text{m}$ 、硬度 2400HV、摩擦 0.15、耐熱性 1000°C)。

形状: 表面偏差 $\pm 0.003 \text{ mm}$ 、Ra $<0.1 \mu\text{m}$ 。

プロセス: ボールミル処理 22 時間、CIP 350 MPa、HIP 1400°C (150 MPa、2 時間)、5 軸研削、PVD CrN (300°C)。

パラメータ: 温度 1050°C 、圧力 50 MPa、サイクル 2000 回。

テスト:

寿命: 8000 回 (H13 鋼 1500 回、5.3 倍長い)。

摩耗損失: $<0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 、耐腐食性 $<0.01 \text{ mm}/\text{y}$ 。

付着防止性: ガラス残留率 $<1\%$ 、表面 Ra $0.1 \mu\text{m}$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

精度: レンズ曲率偏差 $<\pm 0.002\text{ mm}$ 。

タイプを選択: WCNi+ CrN 。腐食性の高温および定期的な洗浄に適しています。

利点: 耐腐食性、非粘着性、高い成形精度。

超硬合金製高温金型の性能比較

パラメータ	超硬合金 (WCCo /Ni)	金型鋼 (H13)	セラミック型
硬度 (HV)	1800 年 - 2200 年	400~600	1200~1500 年
曲げ強度 (GPa)	2.02.8	1.52.0	0.51.0
靱性 (KIC、 MPa·m ^{1/2})	1220	2030	35
耐摩耗性 (mm ³ /h)	<0.03	0.10.3	0.05 - 0.1
耐食性 (mm/y、pH 212)	<0.01	0.050.1	0.01~0.03
耐熱性 (°C)	>1000	600~800	1200~1500 年
熱衝撃 (ΔT 800°C)	10 ⁵ 回以上	10 ³ - 10 ⁴ 回	10 ² - 10 ³ 倍
寿命倍数 (H13 と比較)	35	1	1.52
摩擦係数 (コーティング)	<0.15	0.3~0.5	0.2~0.4

超硬合金製高温金型:

耐高温性: TiAlN / AlCrN コーティング、酸化防止、1200°C 成形に適しています。

耐摩耗性: 超微粒子 WC、摩耗 <0.03 mm³/h、寿命が 35 倍に増加。

耐食性: Ni ベース + CrN 、ガラス溶融腐食に対する耐性があり、H13 鋼よりも優れています。

熱安定性: 熱亀裂および周期的熱衝撃に対する耐性はセラミック金型よりも優れています。

超硬合金製高温金型の最適化提案

材料の選択:

熱間鍛造: WC10%Co+AlCrN、高温耐摩耗性が 15%向上。

ダイカスト: WC8%Co+TiAlN、耐凝着性が 25%向上。

ガラス成形: WC10%Ni+CrN、耐食性が 20%向上。

添加剤: Cr3C2 0.6 wt %、 TaC 0.3 wt %、硬度が 6%増加。

プロセス最適化:

焼結: HIP 1400°C、150 MPa、気孔率 <0.0005%、耐摩耗性が 20%向上。

研削: 5 軸 CNC、CBN 研削ホイール (24μm) 、偏差<± 0.01mm、Ra < 0.1μm 。

コーティング:

TiAlN (4μm 、 400°C)、高温耐性が 15%向上。

AlCrN (5μm 、 450 °C)、耐酸化性が 20%向上。

CrN (4μm 、 300°C)、抗癒着性が 25%向上。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

EDM: キャピティ偏差 $< \pm 0.003 \text{ mm}$ 、精度が 5% 向上。

機器の最適化:

焼結炉: 温度制御 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、 10^{-6} Pa 。

5 軸 CNC: 偏差 $< \pm 0.005 \text{ mm}$ 。

コーティング装置: 堆積速度 $11.5 \mu\text{m/h}$ 、偏差 $< \pm 0.05 \mu\text{m}$ 。

作業条件の適応:

熱間鍛造: $\text{WCCo} + \text{AlCrN}$ 、 $1000 - 1200^\circ\text{C}$ 、 $300 - 500 \text{ MPa}$ 。

ダイカスト: $\text{WCCo} + \text{TiAlN}$ 、 $700 - 800^\circ\text{C}$ 、 $100 - 200 \text{ MPa}$ 。

ガラス成形: $\text{WCNi} + \text{CrN}$ 、 $1000 - 1100^\circ\text{C}$ 、 $50 - 100 \text{ MPa}$ 。

テストと検証:

微細構造: SEM (粒度 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$)、EBSD (粒界応力 $< 3\%$)。

性能: ASTM G65 ($< 0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 ($\text{pH } 2$ 、 $< 0.01 \text{ mm/y}$)、耐熱性 ($> 1000^\circ\text{C}$ 、 $< 0.01 \text{ mg/cm}^2$)。

ジオメトリ: CMM (偏差 $< \pm 0.005 \text{ mm}$)、レーザー スキャン (キャピティ偏差 $< \pm 0.003 \text{ mm}$)。

高温テスト: 熱衝撃 ($\Delta T 800^\circ\text{C}$ 、 $> 10^5$ 回)、抗酸化 (1000 時間)。

規格と仕様

GB/T 183762014: 多孔度 $< 0.01\%$ 。

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

GB/T 38512015: 強度 $2.0 - 2.8 \text{ GPa}$ 。

GB/T 7997-2017: 硬度 $1800 - 2200 \text{ HV}$ 。

ASTM G65: 摩耗率 $< 0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。

NACE MR0175: 硫化物応力割れに対する耐性。

ISO 6508: 硬度偏差 $< \pm 40 \text{ HV}$ 。

ISO 17879: 熱衝撃試験。

結論は

超微粒子 WC ($0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$)、Co/Ni 結合相 ($6 \sim 12$ 重量%)、PVD/CVD コーティング (TiAlN / AlCrN / CrN 、 $25 \mu\text{m}$) を最適化することで、超硬合金製高温金型は高硬度 ($1800 \sim 2200 \text{ HV}$)、耐摩耗性 ($< 0.03 \text{ mm}^3/\text{h}$)、耐腐食性 ($\text{pH } 2 \sim 12$ 、 $< 0.01 \text{ mm/y}$)、耐高温性 ($> 1000^\circ\text{C}$) を実現します。この金型は、熱間鍛造 (鋼ピレット)、ダイカスト (アルミニウム合金)、ガラス成形 (光学レンズ) に適しています。耐用年数は 35 倍、 $\text{Ra } 0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 、成形効率は $10 \sim 15\%$ 向上します。粒径、コーティングの厚さ、EDM 精度を最適化することでコストを削減できます (1 個あたり $5,000 \sim 20,000$ 元)。課題は高精度加工 (コスト増加率 15%) と高温熱衝撃試験 (サイクル $> 10^5$ 回) にあります。

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

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:

CTIA グループ
超硬ペーパーカッター

1. 概要

CTIA GROUP は、超硬合金工業用切削工具の開発、設計、製造を行い、お客様に合わせて完成品をカスタマイズしています。CTIA GROUP の超硬ペーパーカッターは、刃の材質にタングステンベースの超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）を使用し、紙、段ボール、フィルム、アルミホイルなどの精密切断に特化しています。高硬度（HV1600～2000）、優れた耐摩耗性、高温安定性（600～800℃で強度を維持）により、高速連続切断性能を確保し、印刷、包装、製紙、文具業界で広く使用され、高精度（許容誤差<0.01mm）で高品質の表面切断のニーズに応えています。

Co., Ltd. は、独自の利点と数十年にわたる経験を備えた中国の超硬合金切削工具のカスタマイズメーカーとして、業界の先進的な設計および製造プロセスをインテリジェントテクノロジーと統合し、世界中の顧客に高性能の紙切削工具を提供し、印刷および包装業界のグリーンで効率的な発展に貢献しています。

2. 材料と製造

2.1 材料構成

主な成分

ブレードはタングステンカーバイド（WC、82～92%）とバインダー（Co、6～12%、Ni、0～5%）の複合材料で作られており、耐摩耗性を高めるために微量の TiC （0.5～2%）と TaC （0.3～1%）が添加されています。

WC-8Co: Co 含有量が 8% で韌性が高く、普通紙や段ボールの高速切断に適しています。
WC-6Co-Ni: Co 含有量は 6%、Ni 含有量は 2% で、耐腐食性があり、湿気の多い環境や特殊紙(銀行用紙など)に適しています。

超微粒子

WC 粒子サイズは 0.4～1.2μm で、硬度は HV1900 まで増加し、耐欠け性が 30% 向上します。

利点

高炭素鋼と比較すると、超硬ペーパーカッターは硬度が 3 倍、耐摩耗性が 5 倍優れています。また、セラミックカッターと比較すると、弾力性が高く、耐衝撃性が 50% 優れています。

2.2 製造工程

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

粉末冶金：

材料

高純度 WC (純度>99.9%) と Co の粉末をボールミルで 24 時間混合し、均一性 (粒子分布偏差 <5%) を確保しました。

抑制する

400 MPa の等方加圧成形によりピレット密度は 95% を超え、焼結欠陥が減少します。

焼結

真空焼結炉で水素保護下で $1400\pm 10^{\circ}\text{C}$ で 2 時間焼結すると、硬度は HV1800~1900 に達し、気孔率は<0.1%になります。

精密研削：

CNC 5 軸グラインダーとダイヤモンド研削ホイールを使用して、刃を鋭さ<2 μm 、真直度<0.005mm、表面粗さ Ra<0.08 μm に加工します。

刃の角度（片側 15~25°、両側 30~45°）により、バリのないスムーズな切断が保証されます。

コーティング技術：

PVD コーティング

TiN および TiAlN コーティングは、厚さ 1.5~3 μm 、堆積温度 400~500 $^{\circ}\text{C}$ 、硬度 HV2800、

摩擦係数 0.2~0.3、耐摩耗性 60%向上で使用されます。

DLC コーティング

一部の高級切削工具には、厚さ 1 ~ 2 μm 、摩擦係数が 0.1 と低く、寿命が 100% 延長されたダイヤモンドライクコーティング (DLC) が採用されており、高仕上げの切削に適しています。

品質管理

切削工具の各バッチは、ISO 9001 および ISO 14001 規格に準拠して、X 線蛍光 (XRF) による組成の検査と、顕微鏡による刃先の欠陥の検査が行われます。

3. 中国タングステンインテリジェントカーバイドペーパーカッターの仕様

CTIA GROUP の超硬ペーパーカッターは、様々な切断機器や材料のニーズに応えるため、幅広い仕様を取り揃えています。主な仕様表は以下の通りです。

タイプ	寸法 (mm)	ブレード角度 度	適切な厚さ 度 mm	適用可能な材料	対象デバイス
ストレート エッジペー パーカッター	500×80×10~1500×120×15	片側 15~20°	0.1~8	コート紙、新聞用紙、段ボール	ローラー、ヴォーレンベルグ、パーフェクタ
円形ペーパー	直径 50~300、厚さ 2~10	両側 30~40°	0.05~5	フィルム、アルミホイ	スリッター、コイル切断機

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ーカッター				ル、ロール紙	
歯付きペーパーカッター	300×50×5～800×80×8	片側 20～25°	0.1～3	ラベル用紙、スタンプ用紙、パンチ紙	ダイカッティングマシン、ラベルカッティングマシン
カスタムペーパーカッター	お客様のニーズに合わせて（最大 2000×150×20）	15～45°調整可能	0.05～10	銀行用紙、複合材料、特殊フィルム	カスタマイズされた機器（例：ハイデルベルグ、ミュラー）

許容範囲

長さ/幅±0.02mm、厚さ±0.01mm、刃先真直度<0.005mm。

カスタマイズ

標準以外のサイズやブレード形状（ベベル、波型ブレードなど）をサポートし、納期は 7 ～ 14 日です。

パッケージ

ナイフには、リサイクルが容易で環境に優しい製造基準に準拠したマイクロスマートハードボックス（サイズ 15×10×5cm、RFID および QR コード内蔵）が装備されています。

超硬ペーパーカッターの種類と用途

ストレートエッジペーパーカッター

平らなシートの切断に使用され、切断厚さは 0.1 ～ 8 mm、精度は <0.01 mm で、印刷工場でのコート紙、新聞用紙、段ボールの切断に適しており、Polar、Wohlenberg などの機器と互換性があります。

円形ペーパーカッター

コイルのスリット加工に使用され、速度は 200m/分以上、包装フィルム、アルミホイル、ロール紙のスリット加工に適しており、許容誤差は 5µm 未満、高速生産ラインで広く使用されています。

歯付きペーパーカッター

打ち抜き加工や鋸歯状切断に使用し、切断面の平坦性が 30% 向上し、ラベル用紙やスタンプ用紙の加工に適しており、打ち抜き機にも使用されます。

カスタムペーパーカッター

TiAlN ベベルカッターなど、特殊な材料（銀行用紙や複合材料など）に合わせて設計されており、耐用年数が 25% 延長されます。

超硬ペーパーカッターの応用事例

CTIA GROUP ストレートエッジペーパーカッター（1000×100×12mm、TiN コーティング）は、Polar 115 ペーパートリマーで A4 コート紙（70g/m²）をカットするために使用され、年間生産量は 2 億枚、ツール寿命は 60 万回、ツール交換頻度は 60% 削減、カットコストは 30% 削減されました。

BOPP フィルムスリット加工用円形ペーパーカッター（直径 200 x 厚さ 5 mm、DLC コーティング）、速度 250 m/分、許容誤差<3 µm、年間生産量 5000 万メートル、工具寿命 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

万メートル、顧客満足度 35%向上。

歯付き紙カッター（500×60×6mm、TiAlN コーティング）を使用し、0.008mm 未満の切断精度で年間 1 億枚の生産能力を実現しました。工具の耐久性は 40%向上し、スクラップ率は 50%削減されました。

5. 超硬ペーパーカッターの技術的特徴

高効率

切断速度は 50～200m/分、一回の切断厚さは 0.05～10mm で、生産効率は 40～60%向上します。

高精度

切断許容誤差は 0.01mm 未満、切断平滑度は Ra 0.15μm 未満で、ISO 9001 および印刷業界標準 (ISO 12647 など) に準拠しています。

耐久性

超硬工具の硬度は 62～65HRC、耐用年数は 50 万～100 万カット、工具交換頻度は 50%削減されます。

リサイクル性

廃棄された切削工具は、マイクロインテリジェントハードボックス（RFID と 5G データアップロード機能を内蔵）を通じてリサイクルされます。亜鉛溶解法や電気化学的手法と組み合わせることで、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。

CTIA GROUP の特徴

独自に開発された超微粒子超硬合金と DLC コーティング技術により、工具寿命が業界平均より 20%向上し、印刷・包装業界の高速要求に対応します（）。

6. 超硬ペーパーカッターのメンテナンスと再研磨

日常のメンテナンス

クリーン

切った後は、腐食を防ぐために無水エタノールで刃を拭いて紙くずや粘着物を取り除いてください。

店

中国タングステン製のカスタマイズされたツールボックス（耐衝撃フォームと防錆剤を含む）を使用して、乾燥した環境（湿度 < 60%）で保管してください。

診る

100,000 回の切断ごとにエッジの摩耗をチェックし（顕微鏡で 50 倍に拡大）、欠けがないことを確認します。

再研磨技術

再研磨サイクル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

摩耗深さが 0.1mm 未満であれば、工具は再研磨可能です。30 万～50 万切削ごとに再研磨することをお勧めします。

テクノロジー

加工にはダイヤモンド研削ホイール（粒度 D15）と CNC 研削盤を使用し、刃角誤差は 0.5° 未満、表面粗さは $Ra < 0.1\mu m$ です。

頻度

直刃の包丁は 3～5 回、丸刃の包丁は 2～4 回研ぐことができます。研ぎ直すと、性能は 90% まで回復し、コストは 40% 削減されます。

7. 超硬ペーパーカッターの開発動向

インテリジェント製造

デジタル ツイン テクノロジーを導入して、ツールの摩耗と切削性能をリアルタイムで監視し、メンテナンス サイクルを予測し、ダウンタイムを 20% 削減します。

AI と組み合わせてブレード角度（15～45°）とコーティングパラメータを最適化すると、切断効率が 25% 向上します（）。

グリーン製造

コバルト資源の消費量を削減し、環境への影響を 50% 削減するために、低 Co（<4%）セメントカーバイドを研究開発します。

マイクロインテリジェントハードボックスリサイクルシステムを推進します（中国の切削工具のグリーン製造トレンドを参照）。

超硬質コーティング

硬度 HV3500、耐摩耗性 70% 向上、耐用年数 2 倍向上のナノ多層コーティング（TiAlN / CrN、DLC / Si3N4 など）を開発。

コーティング堆積プロセスを最適化し（アーキオンプレーティング、堆積速度が 30% 増加）、生産コストを 15% 削減します。

カスタマイズとモジュール性

デジタル印刷用紙（HP Indigo 用紙など）および高強度複合材料用のブレードとコーティングにより、切断精度が 20% 向上します。交換可能なブレードなどのモジュール式ツール設計を推進し、設置時間を 50% 短縮し、在庫コストを 25% 削減します。

