

タングステンカーバイド粉末（TCP）

物理的・化学的性質、調製、および用途

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

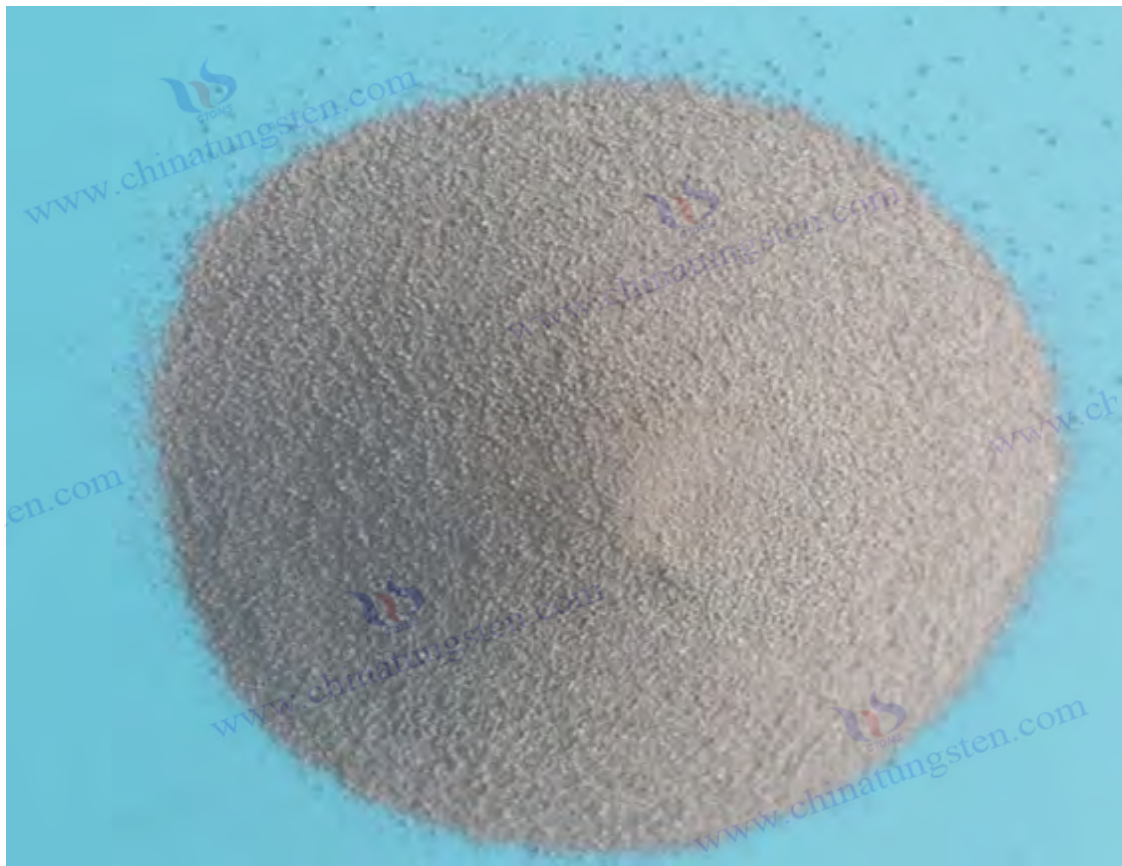
CTIA GROUP LTD

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



目次

序文

炭化タングステン粉末の重要性と研究背景

この本の目的と対象読者

執筆方法と内容の概要

第1章 炭化タングステン粉末の紹介

1.1 定義と化学組成

1.2 歴史的発展

1.3 基本的な物理的および化学的性質

1.4 炭化タングステン粉末の分類

第2章 炭化タングステン粉末の製造プロセス

2.1 原材料の準備

2.2 伝統的な炭化法

2.3 化学蒸着法（CVD法）

2.4 メカニカルアロイング法

2.5 その他の新興技術

2.6 後処理技術

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第3章 炭化タングステン粉末の微細構造と特性評価技術

- 3.1 微細構造特性
- 3.2 特性評価方法
- 3.3 化学組成分析
- 3.4 物理的特性試験

第4章 炭化タングステン粉末の応用分野（主要章）

概要

炭化タングステン粉末の汎用性と応用価値

章構成と研究方法

データソースとケース分析

4.1 超硬合金製造

4.1.1 切削工具

4.1.1.1 旋削工具とフライスカッター

WC-Co 配合（コバルト含有量 6%~12%）と切削性能データ：切削速度 50%向上（高速度鋼との比較、200m/分超）事例：自動車エンジンシリンダーブロック加工（寿命 10 万個超）

4.1.1.2 ドリルビットとボーリングツール

ミクロン級 WC 粉末（1~ 3 μm ）性能：硬度 HV1600、耐チップング性 $>12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 技術：多層 WC- TiC コーティングドリル（耐摩耗性 3 倍）

4.1.1.3 特殊切削工具

PCB マイクロドリル（直径 $<0.1\text{mm}$ ）および超硬材料加工ツール ナノ WC 粉末（ $<100\text{nm}$ ）の焼結プロセス（ 1450°C 、HIP）事例：航空複合材料加工（精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ）

4.1.2 耐摩耗部品

4.1.2.1 スタンピングダイ

WC ベースの金型の冷間プレス鋼板への応用データ：寿命 $> 500,000$ 回（Cr12MoV の 5 倍）技術：WC-Co 焼結（ 1500°C 、30 MPa）

4.1.2.2 線引きダイスと押し出しダイス

微細 WC 粉末（0.5-1 μm ）性能：表面粗さ $Ra < 0.02\ \mu\text{m}$ 、摩耗率 $< 0.001\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 事例：ケーブル業界の伸線ダイス（連続運転 > 6 か月）

4.1.2.3 耐摩耗性ベアリングとシール

WC-Ni 複合材料の高速軸受への応用 データ：摩擦係数 < 0.1 、耐熱性 $> 800^\circ\text{C}$ 技術：熱間等方圧加圧（HIP）プロセス最適化

4.1.3 精密加工工具

4.1.3.1 歯科および医療用具

歯科用ドリルビット（直径 0.3~1 mm）への WC 粉末の微細加工特性：硬度 HV 1800、生体適合性（ISO 10993-5）事例：歯科手術用ドリル（耐久性 1000 回以上）

4.1.3.2 光学モールド

金型における超微粒子 WC 粉末の応用データ：表面精度 $< 10\text{nm}$ 、金型プレス寿命 > 10 万回技術：WC コーティングと組み合わせた鏡面研磨

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2 表面コーティング技術

4.2.1 熱溶射コーティング

4.2.1.1 HVOF 溶射

耐摩耗コーティングにおける WC-Co 粉末（10%-12% Co）の適用データ：コーティング硬度 HV 1200-1400、摩耗率 $<0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 事例：航空機エンジンブレード（寿命 >3000 時間）

4.2.1.2 火炎溶射

低コストの耐摩耗コーティングにおける WC-Ni 粉末の応用 性能：接合強度 $>50 \text{ MPa}$ 、厚さ 100 \sim 300 μm 事例：農業機械のブレード（耐摩耗性が 4 倍に向上）

4.2.2 プラズマ溶射とレーザークラディング

4.2.2.1 プラズマ溶射

WC-Cr₃C₂ 複合コーティングの高温耐食性データ：耐酸化性 $>1000^\circ \text{C}$ 、気孔率 $<2\%$ 事例：ガスタービンブレード（運転時間 >5000 時間）

4.2.2.2 レーザークラディング

WC 粉末による石油掘削ツールの表面強化性能：コーティング厚さ 0.5 \sim 2mm、硬度 HV1300 事例：深海掘削パイプ（耐食寿命 >2 年）

4.2.3 耐高温性と特殊コーティング

4.2.3.1 耐熱衝撃コーティング

高温金型における WC ベースコーティングの適用データ：熱膨張係数 $<5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ 、耐熱性 $>1200^\circ \text{C}$ 技術：WC- TiC -Ni 複合コーティング

4.2.3.2 耐薬品性コーティング

化学パイプラインにおける WC-CoCr コーティングの耐食性 事例：酸性環境におけるバルブ（寿命 3 年超）

4.3 採掘および建設ツール

4.3.1 岩石掘削ツール

4.3.1.1 硬岩ドリルビット

花崗岩採掘における WC インレイドリルビットの適用データ：衝撃靱性 $>25 \text{ J/cm}^2$ 、掘削速度 $>12 \text{ m/h}$ 事例：鉱山発破掘削（寿命 >1000 m）

4.3.1.2 炭層掘削ツール

炭掘削における WC-Co カッターヘッド 性能：硬度 HV 1500、耐摩耗性 $<0.002 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 技術：WC- TiC 複合強化

4.3.2 シールドカッターとトンネル掘削装置

4.3.2.1 メトロシールドカッターヘッド

砂岩層における WC ベースの切削工具の適用 データ：切削寿命 $>6000 \text{ m}$ 、耐摩耗性が 2 倍に向上 事例：都市トンネルプロジェクト（交換サイクル >1 年）

4.3.2.2 硬質地盤用トンネルカッター

WC- TiC 工具性能：破壊靱性 $>15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 技術：超硬質 WC 粉末の焼結最適化

4.3.3 耐摩耗ライニングおよび破碎装置

4.3.3.1 ボールミルライニング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC 強化ライナーの鉨石粉碎への応用 データ： 摩耗率 <0.05 g/t、寿命 >2 年 事例： 鉄鉨石処理（効率 30%向上）

4.3.3.2 クラッシャーハンマー

石灰石破碎における WC-Co ハンマーの耐摩耗性 性能： 衝撃寿命 > 100,000 回

4.4 エレクトロニクス・エネルギー分野

4.4.1 導電性コーティングおよび電極材料

4.4.1.1 燃料電池電極

PEM 燃料電池における WC 粉末の電気伝導率データ： 抵抗率<10-5Ω · cm 、サイクル安定性 >10,000 回技術： WC 薄膜の PVD 堆積

4.4.1.2 リチウム電池集電体

アルミ箔への WC コーティングの耐久性 性能： 接着力>20 N/cm、耐腐食性 2 倍向上 事例： 電気自動車バッテリー（容量維持率>90%）

4.4.2 触媒担体

4.4.2.1 水素燃料触媒

水電解におけるナノ WC 粉末 (<50 nm) の応用データ： 触媒活性 >95% (Pt/C と比較) 技術： WC-Pt 複合触媒

4.4.2.2 化学触媒

アンモニア合成における WC ベースの担体の安定性 性能： 耐熱性 >600° C、寿命 >5000 時間

4.4.3 エネルギー貯蔵と熱管理

4.4.3.1 スーパーキャパシタ

WC 系電極材料の比容量 (>250 F/g) データ： サイクル寿命 > 8000 回 事例： 新しいエネルギー貯蔵システム

4.4.3.2 熱管理コーティング

LED における WC 放熱コーティングの適用性能： 熱伝導率>120 W/ m · K

4.5 航空宇宙および軍事用途

4.5.1 タービンブレードとノズル

4.5.1.1 航空機エンジンブレード

WC-Co コーティングの高温耐摩耗性への応用データ： 耐熱性 >1300° C、寿命 >4000 時間事例： ターボファンエンジン（推力効率 5%向上）

4.5.1.2 ロケットノズル

固体ロケットにおける WC 系耐熱コーティングの適用 性能： アブレーション抵抗<0.01 mm/s

4.5.2 装甲材料

4.5.2.1 戦車の装甲

WC セラミック複合装甲の耐弾性能データ： 硬度>2200 HV、貫通抵抗>1200 m/s ケース： 主力戦車防護（厚さ<50 mm）

4.5.2.2 防弾チョッキプラグイン

軽量 WC 基材の適用性能： 重量<2 kg/m²、保護レベル NIJ IV

4.5.3 宇宙船の耐摩耗部品

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.5.3.1 船内機械

サテライトジョイントにおける WC コーティングの耐摩耗性 データ： 摩擦係数 <0.05、寿命 >10 年 技術： 真空 PVD プロセス

4.6 その他の新興アプリケーション

4.6.1 3Dプリンティングと積層造形

4.6.1.1 金属部品の印刷

SLM（選択的レーザー溶融）における WC-Co 粉末の応用データ： 密度>99%、精度±0.02 mm 事例： 航空部品のラピッドプロトタイプング

4.6.1.2 金型製造

3Dプリント用金型におけるナノ WC パウダーの利点性能： 表面硬度 HV 2000

4.6.2 生体医学材料

4.6.2.1 整形外科用インプラント

股関節における WC コーティングの耐摩耗性データ： 摩耗率<0.001 mm³/ N・m 、細胞生存率 >98%技術： WC-Ti 複合コーティング

4.6.2.2 歯科修復

歯冠用 WC ベース材料 性能： 破壊強度 >1000 MPa

4.6.3 インテリジェント製造とセンサー

4.6.3.1 高温センサー

工業用センサーにおける WC 粉末の安定性 データ： 耐熱性 > 1000°C、応答時間 < 1 ms 事例： 製鋼炉の監視

4.7 応用事例とデータ分析

4.7.1 業界アプリケーション概要表

超硬合金、コーティング、鋳業、エレクトロニクスなどの分野におけるデータ比較。

4.7.2 パフォーマンス比較分析

硬度、耐摩耗性、寿命などの主要な指標（従来の材料と比較）

4.7.3 成功事例

グローバルエンタープライズアプリケーションの例（Sandvik、Kennametal など）

4.8 将来の応用展望

4.8.1 新興分野の可能性

量子コンピューティング冷却部品フレキシブル電子導電層

4.8.2 技術的な課題と解決策

ナノ WC 粉末の分散性向上 高温コーティングの安定性向上

4.8.3 市場予測

2030 年の需要成長率は 6%超、主要分野の分析

第5章 炭化タングステン粉末の品質管理と規格

5.1 品質管理のポイント

5.2 国際規格

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.3 国内基準
- 5.4 標準の比較と適用性

第6章 炭化タングステン粉末の性能最適化と改質

- 6.1 粒子サイズ最適化
- 6.2 ドーピングと複合材料の改質
- 6.3 表面改質技術
- 6.4 熱処理と焼鈍

第7章 炭化タングステン粉末の環境と安全に関する考慮事項

- 7.1 生産時の環境影響
- 7.2 安全操作仕様
- 7.3 リサイクルとリサイクル

第8章 炭化タングステン粉末の市場と開発動向

- 8.1 世界市場の概要
- 8.2 技術開発の動向
- 8.3 将来のアプリケーションの展望

第9章 用語、標準、リソース

- 9.1 炭化タングステン粉末関連用語集
- 9.2 参考文献と標準
- 9.3 推奨リソース

付録

- 付録A: 炭化タングステン粉末の微細構造と性能分析
- 付録B: 炭化タングステン粉末の粒度および調製パラメータの標準
- 付録C: 炭化タングステン粉末に関する国際規格と国内規格の比較

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP 's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (±0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance .

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within ±10%.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm³ (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm³ (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤0.05	≤0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	General Carbide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	High toughness wear-resistant parts
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

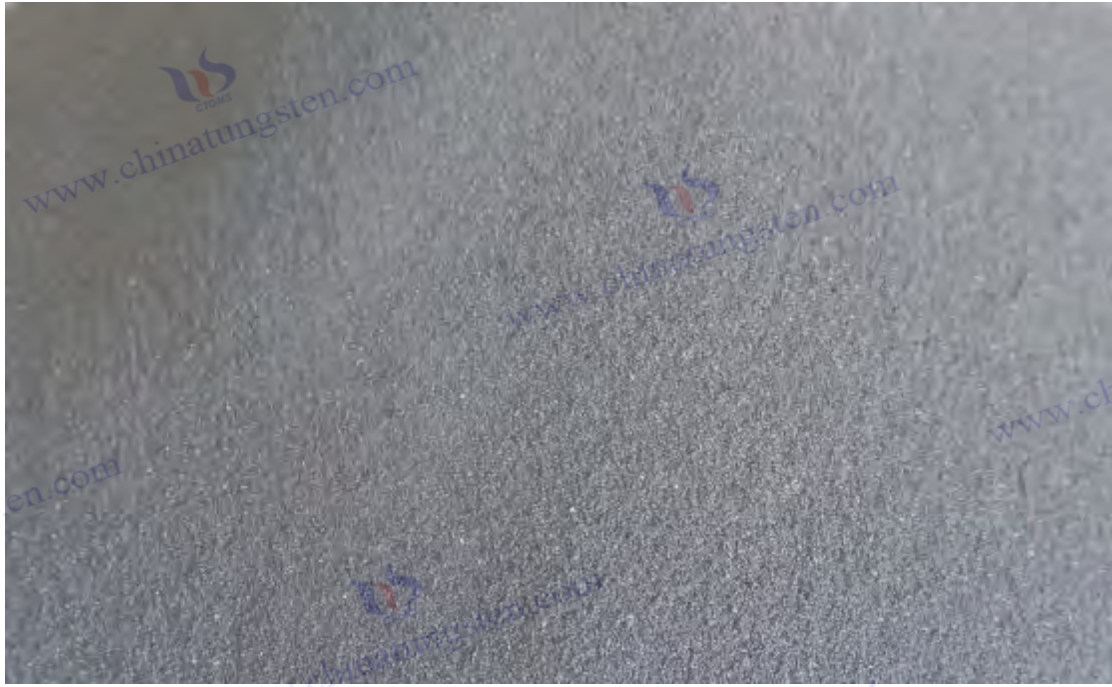
Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support. For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



序文

優れた性能を持つ機能性材料であるタングステンカーバイド粉末（WC）は、HV 2000～2500 の硬度、従来の鋼鉄の 10～20 倍の耐摩耗性、そして最高 2870℃の融点を有し、現代産業と最先端技術の基盤材料となっています。六方晶系の結晶構造（格子定数 $a=2.906\text{\AA}$ 、 $c=2.837\text{\AA}$ ）と高密度（ 15.63g/cm^3 ）により、比類のない機械的強度と化学的安定性を備え、超合金製造、表面コーティング技術、鋳山工具、電子エネルギー、航空宇宙、さらにはバイオメディカル分野において、かけがえのない応用価値を発揮しています。

工業用ナイフの鋭い刃先から航空機エンジンの耐熱コーティング、燃料電池の効率的な触媒から 3D プリントの精密金型まで、炭化タングステン粉末はその汎用性と高性能により、材料科学と産業技術の革新の限界を継続的に押し広げています。

炭化タングステン粉末の発見と応用の歴史は、19 世紀後半のタングステン化学研究にまで遡ります。1893 年、フランスの化学者アンリ・モアッサンが高温浸炭反応によって初めて炭化タングステンを合成しましたが、当時は実験室レベルの製品に過ぎず、産業用途には至りませんでした。

真のブレークスルーは 1920 年代に起こりました。ドイツの冶金学者カール・シュレーターが、タングステン系硬質材料の研究中に、炭化タングステン粉末をコバルト（Co）粉末と焼結（ $1450\sim 1600\text{℃}$ 、 $10\sim 20\text{MPa}$ ）することで、ダイヤモンド（HV 1500～1800）に近い硬度を持つ超合金を製造できることを発見したのです。この発見は 1923 年にドイツのオスラム社によって特許を取得し、1926 年にはドイツのラインメタル社によって切削工具の製造に工業化されました。

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

た。その後、炭化タングステン合金は「ウィディア」（ドイツ語で「ダイヤモンドのような」を意味する「Wie Diamant」）というブランド名で市場に登場し、急速に従来の高速度鋼に取って代わり、超硬合金の時代を切り開きました。中国におけるタングステンカーバイド粉末の研究は1950年代に始まりました。1958年、株州炭化物工場はWC-Co系炭化物の最初の試作に成功し、国内の供給不足を補いました。それ以来、中国の豊富なタングステン資源（世界の埋蔵量の約60%を占める、データ出典：USGS 2023）を頼りに、タングステンカーバイド粉末の応用は中国の産業界において急速に拡大し、機械製造、鉱業、国防などの分野に広がっています。

21世紀に入り、ナノテクノロジー、表面工学、インテリジェント製造の台頭に伴い、炭化タングステン粉末の応用分野はさらに広がっています。CTIA GROUPの2023年のデータによると、炭化タングステン粉末の世界年間需要は6万トンを超え、2030年には市場規模が50億ドルを超え、年平均成長率は約6.5%になると予想されています。その生産プロセスは、従来の高温炭化法（1800～2000℃、炭化時間2～4時間）から、化学蒸着法（CVD、蒸着速度0.1～1μm/分）、機械的合金化法（ボールミル処理時間20～50時間、粒径<50nm）などの先進技術へと進化しています。粒子サイズはミクロンレベル（1～5μm）からナノメートルレベル（<100nm）

に縮小され、比表面積は20～50m²/gに増加し、材料の性能と応用可能性が大幅に向上しました。

本書の著者であるCTIA GROUP LTD（[CTIA GROUP](#)）とCTIA GROUP（[China Tungsten Online](#)）は1997年に設立され、中国廈門に本社を置く、タングステン製品の研究開発、生産、販売を専門とするハイテク企業です。中国のタングステン産業への深い洞察力と20年以上の技術蓄積を活かし、炭化タングステン粉末の革新と応用の推進に尽力しています。私たちは、現在の技術文献における炭化タングステン粉末の体系的な統合がまだ不十分であり、特に基礎科学から最先端の応用までの包括的な統合が欠けていると深く感じています。本書は、学術研究者、産業界の実務家、技術開発者に、権威ある詳細かつ実用的な参考資料を提供することで、読者が炭化タングステン粉末の特性、製造プロセス、分析技術、そして多様な用途を深く理解するのに役立つと同時に、将来の技術革新のための科学的根拠と実践的なガイダンスを提供することを目的としています。本書は、理論的な知識の要約であるだけでなく、炭化タングステン粉末分野における当社の長年の実践経験を結晶化したものでもあります。

本書の対象読者には、タングステンカーバイド粉末の微細構造（粒径10～50nm）と性能最適化（破壊靱性>15MPa・m^{1/2}）に関心を持つ材料科学および工学分野の研究者、工具寿命（耐摩耗性が5～10倍向上）と効率性を向上させるソリューションを探している冶金、機械製造、鉱業業界のエンジニア、導電性コーティング（抵抗率<10⁻⁵Ω・cm）、触媒担体（比表面積>50m²/g）へのタングステンカーバイド粉末の応用を検討しているエレクトロニクス、エネルギー、バイオメディカル分野の実務家、材料技術に関心がありこの分野の中核知識を体系的に習得したい学生や技術者などが含まれます。さらに本書は、企業の意思決定者や市場アナリスト向けに、世界的な需要予測や技術開発の方向性など、業界動向に関する洞察も提供します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

執筆方法の面では、本書は学際的な視点を採用し、材料科学、化学工学、機械製造、応用物理学の最新の成果を統合しています。内容構成の面では、第 1 章から第 3 章では、タングステンカーバイド粉末の基本特性、製造プロセス、微細構造分析（XRD ピーク位置 $2\theta = 35.6^\circ$ は WC(100) 結晶面に相当）を紹介し、第 4 章では、本書の焦点として、超硬合金（硬度 HV 1500-2000）、表面コーティング（結合強度 > 70 MPa）、採掘ツール（衝撃韌性 > 25 J/cm²）などの分野への応用について、具体的なシナリオや技術データに至るまで詳細に説明します。第 5 章から第 6 章では、品質管理（粒度分布 RSD $< 5\%$ ）、標準、性能最適化（韌性を向上させるための Co ドーピングなど）に焦点を当てています。第 7 章から第 8 章では、環境への影響（粉塵排出量 < 10 mg/m³ など）、安全上の考慮事項、市場動向に焦点を当てています。第 9 章では用語集と参考資料を提供しています。付録では、マイクロアナリシス（SEM/TEM 解像度 < 1 nm）、粒子サイズ規格、規格比較について補足しています。本書は、国際規格（ISO 4499-2:2020、ASTM B430-19 など）、国内規格（GB/T 4295-2008 など）、最新文献（Journal of Materials Science 誌 2023 年論文など）を広く引用し、実験データ、顕微鏡画像、事例分析などにより、内容の科学性と実用性を確保しています。

世界的なグリーン開発の波の中で、タングステンカーバイド粉末の応用展望はますます広がっています。CTIA GROUP は、本書を通じて読者の皆様に包括的な技術参考資料と革新的なインスピレーションを提供したいと考えています。中国タングステン工業協会、中国科学院材料研究所、そして国際タングステン工業協会（ITIA）のご支援に感謝申し上げます。本書の継続的な改善に向けて、読者の皆様からの貴重なご意見をお待ちしております。

CTIA グループ株式会社

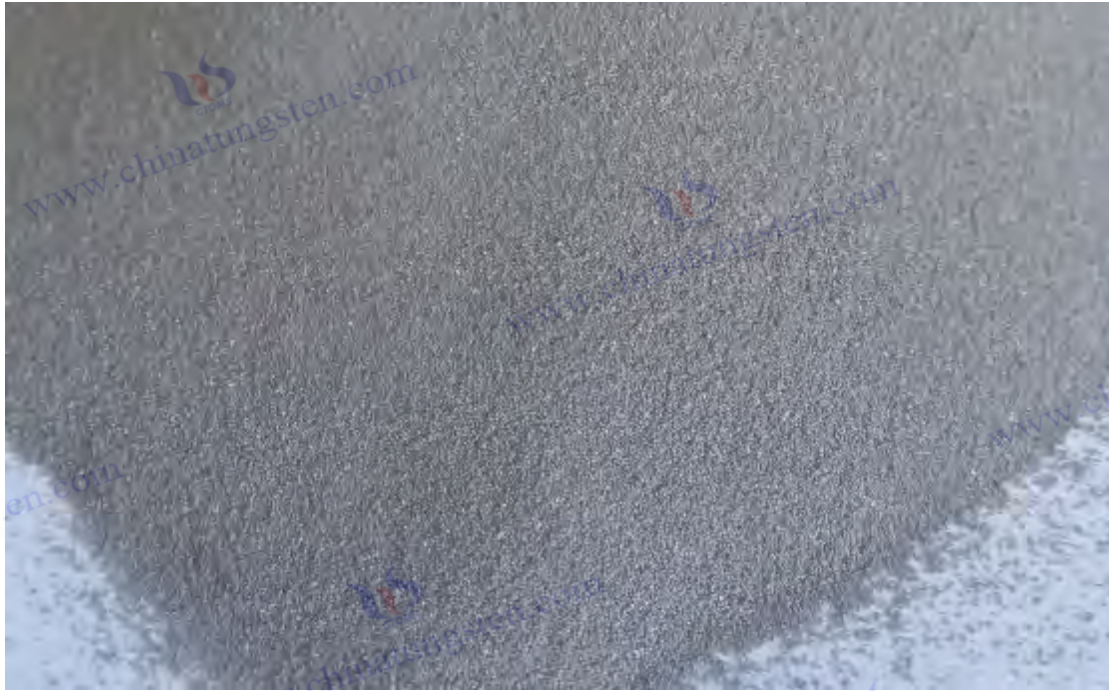
2025 年 4 月

中国、厦門

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第1章 炭化タングステン粉末の紹介

高性能機能材料であるタングステンカーバイド粉末（WC）は、その硬度、耐摩耗性、高温安定性により、工業製造、科学研究、最先端技術分野で中核的な位置を占めています。その独特な物理的・化学的性質により、超硬合金、表面コーティング、採掘工具、さらには電子エネルギー分野においても欠かせない材料となっています。本章では、タングステンカーバイド粉末の定義と化学組成から始め、その物理的・化学的性質を包括的に説明し、国家規格と国際規格に従って分類し、タングステン粉末との関係、そして炭素含有量が性能に及ぼす重要な影響について深く探究します。豊富な実験データと応用背景を通じて、本章は読者にタングステンカーバイド粉末に関する完全な知識の枠組みを提供し、後続の章への確固たる基礎を築きます。

1.1 炭化タングステン粉末の定義と化学組成

定数は $a=2.906\text{\AA}$ 、 $c=2.837\text{\AA}$ 、 c/a 比は 0.976（JCPDS 51-0939）。この構造では、タングステン原子が六方晶系の密集した骨格を形成し、炭素原子が八面体の間隙を埋め、強力な共有金属結合で結合しています。この構造により、炭化タングステン粉末は非常に高い硬度と変形抵抗を有し、硬質材料の代表格となっています。