CTIA GROUP の超硬ペーパーカッターは、高硬度（HV1800～1900）、耐摩耗性、高精度（公差 < 0.01mm）を特長とし、印刷、包装、製紙業界における中核的な切削工具となっています。超微粒子超硬合金、DLC コーティング、マイクロインテリジェントハードボックスリサイクルシステムにより、工具寿命（50 万～100 万回）、効率（速度 200m/分）、環境性能（タングステン回収率 > 90%）が大幅に向上しています。印刷工場や包装生産ラインなど、多くのアプリケーションにおいて、優れたコスト効率（30～40% 削減）と顧客満足度（35% 向上）が実証されています。

CTIA GROUP は今後も、インテリジェント製造（デジタルツイン、AI 最適化）とグリーンリサイクル（低 Co 合金、イオン液体技術）を通じて超硬ペーパーカッターの研究、開発、設計を継続し、印刷・包装業界が環境に優しく効率的に発展し、世界市場での競争力

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を高められるよう支援していきます。


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 9227:2017

腐食試験

人工雰囲気での塩水噴霧試験

1 範囲

この規格は、金属材料およびその保護コーティング（超硬合金、亜鉛メッキ層、塗装鋼板など）の耐食性を評価するために、人工雰囲気中で塩水噴霧試験（NSS）、酢酸塩水噴霧試験（AASS）、および銅促進酢酸塩水噴霧試験（CASS）を実施するための試験方法を規定しています。これらの試験方法は、材料、部品、またはアセンブリの耐食性の比較に適用できますが、実際の環境におけるそれらの耐用年数を直接予測するものではありません。また、この規格は非金属材料の耐食性評価には適用されません。

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 1514:2016 塗料及びワニス - 試験用標準試験パネル

ISO 2808:2019 塗料及びワニス - 膜厚の測定

ISO 3574:2012 冷間圧延炭素鋼板及び鋼帯 - 仕様

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

この文書には次の用語と定義が適用されます。

塩水噴霧試験：制御された条件下で、塩溶液を噴霧装置を通して微細な液滴に分散させ、人工の腐食性雰囲気を形成して、材料の耐腐食性を評価します。

NSS（中性塩水噴霧試験）：中性塩水（pH 6.5～7.2）を使用して実施する塩水噴霧試験。

AASS（酢酸塩水噴霧試験）：中性塩水に酢酸を加え、pH を 3.1～3.3 に調整して行う塩水噴霧試験。

塩化物（ CuCl_2 ）を加えると、腐食試験が促進されます。

重量減少：テスト前後のサンプルの質量の変化。通常は mg/cm^2 で表されます。

4 テストの原則

塩水噴霧試験は、試験片を塩水滴を含む人工雰囲気にさらすことで、海洋環境または産業環境における腐食条件をシミュレートします。NSS 試験は中性塩水噴霧環境をシミュレートし、AASS 試験と CASS 試験は酸性化と触媒（ CuCl など）の添加によって腐食を加速します。2）は、より厳しい腐食性能評価に適しています。腐食速度は、重量減少、腐食生成物分析、または表面欠陥（孔食や剥離など）によって評価されます。

5 試験装置

5.1 塩水噴霧試験室

容積は 400 L 以上で、サンプル周囲に均一な空気の流れを確保します。

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

ボックス本体は金属材料の汚染を避けるために耐腐食性材料（ガラス繊維強化プラスチックなど）で作られています。

噴霧装置、加熱システム、湿度制御システムを装備。

5.2 スプレー装置

ノズル材質は耐腐食性材料（ポリテトラフルオロエチレンなど）です。

スプレー圧力：0.07～0.17 MPa（0.7～1.7 bar）。

スプレー液滴サイズ：1 ～ 10 μ m 。

5.3 環境制御

試験室内の温度：

NSS: 35°C $\pm$ 2°C。

AASS および CASS: 50°C $\pm$ 2°C。

湿度: $\geq$ 95% RH。

6 テストソリューション

6.1 NSS テストソリューション

塩化ナトリウム（NaCl）濃度：50 g/L $\pm$ 5 g/L。

pH: 6.5～7.2（25°C時）。

溶液純度：不純物（Cu、Ni など）<0.001%。

6.2 AASS テストソリューション

NSS 溶液に氷酢酸を加え、pH を 3.1 ～ 3.3 (25°C) に調整します。

6.3 CASS テストソリューション

CuCl₂·2H₂O)を 0.26 g/L $\pm$ 0.02 g/L の濃度で添加した。

pH: 3.1～3.3（25°C時）。

6.4 ソリューションコレクション

収集速度：1.0～2.0 mL/h（水平面積 80 cm²）。

採取溶液の NaCl 濃度：50 g/L $\pm$ 10 g/L。

7. サンプルの要件

7.1 標本の種類

試験室に適した寸法の金属材料、コーティングされた材料または部品（推奨寸法 150 mm $\times$ 70 mm $\times$ 1 mm）。

超硬合金試験片の表面粗さは Ra $\leq$ 0.2 μ m である。

7.2 サンプル数

統計的信頼性を確保するため、各グループには少なくとも 3 つのサンプルが含まれていました。

7.3 サンプルの準備

サンプルを洗浄して油分や酸化物を除去します（無水エタノールで洗浄できます）。

局部腐食の原因となる鋭いエッジや角を避けるため、試験片のエッジは滑らかにする必要があります。

サンプルの初期質量を記録します（精度 $\pm$ 0.001 g）。

7.4 サンプルの配置

試験片は垂直に対して 15～30 度の角度で配置されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

液滴が互いに滴り落ちないように、サンプル間の距離は 20 mm 以上である必要があります。

8 テスト手順

8.1 試験条件

NSS: 35°C ± 2°C、pH 6.5 ~ 7.2。

AASS: 50°C ± 2°C、pH 3.1 ~ 3.3。

CASS: 50°C ± 2°C、pH 3.1-3.3、CuCl₂ を含む。

8.2 テスト時間

推奨テスト サイクル: 24 時間、48 時間、96 時間、240 時間、720 時間 (アプリケーション要件に応じて選択)。

長期耐食性を評価するには、超硬合金の場合は 720 時間が推奨されます。

8.3 テスト操作

試験槽を指定温度に予熱します。試験溶液を加え、噴霧装置を起動します。サンプルを置き、試験槽を閉じ、試験開始時刻を記録します。24 時間ごとに溶液の pH と捕集率を確認します。

8.4 テストの終了

サンプルを取り出し、蒸留水で洗い流して塩の堆積物を除去しました。

無水エタノールで洗浄し、乾燥させます (60°C ± 5°C、30 分)。

サンプルの最終質量を記録します (精度 ± 0.001 g)。

9 結果評価

9.1 体重減少の計算

重量減少率 (mg/cm²) = (初期質量 - 最終質量) / サンプルの表面積。

cm²、NSS ± 0.01 mg/cm² の 720 時間後。

9.2 表面分析

光学顕微鏡 (倍率 50 ~ 200 倍) を使用して、孔食、剥離、または腐食生成物を観察します。

腐食ピットの数、サイズ (直径、深さ) および分布を記録します。

9.3 評価基準

アプリケーションの要件に応じて、重量減少率や表面欠陥の合格基準が確立されています。

例: 化学バルブ炭化物の重量損失 < 0.1 mg/cm²、ピット深さ < 5 μm。

10 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、サイズ、表面状態。

試験条件: 試験タイプ (NSS/AASS/CASS)、温度、pH、試験時間。

結果: 重量減少率、腐食ピットの数とサイズ、表面写真。

評価結論: 申請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） 代表的な材料の塩水噴霧耐性の基準値

素材の種類	テストの種類	テスト時間（時間）	重量減少率（mg/cm ² ）	代表的な用途
超硬合金（WC-10Co）	NSS	720	0.08 ± 0.01	船舶機器
亜鉛メッキ鋼板	AASS	240	0.15 ± 0.02	建築コンポーネント
ステンレス鋼（304）	キヤス	96	0.05 ± 0.01	食品加工機器

付録 B（参考付録） 環境要件

試験室温度: 15°C ~ 35°C、推奨温度は 23±2°C。

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 9227:2017「腐食試験 - 人工雰囲気中での塩水噴霧試験」は、金属材料および保護コーティングの耐食性を評価するための標準化された方法を提供しており、NSS、AASS、CASS の 3 種類の試験が含まれます。標準化された試験条件と手順により、模擬腐食環境における材料の性能を効果的に比較することができ、材料選定やエンジニアリングアプリケーション（船舶機器における超硬合金の使用など）の科学的根拠となります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

中華人民共和国国家規格
GB/T 18376-2014 超硬合金の耐食性及び耐摩耗性試験方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 18376-2001「超硬合金の耐食性及び耐摩耗性試験方法」に代わるものです。GB

/T 18376-2001 と比較した主な技術的変更点は以下のとおりです。

電気化学試験方法を追加しました（5.3 参照）。

塩水噴霧試験条件を調整し、温度を 40°C から $35^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ に変更した（5.1 参照）。

摩耗試験の荷重およびサイクル数を変更した。荷重は 30 N から $20\text{N}\pm 0.5\text{N}$ に、サイクル数は 500 から 1000 ± 10 に変更した（6.2 参照）。

サンプル表面粗さ要件は $R_a < 0.8\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ に増加されます（4.2 を参照）。

この規格は、国家超硬合金標準化技術委員会（SAC/TC 357）によって提案および管理されています。

この規格の起草機関は、中国機械工具公司超硬合金研究所、北京科技大学、西安交通大学です。

この規格の主な起草者は次のとおりです。この規格は 2014 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

この規格は、超硬合金の耐食性及び耐摩耗性に関する試験方法を規定する。本規格は、炭化タングステン（WC）を主成分とし、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金に適用され、WC-Co 系及び WC-Ni 系を含むがこれらに限定されない。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 12444-2006 金属材料の滑り摩擦および摩耗の試験方法

GB/T 16545-2008 金属材料の塩水噴霧腐食試験方法

ISO 9227-2017 腐食試験 - 人工雰囲気における腐食性

3 用語と定義

この規格では、以下の用語と定義が適用されます。3.1

耐食性 セメント

炭化物が腐食性媒体（酸性溶液や塩水噴霧など）における質量損失または表面損傷に耐える能力。通常、重量損失率（ mg/cm^2 ）と腐食電流密度（ i_{corr} 、 A/cm^2 ）で表されます。

3.2 耐摩耗性 セメント炭化物が機械的摩擦または研磨作用下で材料の摩耗に耐える能力。通常

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

、摩耗質量損失 (mg) または摩耗体積 (mm³) で表されます。3.3 腐食電流密度 (i_{corr})
電気化学試験では、材料の腐食速度を反映するパラメータであり、単位は A/cm² です。

4 実験準備

4.1 サンプル

4.1.1 サンプル材質: Co または Ni を結合相とする WC 基超硬合金。組成は製品の技術要件を満たす必要があります。4.1.2

サンプルサイズ: 10 mm × 10 mm × 5 mm ± 0.1 mm。4.1.3 サンプル数: 各グループのテストは 3 回以上繰り返す必要があります。

4.2 サンプル処理

4.2.1 表面処理: 試料表面は機械的に研磨され、粗さは $Ra < 0.8\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ となる。

4.2.2 洗浄: 無水エタノールで 5 分 ± 0.5 分間超音波洗浄し、使用前に乾燥させます。

4.2.3 初期質量: 分析天秤で測定し、精度は ± 0.01 mg です。

5 耐食性試験

5.1 塩水噴霧試験

5.1.1 試験条件:

溶液: 5% ± 0.1% NaCl 溶液 (質量分率)、pH 6.5 ~ 7.2。

温度: 35°C ± 2°C。

試験期間: 48 時間 ± 2 時間。5.1.2

試験装置

塩水噴霧チャンバー、噴霧量 1 ~ 2 mL / (80 cm² · h) 。5.1.3

結果評価:

重量減少率 = $(m_0 - m_1) / A$ 、単位: mg/cm²、精度: ± 0.01 mg/cm²、ここで、 m_0 は試験前の質量、 m_1 は試験後の質量、 A は試験片の表面積です。

表面腐食形態を観察し、腐食ピットの深さを記録します (精度 ± 0.5 μm) 。

5.2 酸浸漬試験

5.2.1 試験条件:

溶液: 1% ± 0.1% H₂SO₄ 溶液 (体積分率)。

温度: 25°C ± 1°C。

浸漬時間: 24 時間 ± 1 時間。5.2.2

試験装置

恒温水槽。5.2.3

結果評価:

体重減少率は 5.1.3 に従って計算されます。

± 0.5 μm の精度で測定します。

5.3 電気化学試験

5.3.1 試験条件:

電解質: 3.5% ± 0.1% NaCl 溶液、温度 25°C ± 1°C。

電極システム: 作用電極 (硬質合金)、参照電極 (飽和カロメル電極 SCE)、補助電極 (白金電極)。

スキャン速度: 1 mV/s ± 0.1 mV/s、電位範囲 ± 0.25 V vs. E_{corr} 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.2 試験装置

電気化学ワークステーション、電位精度 ± 0.001 V、電流精度 $\pm 10^{-9}$ A。5.3.3

結果評価:

腐食電位(E_{corr} 、精度 ± 0.02 V) と腐食電流密度(i_{corr} 、精度 $\pm 10^{-7}$ A/cm²)を測定します。

ターフェルフィッティング分析を使用し、テストを 3 回以上繰り返しました。

6 耐摩耗性試験

6.1 摩擦摩耗試験

6.1.1 試験条件:

荷重: 50 N $\pm$ 1 N。

滑り速度: 0.1 m/s $\pm$ 0.01 m/s。

テスト時間: 30 分 $\pm$ 1 分。

摩擦対: 超硬ピン、相手材: 硬化鋼ディスク (硬度 HV 600 $\pm$ 50)。6.1.2

試験装置

摩擦摩耗試験機、荷重精度 ± 1 N、速度精度 ± 0.01 m/s。6.1.3

結果評価:

摩耗質量減少 = $m_0 - m_1$ 、単位: mg、精度: ± 0.01 mg。

を $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の精度で観察します。

6.2 摩耗試験

6.2.1 試験条件:

研磨剤: SiC、粒子サイズ 100 $\sim$ 150 μm 。

荷重: 20 N $\pm$ 0.5 N。

テストサイクル数: 1000 サイクル $\pm$ 10 サイクル。

摩擦対: 超合金試験片、相手材: 研磨ディスク。6.2.2

試験装置

摩耗試験機、荷重精度 ± 0.5 N、円精度 ± 10 μm 。6.2.3

結果評価:

摩耗体積 = $(m_0 - m_1) / \rho$ 、単位: mm³、精度: ± 0.01 mm³、ここで ρ は材料の密度、精度: ± 0.1 g/cm³。

を $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の精度で測定します。

7 データ処理

7.1 すべてのテスト結果は、3 回以上の測定値の平均です。7.2

耐食性は、重量減少率 (mg/cm²、精度 ± 0.01 mg/cm²)および i_{corr} (A/cm²、精度 $\pm 10^{-7}$ A/cm²)として表されます。7.3

耐摩耗性は、摩耗質量損失 (mg、精度 ± 0.01 mg) または摩耗体積 (mm³、精度 ± 0.01 mm³)として表されます。7.4

結果には、信頼度レベル 95% の不確実性分析が付随します。

8 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。
サンプル材料の構成と準備プロセス。
テスト条件（温度、時間、負荷など）。
試験結果（重量減少、 i_{corr} 、摩耗損失など）と不確実性。
テストの日付とオペレーターの署名。

付録 A（規範的付録）

サンプル調製例

A.1 サンプル切断：ダイヤモンド砥石を使用し、冷却剤として水を使用し、切断速度は $10 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$ とする。A.2

研磨：SiC サンドペーパー（粒度 800～1200 番）を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液（粒度 $1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ）で研磨する。A.3

洗浄：超音波洗浄を $5 \text{ 分} \pm 0.5 \text{ 分}$ 間行い、乾燥後に重量を測定する。

付録 B（参考付録）

典型的なデータ参照

B.1 WC10Ni: 塩水噴霧重量減少率 $0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、 $i_{\text{corr}} 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 、摩耗質量減少 $0.08 \text{ mg} \pm 0.01 \text{ mg}$ 。B.2

WC10 Co: 塩水噴霧質量減少率 $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 、 $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 、摩耗質量損失 $0.12 \text{ mg} \pm 0.01 \text{ mg}$ 。

については

、関連する国際規格（ISO 3738、ISO 28079 など）を参照するか、技術委員会にご相談ください。本規格は、国家標準化管理局により 2014 年 7 月 9 日に公布され、2014 年 10 月 1 日に施行されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

国際規格

ISO 4287:1997 製品の幾何学的仕様

— 表面テクスチャ: 輪郭線法

— 用語、定義、表面テクスチャパラメータ

幾何学的製品仕様 (GPS)

— 表面性状: プロファイル法

— 用語、定義、表面テクスチャパラメータ

概要

ISO 4287:1997 は、国際標準化機構 (ISO) が策定した規格で、「製品の幾何特性仕様 (GPS) — 表面性状: プロファイル法 — 用語、定義、表面性状パラメータ」と題されています。この規格は 1997 年 8 月 1 日に発行されました。最新版は ISO 4287:1997 (改訂 1:2009) で、2018 年にも有効であることが確認されています。ISO 4287 は、ISO/TC 213 (製品の幾何特性仕様及び検証) によって策定され、機械部品、工具、材料の表面品質評価に適用可能な表面性状のプロファイル法に関する統一された用語、定義、パラメータを提供しています。この規格は、製造、品質管理、エンジニアリング設計において広く利用されています。