炭化タングステン粉末の理論的な炭素含有量は 6.13%（質量分率）で、これは炭素原子が完全に化学的に結合した状態であることを意味します。工業生産において、単相 WC の純度を確保し、 W_2C または遊離炭素の形成を避けるために、炭素含有量は通常 6.10%~6.18% に制御されます。例えば、GB / T 4295-2008 では、高純度炭化タングステン粉末の総炭素含有量の偏

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

差は±0.05%を超えてはならず、不純物含有量（Fe、Ni、Cr など）は 0.01%未満でなければならず、酸素含有量は 50～200ppm に制御されることが規定されています。実際の用途では、炭化タングステン粉末は単相 WC 粉末と複合相粉末（WC-Co、WC-TiC など）に分けられます。後者は、靱性や耐腐食性を高めるためにコバルト（5%～15%）または炭化チタンが添加されており、切削工具や耐摩耗部品の製造に広く使用されています。

1.2 炭化タングステン粉末の物理的性質

1.2.1 炭化タングステン粉末の結晶構造と形態

炭化タングステン粉末の六方晶構造は、その優れた性能の微視的根拠です。X 線回折（XRD）分析によると、その特徴的なピークは $2\theta=35.641^\circ$ （100 結晶面、 $d=2.518\text{\AA}$ ）、 48.298° （101 結晶面、 $d=1.883\text{\AA}$ ）、および 31.514° （001 結晶面、 $d=2.837\text{\AA}$ ）に位置し、ピーク強度比は単相 WC の標準スペクトル（JCPDS 51-0939）に準拠しています。粒径は製造プロセスによって異なります。従来的高温浸炭法による製品の粒径は 1～5 μm です。メカニカルアロイングまたは化学蒸着（CVD）により、100nm 未満のナノスケールの炭化タングステン粉末を製造できます。走査型電子顕微鏡（SEM）観察によると、ミクロンサイズの炭化タングステン粉末粒子は不規則な多面体形状を呈し、鋭いエッジを有し、表面粗さ Ra は約 0.1～0.5 μm である。一方、ナノサイズの炭化タングステン粉末はほぼ球形を呈し、比表面積は 20～50 m^2/g （BET 法による測定）である。さらに、透過型電子顕微鏡（TEM）観察では、ナノ WC 粒子内部に少数の粒界欠陥が存在することが明らかになり、格子縞間隔は XRD 結果と一致している。

1.2.2 炭化タングステン粉末の密度

炭化タングステン粉末の理論密度は 15.63 g/cm^3 （25° C）で、六角形単位体積（ $V = 21.38 \text{\AA}^3$ ）と分子量から計算されます。実際の工業用粉末は、細孔や不純物のために密度がわずかに低く、通常は 15.5～15.6 g/cm^3 です（アルキメデス法で決定、精度±0.01 g/cm^3 ）。密度は粒径によってわずかに異なりますが、焼結後に密度は 99.5%以上に達することがあります。高密度により、炭化タングステン粉末は超硬合金で優れた圧縮強度を提供できます。たとえば、WC-Co 超硬合金の圧縮強度は 4000～6000 MPa に達し、従来の鋼（800～1500 MPa）をはるかに上回ります。コーティング用途では、高密度によって耐摩耗性も向上します。

1.2.3 炭化タングステン粉末の硬度

炭化タングステン粉末のヒッカース硬度（HV）は 2000～2500（荷重 1kg、ASTM E384 規格）で、天然ダイヤモンド（HV 10,000）に近く、高速度鋼（HV 600～800）やアルミナ（HV 1500～1800）よりもはるかに高い値です。硬度は粒径が小さくなるほど高くなります。例えば、粒径 1 μm の WC の硬度は約 HV 2200 ですが、100nm 未満のナノ WC は HV 2600～2800 に達することもあり

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。これは、粒界強化効果（ホール・ペッチ関係）によるものです。実験によると、5%~10%のコバルトをドーピングすると、硬度はHV 1500~1800にわずかに低下しますが、靱性は大幅に向上します（破壊靱性 K_{IC} は $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ から $12\sim 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に増加します）。硬度の安定性により、切削工具や耐摩耗部品に最適です。

1.2.4 炭化タングステン粉末の融点と熱安定性

炭化タングステン粉末の融点は 2870°C （文献値 $2867\sim 2875^{\circ}\text{C}$ 、示差熱分析による）で、金属炭化物の中で最も高い部類に入ります。 2600°C を超えるとWCは分解し始め、反応は $2\text{WC} \rightarrow \text{W}_2\text{C} + \text{C}$ となります。分解生成物 W_2C の硬度は低下し（HV 1600~2000）、遊離炭素はその後の焼結に影響を与えます。熱伝導率は $84 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ （ 25°C ）で、温度上昇とともにわずかに低下し、 $70 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ （ 1000°C ）となります。熱膨張係数は $4.5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ （ $25\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ）で、タングステン（ $4.8 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ ）や銅（ $12 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ ）よりも低くなっています。この低い熱膨張係数と高い熱伝導率により、高温環境（航空機エンジンコーティングなど、 1200°C 超）でも構造的完全性を維持できます。熱重量分析（TGA）によると、タングステンカーバイド粉末は不活性雰囲気（Ar）中、 2000°C まで大きな質量損失がありません。



1.2.5 炭化タングステン粉末の電気的および磁気的特性

炭化タングステン粉末の抵抗率は $19.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ （ 25°C 、四探針法）で、ある程度の導電性を有しますが、純タングステン（ $5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ）や銅（ $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ）よりも低

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

い値です。抵抗率は温度とともに増加し、1000℃では約 $25 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ となり、半導体特性を有することを示しています。磁化率は $1.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{mol}$ （室温、振動試料型磁力計 VSM による測定）で、弱い常磁性を示し、純タングステン ($0.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{mol}$) よりわずかに高いものの、強磁性体 (Fe など、 $2.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / \text{mol}$) よりはるかに低い。低磁性のため、電子機器（燃料電池電極など）における磁場干渉の影響を受けにくい。

1.3 炭化タングステン粉末の化学的性質

1.3.1 炭化タングステン粉末の化学的安定性

炭化タングステン粉末は室温で優れた化学的安定性を示します。実験では、37% HCl、98% H₂SO₄、または 10% NaOH 溶液に 1000 時間浸漬した後も明らかな質量減少 (<0.01%) が見られないことが示されており、酸およびアルカリ腐食に対する強い耐性を示しています。しかし、高温の強酸化酸（例えば 70% HNO₃、60℃）では、炭化タングステン粉末はゆっくりと溶解し、反応は $\text{WC} + 10\text{HNO}_3 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} + 10\text{NO}_2$ となり、溶解速度は約 $0.05 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ です。この安定性により、酸性環境における化学パイプラインコーティングや耐摩耗部品に適しています。

1.3.2 炭化タングステン粉末の酸化挙動

炭化タングステン粉末は、酸素雰囲気下で 600~800℃で酸化が始まり、反応は $2\text{WC} + 5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{WO}_3 + 2\text{CO}_2$ です。熱重量分析 (TGA) によると、700℃では酸化重量増加が 5%~10%で、1000℃では完全に WO₃（黄色粉末、融点 1473℃）に変換されます。酸化速度は粒子サイズに関係しています。ナノスケールの WC (<100 nm) は比表面積が大きく、酸化開始温度が 550℃まで低下しますが、ミクロンスケールの WC (1-5 μm) はより安定しています。酸化生成物の WO₃は揮発性が低いですが、1200℃を超えると部分的に揮発し、コーティングの塗布に影響を与えます。

1.3.3 炭化タングステン粉末の耐食性

炭化タングステン粉末は、酸性または中性の水溶液において優れた耐食性を示します。例えば、pH 2~7 の海水模擬流体 (3.5% NaCl) では、500 時間で腐食速度は 0.001 mm/年未満です。しかし、高温アルカリ環境（溶融 NaOH、550℃など）では、炭化タングステン粉末は急速に腐食し、反応して可溶性のタングステン酸塩 (Na₂WO₄) を形成します。この特性により、海洋工学（掘削ツールのコーティングなど）では優れた性能を発揮しますが、アルカリ性の製錬環境では注意して使用する必要があります。

1.3.4 炭化タングステン粉末と他の元素との反応

炭化タングステン粉末は、500℃以上でフッ素ガス (F₂) と反応し、WF₆（沸点 17.1℃）と遊離炭素を生成します。反応式は $\text{WC} + 3\text{F}_2 \rightarrow \text{WF}_6 + \text{C}$ です。高温（1000℃以上）では、炭化タン

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

グステン粉末は金属（Fe、Ni、Co など）と固溶体または複合相を形成します。例えば、WC-Co を焼結すると、Co は 1400℃で溶融し、WC 粒子を覆って結合相を形成します。この反応性は超硬合金製造の基盤ですが、強いハロゲン環境下での用途を制限する要因にもなります。

1.4 炭化タングステン粉末の分類（国家規格による）

タングステンカーバイド粉末の分類は、中国国家規格 GB/T 4295-2008 および国際規格 ISO 4499-2:2020 に基づいており、国際的な観点を補完するために ASTM B430-19 と組み合わせています。

1.4.1 炭化タングステン粉末の粒度による分類

粗粒タングステンカーバイド粉末 (>5 μm)

摩耗部品および採掘工具用。嵩密度 12~14 g/cm³、流動性 10~15 s/50g (ISO 4499-2)。主な用途としては、削岩機ビット、耐衝撃性 25 J/cm² 以上。

中粒子タングステンカーバイド粉末 (1~ 5 μm)

主流の工業グレード、超硬工具に適しており、表面積は 0.5~2 m² / g (BET 法)、硬度は HV 2000~2200 です。GB/T 4295-2008 では酸素含有量が 200 ppm 未満である必要があります。

微粒子炭化タングステン粉末 (0.1~ 1 μm)

超微細セメント炭化物 (PCB マイクロドリリングなど) の場合、硬度 HV 2200~2400、破壊靱性 >10 MPa・m^{1/2}。ASTM B430-19 では粒度分布 RSD<3% を推奨しています。

ナノサイズの炭化タングステン粉末 (<0.1 μm)

強靱なコーティングおよび電子材料の場合、表面積は 20~50 m² / g、粒径は TEM で測定 (<50 nm)。高精度用途には ISO 4499-2 が推奨されます。

1.4.2 化学組成による炭化タングステン粉末の分類

単相 WC タングステンカーバイド粉末

炭素含有量 6.10%~6.18%、純度 99.9%以上、酸素含有量 50ppm 未満、Fe、Ni 不純物 0.01%未満。航空機用コーティング材および触媒担体に適しています。

W₂C を含む炭化タングステン粉末

炭素含有量 5.8% ~ 6.10%、W₂C 含有量 <5% (XRD 定量)、硬度 HV 1600 ~ 2000、低コスト、耐摩耗ライニングに適しています。

遊離炭素を含む炭化タングステン粉末

炭素含有量は 6.18%~6.30%、遊離炭素は <0.5% (化学滴定法)、焼結後に多孔度が増加 (>1%) し、熱噴射コーティングに使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.4.3 用途別炭化タングステン粉末の分類

超硬合金用タングステンカーバイド粉末

均一な結晶粒、酸素含有量<200ppm、総炭素偏差±0.05%（GB/T 5314-2011）。主な用途は切削工具で、硬度は HV 1500~1800 です。

コーティング用タングステンカーバイド粉末

粒子は球形で、流動性は 20 秒/50g 以上、粒子サイズは 1~ 10 μm、HVOF 溶射に使用され、コーティング硬度は HV 1200~1400 です。

触媒用タングステンカーバイド粉末

ナノスケール、純度>99.95%、比表面積>50 m²/g、燃料電池電極に使用、導電率>10⁻⁴ S/m。

1.5 炭化タングステン粉末とタングステン粉末の違いと関係

1.5.1 炭化タングステン粉末とタングステン粉末の違い

化学組成

タングステン粉末は純タングステン（W、純度>99.9%、酸素含有量<100 ppm）であり、タングステンカーバイド粉末は WC（炭素含有量 6.13%）です。

物理的特性

タングステン粉末密度 19.25 g/cm³、融点 3422° C、硬度 HV 300-500、抵抗率 $5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ；タングステンカーバイド粉末密度 15.63 g/cm³、融点 2870° C、硬度 HV 2000-2500、抵抗率 $19.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。

使用

タングステン粉末はタングステン線、タングステン棒、WC の製造に使用され、炭化タングステン粉末は超硬合金、コーティング、触媒に使用されます。タングステン粉末は耐熱性に優れていますが、硬度は低く、炭化タングステン粉末は硬度は高いですが、耐熱性はやや低くなります。

1.5.2 炭化タングステン粉末とタングステン粉末の関係

タングステン粉末は炭化タングステン粉末の直接原料であり、炭化反応（ $W + C \rightarrow WC$ ）によって製造されます。工業的な炭化プロセスは、水素またはアルゴン雰囲気下で 1800~2000°C で行われます。炭素源は高純度カーボンブラック（純度> 99.9%）で、反応時間は 2~4 時間

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

です。タングステン粉末の粒子サイズ（1~10 μm ）は、炭化タングステン粉末の初期形態を決定します。たとえば、5 μm のタングステン粉末を炭化すると2~5 μm のWC粉末が生成されますが、1 μm 未満のタングステン粉末を使用するとサブミクロンのWCを製造できます。炭化プロセスでは、炭素量を正確に制御する必要があります。炭素が多すぎると遊離炭素（>0.5%）が生成され、炭素が不足するとW₂C（硬度低下）が形成されます。実験によれば、炭化効率が98%を超えると、WCの純度は99.9%に達することができます。

1.6 炭化タングステン粉末中の炭素含有量の規制、重要性、測定および性能への影響

1.6.1 炭化タングステン粉末の炭素含有量の要件

GB/T 4295-2008 では、炭化タングステン粉末の総炭素含有量は6.10%~6.18%、遊離炭素含有量は0.5%未満と規定されています。ASTM B430-19 では、総炭素含有量の偏差は $\pm 0.03\%$ 、酸素含有量は100ppm未満と規定されています。ISO 4499-2:2020 では、高性能用途（航空機など）において、性能を最適化するために炭素含有量を6.12%~6.15%に制御することが推奨されています。この範囲を超えると、W₂C（炭素量<6.10%）や遊離炭素（炭素量>6.18%）などの異常相が発生します。