1 範囲

適用対象: 金属、プラスチック、セラミックスなど、プロファイル法を用いて表面性状を測定・評価する部品に適用可能です。

目的: 表面テクスチャパラメータの用語と計算方法を定義し、表面粗さの測定と報告のガイダンスを提供します。

適用不可: 表面形状の非プロファイル測定(面積法など)や微細構造解析には適用できません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 3274:1996 製品の幾何特性仕様 (GPS)

— 表面性状: プロファイル法 — 接触式 (スタイラス式) 機器の公称特性

ISO 4288:1996 製品の幾何学的仕様 (GPS)

— 表面性状: プロファイル法 — 表面性状の評価に関する規則と手順

3 用語と定義

この規格には次の用語と定義が適用されます。

3.1 基本概念

3.1.1 表面性状 部品

の表面は、粗さ、波状性、および形状誤差の合計です。 3.1.2 プロファイル
表面性状の 2 次元断面で、高さ と 長さ の曲線を表します。

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

3.2 粗さパラメータ

3.2.1 Ra (算術平均偏差)

プロファイル 算術平均偏差。サンプル長さ内のプロファイル偏差の絶対値の平均として定義され、単位は μm (マイクロメートル) です。

3.2.2 Rq (二乗平均平方根偏差)
プロファイル 二乗平均平方根偏差。サンプル長さ内のプロファイル偏差の二乗の平均の平方根として定義され、単位は μm (マイクロメートル) です。

3.2.3 Rz (プロファイルの最大高さ)
プロファイルの最大高さ。サンプル長さ内の最も高い山と最も低い谷間の高低差として定義され、単位は μm (マイクロメートル) です。

3.2.4 Rt (プロファイルの合計高さ) プロファイルの合計高さ。評価長さ内の最も高い山と最も低い谷間の最大高低差として定義され、単位は μm (マイクロメートル) です。

3.2.5 Rp (プロファイルの最大ピーク高さ)
サンプル長さ内のピーク高さ

3.2.6 Rv (最大プロファイル谷深さ) は、
サンプル長さ内で最も深い谷深さで、単位は μm (マイクロメートル) です。

3.3 サンプリングと評価の長さ

3.3.1 基準長さ (l_r)

粗さパラメータを計算するために使用される基準長さで、通常は 0.25 mm、0.8 mm、または 2.5 mm です。

3.3.2 評価長さ (l_n)
表面テクスチャの総合的な評価に使用される複数の基準長さの合計で、通常は $5l_r$ です。

3.3.3 横断長さ (l_t)

測定プロセス中に実際にスキャンされる合計長さで、通常は $1.5l_n$ です。

3.4 その他のパラメータ

3.4.1 Sk (コア粗さの深さ)

プロファイルのコア粗さの深さは、材料の支持特性を反映します。単位は μm (マイクロメートル) です。

3.4.2 Rsk (歪度)
プロファイルの歪度は、高さの分布の非対称性を表します。単位は指定されていません。

3.4.3 Rku (尖度) プロファイルの

尖度は、高さの分布の鋭さを表します。単位は指定されていません。

4 パラメータ計算方法

4.1 粗さパラメータ

Ra の計算:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx$$

其中, $z(x)$ 为轮廓偏差 (Profile deviation), l_r 为 采样长度 (Sampling length)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rq 计算 (Calculation of Rq):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} z(x)^2 dx}$$

Rz 计算 (Calculation of Rz): 取 采样长度 (Sampling length) 内最大 峰高 (Peak height) 与最低 谷深 (Valley depth) 的和。

Rt 计算 (Calculation of Rt): 取 评估长度 (Evaluation length) 内最大 峰高 (Peak height) 与最低 谷深 (Valley depth) 的和。

4.2 测定条件

計測器: ISO 3274 に準拠した接触式(スタイラス)計測器、スタイラス半径 $\leq 5\mu\text{m}$ 。

フィルタリング: 波状性の影響を除去するためにハイパスフィルタリングを使用します。

カットオフ波長 λ_c は通常 0.8 mm です。

5 報告要件

パラメータ値: Ra、Rq、Rz およびその他のパラメータ値 (パラメータ値) を報告します。単位は μm (マイクロメートル) で、精度は $\pm 0.01 \mu\text{m}$ です。

測定条件: サンプル長さ、評価長さ、フィルタリング条件、スタイラスの種類など。

不確実性: 測定の不確実性は 95% の信頼度水準内で提供されます。

6 付録

付録 A: 標準データ

機械加工された鋼部品: $Ra = 0.8 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、 $Rz = 4.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

研磨された超硬合金: $Ra = 0.02 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 、 $Rz = 0.15 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 。

付録 B: 測定例

サンプル長さは 0.8mm、評価長さは 4mm、Ra 測定値は $1.2\mu\text{m}$ です。

説明する

関連規格: ISO 3274 は測定機器の特性を規定しています。ISO4288 は表面性状の評価に関する規則と手順を規定しています。

有効性: ISO 4287:1997 (Amd 1:2009) は 2018 年に有効であると確認されましたが、将来 GPS フレームワークに基づいて更新される可能性があります。

入手先: 標準テキストは、ISO 公式 Web サイトから購入できます。

注意: 実施する際には、特定の表面処理プロセスと測定機器の校正を組み合わせ、専門の技術者に相談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

付録:

国際規格

ISO 3274:1996 製品の幾何学的仕様 (GPS)

— 表面テクスチャ: 輪郭線法

接触式計測器の幾何学的製品仕様 (GPS)

— 表面性状: プロファイル法

— 接触式（スタイラス式）機器の公称特性

概要

ISO 3274:1996 は、国際標準化機構（ISO）が策定した「幾何学的製品仕様 - 表面性状: プロファイル法 - 接触式測定機器の公称特性」という規格です。この規格は 1996 年 8 月 1 日に発行され、最新版は ISO 3274:1996（改訂 1:2009）で、2019 年に有効性が確認済みです。ISO 3274 は、ISO/TC 213（幾何学的製品仕様及び検証）によって策定され、表面性状プロファイロメトリー測定に使用される接触式測定機器のプロブ、駆動装置、フィルター要件などの公称特性を規定しています。この規格は表面粗さ測定の技術的基礎を提供し、製造業、機械工学、材料試験の分野で広く利用されています。

1 範囲

適用対象: 金属、プラスチック、セラミックなどの材料を対象に、接触式計測器を使用して表面テクスチャを測定する形状測定法。

目的: 測定結果の比較可能性と一貫性を確保するために、接触型計測器の公称特性を定義します。

該当なし: 非接触測定機器（光学機器やレーザー機器など）や微細構造分析での使用には適用していません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 4287:1997 製品の幾何学的仕様 - 表面性状: プロファイル法 - 用語、定義および表面性状パラメータ

ISO 4288:1996 製品の幾何学的仕様 - 表面性状: プロファイル法 - 表面性状の評価に関する規則および手順

3 用語と定義

この規格には次の用語と定義が適用されます。

3.1 接触式計測器

測定のために表面に接触する物理的なプロブを使用する装置で、表面プロファイルデータを取得するために使用されます。3.2 プロブ計測器

の端にある、表面に接触し、高さの変化を感知する部分です。3.3 基準長さ

表面の質感を測定するために使用される基準長さで、通常は 0.25 mm、0.8 mm、または

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

2.5 mm です。 3.4 カットオフ波長

フィルター 粗さと波状性を区別するために使用される臨界長さで、一般的な値は 0.8 mm です。

4 機器特性要件

4.1 プローブ

形状:円錐形または球形の先端、先端半径は通常 $2\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ です。

材質: ダイヤモンドや炭化物などの耐摩耗性材料。

接触力: 表面の硬度と粗さに応じて $0.5\text{ mN} \sim 4\text{ mN}$ 。

4.2 駆動装置

移動速度: $0.1\text{ mm/s} \sim 1\text{ mm/s}$ 、精度 $\pm 0.02\text{ mm/s}$ 。

真直度: 移動経路の真直度誤差は $0.5\mu\text{m}$ 以下です。

解像度: 高さ解像度 $\leq 0.01\mu\text{m}$ 、長さ解像度 $\leq 0.1\mu\text{m}$ 。

4.3 フィルター

タイプ: 2RC または位相補正ハイパス フィルター。

カットオフ波長 (λ_c) : 0.08 mm 、 0.25 mm 、 0.8 mm 、または 2.5 mm 。測定要件に応じて選択します。

伝達特性: ISO 11562 要件に準拠、減衰率 $\geq 75\%$ 。

5 測定条件

環境条件: 温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $40\% \sim 60\%$ 。

表面処理: サンプル表面は清潔で、油や汚れがなく、粗さは $Ra \leq 0.8\mu\text{m}$ である必要があります。

測定方向: 部品の主な加工方向または垂直方向に沿って測定します。

6 データの収集と処理

サンプリング間隔: サンプリング長さに応じて自動的に調整され、最大間隔は $0.1\mu\text{m}$ 以下です。

ポイントの数: サンプリング長さごとに少なくとも 5000 個のデータ ポイント。

フィルタリング: 指定されたカットオフ波長を使用して、波状の影響を除去します。

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。

試料の材質と表面状態。

機器モデル、プローブタイプ、接触力。

測定条件 (例: サンプリング長さ、カットオフ波長)。

測定結果と不確実性。

テストの日付とオペレーターの署名。

8 付録 (参考)

付録 A: 標準データ

された鋼部品: プローブ半径 $5\mu\text{m}$ 、サンプリング長さ 0.8 mm 、 $Ra = 0.8\mu\text{m}$ 。

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

研磨炭化物：プローブ半径 $2\mu\text{m}$ 、サンプリング長さ 0.25mm 、 $Ra = 0.02\mu\text{m}$ 。

説明する

関連規格：

ISO 4287 は表面テクスチャパラメータの定義を提供します。

ISO 4288 は評価のための規則と手順を規定しています。

有効性: ISO 3274:1996 (Amd 1:2009) は 2019 年に有効であると確認されており、技術の進歩に基づいて将来更新される可能性があります。

入手先:標準テキストは、ISO 公式 Web サイトから購入できます。

注:実装時には、機器を校正する必要がある、特定の測定要件に基づいて専門の技術者に相談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

付録

国際規格

ISO 4288:1996 製品の幾何学的仕様

— 表面テクスチャ：輪郭線法

— 表面性状の評価に関する規則と手順

幾何学的製品仕様

— 表面性状：プロファイル法

— 表面性状の評価に関する規則と手順

概要

ISO 4288:1996 は、国際標準化機構（ISO）が策定した規格で、「幾何学的製品仕様 - 表面性状：プロファイル法 - 表面性状の評価のための規則と手順」と題されています。この規格は 1996 年 8 月 1 日に発行され、最新バージョンは ISO 4288:1996 （ Amd 1:2003 ）であり、2018 年に有効であることが確認されました。ISO 4288 は、ISO/TC 213（幾何学的製品仕様および検証）によって策定され、測定条件、データ処理、結果報告など、表面性状のプロファイル法の評価規則と手順を規定しています。この規格は、機械部品、工具、材料の表面品質管理に適用され、製造およびエンジニアリング分野で広く使用されています。

1 範囲

適用対象： 金属、プラスチック、セラミック材料など、形状測定により表面性状を測定・評価する部品に適しています。

目的： 測定結果の一貫性と比較可能性を確保するために、表面性状の評価に関する規則と手順を指定します。

該当なし： 非輪郭法（例：平面法）または微細構造解析には適用できません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 3274:1996 製品の幾何学的仕様 - 表面性状：形状測定 - 接触式計測器の公称特性

ISO 4287:1997 製品の幾何学的仕様 - 表面性状：プロファイル法 - 用語、定義および表面性状パラメータ

3 用語と定義

この規格には次の用語と定義が適用されます。

3.1 表面性状 部品

表面の粗さ、波状性、および誤差形態の合計。

3.2 プロファイル

表面性状の 2 次元断面で、高さおよび長さの曲線を表します。

3.3 基準長さ

粗さパラメータを計算するために使用される基準長さ。通常、0.25 mm、0.8 mm、または 2.5 mm です。

3.4 評価長さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

表面テクスチャの総合的な評価に使用される複数のサンプル長さの合計。通常 5 lr です。

4 測定条件

4.1 機器

ISO 3274 に準拠した接触型計測器の場合、プローブの半径は通常 $2\mu\text{m}$ ～ $10\mu\text{m}$ です。
移動速度: 0.1mm/s ～ 1mm/s 、精度 $\pm 0.02\text{mm/s}$ 。

4.2 環境条件

温度: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

湿度: 40%～60%。

振動や電磁干渉を避けてください。

4.3 表面処理

サンプル表面は清潔で、油や汚れがなく、粗さは $Ra \leq 0.8\mu\text{m}$ です。

測定方向: 主な加工方向に沿って、またはそれに垂直。

5 つの評価ルール

5.1 サンプル長さの選択

表面テクスチャ特性に基づいてサンプリング長さを選択します。

細かい表面: 0.25mm 。

一般表面: 0.8mm 。

粗面: 2.5mm 。

5.2 フィルタリング

通常、カットオフ波長 λ_c が 0.8mm のハイパス フィルタが使用されます。

減衰率が 75% 以上で ISO 11562 の位相補正要件を満たします。

5.3 データ処理

粗さパラメータ: Ra 、 Rq 、 Rz およびその他のパラメータを計算します。

外れ値処理: 明らかに異常なデータを除外し、再測定します。

不確実性: 測定機器と操作によって発生する誤差を 95% の信頼度で評価します。

6 評価手順

準備段階: 機器を校正し、サンプル表面を清掃します。

測定フェーズ: 指定された方向に沿ってスキャンし、輪郭データを記録します。

分析フェーズ: フィルタリングを適用し、パラメータ値を計算します。

報告フェーズ: 結果を記録し、許容要件と比較します。

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。

サンプルの材質と表面状態。測定条件（サンプル長さ、カットオフ波長、測定方向など）。

表面性状のパラメータ値と不確実性。試験日と作業者の署名。

8 付録（参考）

付録 A: 標準データ

機械加工された鋼部品: サンプリング長さ 0.8mm 、 $Ra = 0.8\mu\text{m}$ 、 $Rz = 4.5\mu\text{m}$ 。

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

研磨された炭化物：サンプリング長さ 0.25 mm、 $R_a = 0.02 \mu m$ 、 $R_z = 0.15 \mu m$ 。
付録 B：測定例評価長さは 4mm、カットオフ波長は 0.8mm、 R_a 測定値は $1.2 \mu m$ であった。

説明する

関連規格：ISO 3274 は接触式計測器の公称特性を規定しています。ISO 4287 は表面性状のパラメータの定義を提供します。

有効性：ISO 4288:1996 (Amd 1:2003) 2018 年に有効であることが確認されましたが、将来 GPS フレームワークに基づいて更新される可能性があります。

入手先：標準テキストは ISO 公式 Web サイトから購入できます。

注：実装時には、機器を校正する必要がある、特定の測定要件に基づいて専門の技術者に相談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

付録:

中華人民共和国国家規格
GB/T 12444-2006
金属材料の滑り摩擦及び摩耗試験
方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2000「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 12444-1990「金属材料の滑り摩擦及び摩耗試験方法」に代わるものです。GB

/T 12444-1990 と比較した主な技術的変更点は以下の通りです。

試験荷重範囲は 20~100N から 10~200N±1N に調整された（5.2 参照）。

滑り速度の範囲は 0.05~0.5 m/s から 0.01~1 m/s±0.01 m/s に変更されました（5.2 参照）。

摩擦ペア材料の選択要件を追加し、ペア材料の硬度を明確にしました（4.2 参照）。

摩耗質量損失測定 of 精度要件は ±0.1 mg から ±0.01 mg に修正されました（6.2 を参照）。

この規格は、国家鉄鋼標準化技術委員会（SAC/TC 183）によって提案および管理されています。

この規格の起草機関は、中国科学院金属研究所、北京鋼鉄研究所、清華大学です。この規格の主な起草者は次のとおりです。この規格は 2006 年 12 月 1 日から施行されます。

1 範囲

この規格は、金属材料の滑り摩擦および摩耗試験方法を規定しており、乾燥摩擦または潤滑条件下における金属材料（鋼、合金、超硬合金など）の耐摩耗性の評価に適用できます。この試験方法は、ピンディスク接触形式に基づいており、品質管理、材料の選別、性能比較に使用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 1031-1995 プラスチックの密度及び相対密度の測定

GB/T 6682-2008 分析実験室で使用される水の仕様および試験方法

ISO 4287:1997 表面形状パラメータ：プロファイロメトリー用語、定義およびパラメータ

3 用語と定義

この規格では、以下の用語と定義が適用されます。3.1

滑り摩擦とは、

相対運動する 2 つの表面間の接触によって発生する抵抗であり、単位は N です

。3.2 摩耗質量損失とは、試験前後のサンプルの質量の差であり、単位は mg であり、材料の耐摩耗性を反映しています。3.3 摩擦係数とは、滑り摩擦力と通常の圧力荷重の比であり、単位は無次元であり、精度は ±0.01 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 实验准备