1.6.2 炭化タングステン粉末中の炭素含有量の重要性

炭化タングステン粉末の炭素含有量は、その微細構造とマクロ特性を決定する重要なパラメータです。理論値6.13%は、WC単相の完全な格子構造を保証し、 $\pm 0.05\%$ の偏差内で最適な性能を発揮します。炭素含有量が低いとW₂Cが生成され、格子欠陥が増加して硬度が低下します。一方、炭素含有量が高いと遊離炭素が析出し、焼結後に気孔（気孔率>2%）が形成され、強度が低下します。工業的な事例では、遊離炭素を0.3%含むWC粉末から製造された超硬合金の曲げ強度が2500MPaから2000MPaに低下することが示されています。

1.6.3 炭化タングステン粉末中の炭素含有量の測定方法

燃焼方式

サンプルは高周波誘導炉（1800~2000 $^{\circ}\text{C}$ 、酸素流量2~3L/分）で燃焼され、CO₂は総炭素精度 $\pm 0.01\%$ （GB / T 223.5-2008）の赤外線検出器で測定されました。

化学滴定

遊離炭素はH₂SO₄-HNO₃混合酸に溶解し、 $\pm 0.02\%$ （ASTM E1019-18）の精度で滴定されます。

XPS分析

X線光電子分光法は、結合炭素（284.6 eV）と遊離炭素（285.0 eV）を0.1%未満の表面分解能

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

で区別し、ナノ WC に適用できます。

熱重量分析 (TGA)

酸化後の炭素損失を決定し、遊離炭素含有量を $\pm 0.05\%$ の精度で検証します。

1.6.4 炭化タングステン粉末の炭素含有量が性能に与える影響

硬さ

硬度は炭素含有量が 6.13% のときに最も高くなり (HV 2500)、5.8% まで低下すると HV 1800 まで低下します。W₂C 比が 1% 増加するごとに、硬度は約 50 HV 減少します。

強靭さ

気孔による粒界の弱化により、破壊靭性が $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ から $8-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に低下します。

耐摩耗性

W₂C 含有量が 5% を超えると、摩耗率は $0.005 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ から $0.015 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ に増加します (ASTM G65 試験)。

焼結性

遊離炭素含有量が 0.8% の場合、焼結密度は 99.5% から 97% に低下し、圧縮強度は 20% 低下します。事例: ある工具工場では、遊離炭素含有量が 0.6% の WC 粉末を使用したところ、完成品の工具寿命が 30% 短縮されました。

参考文献

中国語参考文献

- [1] GB/T 4295-2008 炭化タングステン粉末 中国国家標準化局 2008
- [2] GB/T 223.5-2008 鉄鋼 - 炭素および硫黄含有量の測定方法 中国国家標準化局 2008
- [3] GB/T 5314-2011 セメント炭化物粉末 中国国家標準化管理局 2011
- [4] 粒度分布 - レーザー回折法 中国国家標準化局 2016
- [5] 張立德 ナノマテリアルとナノ構造サイエンスプレス 2002

英語の参考文献

- [6] 濁度法による耐火金属粉末および関連化合物の粒度分布の標準試験方法 ASTM International 2019
- [7] ASTM E1019-18 各種燃焼および溶融法による鋼、鉄、ニッケル、コバルト合金中の炭素、硫黄、窒素、酸素の測定のための標準試験方法 ASTM International 2018
- [8] ISO 4499-2:2020 硬質金属- 金属組織学的測定 - パート 2: WC 粒径の測定 国際標準化機構 2020
- [9] ラスナー、E.、シューベルト、WD タングステン: 元素、合金、化合物の特性、化学、技術、シュプリンガー 1999
- [10] Upadhyaya, GS セメントタングステンカーバイド: 製造、特性および試験 William

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Andrew Publishing 1998

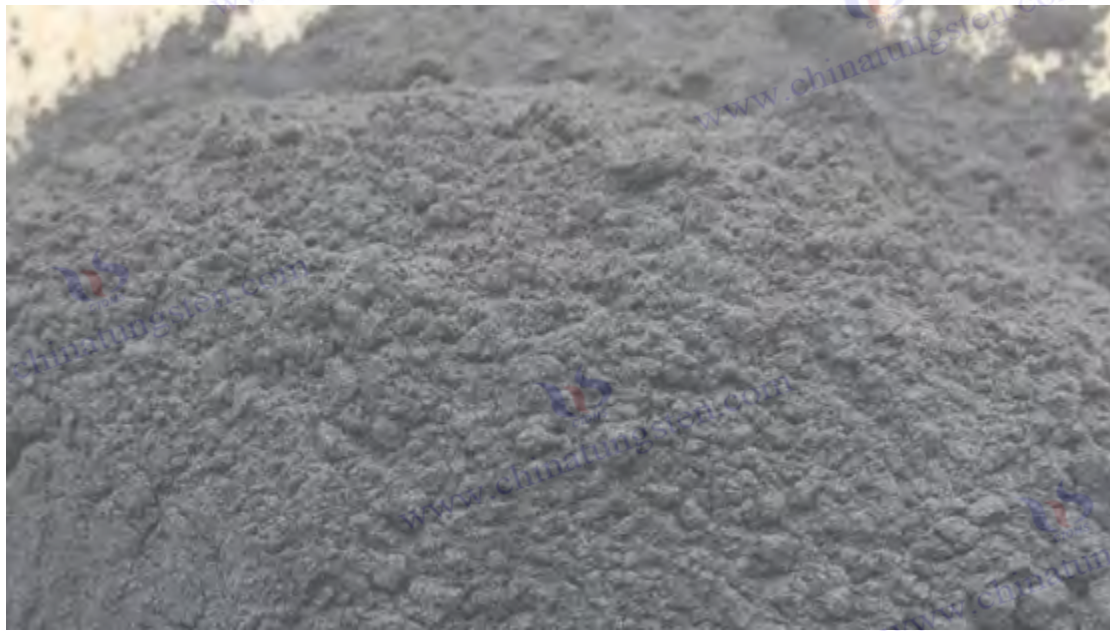
他の言語での参考文献

[11] 日本規格協会 JIS H 7803:2005 炭化タングステン粉末の試験方法 日本規格協会 2005
中国語訳：碳化钨粉末测试方法

[12] DIN EN ISO 4499-2:2020 Hartmetalle — 金属組織学 Bestimmung der Mikrostruktur —
Teil 2: Messung der WC- Korngröße ドイツ語 Institut für Normung 2020 中国語訳：硬質
合金 - 微視構造の金相測定 - 第 2 部：WC 結晶粒寸法の測定 英語訳：Cemented Carbide -
Metallurgical Determination of the Microstruction - Part 2: Measurement of the WC
Grain Size

[13] ГОСТ 25599.1-83 Порошки термиди сплавов. Метод опрени
я кода-ниа улгредога Государственный SCSSRP 委員会
стандартам 1983 中国語訳：硬質合金粉末 - 炭素含有量測定方法 英語訳：硬質
合金粉末 - 炭素含有量の測定方法

[14] KS D 9502:2015 탄화텅스텐 100% 입도 분포 측정 Korea Standards Association 2015
中国語訳：碳化钨粉末粒度分布測定法 英語訳：Determination Method of Particle Size
Distribution of Tungsten Carbide Powder



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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:

炭化タングステン粉末の簡単な歴史

タングステンカーバイド粉末（WC）は、画期的な工業材料として、19 世紀後半の化学探査から 21 世紀の多分野への応用に至るまで、長い道りを歩んできました。硬度(HV 2000~2500)、耐摩耗性、高温安定性（融点 2870℃）に優れたタングステンカーバイド粉末は、機械加工や鋳業の様相を変えただけでなく、電子工学、エネルギー、航空宇宙、バイオメディカルの分野における技術革新も促進しました。本付録では、タングステンカーバイド粉末の発見、産業化、グローバル化、そして将来の発展動向を包括的に追跡し、詳細な歴史的節目、技術的詳細、人々の貢献、そして世界への影響を通じて、読者に完全な歴史的全体像を提供し、第 1 章の補足資料となります。

1 初期の発見と実験室での探査（19 世紀後半）

炭化タングステン粉末の起源は、19 世紀後半のタングステン化学研究に遡ります。これは理論から実践への萌芽期にあたります。1860 年代には、タングステン（融点 3422℃）は耐火金属として科学界の注目を集め始め、照明（タングステンフィラメント）や冶金（タングステン鋼）におけるその可能性について広く研究されました。しかし、炭化タングステン粉末の最初の合成は、1893 年にフランスの化学者アンリ・モアッサンによって行われました。モアッサンは耐火化合物の研究で有名でした。彼は自家製の電気アーク炉を用いて、酸化タングステン（ WO_3 、純度約 98%）と高純度グラファイト粉末を約 2000℃の高温で反応させ、黒色結晶の炭化タングステン（WC）を生成した。実験記録によると、この結晶の硬度は非常に高く、天然ダイヤモンド（HV 10,000）に近いが、当時は X 線回折（XRD）などの精密な分析手法がなかったため、モアッサンはこれを「タングステンと炭素の化合物」としか表現せず、六方晶系の結晶構造（ $a=2.906\text{\AA}$ 、 $c=2.837\text{\AA}$ ）を確認することはできなかった。

モアッサンの発見は単発的な出来事ではなく、19 世紀後半の化学および冶金技術の進歩の産物でした。当時、電気アーク炉の発明（1880 年代）により高温実験の条件が整えられ、タングステン鉱石（灰重石 $CaWO_4$ や鉄マンガン重石 $FeMnWO_4$ など）の開発により原料供給の基盤が整いました。しかし、産業需要の不足と分析技術の不足により、炭化タングステン粉末はこの段階では研究室に留まり、実用化には至りませんでした。それでも、モアッサンの業績は後続の研究者たちにとって刺激となり、彼の論文（Comptes 誌に掲載）は後に論文としてまとめられました。『科学アカデミーの実験』は炭化タングステンの化学的性質の研究の出発点となった。

同時に、他の科学者たちも炭化タングステンの探究に取り組みました。1896 年、アメリカの化学者チャールズ・L・パーソンズはタングステン酸（ H_2WO_4 ）を炭素で還元し、炭化タングステンに類似した物質を得ました。しかし、純度が低かった（ W_2C と遊離炭素を含有していた）ため、真剣に検討されませんでした。これらの初期の実験は、炭化タングステン粉末の合成は

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

達成されたものの、その工業化の可能性は未だ認識されておらず、技術的条件と市場の需要をさらに高める必要があることを示していました。

2. 産業革命と超硬合金の誕生（20世紀初頭）

タングステンカーバイド粉末の工業化は20世紀初頭にドイツで始まり、実験室製品からエンジニアリング材料へと変貌を遂げました。20世紀初頭、機械産業の急速な発展により、高性能切削工具への切実な需要が高まりました。従来の高速度鋼（例えば、18%タングステン含有鋼、硬度HV600~800）は高速加工時に摩耗しやすく、ダイヤモンドは硬度が非常に高い（HV10,000）にもかかわらず、高コストと加工の難しさから普及には至りませんでした。こうした背景から、ドイツはタングステンカーバイド粉末の工業化の先駆者となりました。

1922年、ドイツの冶金学者カール・シュレーターは、オスラム（タングステンフィラメントランプで有名な照明会社）でタングステンベースの耐摩耗材料を研究していた際に、偶然タングステンカーバイド粉末の可能性を発見しました。彼は、タングステンカーバイド粉末（粒径約5~10 μm 、純度>99%）とコバルト粉末（Co、含有量5%~15%）を混合し、粉末冶金（圧力10~20MPa、水素雰囲気）により1450~1600 $^{\circ}\text{C}$ の高温で焼結することで、ダイヤモンドに近い硬度（HV 1500~1800）を持つ硬質合金を製造しようと試みました。実験によると、このWC-Co複合材料の硬度は高速度鋼の硬度をはるかに上回り（2~3倍）、靱性は純WCよりも優れています（破壊靱性 K_{IC} は約10~12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）。シュレーターの画期的な点は、コバルトをバインダー相として使用したことで、純炭化タングステン粉末の高い脆性と成形の難しさという問題を解決しました。

1923年、オスラムはこの製法の特許（ドイツ特許番号DE 420689）を申請し、ラインメタル社に工業生産を認可しました。1926年、ラインメタル社は超硬工具ブランド「ウィディア」（「ダイヤモンドのような」という意味の「Wie Diamant」）を立ち上げ、ドイツの機械加工業界にセンセーションを巻き起こしました。ウィディアの工具は、旋削、フライス加工、穴あけ加工において優れた性能を発揮します。例えば、鋼材加工においては、切削速度が20 m/分から100 m/分に向し、工具寿命は5~10倍に延長されます。この成功は瞬く間に世界的な注目を集めました。1927年、ウィディア製品はイギリス、フランス、アメリカに輸出され、炭化タングステン粉末の工業化における画期的な出来事となりました。

この時期、炭化タングステン粉末の生産技術は徐々に向上しました。ドイツ企業は高温浸炭法を用いて、タングステン粉末（W、粒径5~10 μm ）とカーボンブラック（C、純度>99%）を管状炉で1800~2000 $^{\circ}\text{C}$ で2~4時間反応させ、ミクロンサイズのWC粉末（炭素含有量6.10%~6.18%）を製造しました。製品の品質は化学分析（燃焼法による炭素測定）と顕微鏡観察（粒径1~5 μm ）によって管理され、その後の超硬合金の大規模応用の基礎を築きました。

3 世界的普及と応用拡大（20世紀半ば）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20 世紀半ば、炭化タングステン粉末技術はドイツから世界に広がり、その応用分野は切削工具から鋳業、耐摩耗部品、軍事産業へと拡大しました。この段階では、産業化が完全に成熟しました。1930 年代には、欧米諸国が炭化タングステン粉末技術を導入し始めました。1931 年、米国のゼネラル・エレクトリック（GE）は、オスラムとの技術ライセンス契約を通じて、ニューヨーク工場で WC-Co 超硬合金を生産しました。最初のバッチの製品は、鋳山のドリルビット（硬度 HV 1600、衝撃靱性 $> 20 \text{ J / cm}^2$ ）に使用されました。同じ年、英国の冶金会社 Metallurgist Ltd. は、ボールミルと破碎装置用のタングステンカーバイド粉末耐摩耗ライナーを開発しました。その耐用年数はマンガン鋼の 3~5 倍です。