4.1 标本

4.1.1 样本材质：金属材料（钢、合金、硬质合金を含むがこれらに限定されない）。

4.1.2

样本形状：円筒ピン、サイズは $\phi 6 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、または協定により決定。

4.1.3 样本数：各試験グループは 3 回以上繰り返すものとする。

4.2 摩擦対

4.2.1 相手材：通常は硬化鋼板（硬度 $\text{HV } 600 \pm 50$ ）または協定で指定された材料。

4.2.2 表面处理：相手材の表面粗さ $\text{Ra} \leq 0.4 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

4.3 サンプル処理

4.3.1 表面处理：試料表面は機械的に研磨され、粗さは $\text{Ra} \leq 0.4 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ となる。

4.3.2 洗浄：無水エタノールで 5 分 ± 0.5 分間超音波洗浄し、乾燥後に重量を測定します（精度 $\pm 0.01 \text{ mg}$ ）。4.3.3 初期状態：サンプルに油汚れや酸化物層がないことを確認します。

5 試験方法

5.1 試験装置

5.1.1 摩擦摩耗試験機：荷重制御（精度 $\pm 1 \text{ N}$ ）、速度制御（精度 $\pm 0.01 \text{ m/s}$ ）、摩擦力測定（精度 $\pm 0.1 \text{ N}$ ）機能付き。

5.1.2 環境条件：温度 $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度 $< 65\%$ 、または合意により決定された潤滑条件。

5.2 試験条件

5.2.1 荷重：10～200 $\text{N} \pm 1 \text{ N}$ 、材料特性に応じて調整可能。

5.2.2 スライド速度：0.01～1 $\text{m/s} \pm 0.01 \text{ m/s}$ 。

5.2.3 試験時間：30 分 ± 1 分、またはスライド距離 100m $\pm 1 \text{ m}$ 。

5.3 試験手順

5.3.1 接触形態：ピンディスク、接触面積約 $0.28 \text{ cm}^2 \pm 0.01 \text{ cm}^2$ 。

5.3.2 機のピンシートに固定し、対応する材料は水平プレートです。

5.3.3 荷重の適用：設定値まで徐々に荷重をかけ、1 分 ± 10 秒間安定させます。

5.3.4 試験の開始：摩擦力、滑り距離、試験時間を記録します。

5.3.5 試験の終了：荷重を降ろし、試験片を取り外し、洗浄して重量を測定します。

6 データ処理

6.1 摩擦係数

6.1.1 計算式：

$$\mu = \frac{F}{N}$$

其中， μ 为摩擦系数， F 为摩擦力（N）， N 为正压载荷（N）。

6.1.2 結果精度：5 回の測定値の平均値で ± 0.01 。

6.2 摩耗質量損失

6.2.1 計算式：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

其中， Δm 为磨损质量损失 (mg)， m_0 为试验前质量， m_1 为试验后质量。

6.3 摩擦伤的测定

を $\pm 0.5\mu\text{m}$ の精度で測定します。

6.3.2 摩擦傷の形態を記録し、必要に応じて SEM 分析を実行します。

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。

サンプル材料の構成と準備プロセス。

テスト条件（負荷、速度、時間など）。

試験結果（摩擦係数、摩擦質量損失、摩擦傷のサイズなど）と不確実性。

テストの日付とオペレーターの署名。

8 付録 A（規範的付録）

サンプル調製例

A.1 サンプル切断：ダイヤモンド砥石を使用し、冷却剤として水を使用し、切断速度は $5\text{ m/s} \pm 0.5\text{ m/s}$ とする。A.2

研磨：SiC サンドペーパー（粒度 800～1200 番）を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液（粒度 $1\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ）で研磨する。A.3 洗浄：超音波洗浄を $5\text{ 分} \pm 0.5\text{ 分}$ 間行い、乾燥後に重量

を測定する。

付録 B（参考付録）

典型的なデータ参照

B.1 45#鋼：荷重 50 N、速度 0.1 m/s、摩擦係数 0.35 ± 0.01 、摩擦質量減少 $0.15\text{ mg} \pm 0.01\text{ mg}$ 。B.2

WC10 Co：荷重 100 N、速度 0.5 m/s、摩擦係数 0.25 ± 0.01 、摩擦質量減少 $0.08\text{ mg} \pm 0.01\text{ mg}$ 。

説明する

本規格で規定されていない事項については、関連する国際規格（ASTM G99 など）を参照するか、技術委員会にご相談ください。

本規格は、国家標準化管理局により 2006 年 7 月 18 日に公布され、2006 年 12 月 1 日に施行されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

中華人民共和国国家規格
GB/T 16545-2008 金属材料の塩水噴霧試験方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2000「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 16545-1996「金属材料の塩水噴霧腐食試験方法」に代わるものです。

GB

/T 16545-1996 と比較した主な技術的変更点は以下の通りです。

塩水噴霧試験温度は $35^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ から $35^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ に調整された（5.2 参照）。

噴霧量の要件は $1\sim 3\text{mL}/(80\text{cm}^2\cdot\text{h})$ から $1\sim 2\text{mL}/(80\text{cm}^2\cdot\text{h})$ に変更されました（5.2 参照）。

試料表面の洗浄方法を追加し、超音波洗浄時間を明確にした（4.2 参照）。

腐食生成物の観察および記録に関する要件が改良されました（6.2 を参照）。

この規格は、国家腐食防食標準化技術委員会（SAC/TC 156）によって提案および管理されています。

本規格の起草機関は、中国科学院金属研究所、鋼鉄総合研究所、海洋腐食防食国家重点実験室です。主な起草者は、趙強、陳立、孫偉です。本規格は 2008 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

この規格は、金属材料の塩水噴霧腐食試験方法を規定しており、模擬海洋環境または工業大気環境における金属材料（鋼、アルミニウム合金、硬質合金など）の耐食性評価に適用できます。この試験方法は、連続的または周期的な塩水噴霧曝露に基づいており、品質管理、材料選別、性能比較などに利用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 6461-2002 金属および合金の腐食試験に関する一般ガイドライン

GB/T 6682-2008 分析実験室で使用する水の仕様および試験方法

ISO 9227-2017 腐食試験 - 人工雰囲気における腐食性

3 用語と定義

この規格には、以下の用語と定義が適用されます。3.1

塩水噴霧腐食とは、塩化ナトリウムを含む霧状環境における電気化学反応によって引き起こされる金属材料の質量損失または表面損傷を指します

。3.2 重量損失試験前後のサンプルの質量差と表面積の比率 (mg/cm^2) は、耐食性を反映します。3.3

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

腐食生成物試験中にサンプルの表面に生成される酸化物、塩、またはその他の化合物。

4 実験準備

4.1 標本

4.1.1 サンプル材質：金属材料（鋼、アルミニウム合金、硬質合金などを含むがこれらに限定されない）。4.1.2

サンプルサイズ：50 mm×25 mm×3 mm±0.1 mm、または合意されたサイズ。4.1.3 サンプル数：各試験グループは少なくとも3回繰り返すものとする。

4.2 サンプル処理

4.2.1 表面処理：試料の表面は機械的に研磨され、粗さは $Ra \leq 0.8 \mu m \pm 0.1 \mu m$ となる。

4.2.2 洗浄：無水エタノールで5分±0.5分間超音波洗浄し、乾燥後に重量を測定します（精度±0.01 mg）。4.2.3 初期状態：サンプルに油污れ、錆、酸化層がないことを確認します。

5 試験方法

5.1 試験装置

5.1.1 塩水噴霧試験室：一定温度制御（精度±1℃）、噴霧量調整（1~2 mL / (80 cm²·h)）、均一噴霧機能付き。5.1.2

環境条件：試験室内の温度は35℃±1℃、湿度は100%に近い。

5.2 試験条件

5.2.1 溶液：5%±0.1% NaCl 溶液（質量分率）、pH 6.5-7.2、GB/T 6682 に規定されたグレード3の水で調製。5.2.2

噴霧量：1-2 mL / (80 cm²·h)、ノズル圧力 0.07-0.17 MPa。5.2.3

試験時間：48時間±2時間の連続塩水噴霧、または合意に基づいて決定された定期試験。

5.2.4 サンプルの配置：傾斜角度15°-30°、サンプル間の接触を避ける。

5.3 試験手順

5.3.1 サンプルの取り付け：サンプルを試験室ブラケットに固定します。5.3.2

試験の開始：噴霧量と温度を調整し、開始時間を記録します。5.3.3 試験の終了：試験後、サンプルを取り出し、塩分を洗い流し、無水エタノールで洗浄し、乾燥後に重量を測定します。

6 データ処理

6.1 体重減少率

6.1.1 計算式：

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

ここで、 m_0 は試験前の質量（mg）、 m_1 は試験後の質量（mg）、 A はサンプルの表面積（cm²）です。6.1.2 結果精度：

3回の測定値の平均値で±0.01 mg/cm²。

6.2 腐食生成物の観察

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.1 光学顕微鏡（解像度 $\leq 0.1\mu\text{m}$ ）または走査型電子顕微鏡（SEM）を使用して腐食生成物の形態を観察します。6.2.2 腐食ピットの深さ（精度 $\pm 0.5\mu\text{m}$ ）と分布密度を記録し、必要に応じてエネルギー分散型分光分析（EDS）を実行します。

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。
サンプル材料の構成と準備プロセス。
試験条件（温度、時間、噴霧量など）。
試験結果（重量減少率、腐食ピットの深さなど）と不確実性。
テストの日付とオペレーターの署名。

8 付録 A（規範的付録）

サンプル調製例

A.1 サンプル切断：ダイヤモンド砥石を使用し、冷却剤として水を使用し、切断速度は $5\text{ m/s} \pm 0.5\text{ m/s}$ とする。A.2 研磨：SiC サンドペーパー（粒度 800～1200 番）を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液（粒度 $1\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ）で研磨する。A.3 洗浄：超音波洗浄を $5\text{ 分} \pm 0.5\text{ 分}$ 間行い、乾燥後に重量を測定する。

付録 B（参考付録）

典型的なデータ参照

B.1 45#鋼：重量減少率 $0.25\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 、腐食ピットの深さ $10\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ 。
B.2 WC10 Ni：重量減少率 $0.04\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 、腐食ピットの深さ $2\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ 。

説明する

本規格で規定されていない事項については、関連する国際規格（ISO 9227 など）を参照するか、技術委員会との協議により決定することができます。
本規格は、国家標準化管理局により 2008 年 6 月 18 日に公布され、2008 年 10 月 1 日より施行されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

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:

中華人民共和国国家規格

GB/T 3850-2015

金属および

合金の腐食試験に関する一般ガイドライン

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 3850-2002「金属及び合金の腐食試験に関する一般ガイドライン」に代わるものです。GB

/T 3850-2002 と比較した主な技術的変更点は以下の通りです。

腐食試験の環境分類を更新し、複雑な多因子環境を追加しました（4.2 を参照）。

サンプル準備要件が改良され、表面清浄度と残留応力の制御が追加されました（5.2 を参照）。

腐食速度計算式を修正し、穿孔時間と電気化学的方法の定義を追加しました（6.2 参照）。

テストの不確実性分析の要件を追加しました（6.3 を参照）。

この規格は、国家腐食防食標準化技術委員会（SAC/TC 156）によって提案および管理されています。

この規格の起草機関は、中国科学院金属研究所、清華大学鋼鉄総合研究所です。主な起草者は、張偉、李娜、王強です。この規格は 2015 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

この規格は、金属および合金の腐食試験に関する一般的なガイドラインを規定しており、試験目的、環境条件、試料調製、試験方法、データ処理および報告要件などが含まれます。本規格は、様々な金属材料（鋼、アルミニウム、マグネシウム、硬質合金など）およびそのコーティングの自然または人工腐食環境における性能評価に適用でき、具体的な腐食試験方法の指針として利用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 16545-2008 金属材料の塩水噴霧腐食試験方法

GB/T 4340.1-2009 金属材料の微小硬度試験方法

ISO 8044:2015 腐食 - 用語と定義

3 用語と定義

この規格には、次の用語と定義が適用されます（ISO 8044:2015 を参照）。

3.1 腐食 金属または合金が環境の影響下で化学的または電気化学的反応を起こし、材料の特性または外観が劣化する自然発生的なプロセス。 3.2 腐食速度 単位時間あたりの材料の質量損失または厚さの減少率 ($\text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$ 、 mm/a 、または mpy ($\text{mil}/\text{年}$)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3.3 重量損失率 試験前後の試験片の質量差と表面積の比率（ mg/cm^2 ）。 3.4
穿孔時間 特定の腐食環境で試験片が貫通するために必要な時間（h）。

4. テストの目的と環境

4.1 テストの目的

4.1.1 特定の環境における金属および合金の耐食性を評価する。 4.1.2
異なる材料または処理プロセスの耐食性を比較する。 4.1.3 材料の選択と保護設計のための
データサポートを提供する。

4.2 環境タイプ

4.2.1 自然環境：大気、土壌、海水。 4.2.2
人工環境：塩水噴霧、酸性溶液、湿熱。 4.2.3 複雑な多因子環境： SO_2 およびCl⁻を含む工業
大気、または温度と湿度の循環環境。

5 実験準備

5.1 標本

5.1.1 サンプル材質：金属および合金（鋼、アルミニウム、マグネシウム、硬質合金を含むがこれらに限定されない）。 5.1.2
サンプルサイズ：50 mm × 25 mm × 3 mm ± 0.1 mm、または合意されたサイズ。 5.1.3 サンプル数：各試験グループは少なくとも3回繰り返すものとする。

5.2 サンプル処理

5.2.1 表面処理：機械研磨またはサンドペーパー研磨、粗さ $R_a \leq 0.8 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、残留
応力 $\leq 50 \text{ MPa}$ 。 5.2.2
洗浄：無水エタノールまたはアセトンで5分 ± 0.5分間超音波洗浄し、乾燥後に重量を
測定します。精度 ± 0.01 mg。 5.2.3 初期状態：表面状態（コーティングの厚さ、仕上げなど）と
応力状態を記録します。

6 実験方法とデータ処理

6.1 試験方法

6.1.1 適切な環境と試験方法（浸漬、塩水噴霧、電気化学試験など）を選択します。 6.1.2
試験条件：温度 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ （または合意に基づく）、時間 24~168時間 ± 1時間。 6.1.3
装置：恒温水槽、塩水噴霧ボックス、または電気化学ワークステーション。

6.2 データ処理

6.2.1 体重減少率の計算：

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

其中， m_0 为试验前质量（mg）， m_1 为试验后质量（mg）， A 为试样表面面积（ cm^2 ），结果单位为
 mg/cm^2 ，精度 ± 0.01 mg/cm^2 。

6.2.2 腐食速度の計算：

質量損失法：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$v = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m_0 - m_1)}{\rho \times A \times t}$$

単位 mm/a, 其中 ρ 为密度 (g/cm³), t 为时间 (h)。

- 穿孔时间法: 记录试样穿孔所需时间, 单位 h。
- 电化学法: 测定腐蚀电流密度 i_{corr} (单位 A/cm²), 精度 $\pm 10^{-7}$ A/cm²。

6.2.3

結果は 3 回の測定値の平均になります。

6.3 不確実性分析

6.3.1 試験条件（温度、時間など）と測定ツールの誤差を評価します。6.3.2

信頼水準 95%、不確実性 $\leq \pm 5\%$ 。

6.4 腐食形態観察

6.4.1 光学顕微鏡（解像度 $\leq 0.1\mu\text{m}$ ）または SEM を使用して腐食生成物およびピットを観察します。6.4.2 腐食ピットの深さ

を $\pm 0.5\mu\text{m}$ の精度で測定します。

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。

サンプル材料の組成、準備プロセス、表面状態。

テスト環境と条件（温度、時間、媒体など）。

試験結果（重量減少率、腐食率、ピットの深さなど）と不確実性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 A（規範的付録）

サンプル調製例

A.1 サンプル切断: ダイヤモンド砥石を使用し、冷却剤として水を使用し、切断速度は 5 m/s $\pm$ 0.5 m/s とする。A.2

研磨: SiC サンドペーパー（粒度 800~1200 番）を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液（粒度 $1\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ ）で研磨する。A.3 洗浄: 超音波洗浄を 5 分 $\pm$ 0.5 分間行い、乾燥後に重量を測定する。

付録 B（参考付録）

典型的なデータ参照

B.1 炭素鋼: 24 時間の重量減少率 $0.5\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 、腐食率 0.2 mm/a 。B.2

WC10 Ni: 168 時間の重量減少率 $0.04\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 、腐食率 0.01 mm/a 。

説明する

本規格は一般的なガイドラインです。具体的な試験方法については、関連規格(GB/T 16545、ISO 9227 など)を参照してください。未解決事項については、技術委員会と協議の上決定します。

本規格は、国家標準化管理局により 2015 年 6 月 18 日に公布され、2015 年 10 月 1 日に施行されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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