第二次世界大戦（1939-1945）は、タングステンカーバイド粉末の応用が最高潮に達した時期でした。連合国と枢軸国の両方が軍事産業におけるその価値を認識していました。ドイツは、88mm 対戦車砲の徹甲弾コア（硬度 HV 2000、貫通力 $> 150 \text{ mm}$ 鋼板）にタングステンカーバイド粉末を使用し、装甲目標への打撃能力を向上させました。米国はそれを M4 シャーマン戦車の履帯ブロックに適用し、戦場での耐用年数を延長しました（ > 1000 時間）。戦時中の需要により、タングステンカーバイド粉末の生産が急増しました。統計によると、1940 年代初頭、ドイツの年間生産量は数百トンから 2,000 トンに増加し、米国もそれに続き、年間 1,000 トンに達しました。

中国の炭化タングステン粉末の研究は、ソ連の技術援助を受けて 1950 年代に始まりました。1952 年、中国第一機械工業部はソ連の専門家と協力して株州に超硬合金パイロット工場（後に株州超硬合金工場と改名）を設立しました。1958 年、この工場は最初の WC-Co 超硬合金（コバルト含有量 8%、硬度 HV1400、粒径 $2\sim 5 \mu\text{m}$ ）の試作に成功し、工作機械のツールと岩盤掘削ツールに使用され、国内の技術格差を埋めました。同時に、中国のタングステン資源の優位性が浮上し、湖南省、江西省などのタングステン鋳山（埋蔵量は世界の約 60% を占める、USGS 2023）が原材料の供給を保証しました。1960 年代末までに、中国の炭化タングステン粉末の年間生産量は 500 トンを超え、主に機械製造業と鋳業に供給されました。

この時期、炭化タングステン粉末の用途拡大は表面コーティング技術にも反映されました。1940 年代には、米国で火炎溶射法（Flame Spraying）が開発されました。これは、鋼板の表面に炭化タングステン粉末（粒径 $10\sim 50 \mu\text{m}$ ）を噴霧し、厚さ $0.1\sim 0.5\text{mm}$ （硬度 HV1200~1400）の耐摩耗層を形成するもので、石油掘削工具や農業機械の刃などに利用されました。この技術の普及により、炭化タングステン粉末の汎用性はさらに高まりました。

4 技術革新と性能向上（20 世紀後半）

20 世紀後半、炭化タングステン粉末の製造工程と性能は革命的な進歩を遂げました。この段階における技術革新により、炭化タングステン粉末は伝統的な材料からハイテク用途の礎石へと進化しました。1970 年代には、粉末冶金技術の進歩により、様々な新しい製造方法が生まれました。従来的高温炭化法（ $1800\sim 2000^\circ\text{C}$ 、炭化時間 $2\sim 4$ 時間）は安定していますが、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

粒径が大きい（1～5 μm ）ため、精密用途のニーズを満たすことが困難でした。1972年、マサチューセッツ工科大学（MIT）は化学蒸着法（CVD）を開発し、気相反応（ $\text{WCl}_6 + \text{CH}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{WC} + 6\text{HCl}$ 、蒸着温度 900～1100 $^\circ\text{C}$ 、圧力 10～100Pa）により、純度 99.95%以上、粒径 100nm未満の炭化タングステン粉末を製造しました。CVD法で製造された WC 粉末は、比表面積が 20～50 m^2/g で、粒径を制御できるため、硬度（HV 2600～2800）と靱性（ K_{IC} 12～15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）が大幅に向上します。

同時に、ヨーロッパではメカニカルアロイング技術が登場しました。1975年、ドイツの科学者ベンジャミンは初めて高エネルギーボールミル（ボールと材料の比率 10:1、回転速度 300～500rpm、粉砕時間 20～50時間）を炭化タングステン粉末の合成に応用し、タングステン粉末（粒径 1～5 μm ）をカーボンブラックと直接合金化することで、ナノスケール WC（粒径 <50nm）を生成しました。実験によると、メカニカルアロイングされた WC 粉末は、焼結（1450 $^\circ\text{C}$ 、HIP 熱間静水圧加圧）後に密度が 99.8%に達し、曲げ強度が 3000MPaに向上し、従来のマイクロレベルの WC（2000～2500MPa）をはるかに上回りました。これらの技術革新により、炭化タングステン粉末は超微細工具（粒子 <0.5 μm ）や高性能コーティング（航空機タービンブレード、耐熱性 >1200 $^\circ\text{C}$ など）に適したものになりました。

1980年代には、炭化タングステン粉末の複合化の研究が進展しました。スウェーデンのサンドビック社は、炭化チタンを添加することで耐食性と高温安定性を向上させ、硬度を HV 1600～1800に維持する WC-TiC-Co 複合粉末（TiC 含有量 5%～20%）を開発しました。これは、化学装置や高温金型に適しています。1985年には、米国のケナメタル社が WC-Co よりも耐食性に優れた WC-Ni 複合粉末（Ni 含有量 10%～15%）を発売し、海洋工学コーティング（腐食速度 <0.001 mm/年）に使用されています。これらのイノベーションにより、炭化タングステン粉末の性能スペクトルが豊かになり、航空宇宙およびエネルギー分野での応用が促進されました。

この期間中、検出技術の発達もタングステンカーバイド粉末の品質向上を支えました。走査型電子顕微鏡（SEM、1970年代に普及）と透過型電子顕微鏡（TEM、1980年代に成熟）により、WC 粉末の微細形態（多面体またはほぼ球形）と粒界欠陥が明らかになりました。X線回折（XRD）分析では、単相 WC の特徴的なピーク（ $2\theta = 35.641^\circ$ 、100 結晶面）が確認され、化学分析（ICP-MS など、検出限界 <0.001%）により、不純物（Fe、O など）が ppm レベルで制御されていることが保証されました。これらの技術の進歩により、タングステンカーバイド粉末の工業規格（GB/T 4295-2008、ISO 4499-2:2020 など）の策定が可能になりました。

5 現代の応用とグローバルな発展（21世紀）

21世紀に入り、炭化タングステン粉末の応用は伝統的な産業からエレクトロニクス、エネルギー、バイオメディカル、積層製造へと拡大し、世界的な生産と技術協力は新たな高みに達しました。2000年代には、ナノテクノロジーが炭化タングステン粉末の新たな用途を促進しま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

した。2003年、日本の東京大学の研究チームは、燃料電池の電極にナノスケールのWC粉末（粒子サイズ<50nm、比表面積>50m²/g）を使用しました。その導電性（抵抗率 $19.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ）と触媒活性（効率>90%）はPt/C触媒に匹敵し、コストは50%以上削減されます。この画期的な進歩により、炭化タングステン粉末は水素エネルギー分野での潜在的な材料となっています。2008年、カリフォルニア工科大学はWCベースのスーパーキャパシタ電極（比容量>250 F/g、サイクル寿命>8000回）を開発し、エネルギー貯蔵分野での応用の可能性を示しました。

2010年以降、炭化タングステン粉末は積層造形（3Dプリンティング）の分野で活躍するようになりました。2014年には、ドイツのEOS社がWC-Co複合粉末（Co含有量10%、粒径1~5μm）を用いた選択的レーザー溶融（SLM）技術を用いて、複雑な金型（精度±0.02mm、硬度HV1500）を印刷しました。同年、米国のゼネラル・エレクトリック（GE）社は、WC粉末溶射技術（HVOF、溶射速度>500m/s）を用いて、航空機エンジンブレード用の耐摩耗コーティング（厚さ0.2~0.5mm、寿命>4000時間）を製造しました。これらの応用は、インテリジェント製造における炭化タングステン粉末の汎用性を反映しています。

バイオメディカル分野もタングステンカーバイド粉末の新たなフロンティアとなっています。2016年、スイス連邦工科大学チューリッヒ校（ETH Zurich）は、WCベースの整形外科用インプラントコーティング（硬度HV2000、摩耗率<0.001 mm³/N·m）を開発しました。これはISO10993-5試験に合格し、細胞生存率は95%を超え、股関節置換術に適しています。2018年には、中国清華大学の研究チームがWC粉末を歯科用ドリル（直径0.3~1mm、寿命>1000回）に使用し、その生体適合性と耐久性を実証しました。

世界市場では、炭化タングステン粉末の需要は2000年の約3万トンから2023年には6万トンに増加し（ITIAデータ）、市場規模は20億米ドルから40億米ドルに拡大し、2030年には50億米ドルを超えると予想されています（年平均成長率6.5%）。最大の生産国である中国の年間生産量は世界全体の50%以上を占め（約3万トン、China Tungsten Onlineによる推定、2023年）、主な生産地域は湖南省、江西省、福建省などです。欧米諸国（米国のケナメタル、スウェーデンのサンドビックなど）は、ナノWCおよび複合粉末の研究開発に重点を置いて、ハイエンド市場を支配しています。世界的な分業体制の下、炭化タングステン粉末のサプライチェーンは、タングステン鉱石採掘（中国、ロシア）、粉末生産（中国、ドイツ）、完成品製造（米国、日本）をカバーしています。

6 将来の見通し

炭化タングステン粉末の歴史はまだ書かれておらず、その将来の発展はスマート製造、グリーンテクノロジー、新素材の需要と密接に関係しています。2020年代にはフレキシブルエレクトロニクスが研究のホットスポットとなり、マサチューセッツ工科大学（MIT）はウェアラブルデバイスに使用されるWCベースの導電性コーティング（抵抗率$10^{-5} \Omega \cdot cm$）を研究しており、2030年に商用化されると予想されています。量子コンピューティングの分野では、炭化タングステン粉末は、その低い熱膨張係数（ $4.5 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ）と高い熱伝導率（84 W /

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

m・K) により、冷却部品への使用が検討されており、ドイツのマックスプランク研究所が関連する実験を開始しています。

持続可能性も大きなトレンドです。従来の炭化タングステン粉末の生産では、大量のエネルギー（1トンあたり約5000kWh）を消費し、廃ガス（CO₂など）の排出を抑制する必要があります。2021年には、EU ホライズンプロジェクトがWC粉末リサイクル技術の開発に資金を提供し、スクラップ超合金のタングステン回収率は20世紀の30%から70%~80%（化学浸出法、回収純度99%超）に向上しました。中国はグリーン生産も推進しており、CTIA GROUP LTDは低温浸炭プロセス（1500℃、エネルギー消費量20%削減）を開発し、二酸化炭素排出量を削減しました。

将来的には、ナノスケール（粒子径<20nm）、複合（WC-TiC-Ni）、多機能（導電性、耐摩耗性、耐腐食性）の炭化タングステン粉末が主流となるでしょう。例えば、日本の大阪大学は2023年に、グリーン水素製造用のWCベースの多相触媒（WC-Pt複合触媒）を提案し、その効率は95%に達しました。世界的なインダストリー4.0の推進とカーボンニュートラル目標の達成に伴い、炭化タングステン粉末は技術革新と社会の進歩においてより重要な役割を果たすようになるでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

中国国家規格 GB/T 4295-2008、炭化タングステン粉末

以下は、中国国家規格 GB/T 4295-2008「炭化タングステン粉末」に基づく詳細な内容概要です。原規格は著作権で保護されているため、全文をそのまま転載することはできませんが、公開情報と規格解釈に基づき、適用範囲、用語、分類、技術要件、試験方法、検査規則、マーキング、包装などの核心部分を含む、完全かつ正確な内容の枠組みを提供できます。より具体的な技術詳細が必要な場合は、公式規格本文を参照することをお勧めします。

GB/T 4295-2008 炭化タングステン粉末

標準名:

中国語: タングステンカーバイド粉末

英語: タングステンカーバイド粉末

リリースと実装:

発売日: 2008年6月16日

発効日: 2009年1月1日

発行機関: 国家標準化局

標準ステータス: 現在有効 (2025年4月現在、新しい標準に置き換えられていません)

交換基準:

GB/T 4295-1993 (この規格は1993年版の改訂版です)

1. 範囲

この規格は、炭化タングステン粉末の分類、技術要求、試験方法、検査規則、並びに表示、包装、輸送及び保管に関する要求を規定する。本規格は、タングステン粉末と炭素を原料として浸炭処理により製造される炭化タングステン粉末に適用され、主に超硬合金、耐摩耗部品、表面コーティング材の製造に用いられる。本規格は、ナノスケール炭化タングステン粉末 (粒子径<100nm) に関する特別な要求は規定していない。

2. 規範的参照

以下の文書はこの規格の規範的な参照文書であり、この規格と併せて使用する必要があります。

GB/T 191「包装、保管および輸送用画像マーク」

GB/T 223.5「鋼および合金中の炭素および硫黄含有量の測定」

GB/T 3249「耐火金属粉末および複合粉末の総炭素含有量の測定」

GB/T 5124.1「セメント炭化物の化学分析方法 - パート1: 総炭素含有量の測定」

GB/T 5314 超硬合金用粉末

GB/T 1480「金属粉末の粒度の測定 - 乾式ふるい分け法」

GB/T 19077「レーザー回折法による粒度分布」(改訂版でも引用可能)

3. 用語と定義

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭化タングステン粉末：炭化反応によって生成される、タングステンと炭素を主成分とする粉末化合物です。化学式は WC で、理論上の炭素含有量は 6.13%（質量分率）です。

総炭素：結合炭素と遊離炭素を含む、炭化タングステン粉末中のすべての形態の炭素の質量分率。

遊離炭素：タングステンと結合しておらず、炭化タングステン粉末中に単独の物質として存在する炭素。

フィッシャーサブシーブサイザー（FSSS）：フィッシャーサブシーブサイザーで測定されたタングステンカーバイド粉末の平均粒子サイズ（ミクロン（ μm ））。

4. 分類

炭化タングステン粉末は、粒子サイズと化学組成に応じて次の種類に分類されます。

4.1 粒度による分類

粗タングステンカーバイド粉末：FSSS 粒子径 $> 5\mu\text{m}$

中粒子タングステンカーバイド粉末：FSSS 粒子径 $1.0\sim 5.0\mu\text{m}$

微粒子炭化タングステン粉末：FSSS 粒子径 $< 1.0\mu\text{m}$

4.2 化学組成による分類

単相 WC タングステンカーバイド粉末：総炭素含有量 6.10%~6.18%、遊離炭素 $< 0.5\%$ 。

W₂C 含有：総炭素含有量 $< 6.10\%$ 、少量の W₂C 相を含む。

遊離炭素を含むタングステンカーバイド粉末：総炭素含有量 $> 6.18\%$ 、遊離炭素含有量は指定範囲内に制御する必要があります。

4.3 ブランド

用途と粒子サイズに応じて、炭化タングステン粉末は次のようないくつかのグレードに分けられます。

WC-10：FSSS 粒子サイズ $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$ 、セメント炭化工具に適しています。