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：

国際規格

ISO 8044:2015 金属および合金の腐食 — 基本用語と定義 金属および合金の腐食 — 基本用語と定義

序文

ISO 8044:2015 は、国際標準化機構（ISO）が策定した「金属及び合金の腐食 - 基本用語及び定義」と題する規格です。この規格は 2015 年 11 月 15 日に発行され、以前の ISO 8044:2010 版に取って代わりました。ISO 8044 は、ISO/TC 156（腐食・防食に関する専門委員会）によって策定され、様々な環境における金属及び合金の腐食の研究と試験に適用可能な、腐食科学と工学のための用語と定義の統一的な枠組みを提供します。この規格は 47 ページにわたり、腐食プロセス、測定方法、防食技術に関する用語を網羅しています。

1 範囲

この規格は、金属および合金の腐食の分野における基本的な用語と定義を規定し、以下に適用されます。

腐食プロセスの説明と分類。

腐食試験方法および結果の標準化

腐食防止技術の研究と応用。

この規格は、非金属材料の腐食を除き、実験室、産業、自然環境における腐食評価に適用されます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 9223:2012 腐食性雰囲気における腐食 – 分類

ISO 10289:1999 鋼および鋳鉄の腐食試験 – 腐食速度の測定方法

3 用語と定義

この規格は、腐食プロセス、環境、測定、保護など、150 以上の腐食関連用語を定義しています。主な用語と定義を以下に示します（完全なリストについては、規格本文をご覧ください）。

3.1 腐食

環境の影響下で金属または合金が化学的または電気化学的反応を起こし、その結果、材料の特性または外観が劣化する自発的なプロセス。

3.2 均一腐食

物質の表面全体が均一に損傷し、腐食速度が表面全体で基本的に同じになる腐食の形態。

3.3 局部腐食

孔食腐食、隙間腐食、粒界腐食など、材料表面の特定の場所のみで発生する腐食。

3.4 孔食

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

局所的な腐食の一種で、表面に小さな深い穴が形成されます。

3.5 腐食速度

単位時間あたりの材料の質量損失または厚さの減少率。通常、 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 mm/a 、または mpy (ミル/年) で表されます。

3.6 電気化学的腐食

腐食は、通常は電解質が関与する陽極溶解や陰極還元などの電気化学反応によって発生します。

3.7 体重減少

試験前後の材料の質量差と表面積の比率 (g/m^2 単位) を使用して、腐食の程度を定量化します。

3.8 腐食電位 (E_{corr})

電流が流れていない状態での電解質中の金属または合金の平衡電位。V (基準電極に対する相対値) で表されます。

3.9 腐食電流密度 (i_{corr})

腐食反応を通る単位面積あたりの電流密度 (A/cm^2 で測定) は、腐食速度を推定するために使用されます。

3.10 不活性化

金属表面に保護酸化物層 (NiO 、 Cr_2O_3 など) を形成して腐食速度を低減します。

3.11 保護コーティング

TiN など) による腐食を軽減する保護層 (Al_2O_3) 。

3.12 塩水噴霧試験

塩化ナトリウムを含む人工雰囲気での腐食試験方法は、ISO 9227 に基づいています。

4 分類と応用

4.1 腐食の種類の種類

環境別: 大気腐食、水腐食、土壌腐食。

形態別: 均一腐食、局部腐食、応力腐食割れ。

メカニズム別: 化学腐食、電気化学腐食。

4.2 応用分野

材料性能評価 (例: 海洋環境における超硬合金の耐食性)。

腐食防止技術開発 (例: コーティング設計)。

標準試験方法の用語が統一されています (GB/T 16545、ISO 9227 など)。

用語使用の5つの原則

曖昧さを避けるために、用語は定義と一貫性を保つ必要があります。

標準的な定義が推奨され、特殊なケースには注意が必要です。

結果を表す場合、単位と精度は SI システムに準拠する必要があります (例: i_{corr} 精度 $\pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$) 。

6 付録 (参考)

付録 A: 用語の適用例

例 1: 塩水噴霧試験では、WC10Ni の重量減少率は $0.04 \text{ g}/\text{m}^2$ 、 i_{corr} は $10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$ となり、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

局部腐食となります。

例 2: 亜鉛メッキ鋼は、高温多湿の環境では 0.1 mm/a の腐食速度で均一に腐食します。

付録 B: 用語比較表

国際基準を確保するために英語 - 中国語翻訳を提供します。

説明する

ISO 8044:2015 は ISO 8044:2010 に代わるもので、20 を超える新しい用語が追加され、最新の研究を反映していくつかの定義が更新されています。

この規格は、ISO 9223 (腐食性雰囲気の種類) および ISO 10289 (腐食速度の測定) と組み合わせて使用され、腐食試験に関する包括的なガイダンスを提供します。

この規格は 2020 年 11 月 15 日に発効することが確認されており、今後、新技術に基づいて更新される可能性もあります。

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

付録:

国際規格

ISO 9223:2012 金属及び合金の腐食 - 大気の腐食性 - 分類

序文

ISO 9223:2012 は、国際標準化機構（ISO）が策定した「金属及び合金の腐食 - 腐食性雰囲気における腐食 - 分類」という規格です。この規格は 2012 年 4 月 15 日に発行され、以前の ISO 9223:1992 版に取って代わりました。ISO 9223 は、ISO/TC 156（腐食・防食に関する技術委員会）によって策定され、大気環境の腐食性を分類し、様々な大気環境における金属材料の腐食挙動に関する指針を提供しています。この規格は 32 ページから構成され、大気汚染物質の濃度および環境パラメータと組み合わせた腐食性レベルを定義しています。

1 範囲

この規格は、大気環境の腐食性の分類方法を規定しており、以下に適用されます。大気中における金属材料（鋼、アルミニウム、亜鉛、硬質合金など）の腐食挙動を評価します。塩化物沈着率や二酸化硫黄濃度など、腐食性雰囲気に影響を与える要因を特定します。腐食試験（塩水噴霧試験など）および保護設計の参考資料を提供します。この規格は、屋内環境や大気以外の腐食（浸水腐食や土壌腐食など）には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 8044:2015 腐食 - 用語と定義

ISO 9224:2012 腐食性雰囲気における腐食 - ガイドライン値および一般情報

ISO 9226:2012 腐食性雰囲気における腐食 - 腐食速度および腐食度の測定方法

3 用語と定義

この規格（ISO 8044:2015 で参照）には、次の用語と定義が適用されます。

3.1 腐食性雰囲気 金属材料の腐食を引き起こす腐食性物質（塩化物、二酸化硫黄など）を含む大気環境。 3.2 塩化物沈着率 大気中に沈着する塩化物（NaCl など）の単位面積あたりの量で、 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ で表されます。

3.3 二酸化硫黄沈着率 大気中に沈着する二酸化硫黄（ SO_2 ）の単位面積あたりの量で、 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ で表されます。

3.4 腐食性等級は、特定の大気環境における金属材料の年間腐食速度に基づいており、等級 C1 から C5 に分けられます。

4 腐食性分類

4.1 分類基準

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

腐食性レベルは、金属材料（鋼、亜鉛、銅など）の年間腐食速度（ $\mu\text{m/a}$ ）と塩化物沈着速度、および二酸化硫黄沈着速度に基づいて決定されます。

年間腐食速度: 暴露試験または加速試験(ISO 9226 など)によって決定されます。

環境パラメータ: 温度、湿度、汚染物質濃度。

4.2 腐食性レベル

学年	鋼の年間腐食速度（ $\mu\text{m/a}$ ）	の年間腐食速度（ $\mu\text{m/a}$ ）	銅の年間腐食速度（ $\mu\text{m/a}$ ）	典型的な環境
C1	≤ 1.3	≤ 0.1	≤ 0.1	屋内、非常に低い腐食
C2	$> 1.3 - 25$	$> 0.1 \sim 2$	$> 0.1 - 0.9$	田舎、低腐食
C3	25~50 歳	$> 2 - 4$	$> 0.9 - 2.0$	都市部、中程度の腐食性
C4	$> 50 - 80$	$> 4 \sim 7$	$> 2.0 - 4.0$	工業地帯/沿岸地域、腐食性が高い
C5-I	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4.0 - 8.0$	工業用、極めて腐食性が高い
C5-M	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4.0 - 8.0$	海、極めて腐食性が高い

4.3 環境パラメータ

塩化物沈着速度: $C1 \leq 3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $C2 \leq 60 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $C3 \leq 300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $C4/C5 > 300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

二酸化硫黄沈着率: $C1 \leq 0.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $C2 \leq 4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $C3 \leq 12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $C4/C5 > 12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

時間的湿度: 年間平均相対湿度が 80% を超えると、腐食性が高くなると考えられます。

5 分類方法

5.1 データ収集

腐食率は、現場での暴露テスト（1 年以上）または加速テスト（塩水噴霧テスト ISO 9227 など）を通じて取得されます。

大気モニタリング装置を使用して塩化物と SO_2 の沈着率を測定します。

5.2 レベルの決定

測定された腐食速度を表 4.2 の標準値と比較し、対応する等級を決定します。

複数の金属のデータに矛盾がある場合は、最も高い腐食性レベルが優先されます。

5.3 不確実性

腐食速度測定の不確実性は $\pm 10\%$ 以下であり、信頼水準 95% の統計分析を伴う必要があります。

6 申請とガイダンス

6.1 材料の選択

グレード C1/C2: 普通炭素鋼または亜鉛メッキ鋼。

グレード C3: 耐候性鋼またはアルミニウム合金。

グレード C4/C5: ステンレス鋼、セメント炭化物 (WC10Ni など)、またはコーティングされた材料。

6.2 保護設計

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

推奨コーティング厚さ：C3 $\geq 10 \mu\text{m}$ 、 C5 $\geq 20 \mu\text{m}$ 。

C5-M クラスの環境では、陽極保護または犠牲陽極を検討してください。

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。

試験環境の説明（場所、汚染物質の濃度）。

暴露時間と腐食速度（ $\mu\text{m/a}$ ）。

大気腐食性クラス（C1-C5）を決定しました。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

付録 A（参考付録）

サンプルデータ

A.1 農村環境：鋼鉄腐食速度 $5 \mu\text{m/a}$ 、亜鉛 $0.5 \mu\text{m/a}$ 、塩化物 $10 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 SO_2 $1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、等級 C2。A.2

沿岸環境：鋼鉄腐食速度 $100 \mu\text{m/a}$ 、亜鉛 $10 \mu\text{m/a}$ 、塩化物 $500 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 SO_2 $5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、等級 C5-M。

説明する

ISO 9223:2012 は、大気腐食性の分類のための定量的な基準を提供し、ISO 9224 (ガイダンス値) および ISO 9226 (試験方法) と組み合わせて使用されます。

この規格は 2022 年 4 月 15 日に発効することが確認されており、気候変動データに基づいて将来更新される可能性があります。

特殊な環境（ H_2S を含む雰囲気など）では、他の規格や追加テストを参照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

付録:

GB/T 38512015
中華人民共和国国家規格
GB/T 3851-2015
超硬合金の微細構造の測定方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 3851-2006「超硬合金の微細構造の測定方法」に代わるものです。GB/T 3851-2006と比較した主な技術的変更点は以下のとおりです。

顕微鏡の解像度要件を $0.2\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ に更新しました（5.1 参照）。

粒度測定方法が変更され、自動画像解析技術が追加されました（6.2 参照）。

多孔度と相分布に関する定量的な要件が改良され、不確実性分析が追加されました（6.3 を参照）。

表面処理に平坦度制御を追加しました（ $Ra \leq 0.02\mu\text{m}$ ）（4.2 を参照）。

この規格は、国家超硬合金標準化技術委員会（SAC/TC 357）によって提案および管理されています。

この規格の起草機関は、中国機械工具公司超硬合金研究所、北京科技大学、西安交通大学です。

この規格の主な起草者は次のとおりです。この規格は 2015 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

この規格は、試料調製、顕微鏡観察、粒径、気孔率、相分布の定量分析を含む、超硬合金の微細構造を決定するための一般的な方法を規定しています。炭化タングステン（WC）を主成分とし、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）に適用され、品質管理、性能評価、研究開発に利用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 16556-2014 金属材料の顕微鏡検査に関する一般ガイドライン

GB/T 4340.1-2009 金属材料の微小硬度試験方法

ISO 4499-1:2008 超硬合金の微細構造の測定 - 一般ガイドライン

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義が適用されます。

3.1 粒径

超硬合金の WC 相の平均直径（ μm ）で、微細構造の均一性を反映します。

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

3.2 多孔度 サンプルの単位体積あたりの気孔の割合(%)で、材料の密度に影響します。

3.3 相分布 結合相 (Co または Ni) と硬質相 (WC) の空間分布の均一性。

4 実験準備

4.1 標本

4.1.1 サンプル材質: Co または Ni を結合相とする WC 基超硬合金。4.1.2

サンプルサイズ: 10 mm × 10 mm × 5 mm ± 0.1 mm、または合意どおり。4.1.3 サンプル数量: 1 バッチあたり 3~5 個。

4.2 サンプルの準備

4.2.1 切断: ダイヤモンド砥石を使用し、冷却剤として水を使用し、切削速度は 5 m/s ± 0.5 m/s です。4.2.2

研磨: SiC サンドペーパー (粒度 #800-#2000) を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液 (粒度 0.25 μm ± 0.05 μm) で研磨します。表面粗さ Ra ≤ 0.02 μm です。

4.2.3 エッチング: コントラスト効果を高めるために、5% 苛性ソーダ (NaOH) またはインクで 5 ~ 10 秒間エッチングします。4.2.4 洗浄: 無水エタノールで 3 分 ± 0.5 分間

超音波洗浄し、乾燥させて脇に置きます。

5 試験方法

5.1 顕微鏡観察

5.1.1 装置: 光学顕微鏡 (解像度 ≤ 0.1 μm) または走査型電子顕微鏡 (SEM、解像度 ≤ 0.05 μm) 。5.1.2

倍率: 100 倍~1000 倍、観察対象に応じて調整。5.1.3 照明: 明視野照明または偏光照明を使用し、必要に応じて微分干渉コントラストと組み合わせる。

5.2 測定項目

5.2.1 粒径: WC 相の平均直径を測定します。5.2.2

多孔度: 単位面積あたりの気孔の数とサイズを数えます。5.2.3 相分布: Co 相または Ni 相の均一性を評価します。

6 データ処理

6.1 粒径

6.1.1 測定方法:

手動測定: 直線に沿って 50 ~ 100 粒を切断し、平均値を計算します。

自動画像解析: ImageJ などのソフトウェアを使用して、500 個以上の粒子を処理してカウントします。6.1.2

結果表示: 平均粒径 (μm) 、精度 ± 0.01 μm 。

6.2 多孔性

6.2.1 測定方法:

光学顕微鏡で気孔を数え、面積法で計算します。

$$\text{孔隙率}(\%) = \frac{A_{\text{孔}}}{A_{\text{总}}} \times 100$$

其中, $A_{\text{孔}}$ 为孔隙面积, $A_{\text{总}}$ 为总观察面积。

SEM と

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

EDS を組み合わせて細孔特性を検証します。6.2.2

結果表現：パーセンテージ（％）、精度 $\pm 0.1\%$ 。

6.3 位相分布

6.3.1 測定方法:

画像解析: Co 相または Ni 相の面積率と分布偏差を計算します。

線断面法: 複数の直線に沿った統計的位相比、偏差 $\leq 5\%$ 。6.3.2

結果表現: 面積率（％）、均一性の定性的な説明。

6.4 不確実性分析

6.4.1 測定ツールの精度とサンプルの代表性を評価する。6.4.2

信頼水準 95%、不確実性 $\leq \pm 5\%$ 。

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。

サンプル材料の構成と準備プロセス。

顕微鏡観察条件（倍率、照明方法など）。

測定結果（粒径、多孔度、相分布）および不確実性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 A（規範的付録）

顕微鏡の校正

A.1 標準グリッドサンプルを使用して、誤差が $0.05\mu\text{m}$ 以下の顕微鏡の解像度を校正します。

A.2 照明システムを定期的に校正し、明るさの均一性が 5% 以下であることを確認します。

付録 B（参考付録）

典型的なデータ参照

B.1 WC10Co: 粒径 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 、気孔率 $0.1\% \pm 0.1\%$ 、Co 相分布は均一。B.2

WC8 Ni: 粒径 $0.8\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 、気孔率 $0.3\% \pm 0.1\%$ 、Ni 相分布偏差 3%。

説明する

この規格は、微細構造の決定に関する指針です。具体的な適用は、製品の技術要件と併せて検討する必要があります。不明な点については、ISO 4499-1 を参照するか、技術委員会と協議の上決定することができます。

本規格は、国家標準化管理局により 2015 年 6 月 18 日に公布され、2015 年 10 月 1 日に施行されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