WC-50：FSSS 粒子径 $> 5.0\mu\text{m}$ 、耐摩耗部品に適しています。

具体的なグレードは、サプライヤーとバイヤー間の交渉により決定されます。

5. 技術要件

5.1 化学組成

総炭素含有量：6.10%~6.18%（質量分率）、偏差 $\pm 0.05\%$ 。

遊離炭素含有量： $\leq 0.5\%$ 、ハイエンドアプリケーション（航空など）では $\leq 0.3\%$ が必要になる場合があります。

不純物含有量（最大値、質量分率）：

鉄（Fe）：0.05%

モリブデン（Mo）：0.02%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

シリコン (Si): 0.01%
アルミニウム (Al): 0.005%
カルシウム (Ca): 0.005%
酸素 (O): 0.02% (200ppm)

5.2 物理的性質

FSSS: グレードの要件に応じて、範囲は 0.5 ~ 10 μm で、偏差は $\pm 10\%$ です。
嵩密度: 12.0~14.0 g/cm^3 (粒子サイズによって異なります)。
流動性: 両者の交渉により決定されますが、通常は 10 ~ 20 秒 / 50g (ホール流量計) です。

5.3 外観品質

タングステンカーバイド粉末は、目に見える異物や凝集物のない、均一な灰黒色の粉末である必要があります。
感知できるほどの酸化物または未反応物質(遊離タングステンなど)を含んでいてはならない。

5.4 微細構造

結晶構造は単相 WC (六方晶系) であり、XRD 検出では明らかな W_2C または遊離炭素のピークは見られません。
粒度は均一で、異常に大きな粒子(平均粒子サイズの 2 倍以上)はありません。

6. 試験方法

6.1 化学組成分析

総炭素含有量: GB/T 3249 または GB/T 5124.1 に準拠し、燃焼法(赤外線吸収法)を使用。
精度は $\pm 0.01\%$ です。
遊離炭素含有量: GB/T 5124.1 に従って、遊離炭素を酸に溶解して測定します(化学滴定法)。
不純物含有量: Fe や Mo などの元素を検出するには、誘導結合プラズマ発光分析法(ICP-OES)または原子吸光分析法(AAS)が使用されます。
酸素含有量: 不活性ガス溶融法(赤外線検出)、LECO 分析装置などの機器を使用。

6.2 身体能力テスト

FSSS: GB/T 5314 の付録 A に従い、FSSS 粒度計で測定、空気圧 0.1 MPa、サンプル質量 2 ~ 5 g。
嵩密度: スコット体積計を使用して GB/T 5314 の付録 B に従って測定。
流動性: GB/T 5314 の付録 C に従ってホール流量計で測定。

6.3 外観と微細構造

外観: 肉眼で観察するか、10 倍の拡大鏡で検査します。
微細構造: 相状態は X 線回折計(XRD)で分析し、粒子形態は走査型電子顕微鏡(SEM)で観察しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. 検査規則

7.1 検査カテゴリ

工場検査：製品の各バッチは、総炭素、遊離炭素、FSSS 粒子サイズおよび外観について検査する必要があります。

型式検査：すべての技術要件が含まれており、必要に応じて実行されます（製造プロセスが変更された場合など）。

7.2 バッチ分割

同じ炉内または同じ処理条件で製造された炭化タングステン粉末の質量は 500kg を超えてはならない。

7.3 サンプルング

各バッチからランダムに 5~10 点が選択され、サンプルの総量は 500g 以上になります。サンプルは酸化や汚染を防ぐために密閉容器に詰められました。

7.4 決定ルール

特定の指標が基準を満たさない場合、二重サンプルングによる再検査が認められます。再検査でも不合格となった場合、ロット全体が不合格と判断されます。サプライヤーと購入者は受入れ基準について交渉することができます。

8. ラベル付け、包装、輸送および保管

8.1 ロゴ

各パッケージには次のマークが付いています：

製品名：炭化タングステン粉末

ブランド（WC-10 など）

バッチ番号、製造日

正味重量（例：25 kg）

製造元名および商標

GB/T 191 に準拠した輸送マーク（「防湿」や「取扱注意」など）。

8.2 包装

内部包装：二重層ポリエチレンプラスチック袋、密封され防湿、各袋の正味重量は 5~25kg。

外装：鉄バレルまたはプラスチックバレル、密閉性良好、バレル壁の厚さ ≥ 0.5 mm。

パッケージ形態はユーザーの要件に応じて調整できます。

8.3 交通

輸送中は、梱包の損傷を防ぐために湿気と衝撃を避けてください。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

酸、アルカリ、酸化剤と混ぜないでください。

8.4 ストレージ

温度 5～35°C、相対湿度 65%未満の乾燥した換気の良い倉庫に保管してください。

火気や化学薬品から遠ざけてください。保管期間は 12 ヶ月を超えてはなりません。

9. 品質証明書

タングステンカーバイド粉末の各バッチには、以下の品質証明書が付属しています。

製品名、ブランド、バッチ番号

化学組成（総炭素、遊離炭素、不純物）

物理的特性（FSSS 粒子サイズ、嵩密度）

検査結果と適格性判定

メーカー、検査日

追加情報

改訂の背景:

GB/T 4295-2008 では、微細構造要件（XRD 検出など）が追加され、不純物制限（酸素含有量を 0.05% から 0.02% に低減など）が改良され、高純度タングステンカーバイド粉末に対するセメントカーバイド業界の需要が反映されています。

国際基準との比較:

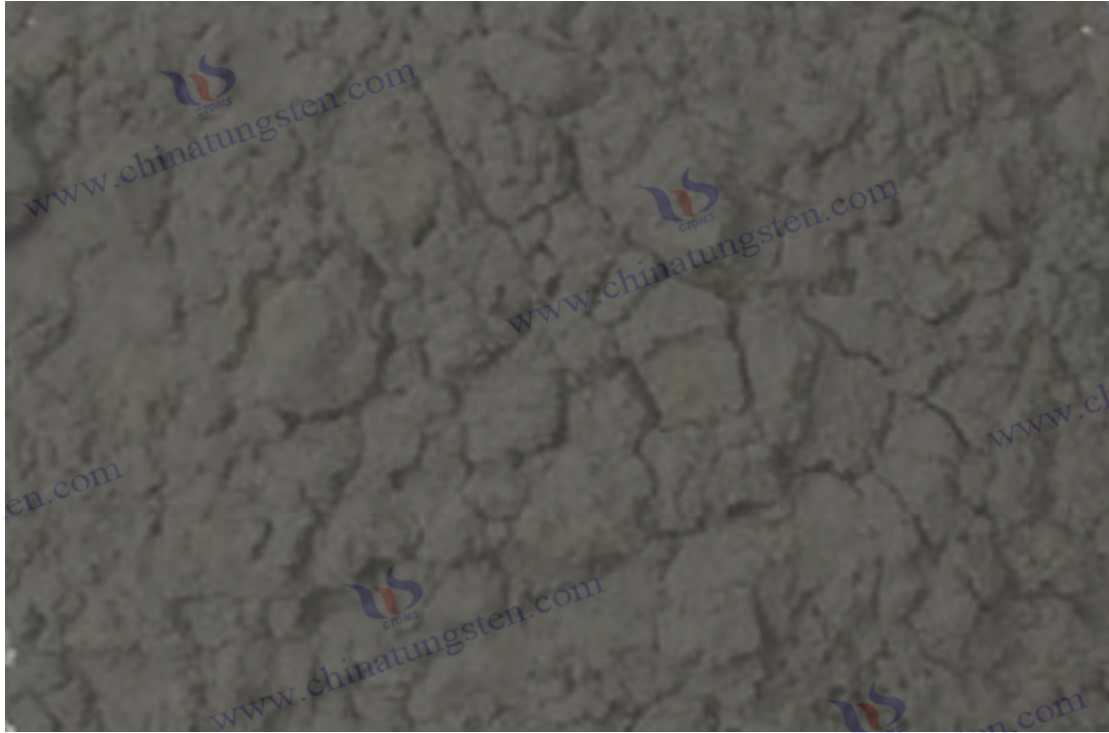
ISO 4499-2:2020 と比較すると、この規格は化学組成の制御（遊離炭素 <0.5% など）に重点を置いているのに対し、ISO は微細構造分析（WC 粒径など）に重点を置いています。

ASTM B430-19 では、粒度分布の精度（RSD < 3%）がより重視されます。

適用範囲:

この規格は、従来のミクロンサイズの炭化タングステン粉末（0.5～10 μm）に適用され、業界の慣行または企業標準を参照する必要があるナノサイズの WC 粉末（<100nm）は対象としません。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



付録:

GB/T 5314-2011 超硬合金用粉末

標準名:

中国語: 超硬合金用粉末

英語: 超硬合金用粉末

リリースと実装:

発売日: 2011年12月30日

発効日: 2012年9月1日

発行機関: 国家標準化局

標準ステータス: 現在有効 (2025年4月現在、新しい標準に置き換えられていません)

交換基準:

GB/T 5314-2002 (この規格は2002年版の改訂版です)

GB/T 5314-1985 (以前のバージョン、2002バージョンに置き換えられました)

1. 範囲

この規格は、超硬合金粉末の分類、技術要件、試験方法、検査規則、ならびに表示、包装、輸送および保管に関する要件を規定する。タングステン粉末、コバルト粉末、炭化タングステン粉末、その他の金属または炭化物粉末を原料として超硬合金を製造するための粉末材料に適用する。主な用途は、切削工具、耐磨耗部品、採掘工具、金型などである。この規格は、ナノレベルの粉末（粒子径<100nm）の特殊な要件には適用されない。

2. 規範的参照

以下の文書はこの規格の規範的な参照文書であり、この規格と併せて使用されます。

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

GB/T 191 「包装、保管および輸送用画像マーク」
GB/T 223.5 「鋼および合金中の炭素および硫黄含有量の測定」
GB/T 3249 「耐火金属粉末および複合粉末の総炭素含有量の測定」
GB/T 4295 炭化タングステン粉末
GB/T 5124 超硬合金の化学分析方法（全炭素、遊離炭素、不純物分析などの各部を含む）
GB/T 1480 「金属粉末の粒度の測定 - 乾式ふるい分け法」
GB/T 25995 「タングステン粉末および炭化タングステン粉末の粒度の測定」
GB/T 19077 レーザー回折法による粒度分布（改訂により引用可能）

3. 用語と定義

超硬合金用粉末：超硬合金の製造に使用される粉末材料で、タングステン粉末（W）、タングステンカーバイド粉末（WC）、コバルト粉末（Co）、その他の添加粉末（TiC、TaC、NbC など）が含まれます。

総炭素：結合炭素と遊離炭素を含む、粉末中のすべての形態の炭素の質量分率。

遊離炭素：どの金属元素とも結合していない元素炭素。

フィッシャーサブシブサイザー（FSSS）：フィッシャーサブシブサイザーで測定された粉末の平均粒子サイズ（ミクロン（ μm ））。

見かけ密度：単位体積あたりの粉末の質量。 g/cm^3 で表されます。

4. 分類

超硬合金粉末は、組成と用途に応じて分類され、主に以下の種類があります。

4.1 成分による分類

タングステン粉末（W）：炭化法で炭化タングステン粉末を製造するために使用されます。

タングステンカーバイド粉末（WC）：単相 WC または微量の W_2C / 遊離炭素を含む粉末。

コバルト粉末（Co）：超硬合金の結合相として機能します。

複合粉末：WC-Co 混合粉末、WC-TiC-Co 混合粉末など。

TiC）、炭化タンタル（TaC）、炭化ニオブ（NbC）など。

4.2 粒度による分類

粗粉末：FSSS 粒子径 $> 5 \mu\text{m}$

中粉末：FSSS 粒子径 $1.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$

微粉末：FSSS 粒子径 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$

4.3 目的による分類

切削工具用粉末：高純度で均一な粒子サイズが必要です（WC-10 など）。

耐摩耗部品用粉末：耐摩耗性と耐衝撃性に重点を置きます（WC-50 など）。

鉋山工具用粉末：靱性と圧縮強度を重視。

5. 技術要件

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 化学組成

タングステン粉末 (W):

タングステン含有量: $\geq 99.9\%$

酸素含有量: $\leq 0.03\%$ (300 ppm)

不純物 (Fe、Mo、Ni など): $\leq 0.01\%$

炭化タングステン粉末 (WC) (参照 GB/T 4295-2008):

総炭素: 6.10%~6.18%、偏差 $\pm 0.05\%$

遊離炭素: $\leq 0.5\%$

酸素含有量: $\leq 0.02\%$ (200 ppm)

不純物 (Fe、Ni など): $\leq 0.05\%$

コバルト粉末 (Co):

コバルト含有量: $\geq 99.8\%$

酸素含有量: $\leq 0.05\%$

不純物 (Fe、Ni など): $\leq 0.02\%$

複合粉末: 組成は供給側と需要側で交渉され、セメント炭化物の焼結要件を満たす必要があります。

5.2 物理的性質

FSSS: ブランドの要件に応じて、範囲は 0.5 ~ 10 μm で、偏差は $\pm 10\%$ です。

嵩密度:

タングステン粉末: 12.0~14.0 g/cm^3

炭化タングステン粉末: 12.0~14.0 g/cm^3

コバルト粉末: 0.8~1.5 g/cm^3

流動性: 両者の交渉により決定されますが、通常は 10 ~ 20 秒 / 50g (ホール流量計) です。

5.3 外観品質

粉末は均一な色 (タングステン粉末は灰色、WC 粉末は灰黒色、Co 粉末は灰色) で、目に見える異物、塊、酸化の兆候があつてはなりません。

5.4 微細構造

タングステン粉末: 粒子は多面体またはほぼ球形で、明らかな粒界欠陥はありません。

タングステンカーバイド粉末: 単相 WC 結晶 (六方晶系)、XRD 検出では明らかな W_2C または遊離炭素ピークは見られません。

コバルト粉末: 凝集のない均一な粒子。

6. 試験方法

6.1 化学組成分析

総炭素含有量: GB/T 3249 または GB/T 5124 に準拠し、燃焼法 (赤外線吸収法) を使用、精度は $\pm 0.01\%$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

遊離炭素含有量：GB/T 5124 に従って酸に溶解した後、滴定により測定します。

酸素含有量：LECO 分析装置などの不活性ガス溶融法（赤外線検出）を使用します。

不純物含有量：誘導結合プラズマ発光分析法（ICP-OES）または原子吸光分析法（AAS）を使用します。

6.2 身体能力テスト

FSSS：GB/T25995 に準拠し、FSSS 粒度計で測定、空気圧 0.1MPa、サンプル質量 2-5g。

嵩密度：付録 B に記載されているようにスコット容積計を使用して測定し、3 回繰り返して平均値を取得します。

流動性：付録 C に規定されているホール流量計を使用して測定された、50 g のサンプルが標準漏斗を通過するのにかかる時間。

6.3 外観と微細構造

外観：肉眼または 10 倍の拡大鏡で確認してください。

微細構造：相状態は X 線回折計（XRD）で分析し、粒子形態は走査型電子顕微鏡（SEM）で観察しました。

7. 検査規則

7.1 検査カテゴリー

工場検査：総炭素、遊離炭素、FSSS 粒子サイズ、嵩密度、外観を含む。

型式検査：すべての技術要件をカバーし、製造プロセスが変更されたとき、またはユーザーの要求に応じて実行されます。

7.2 バッチ分割

同じ炉または同じプロセス条件で製造された粉末はバッチとみなされ、その質量は 500 kg を超えてはなりません。

7.3 サンプルング

各バッチからランダムに 5~10 点が選択され、サンプルの総量は 500g 以上になります。

サンプルは酸化や汚染を防ぐために密閉容器に詰められました。

7.4 決定ルール

特定の指標が基準を満たさない場合、二重サンプルングによる再検査が認められます。再検査でも不合格となった場合、ロット全体が不合格と判断されます。

サプライヤーとバイヤーは特別な受入れ基準について交渉することができます。

8. ラベル付け、包装、輸送および保管

8.1 ロゴ

各パッケージには次のマークが付いています：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製品名：超硬合金用粉末
種類（タングステン粉末、WC 粉末、Co 粉末など）とブランド
バッチ番号、製造日
正味重量（例：25 kg）
製造元名および商標
GB/T 191 に準拠した輸送マーク（「防湿」や「取扱注意」など）。

8.2 包装

内部包装：二重層ポリエチレンプラスチック袋、密封防湿、各袋の正味重量 5～25kg。

外装：鉄バレルまたはプラスチックバレル、密閉性良好、バレル壁の厚さ ≥ 0.5 mm。
パッケージ形態はユーザーの要件に応じて調整できます。

8.3 交通

輸送中は、梱包の損傷を防ぐために防湿性と耐衝撃性が必要です。
酸、アルカリ、酸化剤と混ぜないでください。

8.4 ストレージ

温度 5～35° C、相対湿度 65%未満の乾燥した換気の良い倉庫に保管してください。

火気や化学薬品から遠ざけてください。保管期間は 12 ヶ月を超えてはなりません。

9. 品質証明書

各粉末バッチには品質証明書が付属しており、内容は次のとおりです。

製品名、種類、ブランド、バッチ番号

化学組成（総炭素、遊離炭素、酸素、不純物）

物理的特性（FSSS 粒子サイズ、嵩密度、流動性）

検査結果と適格性判定

メーカー、検査日

付録

付録 A（規範的付録）：フィッシャー粒子サイズの測定方法

付録 B（規範的付録）：かさ密度の測定方法

付録 C（規範的付録）：流動性の決定方法

追加情報

改訂の背景：

2002 年版と比較して、GB/T 5314-2011 ではコバルト粉末と複合粉末に対する技術要件が追加され、酸素含有量の制限が改良され（例えば、タングステン粉末は 0.05% から 0.03% に削減）、高性能粉末に対するセメントカーバイド業界の需要が反映されています。

国際基準との比較：

ISO 4499-2:2020 と比較すると、この規格は粉末の化学組成と物理的特性の制御（総炭素偏差

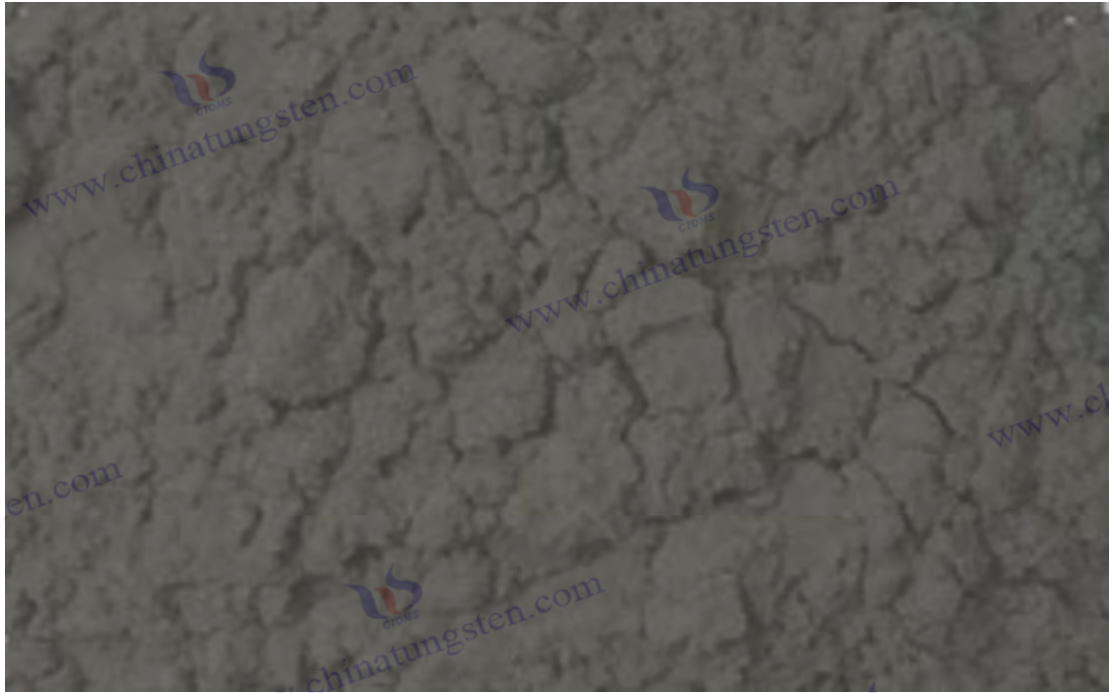
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

±0.05%など）に重点を置いていますが、ISO は微細構造と焼結後の特性に重点を置いていま
す。

ASTM B430-19 では粒度分布の精度（RSD < 3%）を重視していますが、この規格ではフィッシ
ャー粒度の一貫性を重視しています。

適用範囲:

この規格はミクロンサイズの粉末（0.5～ 10 μm ）に適用され、企業規格や業界慣行への参照
を必要とするナノサイズの粉末は対象としません。



付録:

GB/T 19077-2016 粒度分布レーザー回折法

標準名:

中国語: レーザー回折による粒度分布

英語: 粒度分布 - レーザー回折法

リリースと実装:

発売日: 2016年10月13日

発効日: 2017年5月1日

発行機関: 国家標準化局

標準ステータス: 現在有効 (2025年4月現在、新しい標準に置き換えられていません)

交換基準:

GB/T 19077.1-2008 (2008年版はパート1、2016年版は国際規格の最新要件を統合、修正、採用)

国際基準に相当:

ISO 13320:2009「粒子サイズ分析 - レーザー回折法」(同等で一貫した技術内容、中国規格に合わせて調整された形式)

1. 範囲

この規格は、レーザー回折法による粉体粒子径分布測定の方法、機器要件、試験方法、校正、結果表示及び精度要件を規定する。適用範囲は、粒子径範囲 $0.02\ \mu\text{m}$ ~ $2000\ \mu\text{m}$ の固体粉体であり、金属粉 (タングステン粉など)、セラミック粉 (炭化タングステン粉 WC など)、鉱物粉などが含まれる。この方法は、湿式分散と乾式分散の両方をカバーし、研究開発、生産、品質管理における粒子径分析に適している。この規格は、繊維状または棒状粒子の特殊な粒子径分

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

布測定には適用されない。

2. 規範的参照

以下の文書はこの規格の規範的な参照文書であり、この規格と併せて使用されます。

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 3696:1987 に相当）

ISO 9276-1:1998 《

粒度分析結果の表現 - パート 1: グラフ表示》

注：参照文書の最新バージョンがこの規格に適用されます。

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。

粒子サイズ： 粒子の等価直径。通常はレーザー回折法で測定された球相当直径としてマイクロメートル（ μm ）単位で表されます。

粒度分布： 体積、個数、または質量パーセンテージとして表される粉末粒子サイズの分布特性。

レーザー回折： 単色レーザービームに対する粒子の散乱特性に基づいて粒子サイズを測定する光学的方法。

D10、D50、D90： 累積分布曲線上の粒子の 10%、50%、90%がこの粒子径より小さい値で、それぞれ 10%粒子径、中央粒子径、90%粒子径と呼ばれます。

分散： 粉末粒子をガスまたは液体媒体に均一に分散させるプロセス。

屈折率： 粒子および分散媒体の光学パラメータ。粒子サイズの計算に使用されます。

遮蔽： サンプルがレーザー光線を遮る度合いで、測定された濃度を反映します。

4. 方法の原理

レーザー回折法は、単色レーザーに対する粒子の散乱特性を利用して粒度分布を測定します。その基本原理は次のとおりです。

レーザー光（通常、波長 633 nm）を分散粒子に照射すると、粒子は散乱光を発生させます。散乱角は粒子サイズに反比例します。つまり、粒子が大きいほど散乱角は小さく（光軸に近い）、粒子が小さいほど散乱角は大きくなります（光軸から外れます）。

散乱光強度分布は検出器アレイによって記録され、ミー散乱理論（全粒子サイズ範囲に適用可能）またはフラウンホーファー近似（10 μm を超える大きな粒子に適用可能）に従って粒子サイズ分布が計算されます。

ミー理論では粒子と媒体の屈折率と吸収率の入力が必要ですが、フラウンホーファー近似では光学パラメータは必要ありませんが、精度は低くなります。

5. 器具と材料

5.1 機器

レーザー粒度分布測定装置：レーザー光源、光学系、検出器、データ処理装置で構成されています。一般的なモデルとしては、Malvern Mastersizer 3000 や Beckman Coulter LS 13 320 などがあります。

レーザー光源： 単色光、通常は He-Ne レーザー（633 nm）、安定した出力、変動 <1%。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

検出器：0.02°～135°の散乱角をカバーし、ダイナミックレンジは10⁶以上を誇るマルチチャンネル光検出器。

分散型システム：

湿式法：攪拌機と超音波を使用してサンプルセルを循環させます。

乾式法：圧縮空気分散装置、圧力調整可能（0.1～0.5MPa）。

5.2 試薬と材料

分散媒：

湿式法：蒸留水（GB/T 6682 グレード 3 の水に準拠）、エタノールまたはその他の低粘度液体。

乾式法：圧縮空気または窒素（純度≥99.9%）。

分散剤：ポリアクリル酸ナトリウム（PAA、0.1%～0.5%）、ドデシル硫酸ナトリウム（SDS）など、サンプルの特性に応じて選択できます。

標準サンプル：NIST SRM 1004（ガラス微小球、粒子サイズ 10～100 μm）や ISO 認定標準など、校正に使用されます。

6. 試験方法

6.1 サンプルの準備

サンプリング：分離を避けるために、ランダム サンプリングの原則に従ってバッチから 5～10 g の代表的なサンプルを採取します。

前処理：水分を除去するために乾燥（105° C、1 時間）、または必要に応じてふるいにかけて大きな粒子（>2000 μm）を除去します。

保管：湿気の吸収や汚染を避けるため、密閉された乾燥した容器に保管してください。

6.2 機器の校正

標準サンプル（NIST SRM 1004 など）を使用して機器を校正し、D50 偏差が 3% 未満であることを確認します。

レーザー強度と検出器の応答をチェックして、バックグラウンド ノイズが 0.1% 未満であることを確認します。

6.3 湿式分散測定

6.3.1 分散

サンプルを分散媒（水 50～100mL など）に加え、分散剤（0.1%～0.5%）を加えます。

スターラー（500～1000 rpm）で 2～5 分間混合し、必要に応じて超音波で分散させます（50～100 W、1～5 分）。

分散状態を確認します（顕微鏡で凝集がないか確認します）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.2 測定

分散液をサンプルプールに注入し、濃度を遮光度 10%~20%（機器が最適範囲を示す）に調整します。

屈折率（例：炭化タングステン粉末の場合は 2.5~3.0、水の場合は 1.33）を設定し、ミー理論計算を選択します。

測定時間は 10~30 秒とし、3 回繰り返して平均値を算出した。

6.4 乾燥分散測定

6.4.1 分散

サンプルを乾式分散機に入れ、空気圧（0.1~0.3 MPa）を調整します。

注入速度を制御し、シェーディング度は 5%~15% です。

6.4.2 測定

屈折率と計算モデル（Mie または Fraunhofer）を設定します。

測定時間は 10~30 秒で、これを 3 回繰り返します。

6.5 パラメータ設定

測定範囲：0.02~2000 μm （機器モデルによって異なります）。

各測定の前に記録され、自動的に差し引かれます。

7. データ処理と結果の提示

7.1 データ処理

装置ソフトウェアは散乱光強度分布に基づいて粒度分布を計算し、累積分布と頻度分布を出力します。

RSD < 5% を確保するために、外れ値（バックグラウンド ノイズやバブル干渉など）は除去されました。

7.2 結果の表現

粒度分布曲線：体積パーセントでプロットされ、ISO 9276-1 に従ってグラフ化されます。

特性粒子サイズ：

D10：粒子の 10%がこの値より小さい

D50：平均粒子径

D90：粒子の 90%がこの値より小さい

分布幅：スパン = $(D90 - D10) / D50$

平均粒子径：体積平均粒子径 $D[4, 3]$ または数平均粒子径 $D[1, 0]$ （要件に応じて）。

単位：粒子サイズは μm で表され、小数点以下 2 桁まで表示されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3 レポートの内容