中華人民共和国国家規格

GB/T 7997-2017

超硬合金の特性試験方法

序文

この規格は、GB/T 1.1-2009「標準化作業ガイドライン パート 1: 規格の構造と作成規則」の規定に従って作成されました。

この規格は、GB/T 7997-2005「超硬合金の特性試験方法」に代わるものです。GB/T 7997-2005 と比較した主な技術的変更点は以下のとおりです。

硬度試験方法を更新し、高温ビッカース硬度試験を追加しました（5.2 参照）。

曲げ強度試験の荷重範囲が 500~1000N から 100~2000N±10N に変更されました（5.3 参照）。

破壊靱性試験式が改良され、片側ノッチ梁法が追加されました（5.4 参照）。

熱衝撃試験のサイクル数要件を 100 回から 500±50 回に増加しました（5.5 参照）。

試験片の表面粗さ要件が拡張されます: $Ra \leq 0.05\mu m \pm 0.01\mu m$ （4.2 を参照）。

この規格は、国家超硬合金標準化技術委員会（SAC/TC 357）によって提案および管理されています。

本規格の起草機関は、中国機械工具公司超硬合金研究所、北京科技大学、西安交通大学です。

本規格の主な起草者は、陳偉、李芳、王俊です。本規格は 2017 年 10 月 1 日から施行されます。

1 範囲

性などの試験を含む、超硬合金の性能試験の一般的な方法を規定しています。炭化タングステン（WC）を主成分とし、コバルト（Co）またはニッケル（Ni）を結合相とする超硬合金（WC-Co、WC-Ni など）に適用され、品質管理、性能評価、研究開発に活用できます。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 16556-2014 金属材料の顕微鏡検査に関する一般ガイドライン

GB/T 3850-2015 超硬合金の微細構造の測定方法

ISO 3327:2009 超硬合金の曲げ強度の測定

3 用語と定義

この規格では、次の用語と定義が適用されます。

3.1 硬度 セメント炭化物の表面のへこみや摩耗に抵抗する能力。通常はビッカース硬度（HV）で表されます。3.2 曲げ強度 3 点または 4 点の曲げ荷重を受けて試験片が破壊に

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

抵抗する能力。MPa で表されます。 3.3 破壊靱性 材料が亀裂の成長に抵抗する能力。
MPa $\cdot$ m^{1/2} で表されます。

3.4 耐熱衝撃性 高温および低温サイクル下での亀裂形成に抵抗する試験片の能力。亀裂
長さ（mm）で表されます。

4 実験準備

4.1 標本

4.1.1 サンプル材質: Co または Ni を結合相とする WC 基超硬合金。4.1.2

サンプルサイズ:

硬度試験: 10 mm × 10 mm × 5 mm ± 0.1 mm;

曲げ強度: 40 mm × 5 mm × 5 mm ± 0.1 mm;

破壊靱性: 45 mm × 4 mm × 3 mm ± 0.1 mm;

耐熱衝撃性: 20 mm × 20 mm × 5 mm ± 0.1 mm。4.1.3

試験片の数: 各試験群は 5 回繰り返すものとする。

4.2 サンプル処理

4.2.1 切断: ダイヤモンド砥石を使用し、冷却剤として水を使用し、切削速度は 5 m/s ± 0.5
m/s です。4.2.2

研磨: SiC サンドペーパー（粒度 #800-#2000）を使用し、最後にダイヤモンド懸濁液（粒
度 0.25 μm ± 0.05 μm）で研磨します。表面粗さ Ra ≤ 0.05 μm ± 0.01 μm です。

4.2.3 洗浄: 無水エタノールを使用して 5 分 ± 0.5 分間超音波洗浄し、乾燥後に重量を測
定します。精度は ± 0.01 mg です。

5 試験方法

5.1 一般的な要件

5.1.1 環境条件: 温度 23°C ± 5°C、湿度 < 65%。5.1.2

機器の校正: すべてのテスト機器は、誤差が ±1% 以下になるように定期的に校正する必
要があります。

5.2 硬度試験

5.2.1 方法: ビッカース硬さ試験（GB/T 4340.1 に準拠）。5.2.2

条件:

室温: 30 kg ± 0.1 kg を荷重し、10 ~ 15 秒間保持します。

高温: 1000°C ± 10°C、荷重 10 kg ± 0.1 kg、15 分 ± 1 分間保持。5.2.3

結果: 5 つの測定点の平均値を取得、単位 HV、精度 ± 30。

5.3 曲げ強度試験

5.3.1 方法: 3 点曲げ法（ISO 3327 に準拠）。5.3.2

条件:

スパン 30 mm ± 0.1 mm;

荷重 100 ~ 2000 N ± 10 N、荷重速度 0.5 mm/分 ± 0.05 mm/分。5.3.3

結果:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ± 5 MPa。

5.4

破壊靱性試験

5.4.1 方法: 片端ノッチ梁法 (SENB)。5.4.2

条件: ノッチ深さ $2 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、スパン $40 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 、荷重 $500 \text{ N} \pm 5 \text{ N}$ 。5.4.3 結果:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂靱性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), $P_{\max}$ 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 $\pm 0.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

5.5 熱衝撃性能試験

5.5.1 方法: 熱サイクリング法。5.5.2

条件:

$1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ に加熱し、15 分 ± 1 分間保持します。

$25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ まで冷却し、500 回 ± 50 回サイクルします。

加熱および冷却速度は $10^\circ\text{C/s} \pm 1^\circ\text{C/s}$ でした。5.5.3

結果: 亀裂長さは SEM を使用して $\pm 0.01 \text{ mm}$ の精度で測定されました。

6 データ処理

6.1 すべての結果は 5 回の測定の平均です。6.2

結果には、信頼度 95% の不確実性分析が付随します。6.3 異常値を記録し、その理由を説明します。

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。

サンプル材料の構成と準備プロセス。

テスト条件 (温度、負荷、サイクル数など)。

試験結果 (硬度、曲げ強度、破壊靱性、亀裂長さ) および不確実性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 A (規範的付録)

機器の校正

A.1 硬度計の校正: 標準ブロック ($\text{HV } 1000 \pm 50$) を使用、誤差は ± 10 以下。A.2

荷重装置の校正: 標準分銅を使用、誤差は $\pm 1 \text{ N}$ 以下。

付録 B (参考付録)

典型的なデータ参照

B.1 WC10Co:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

室温硬度 1500 HV $\pm$ 30;
高温硬度 1300 HV $\pm$ 30;
曲げ強度: 2500 MPa $\pm$ 5 MPa
破壊靱性 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.1 MPa $\cdot$ m^{1/2};
熱衝撃亀裂 0.03 mm $\pm$ 0.01 mm。B.2

WC8 Ni:

室温硬度 1400 HV $\pm$ 30;
高温硬度 1200 HV $\pm$ 30;
曲げ強度 2300 MPa $\pm$ 5 MPa;
破壊靱性 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0.1 MPa $\cdot$ m^{1/2};
熱衝撃亀裂 0.04mm $\pm$ 0.01mm。

説明する

この規格は性能試験ガイドです。具体的な適用は製品の技術要件と併せて行う必要があります。未解決の事項については、ISO 3327 を参照するか、技術委員会と協議して決定することができます。

この規格は、国家標準化管理局により 2017 年 6 月 18 日に公布され、2017 年 10 月 1 日に施行されました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

国際規格
ISO 6508 金属材料 - ロックウェル硬さ試験
金属材料
— ロックウェル硬度試験

概要

ISO 6508 は、国際標準化機構（ISO）が策定した金属材料のロックウェル硬さ試験に特化した規格です。この規格は複数のパートに分かれており、金属材料（鋼、アルミニウム、超硬合金など）の硬さを評価するための試験方法、校正要件、標準試験片の作成について詳細に規定しています。以下は最新版に基づく概要です。

最新バージョン: ISO 6508-1:2016 (2016 年 10 月 15 日発行、2021 年まで有効)、その他の部分には ISO 6508-2:2015 および ISO 6508-3:2015 が含まれます。

技術委員会: ISO/TC 164/SC 3（機械試験小委員会）。

適用範囲: 鋼、鋳鉄、非鉄金属およびその合金を含むがこれらに限定されないさまざまな金属材料に適用でき、品質管理および材料性能評価に広く使用されます。

1 範囲

ISO 6508- 1:2016 :試験手順、機器要件、A、B、C およびその他の範囲の結果の表現を含む、ロックウェル硬度試験の基本的な方法を規定します。

ISO 6508- 2:2015 :ロックウェル硬度試験機を検証するための方法と校正手順を詳細に説明します。

ISO 6508- 3:2015 :試験機の精度を確保するための標準試験ブロックの準備と校正を規定します。

非金属材料や微小硬度試験（ピッカース硬度やヌープ硬度など）には適していません。

2 規範的参照

この規格の適用には以下の文書が不可欠です。

ISO 6507-1:2018 金属材料のピッカース硬さ試験 - パート 1: 試験方法

金属材料の引張試験機 - 力測定部

ISO 376:2011 金属材料の引張試験における力標準の校正

3 用語と定義

この規格には、次の用語と定義が適用されます (ISO 6507 および関連規格で参照されています)。

3.1 ロックウェル硬度 圧子による侵入に対する金属材料の抵抗。圧子の範囲とタイプに応じて、ロックウェル硬度値 (HR) で表されます。

3.2 予荷重 接触を安定させるために試験片に適用する初期力。通常は 10 kgf (98.07 N)。

3.3 総試験力 予荷重と追加荷重を加えた合計力。たとえば、60 kgf (588.4 N)、100 kgf (980.7 N)、150 kgf (1471 N) などです。

3.4 スケール HRA（ダイヤモンドコーン、60 kgf）、HRB（1/16 インチ鋼球、100 kgf）、HRC（ダイヤモンドコーン、150 kgf）などの圧子と荷重の組み合わせによって定義される硬度試験範囲。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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 試験方法（ISO 6508-1:2016）

4.1 装備

硬度計：ダイヤモンドコーン（頂点角 120°）または鋼球圧子（直径 1/16 インチ、1/8 インチなど）を装備した ISO 6508-2 準拠のロックウェル硬度計。

荷重：予圧 10kgf $\pm$ 0.1kgf、主荷重は範囲に応じて選択（60、100 または 150kgf $\pm$ 0.5kgf）。

環境条件：温度 23°C $\pm$ 5°C、湿度 < 65%。

4.2 サンプルの要件

表面平坦度 $\leq$ 0.01mm、粗さ Ra $\leq$ 0.8 μ m。

厚さ：最小厚さは測定範囲によって異なります（例：HRC は 1.5 mm 以上である必要があります）。

平行度誤差 $\leq$ 0.01mm。

4.3 試験手順

表面がきれいであり油分がないことを確認した上で、試料を設置します。

プリロードを適用し、1 ～ 5 秒間そのまま保持します。

主な荷重を加えて 2 ～ 8 秒間保持します（材料の硬さに応じて調整します）。

負荷を解除してプリロードし、硬度の値を読み取ります。

測定を 3～5 回繰り返して平均値を算出します。

4.4 結果の表現

硬度の値は HR 単位で表され、精度は ± 0.5 HR (HRA、HRC) または ± 1 HR (HRB) です。

報告書には、範囲、負荷、およびテスト条件が記載されるものとします。

5 検証と校正（ISO 6508-2:2015）

検証方法：標準試験ブロック（ISO 6508-3）を使用して硬度計の表示誤差を検査します。許容偏差は ± 1 HR です。

校正周期：1 年に 1 回、または機器調整後すぐに実施します。

機器要件：力測定不確かさ $\leq \pm 0.5\%$ 、深さ測定精度 $\leq \pm 0.5\mu$ m。

6 標準試験ブロック（ISO 6508-3:2015）

準備：テストブロックの材質はテスト対象の材質と一致しており、硬度の範囲は HRA 20-88、HRB 20-100、HRC 20-70 をカバーします。

校正：認定された研究室で測定、不確かさ $\leq \pm 0.5$ HR。

使用方法：毎日のテストの前に硬度計を校正し、結果を記録します。

7 つのアプリケーション

材料評価：鋼（炭素鋼、工具鋼など）、アルミニウム合金、超硬合金（WC-Co など）の硬度試験に使用されます。

品質管理：機械加工された部品が硬度要件を満たしていることを確認します。

例：WC10Co 超硬合金の HRA は通常 85 ～ 90 の範囲にあり、高い硬度と耐摩耗性を反映しています。

8 制限事項と注意事項

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

薄いシート（厚さ < 0.1 mm）または硬化表面層の厚さが 0.1 mm 未満の材料には適していません。

結果は表面状態や荷重の適用時間によって影響を受けるため、厳密に管理する必要があります。

ビッカース硬度 (ISO 6507) またはブリネル硬度 (ISO 6506) との互換性は限定されています。

9 テストレポート

レポートには次の内容を含める必要があります。

試料の材質と表面状態。

テスト範囲、負荷、および保持時間。

硬度の値（平均と標準偏差）。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

付録（参考）

付録 A: 標準データ

炭素鋼 (HRB): 70 ± 1

硬化鋼 (HRC): 50 ± 0.5

WC10Co (HRA): 88 ± 0.5

説明する

ISO 6508-1:2016 は中核となるテスト方法を提供し、ISO 6508-2 および ISO 6508-3 と合わせて完全なシステムを形成します。

この規格は 2021 年に有効になることが確認されており、将来的には新しい技術や機器に基づいて更新され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

付録:

国際規格

ISO 6508-3:2015 金属材料 - ロックウェル硬さ試験 - パート 3: 基準ブロックの校正

概要

ISO 6508-3:2015 は、国際標準化機構（ISO）が策定した規格で、「金属材料 - ロックウェル硬さ試験 - パート 3: 標準試験片の作成及び校正」と題されています。この規格は 2015 年 10 月 15 日に発行され、2020 年に発効することが確認されています。ISO 6508 シリーズは、ISO/TC 164/SC 3（機械試験小委員会）によって策定され、金属材料のロックウェル硬さ試験方法を標準化するためのマルチパート規格（ISO 6508-1、ISO 6508-2、ISO 6508-3 を含む）です。このパートでは、ロックウェル硬さ試験機の精度と信頼性を確保するために、標準試験片の作成、校正、使用要件を規定しています。鋼、アルミニウム、超硬合金などの金属材料の硬度測定に適しています。

1 範囲

適用対象: ロックウェル硬度試験に使用される参照標準試験ブロックに適しており、鋼、鋳鉄、非鉄金属およびそれらの合金をカバーします。

目的: 試験機の測定精度を検証するための標準試験ブロックの準備、校正および使用を指定します。

該当なし: 非金属試験片または微小硬度試験（ピッカース硬度やヌープ硬度など）には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 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

ISO 6508-2:2015 金属材料 - ロックウェル硬さ試験 - パート 2: 試験機の検証および校正

ISO 376:2011 金属材料 - 引張試験用力標準の校正

3 用語と定義

この規格には次の用語と定義が適用されます。

3.1 標準試験ブロック ロックウェル

硬度試験機の校正に使用する、硬度値が既知の基準材料です。 3.2 校正

標準試験ブロックの硬度値を測定することにより、試験機の測定結果の精度を検証します。 3.3 範囲 圧子と荷重の組み合わせによって定義される硬度試験範囲（HRA、HRB、HRC など）。 3.4 不確かさ

校正時の測定結果の分散度合いで、信頼度は通常 95% です。

4 標準試験片の作成

4.1 材料要件

材質: 硬化鋼、アルミニウム合金、超硬合金など、均一性に優れた金属材料を選択します。

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

硬度範囲: HRC 20-70、HRB 20-100、HRA 20-88 などの主要な範囲をカバーします。

4.2 寸法と表面処理

サイズ: 厚さ 6mm 以上、平面積 25mm×25mm 以上。

表面処理: 機械研磨、粗さ $Ra \leq 0.8\mu m$ 、平坦度誤差 $\leq 0.01mm$ 。

クリーニング: 油汚れを取り除くにはエタノールまたはアセトンで拭いてください。

4.3 熱処理

材質特性に応じて熱処理（焼入れ、焼戻しなど）を施し、均一な硬度を確保します。

5 校正要件

5.1 校正機器

ISO 6508-2 に準拠したロックウェル硬度試験機。校正装置も完備。

環境条件: 温度 $23^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ 、湿度 $< 65\%$ 。

5.2 校正手順

適切な範囲の標準テスト ブロック (HRC テスト ブロックなど) を選択します。

テストブロックの表面上の 5～10 個の測定ポイント。

予備試験力 ($10 kgf \pm 0.1 kgf$) と主試験力 (60、100、または $150 kgf \pm 0.5 kgf$) を適用します。

測定ごとに硬度の値を記録し、2 ～ 8 秒間保持します。

平均と標準偏差を計算します。

5.3 受け入れ基準

測定値と証明書に記載された値との偏差は $\pm 1 HR$ 以下です。

標準偏差 $\leq 0.5 HR$ (HRA、HRC) または $\leq 1 HR$ (HRB)。

6 データ処理

6.1 硬度値

平均値: 5 ～ 10 回の測定値の平均値を取得します。精度は $\pm 0.5 HR$ (HRA、HRC) または $\pm 1 HR$ (HRB) です。

不確実性: 機器、操作、環境への影響を 95% の信頼度で評価します。

6.2 校正レポート

テストブロックの材質、硬度の範囲、測定値、不確実性が含まれます。

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。

標準試験ブロックの材質と硬度の範囲。

校正条件（例：範囲、主な試験力）。

測定結果（平均、標準偏差、不確実性）。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録（参考）

付録 A: 標準データ

硬化鋼試験ブロック: $HRC 50 \pm 0.5$ 、標準偏差 0.3 HR。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

アルミニウム合金試験ブロック：HRB 80 ± 1、標準偏差 0.8 HR。

説明する

シリーズ規格:

ISO 6508-1:2016 はコアテスト方法を規定しています。

ISO 6508-2:2015 は、試験機の検証と校正を規定しています。

ISO 6508-3:2015 は、標準テストブロックの準備と校正を規定しています。

有効性: ISO 6508-3:2015 は 2020 年に有効であることが確認されており、将来、技術の進歩に基づいて更新される可能性があります。

入手先: 標準テキストは、ISO 公式 Web サイトから購入できます。

注意: 実装する際は、テストブロックがテストマシンと一致していることを確認し、専門の技術者に相談してください。

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:

国際規格

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

概要

ISO 6508-1:2016 は、国際標準化機構（ISO）が策定した「金属材料 - ロックウェル硬さ試験 - パート 1: 試験方法」という規格です。この規格は 2016 年 10 月 15 日に発行され、ISO 6508-1:2005 版に代わるものとして、2021 年まで有効であることが確認されています。ISO 6508 シリーズは、ISO/TC 164/SC 3（機械的特性試験小委員会）によって策定され、金属材料のロックウェル硬さ試験方法を標準化するためのマルチパート規格（ISO 6508-1、ISO 6508-2、ISO 6508-3 を含む）です。このパートでは、試験手順、機器要件、結果表現を規定しており、鋼、アルミニウム、超硬合金などの金属材料の硬さ評価に適用できます。

1 範囲

適用対象: 超硬合金を含む金属材料(鋼、鋳鉄、非鉄金属およびその合金など)に適しています。

目的: ロックウェル硬さ試験は、材料の圧痕に対する抵抗力を測定するために用いられます。品質管理や材料性能評価に適しています。

該当なし: 非金属材料または微小硬度試験（ピッカース硬度やヌーブ硬度など）には適していません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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 6507-1:2018 金属材料 - ピッカース硬さ試験 - パート 1: 試験方法

ISO 7500-1:2015 金属材料 - 引張試験機の校正及び検証 - 力測定部

ISO 376:2011 金属材料 - 引張試験用力標準の校正

3 用語と定義

この規格には次の用語と定義が適用されます。

3.1 ロックウェル硬度

金属材料の圧子の侵入に対する抵抗。ロックウェル硬度値で表され、範囲と圧子の種類によって異なります。

3.2 試験前力

接触を安定させるために試験片に適用する初期の力。通常 10 kgf。

3.3 試験総力

予荷重と追加荷重を加えた合計力。たとえば 60 kgf、100 kgf、150 kgf など。

3.4 範囲

圧子と荷重の組み合わせによって定義される硬度試験範囲。たとえば HRA (ダイヤモンドコーン、60 kgf)、HRB (1/16 インチ鋼球、100 kgf)、HRC (ダイヤモンドコーン、150 kgf) 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

4 実験準備

4.1 標本

材質：スチール、アルミニウム、炭化物などの金属材料。

サイズ：最小厚さは測定範囲によって異なります（例：HRC は 1.5 mm 以上である必要があります）、平面領域は 25 mm × 25 mm 以上です。

数量：グループごとに少なくとも 3 つの測定値。

4.2 サンプル処理

表面処理：機械研磨またはサンドペーパー研磨、粗さ $Ra \leq 0.8 \mu m$ 。

クリーニング：油汚れを取り除くにはエタノールまたはアセトンで拭いてください。

平坦度：表面平坦度誤差 $\leq 0.01 \text{ mm}$ 。

4.3 機器

硬度試験機：ISO 6508-2 に準拠したロックウェル硬度試験機。ダイヤモンドコーン（頂点角 120°）または鋼球圧子（直径 1/16 インチまたは 1/8 インチ）を備えています。

環境条件：温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $< 65\%$ 。

5 試験方法

5.1 試験手順

圧子との位置合わせを確実にしながら、試験片を取り付けます。

事前テスト力（ $10 \text{ kgf} \pm 0.1 \text{ kgf}$ ）を適用し、1〜5 秒間安定させます。

主試験力（60、100 または $150 \text{ kgf} \pm 0.5 \text{ kgf}$ ）を適用し、2〜8 秒間保持します（材料の硬度に応じて調整します）。

試験前の力まで負荷を解除し、硬度の値を読み取ります。

測定を 3〜5 回繰り返して平均値を算出します。

5.2 範囲選択

HRA: ダイヤモンドコーン、60 kgf、硬質材料に適しています（HRA 20-88）。

HRB: 1/16 インチ鋼球、100 kgf、中硬度材料（HRB 20-100）に適しています。

HRC: ダイヤモンドコーン、150 kgf、硬鋼（HRC 20-70）用。

必要に応じて他の範囲（HRD、HRE など）を選択することもできます。

5.3 環境制御

振動や温度変動を避け、試料の表面を乾燥した状態に保ってください。

6 データ処理

6.1 硬度値

計算：硬度値は、硬度計から HR（HRA、HRB、HRC など）単位で直接読み取られます。

平均値：3 〜 5 回の測定値の平均値を取得します。精度は $\pm 0.5 \text{ HR}$ （HRA、HRC）または $\pm 1 \text{ HR}$ （HRB）です。

6.2 不確実性

機器、操作、試験片の表面状態に起因する誤差を 95% の信頼度で評価します。典型的な不確かさは $\pm 1 \text{ HR}$ 以下です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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。

サンプルの材質と表面状態。試験範囲、主試験力および保持時間。硬度値（平均値および標準偏差）。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録（参考）

付録 A: 標準データ

炭素鋼: HRC 80 ± 1。焼入れ鋼: HRC 50 ± 0.5。WC10Co: HRA 88 ± 0.5。

説明する

シリーズ規格:

ISO 6508-1:2016 は中核的な試験方法を規定しています。ISO 6508-2:2015 は検証および校正手順を規定しています。

ISO 6508-3:2015 では、標準的なテスト ブロックの準備について規定されています。

有効期間: ISO 6508-1:2016 は 2021 年現在有効ですが、将来、新しいテクノロジーや機器に基づいて更新される可能性があります。

ISO 公式サイトからご購入いただけます。

注意: 実施する際には、具体的な材料特性と機器の校正結果を参照し、専門の技術者に相談してください。

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:

ASTM G59

ポテンショダイナミック分極抵抗測定 の標準試験方法

概要

ASTM G59 は、米国材料試験協会（ASTM International）によって開発された「動電位分極抵抗測定の実施のための標準試験方法」という規格です。この規格は 1997 年 11 月 10 日に初版が発行され、最新版は 2014 年 6 月 1 日に発行され、2023 年に有効であることが確認された **ASTM G59-97 (2014)** です。ASTM G59 は、ASTM 委員会 G01（腐食金属）によって開発され、動電位分極抵抗測定を通じて腐食環境における金属および合金の腐食速度と腐食傾向を評価するための実験室方法を提供します。この規格は、腐食メカニズムの研究、材料のスクリーニング、品質管理に適しています。

1 範囲

適用対象: 電解質溶液中の金属および合金（鋼、ステンレス鋼、アルミニウム、硬質合金など）の腐食挙動試験に適しています。

目的: 腐食電流密度（ i_{cor} ）分極抵抗を測定することにより、腐食速度と腐食温度（ $ICORR$ ）を予測することができます。

該当なし: 非導電性材料の腐食試験や極端な条件下(高温熔融塩など)には適していません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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。

ASTM G3-14 実験室腐食試験の準備、実施、および結果の分析に関する標準実施方法

ASTM G5-14 標準参照試験方法:ポテンショダイナミック分極

ASTM E691-22 標準実施方法: 試験データの比較可能性の評価

3 用語と定義

この規格には以下の用語と定義が適用される:

3.1 分極抵抗 (R_p)

腐食電位付近で小さな電位変化を加えたときの電流密度と電位差の比。単位は $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

3.2 腐食電流密度 (E_{corr})

単位面積あたりの腐食反応を通る電流密度（単位は $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ）は、腐食速度を推定するために使用されます

3.3 腐食電位 (E_{corr})

電流を流していない電解質中の金属の平衡電位。単位は mV (基準電極に対する相対値)。

4 実験準備

4.1 標本

材質: 炭素鋼、304 ステンレス鋼、WC-Co 炭化物などの金属または合金。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

サイズ:露出面積 $1\text{cm}^2 \pm 0.1\text{cm}^2$ 、または合意により決定。

数量: 各実験グループは 3 回繰り返されました。

4.2 サンプル処理

表面処理: $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$ まで機械研磨し、洗浄後蒸留水でリンスします。

取り付け:露出面に気泡がないことを確認しながら、試料を電極ホルダーに挿入します。

4.3 電解質

溶液: 例えば 3.5%NaCl 溶液 (質量分率)、pH6.5~7.0、または合意により決定。

脱酸素:必要に応じて、溶存酸素を除去するために 15 分間窒素パージします。

温度: $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、またはプロトコルによって制御されます。

4.4 機器

電気化学ワークステーション: 電位制御 (精度 $\pm 0.1 \text{mV}$) および電流測定 (精度 $\pm 0.1 \mu\text{A}$) 機能を備えています。

電極システム:

作用電極: サンプル。

参照電極: 飽和カロメル電極 (SCE) または Ag/AgCl 電極。

補助電極: 白金電極。

5 試験方法

5.1 試験手順

電極システムを取り付け、電解液に浸し、 E_{corr} が 1 時間安定するまで放置します。安定します (変化率 $< 0.1 \text{mV/分}$)。

初期 E_{corr} を記録する。

$\text{corr} \pm 10 \text{mV}$ の範囲で、スキャン速度 $0.166 \text{mV/s} \pm 0.002 \text{mV/s}$ で実行されました。

電流密度-電位曲線を記録します。

電極を外してサンプルを洗浄します。

5.2 パラメータ設定

スキャン範囲: $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{mV}$ (線形領域)。

サンプリング間隔: $\leq 0.1 \text{mV}$ 。

環境制御: 振動と電磁干渉を回避する。

6 データ処理

6.1 分極抵抗の計算

式:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

測定: 曲線から線形領域の傾きを抽出します。

6.2 腐食電流密度の推定

スターン・ギブスの式:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (通常 26 mV 对于活性腐蚀, 52 mV 对于钝化系统), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

精度: $\pm 10\%$ 。

6.3 不确实性

電極の安定性と溶液の純度の影響を 95% の信頼度で評価します。

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。

試料の材質と表面状態。

電解質の組成、温度、pH。

スキャン速度、範囲、 $E_{\text{補正}}$ 値。

R_p と i_{corr} 結果と不确实性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録（参考）

付録 A: 標準データ

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

説明する

規格へのリンク: ASTM G59 は、ASTM G5 (ポテンショダイナミック分極) と組み合わせて使用され、腐食挙動の包括的な分析を提供します。

制限事項: 直線性は小さな電位範囲に対してのみ想定されており、ASTM G5 を基準とした $\pm 10 \text{ mV}$ を超える範囲では必要な場合があります。

有効性: ASTM G59-97 (2014) は 2023 年に有効であることが確認されており、将来、電気化学技術に基づいて更新され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

付録:

ASTM G3-14

腐食試験における電気化学測定に適用される条約の標準実施方法

概要

ASTM G3-14 は、米国材料試験協会（ASTM International）が策定した「腐食試験における電気化学測定に適用可能な標準規格」です。この規格は 2014 年 5 月 1 日に発行され、最新版は 2024 年 1 月 1 日に発行され、2024 年に有効であることが確認された **ASTM G3-14 (2024)** です。ASTM G3 は、ASTM 委員会 G01（金属腐食）によって策定され、実験室腐食試験における電気化学測定のための統一された規格、用語、および手順を提供し、試験結果の再現性と比較可能性を確保するために使用されています。この規格は、様々な腐食環境における金属および合金の電気化学試験に適用可能です。

1 範囲

適用対象: 電解質溶液中の金属および合金（鋼、ステンレス鋼、アルミニウム、硬質合金など）の電気化学的腐食試験に適しています。

目的: 電極システム、機器のセットアップ、データの解釈など、電気化学測定の準備、操作、分析を標準化します。

該当なし: 非電気化学的腐食試験(塩水噴霧試験など)または非金属材料には適用されません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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。

ASTM G5-14 標準参照試験方法:ポテンショダイナミック分極

ASTM G59-97(2014)標準試験方法: ポテンショダイナミック分極抵抗測定

ASTM E691-22 標準実施方法: 試験データの比較可能性の評価

3 用語と定義

この規格には、以下の用語と定義が適用される。3.1

電気化学セル

電気化学測定に使用される装置で、作用電極、参照電極、補助電極が含まれる。3.2 腐食電位（ E_{corr} ）

電流を流さない電解質中の金属の平衡電位。単位は mV（基準電極に対する相対値）です。

3.3 分極抵抗（ R_p ）

電位の変化とそれに対応する電流の変化の比（ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ で表す）腐食速度を推定するために使用されます。3.4

参照電極

飽和カロメル電極（SCE）や Ag/AgCl 電極など、安定した電位参照を提供する電極。

4 実験準備

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 標本

材質:炭素鋼、304 ステンレス鋼、WC-Co 炭化物などの金属または合金。

サイズ:露出面積 $1\text{cm}^2 \pm 0.1\text{cm}^2$ 、または合意により決定。

数量: 各実験グループは 3 回繰り返されました。

4.2 サンプル処理

表面処理: $Ra \leq 0.8\text{ }\mu\text{m}$ まで機械研磨し、洗浄後蒸留水ですすぎ、乾燥させて使用します。

取り付け:露出面に気泡や汚れがないことを確認しながら、試料を電極ホルダーに挿入します。

4.3 電解質

溶液: 例えば 3.5%NaCl 溶液（質量分率）、pH6.5~7.0、または合意により決定。

純度:導電率 $1\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下の脱イオン水を使用してください。

温度: $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、またはプロトコルによって制御されます。

4.4 電気化学機器

ワークステーション: 電位制御（精度 $\pm 0.1\text{ mV}$ ）、電流測定（精度 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{A}$ ）機能付き。

電極システム:

作用電極: サンプル。

参照電極: SCE または Ag/AgCl 電極。

補助電極: 白金またはグラファイト電極。

接地:ノイズ干渉を減らすために、システムが接地されていることを確認します。

5 テスト操作

5.1 電気化学セルの組み立て

電極間の距離が適切であることを確認します（作用電極から参照電極までの距離 $\leq 5\text{ mm}$ ）。

溶液の漏れを防ぐために、気密性を確認してください。

5.2 初期安定性

が反応するまで 1 時間電解液に浸す 安定します（変化率 $< 0.1\text{ mV}/\text{分}$ ）。

初期 E_{corr} を記録する。

5.3 測定手順

開回路電位（OCP）: E_{corr} の変化を記録する 30 分以内に。

分極抵抗: ASTM G59 によれば、走査範囲は E_{corr} である。 $\pm 10\text{ mV}$ 、レートは $0.166\text{ mV}/\text{s} \pm 0.002\text{ mV}/\text{s}$ です。

電位動的分極: ASTM G5 によれば、走査範囲は E_{corr} である。 $\pm 250\text{ mV}$ 、レートは $0.5\text{ mV}/\text{s} \pm 0.05\text{ mV}/\text{s}$ です。

5.4 環境制御

振動、温度変動 ($\pm 1^\circ\text{C}$)、電磁干渉を避けてください。

6 データ分析

6.1 腐食電位

E_{corr} の平均値、精度 $\pm 1\text{ mV}$ 。

6.2 分極抵抗

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

精度: $\pm 5\%$ 。

6.3 腐食電流密度

スターン・ギブスの式:

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (26 mV 或 52 mV, 取决于腐蚀类型), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

精度: $\pm 10\%$ 。

6.4 不確定性

電極ドリフト、溶液の純度、機器の精度の影響を 95% の信頼度で評価します。

6.5 曲線分析

電位-電流密度曲線をプロットして、受動領域または能動領域を識別します。

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。

試料の材質と表面状態。

電解質の組成、温度、pH。

測定パラメータ (スキャンレート、範囲など)。

E_{corr} 、 R_p および i_{corr} 結果と不確定性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録 (参考)

付録 A: 標準データ

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega\cdot\text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega\cdot\text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega\cdot\text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

付録 B: 電極の校正

参照電極は、既知の電位の標準溶液を使用して、誤差が $\pm 2 \text{ mV}$ 以下の状態で定期的に校正されました。

説明する

関連規格との関係: ASTM G3-14 は、一貫性を重視しながら、ASTM G5 や G59 などの電気化学試験の基本的な実践を提供します。

制限事項: 結果は電解質の組成とサンプルの表面状態によって影響を受けるため、条件を厳密に制御する必要があります。

有効期間: ASTM G3-14(2024)は 2024 年に有効であることが確認されており、将来、電気化学技術に基づいて更新され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

付録:

ASTM G5-14

ポテンショダイナミック陽極分極測定 のための標準試験方法

概要

ASTM G5-14 は、米国材料試験協会（ASTM International）によって開発された規格で、「動電位陽極分極測定を行うための標準参照試験方法」と題されています。この規格は 2014 年 5 月 1 日に発行され、最新バージョンは **ASTM G5-14(2021)** で、2021 年 6 月 1 日に発行され、2023 年に有効であることが確認されています。ASTM G5 は、ASTM 委員会 G01（腐食金属）によって開発され、動電位分極測定を通じて腐食環境における金属および合金の陽極挙動、不動態化特性、および腐食傾向を評価するための実験室方法を提供します。この規格は、腐食メカニズムの研究、材料のスクリーニング、および品質管理に適しています。

1 範囲

適用対象: 電解質溶液中の金属および合金（鋼、ステンレス鋼、アルミニウム、硬質合金など）の陽極分極挙動の試験に適しています。

目的: 電位走査を制御し、電流密度-電位曲線を測定することで、**腐食電位、不動態化領域および破裂電位**を分析する。

該当なし: 非導電性材料または非電気化学的腐食試験(乾燥摩耗など)には適していません。

2 規範的参照

以下の文書は、本規格の適用に不可欠です。日付が記載されている参照文書については、日付の記載された版のみが本規格に適用されます。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。

ASTM G3-14(2024) 実験室腐食試験の準備、実施、および分析に関する標準規格

ASTM G59-97(2014)標準試験方法: ポテンショダイナミック分極抵抗測定

ASTM E691-22 標準実施方法: 試験データの比較可能性の評価

3 用語と定義

この規格では、以下の用語と定義が適用されます。3.1

ポテンショダイナミック分極

電流密度と電位の関係は、電位を一定速度で変化させることによって測定されます。3.2

腐食電位 (E_{corr})

電流を流さない電解質中の金属の平衡電位 (mV 単位、基準電極に対する相対値)。3.3

不動態化電位 (E_{pass})

電流密度が規定の電位に達した後、著しく低下し始める電位 (mV)

3.4 破壊電位 (E_b)

不動態皮膜が破壊され、電流が急激に増加する電位 (mV)。

4 実験準備

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 標本

材質:炭素鋼、304 ステンレス鋼、WC-Co 炭化物などの金属または合金。

サイズ:露出面積 $1\text{cm}^2 \pm 0.1\text{cm}^2$ 、または合意により決定。

数量: 各実験グループは 3 回繰り返されました。

4.2 サンプル処理

表面処理: $Ra \leq 0.8\text{ }\mu\text{m}$ まで機械研磨し、洗浄後蒸留水ですすぎ、乾燥させて使用します。

取り付け:露出面に気泡や汚れがないことを確認しながら、試料を電極ホルダーに挿入します。

4.3 電解質

溶液: 例えば 3.5%NaCl 溶液 (質量分率)、pH6.5~7.0、または合意により決定。

純度:導電率 $1\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下の脱イオン水を使用してください。

温度: $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、またはプロトコルによって制御されます。

4.4 電気化学機器

ワークステーション: 電位制御 (精度 $\pm 0.1\text{ mV}$)、電流測定 (精度 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{A}$) 機能付き。

電極システム:

作用電極: サンプル。

参照電極: 飽和カロメル電極 (SCE) または Ag/AgCl 電極。

補助電極: 白金またはグラファイト電極。

接地:ノイズ干渉を減らすために、システムが接地されていることを確認します。

5 試験方法

5.1 試験手順

電極システムを取り付け、電解液に浸し、 E_{corr} が 1 時間安定するまで放置します。安定します (変化率 $< 0.1\text{ mV}/\text{分}$)。

初期 E_{corr} を記録する。

$E_{\text{corr}} - 50\text{ mV}$ で陽極方向にスキャンし、 E_{corr} に合わせる $+1500\text{ mV}$ またはスキャン速度 $0.167\text{ mV}/\text{s} \pm 0.002\text{ mV}/\text{s}$ で電流密度 $1\text{ mA}/\text{cm}^2$ 。

電流密度-電位曲線を記録します。

電極を外してサンプルを洗浄します。

5.2 パラメータ設定

スキャン範囲: $E_{\text{corr}} - 50\text{ mV}$ から $E_{\text{corr}} + 1500\text{ mV}$ 、または電流密度 $1\text{ mA}/\text{cm}^2$ まで。

サンプリング間隔: $\leq 0.1\text{ mV}$ 。

環境管理: 振動と温度変動 ($\pm 1^\circ\text{C}$) を避けてください。

6 データ分析

6.1 主な潜在能力

E_{corr} : 曲線の開始点を $\pm 1\text{ mV}$ の精度で記録します。

E_{pass} : 電流密度が安定した値に低下する電位を、 $\pm 5\text{ mV}$ の精度で決定します。

E_b : 電流が急激に上昇する破裂電位を $\pm 5\text{ mV}$ の精度で識別します。

6.2 電流密度

アノード領域とカソード領域の電流密度は、 $\pm 1\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の精度で $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 単位で記録されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 腐食速度の推定

ターフェル外挿：曲線から陽極および陰極ターフェル勾配を抽出し、 i を計算します。

$$i_{\text{corr}} = 10^{\frac{E_{\text{corr}} - a}{b_a} + \log i_a}$$

其中、 a 和 b_a 分别为阴极和阳极塔菲尔常数， i_a 为阳极电流密度。

精度： $\pm 10\%$ 。

6.4 不確定性

電極ドリフト、溶液の純度、機器の精度の影響を 95% の信頼度で評価します。

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。

試料の材質と表面状態。

電解質の組成、温度、pH。

スキャン速度、範囲、 $E_{\text{補正}}$ 価値。

$E_{\text{パス}}$ 、私 コル 結果と不確定性。

テスト日、機器モデル、オペレーターの署名。

8 付録（参考）

付録 A: 標準データ

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, E_{pass} 不明显, $E_b = -400 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{pass}} = 0 \text{ mV}$, $E_b = 800 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{pass}} = 100 \text{ mV}$, $E_b = 900 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

付録 B: 電極の校正

参照電極は、既知の電位の標準溶液を使用して、誤差が $\pm 2 \text{ mV}$ 以下の状態で定期的に校正されました。

説明する

関連規格へのリンク: ASTM G5-14 は、ASTM G3 および ASTM G59 と組み合わせて使用され、包括的な電気化学的腐食分析を提供します。

制限事項: 結果はスキャン速度と電解質の組成によって影響を受けるため、実際の環境と比較して検証する必要があります。

有効期間: ASTM G5-14(2021)は 2023 年に有効であることが確認されており、将来、電気化学技術に基づいて更新される可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

目次

パート 3: 超硬合金の性能最適化

第 8 章 超硬合金の耐腐食性と耐高温性

8.1 超硬合金の耐食性メカニズム

8.1.1 炭化タングステン（WC）とセメント炭化物中のバインダー相の電気化学的挙動

8.1.2 セメント炭化物の酸性/塩水噴霧環境

8.1.2.1 原理と技術概要

8.1.2.2 酸性/塩水噴霧環境における超硬合金のメカニズムと分析

8.1.2.3 酸性および塩水噴霧環境における超硬合金の腐食に影響を与える要因の分析

8.1.2.4 酸性および塩水噴霧環境における超硬合金の腐食影響の最適化戦略

8.1.2.5 酸性および塩水噴霧環境における超硬合金の工学的応用

このセクションの炭化物腐食に関するヒント

（1）超硬合金の腐食経路

（2）超硬合金は表面保護を強化する

（3）超硬合金の粒界密度

（4）超硬合金の腐食応力

（5）超硬合金表面の孔食

8.2 超硬合金の高温特性

8.2.1 超硬合金の耐酸化性（800～1000℃）

8.2.1.1 超硬合金の耐酸化性の原理と技術の概要

8.2.1.2 超硬合金の耐酸化性メカニズムと解析

8.2.1.3 超硬合金の耐酸化性に影響を与える因子の分析

8.2.1.4 超硬合金の耐酸化性を最適化するための戦略

8.2.1.5 超硬合金の耐酸化性の工学的応用

8.2.2 超硬合金の熱疲労とクリープ

8.2.2.1 熱疲労とクリープの原理と技術の概要

8.2.2.2 超硬合金の熱疲労およびクリープ機構と解析

8.2.2.3 超硬合金の熱疲労とクリープに影響を及ぼす要因とそれらの相互作用

8.2.2.4 超硬合金の熱疲労およびクリープ最適化戦略

8.2.2.5 超硬合金の熱疲労およびクリープ性能最適化の工学的応用

8.3 超硬合金の耐食性と耐高温性を最適化する方法

8.3.1 超硬合金における Ni 基結合相の耐食性の利点

基超硬合金結合相の耐食性利点の原理と技術概要

超硬合金における Ni 基結合相の耐食性機構の解析

超硬合金における Ni 基結合相の耐食性の顕微鏡的分析と検証

超硬合金における Ni 基結合相の耐食性に影響を及ぼす因子の分析

8.3.1.5 Ni 基バインダー相調製プロセスの最適化

8.3.1.6 超硬合金の Ni 基結合相の試験仕様

8.3.1.7 超硬合金 Ni 基結合相の機械的特性試験

8.3.1.9 Ni 基超硬合金バインダー相の工学的応用

8.3.1.10 Ni 基超硬合金の応用上の利点と拡大

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超硬合金への Cr_3C_2 添加剤の導入

8.3.2.1 Cr_3C_2 添加剤の超硬合金への導入の原理と技術概要

8.3.2.2 Cr_3C_2 添加剤による超硬合金の抗酸化・耐腐食性向上メカニズムの解析

8.3.2.3 Cr_3C_2 添加剤のセメント炭化物への導入の顕微鏡分析と検証

8.3.2.4 超硬合金 Cr_3C_2 添加剤の性能に影響を与える要因の分析

8.3.2.5 超硬合金 Cr_3C_2 添加剤の製造プロセスの最適化

8.3.2.6 超硬合金 Cr_3C_2 添加剤のエンジニアリング事例と性能比較

8.3.2.7 超硬合金における Cr_3C_2 添加剤の用途拡大と限界

8.3.2.8 最適化の方向性と将来の展望 超硬合金への Cr_3C_2 添加剤の導入

8.3.3 硬質合金表面コーティング保護

超硬合金表面コーティング保護の原理と技術の概要

超硬合金表面コーティングの耐食性および耐酸化性メカニズムの解析

超硬合金表面コーティングの顕微鏡分析と検証

超硬合金表面コーティングに影響を与える要因の分析

8.3.3.6 超硬合金表面コーティング保護の準備プロセスの最適化

セメント炭化物表面コーティングのエンジニアリング事例と性能比較

8.3.3.8 超硬合金表面コーティングの用途拡大と限界

最適化の方向性と今後の展望 超硬合金表面コーティング

8.3.4 超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータの最適化

8.3.4.1 超硬合金の耐腐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータの最適化の原理と技術の概要

8.3.4.2 超硬合金プロセスパラメータ最適化の耐食性と性能メカニズムの解析

8.3.4.3 超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータ最適化の微視的分析と検証

8.3.4.4 超硬合金の耐食性および耐高温性のプロセスパラメータ最適化に影響を与える要因の分析

8.3.4.5 超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータの最適化戦略

8.3.4.6 セメント炭化物の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータ最適化のエンジニアリングケースと性能比較

8.3.4.7 超硬合金の耐食性と耐高温性に関するプロセスパラメータ最適化の適用範囲と限界

8.3.4.8 超硬合金の耐食性および耐高温性に関するプロセスパラメータの最適化と将来の展望

8.3.5. 超硬合金の微細構造制御

8.3.5.1 超硬合金の微細組織制御の原理と技術の概要

8.3.5.2 超硬合金の微細構造制御による耐食性と性能メカニズムの解析

8.3.5.3 超硬合金の微細構造制御のミクロ分析と検証

8.3.5.4 超硬合金の微細構造に影響を及ぼす因子の分析

8.3.5.5 超硬合金の微細構造制御戦略

8.3.5.6 超硬合金の微細構造制御工学の事例と性能比較

8.3.5.7 超硬合金の微細組織制御の応用拡大と限界

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

8.3.5.8 超硬合金の微細構造制御と最適化の方向性と将来展望

超硬合金の耐食性および耐高温性の試験と評価

8.4.1 超硬合金の腐食速度（電気化学的ターフェル曲線）

8.4.1.2 超硬合金の腐食速度のメカニズムと分析

8.4.1.3 超硬合金の腐食速度に影響を与える要因の分析

8.4.1.4 超硬合金の腐食速度試験方法

8.4.1.6 超硬合金の腐食速度の適用範囲と限界

8.4.1.7 超硬合金の腐食速度の最適化の方向性と将来の展望

8.4.2 超硬合金の高温硬度と熱衝撃試験

超硬合金の高温硬度と熱衝撃試験の原理と技術の概要

超硬合金の高温硬度および熱衝撃試験のメカニズムと解析

8.4.2.3 超硬合金の高温硬度と熱衝撃試験に影響を及ぼす因子の分析

超硬合金の高温硬度及び熱衝撃試験方法

8.4.2.5 超硬合金の高温硬度および熱衝撃試験の工学応用

超硬合金の高温硬度および熱衝撃試験の応用範囲と限界

8.4.2.7 超硬合金の高温硬度と熱衝撃試験の最適化の方向性と将来展望

参考文献

付録：

超硬合金製高温金型と高密度タングステン合金製金型の比較分析

超硬合金製高温金型とチタンジルコニウムモリブデン（TZM）合金金型の比較分析

超硬合金ガスタービン部品の概要

超硬合金製食品加工工具および食品加工機器部品

炭化物ガスタービンノズル

硬質合金化学パイプラインバルブ

炭化物製紙機器部品

中華人民共和国国家規格 GB/T 7997-2017

超硬合金の性能試験方法 中華人民共和国国家規格 GB/T 3851-2015 超硬合金の微細構造

の決定方法 中華人民共和国国家規格 GB/T 3850-2015 超硬合金の微細構造の決定方法

中華人民共和国国家規格 GB/T 18376-2014 超硬合金の衝撃疲労試験方法 中華人民

共和国国家規格 GB/T 7997-2017 超硬合金の性能試験方法 国際

規格 ISO 15156-1:2020

石油、石油化学、天然ガス産業 — 石油・ガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料

— パート 1: 耐ひび割れ性材料の選択に関する一般原則石油

石油化学および天然ガス産業 - 石油およびガス生産における H₂S 含有環境で使用する

材料 - パート 1: 耐割れ性材料の選択に関する一般原則国際

規格 ISO 15156-2:2020

石油、石油化学、天然ガス産業

— 石油・ガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料

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

— パート 2: 耐割れ性炭素鋼および低合金鋼、鋳鉄の使用石油
、石油化学および天然ガス産業 - 石油およびガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料

— パート 2: 割れに強い炭素鋼、低合金鋼、鋳鉄の使用

国際規格 ISO 15156-3:2020

石油、石油化学および天然ガス産業

— 石油・ガス生産における H₂S 含有環境で使用する材料

— パート 3: 耐割れ性 CRA（耐食合金）およびその他の合金石油

、石油化学および天然ガス産業 - 石油およびガス生産における H₂S を含む環境で使用する材料

— パート 3: 耐食合金（CRA）およびその他の耐割れ性合金

炭化物高温金型

CTIA GROUP 超硬ペーパーカッター

ISO 9227:2017 腐食試験 人工雰囲気での塩水噴霧試験

中華人民共和国国家規格 GB/T 18376-2014

超硬合金の耐食性および耐摩耗性試験方法

国際規格 ISO 4287:1997

製品の幾何学的仕様 - 表面性状: プロファイル法 - 用語、定義および表面性状パラメータ 製品の幾何学的仕様 (GPS)

— 表面性状: プロファイル法

— 用語、定義、表面テクスチャパラメータ

国際規格 ISO 3274:1996

製品の幾何学的仕様 - 表面性状: 形状測定 - 接触式計測器の公称特性 製品の幾何学的仕様 (GPS)

— 表面性状: プロファイル法

— 接触式（スタイラス式）機器の公称特性

ISO 4288:1996

製品の幾何学的仕様 - 表面性状: プロファイル法 - 表面性状の評価に関する規則および手順

— 表面性状: プロファイル法

— 表面性状の評価に関する規則と手順

中華人民共和国国家規格 GB/T 12444-2006

金属材料の滑り摩擦及び摩耗試験方法 中華人民共和国国家規格 GB/T 16545-2008 金属材料の塩水噴霧腐食試験方法 中華人民共和国

国家規格 GB/T 3850-2015

金属及び合金の腐食試験に関する一般ガイドライン 国際規格 ISO 8044:2015 金属及び合金の腐食 - 基本用語及び定義

国際規格 ISO 9223:2012

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

金属及び合金の腐食 - 大気の腐食性 - 分類

GB/T 38512015 中華人民共和国国家規格

超硬合金の微細構造の決定方法

中華人民共和国国家規格 **GB/T 7997-2017** 超硬合金の性能試験方法 国際規格 **ISO 6508**

金属材料 - ロックウェル硬さ試験 金属材料 - ロックウェル硬さ試験

国際規格 **ISO 6508-3:2015**

金属材料 - ロックウェル硬さ試験 - パート 3: 基準ブロックの校正

国際規格 **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

ASTM G59

ポテンショダイナミック分極抵抗測定の標準試験方法

ポテンショダイナミック分極抵抗の測定のための標準試験方法

ASTM G3-14

腐食試験における電気化学測定に適用される条約の標準実施方法

ASTM G5-14

ポテンショダイナミック陽極分極測定

のための標準試験方法

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