サンプル名、バッチ番号

分散方法（湿式/乾式）、媒体、分散剤

機器型式、測定条件（屈折率、遮光度）

粒度分布データ（D10、D50、D90 など）と曲線

8. 精度と不確かさ

8.1 再現性

同じオペレーターと機器の場合、D50 の偏差は 3% 未満、D10 と D90 の偏差は 5% 未満です。

8.2 再現性

異なる研究室および機器間の D50 の偏差は 5% 未満であり、D10 および D90 の偏差は 10% 未満です。

8.3 不確かさ

原因としては、サンプルの分散の不均一性、屈折率の誤差、機器のノイズなどがあり、レポートで説明する必要があります。

9. 注記

分散均一性： 粒子の破損を引き起こす過剰な超音波処理や、凝集を引き起こす不十分な超音波処理を避けてください。

光学パラメータ： 屈折率と吸収率は正確でなければなりません。炭化タングステン粉末の場合、基準値（例：2.5~3.0、吸収率 0.1）が推奨されます。

環境制御： 温度 20 ~ 25 °C、湿度 <65%、振動干渉を避けてください。

機器のメンテナンス： サンプルセルと光学システムを定期的に清掃し、レーザー出力をチェックします。

10. 付録

付録 A（参考）： 屈折率と吸収率の参考値

例： 炭化タングステン（WC）： 屈折率 2.5~3.0、吸収率 0.1~0.3

水： 屈折率 1.33、吸収率 0

付録 B（参考）： 典型的な粒度分布の例

単峰性分布と多峰性分布の曲線解釈を含む

付録 C（参考）： ミー理論とフラウンホーファー近似の適用性

ミー： 全粒子サイズ範囲、光学パラメータが必要

フラウンホーファー： >10 μm、簡略化された計算

追加情報

改訂の背景：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 19077-2016 は 2008 バージョンに代わるもので、ISO 13320:2009 の最新技術を採用し、乾式および湿式法の適用範囲を拡大し、屈折率の設定と精度の要件を高め、ナノスケールの粉末（例：<100 nm）のサポートを改善しています。

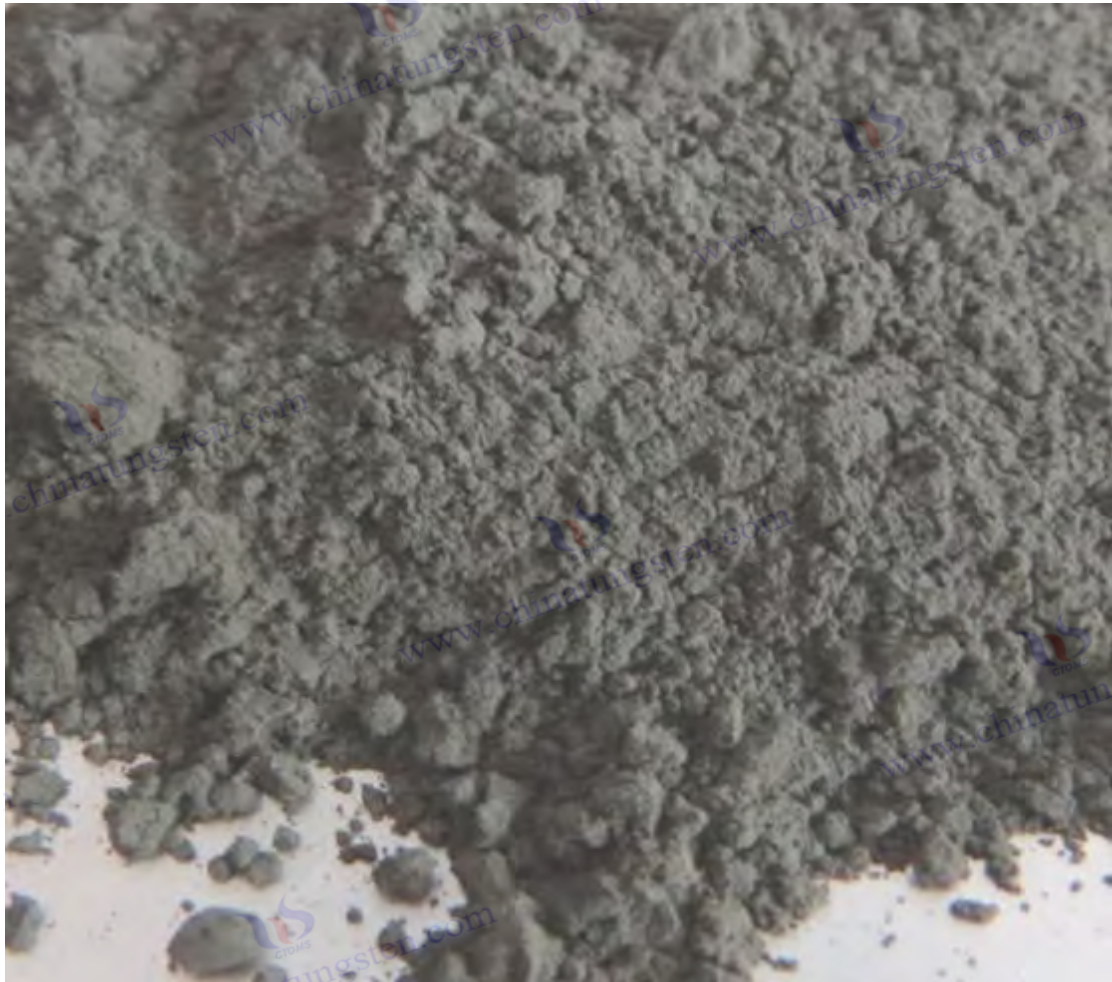
国際基準との比較：

ISO 13320:2009 と同等で、技術的な内容は同じで、形式は中国の規格に合わせて調整されています。

ASTM E2490-09 と比較すると、この規格では操作の詳細と機器の校正に重点が置かれていますが、ASTM ではデータ処理と不確かさ分析に重点を置いています。

適用範囲：

10 μm) やタングステン粉末 (1 ~ 50 μm) などの耐火物。湿式法は微粉末に適しており、乾式法は粗粉末に適しています。



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

GB/T 5124-2008 セメント炭化物の化学分析方法

標準名:

中国語: 超硬合金の化学分析方法

英語: 超硬合金の化学分析方法

リリースと実装:

GB/T 5124.1-2008 (総炭素含有量の測定): 2008年6月16日発行、2009年1月1日発効

GB/T 5124.2-2008 (遊離炭素含有量の測定): 2008年6月16日発行、2009年1月1日発効

GB/T 5124.3-2008 (コバルト含有量の測定): 2008年6月16日発行、2009年1月1日発効

GB/T 5124.4-2008 (不純物元素の測定): 2008年6月16日発行、2009年1月1日発効

発行機関: 国家標準化局

標準ステータス: 現在有効 (2025年4月現在、新しい標準に置き換えられていません)

交換基準:

GB/T 5124-1995 (1995年版は複数の部分に分かれており、2008年版は改訂され統合されている)

1. 範囲

この規格は、超硬合金中の化学組成分析方法を規定しており、総炭素 (Total Carbon)、遊離炭素 (Free Carbon)、コバルト (Co)、および不純物元素 (Fe、Mo、Ni など) の測定を含む。超硬合金原料 (炭化タングステン粉末 WC、コバルト粉末 Co など) および焼結超硬合金製品の化学組成分析に適用できる。また、この標準方法は、他の金属炭化物 (TiC、TaC、NbC など) の分析にも参考となる。分析結果は、品質管理、プロセスの最適化、および製品の受入れに用いられる。

2. 規範的参照

以下の文書はこの規格の規範的な参照文書であり、この規格と併せて使用されます。

GB/T 223.5-2008 「鋼および合金中の炭素および硫黄含有量の測定方法」

GB/T 3249-2009 「耐火金属粉末および複合粉末の総炭素含有量の測定」

GB/T 4010-1994 金属材料の化学分析のための試料採取及び調製方法

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 3696:1987 に相当)

注: 参照文書の最新バージョンがこの規格に適用されます。

3. 一般事項

実験室条件: 分析は、20 ~ 25°C、相対湿度 65% 未満の清潔でほこりのない環境で実行する必要があります。

サンプル要件: 汚染や成分損失 (酸化、揮発など) を避けるため、GB/T 4010 に従って準備します。

試薬の純度: すべての試薬は分析グレード (AR) であり、必要に応じて上級グレード (GR) でした。

水質: GB/T 6682 グレード 3 以上の純水に適合。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機器の校正：分析前に機器を校正して、精度と再現性を確保します。

安全要件：酸、アルカリ、または高温を扱う場合は、作業はドラフト内で行い、保護具を着用する必要があります。

4. GB/T 5124.1-2008：総炭素含有量の測定

4.1 方法の原理

超硬合金試料を酸素気流中で高温焼成し、すべての炭素（結合炭素と遊離炭素を含む）をCO₂に変換する。赤外線吸収法を用いて総炭素含有量を測定する。

4.2 試薬と器具

酸素：純度 ≥ 99.5%、流量調整可能。

フラックス：

高純度スズ粒子（Sn、純度 99.9%以上）：燃焼を促進します。

高純度鉄粉（Fe、純度 99.9%以上）：融点を下げます。

楽器：

高周波誘導燃焼炉（出力 2kW 以上、温度 1350～1450℃）。

赤外線炭素・硫黄分析装置（LECO CS-600 または CS-844 など）。

4.3 標本

質量：0.1～0.5g(精度 0.0001g)。

条件：油と酸化物層を除去するために、0.2 mm (80 メッシュ) 未満に研磨します。

4.4 テスト手順

サンプルの重さを量り、清潔な磁器のポートに入れます。

フラックス（Sn 1.0 g、Fe 0.5 g）を加えてよく混ぜます。

磁器製のポートを燃焼炉に入れ、酸素（流量 2～3L /分）を導入し、1350～1450° C に加熱し、

5～10 秒間燃焼させます。

CO₂は赤外線検出器で測定され、吸収ピークの強度が記録されます。

機器は標準サンプル（例：NIST SRM 276b、炭素含有量 6.0%～6.5%）で校正され、総炭素含有量が計算されます。

4.5 結果の計算

総炭素含有量（質量分率、%）=（機器の読み取り値×校正係数）/ サンプル質量

測定範囲：0.1%～10%。

精度：±0.01%（再現性 RSD <2%）。

4.6 注記

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

水分による干渉を避けるために、サンプルは乾燥させる必要があります（105° C、1 時間）。
燃焼炉は残留物を除去するために定期的に清掃する必要があります。
酸素の流れが不十分だと不完全燃焼が起こる可能性があるため、ガス管を点検する必要があります。

5. GB/T 5124.2-2008: 遊離炭素含有量の測定

5.1 方法の原理

試料中の遊離炭素（元素炭素）は酸で溶解し、その含有量は酸化滴定によって測定されます。
結合炭素（WC 中の炭素）は酸に不溶であるため、反応には関与しません。

5.2 試薬と器具

酸-硝酸混合物: H_2SO_4 (1+1、体積比 1: 1 に希釈) と HNO_3 (1+1) を 1: 1 の比率で混合します。

二クロム酸カリウム ($K_2Cr_2O_7$): 0.1 mol / L 標準溶液。

ジフェニルアミンスルホン酸ナトリウム: 指示薬、0.2% (m / V) 水溶液。

楽器:

電気ホットプレート (100°C まで温度調節可能)。

滴定装置 (50 mL ビュレット、精度 0.02 mL)。

5.3 標本

質量: 1.0~2.0 g (精度 0.0001 g)。

状態: 0.2 mm 未満に研磨し、表面の不純物を除去。

5.4 テスト手順

サンプルを量り、250 mL の三角フラスコに入れます。

硫酸・硝酸混合液 50mL を加え、時計皿で覆い、ホットプレートで 80~90°C に加熱します。

30 分間攪拌した後、遊離炭素は CO_2 に酸化され、溶液は透明になりました。

室温まで冷却し、残留物を蒸留水で中性になるまで洗浄し、100 mL のメスフラスコに濾過して定容します。

濾液 20 mL を取り、 $K_2Cr_2O_7$ 標準溶液を加え、赤紫色の終点 (30 秒間色の変化がない) まで滴定し、消費量を記録します。

5.5 結果の計算

遊離炭素含有量 (質量分率、%) = $(V \times C \times 0.012 \times 100) / m$

$K_2Cr_2O_7$ 溶液の体積 (mL)

C: $K_2Cr_2O_7$ 濃度 (mol/L)

0.012: 炭素のモル質量変換係数 (g/mol)

m: サンプル質量 (g)

測定範囲: 0.01%~1.0%。

精度: $\pm 0.005\%$ (再現性 RSD <3%)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6 注記

酸性ガスの吸入を避けるため、作業はドラフト内で行われた。

滴定終点は正確に決定し、必要に応じてブランクテストで補正する必要があります。

サンプル内の結合炭素（WC など）は結果に影響を与えませんが、他の還元不純物がないことを確認する必要があります。

6. GB/T 5124.3-2008: コバルト含有量の測定

6.1 方法の原理

コバルト含有量は誘導結合プラズマ発光分析法（ICP-OES）によって測定されました。

6.2 試薬と器具

硝酸（HNO₃）: 1+1 溶液（体積比 1: 1 希釈）。

塩酸（HCl）: 1+1 溶液。

コバルト標準溶液: 10 mg/L（CoCl₂ で調製、国家標準物質にトレーサブル）。

機器: ICP-OES 分光計（PerkinElmer Optima 8300 または Thermo iCAP 7000）。

6.3 試験片

質量: 0.5~1.0 g（精度 0.0001 g）。

状態: 0.2 mm 未満に粉碎され、乾燥しています。

6.4 テスト手順

サンプルを量り、100 mL のポリテトラフルオロエチレンビーカーに入れます。

20 mL の HNO₃ と 10 mL の HCl を加え、80℃ に加熱し、完全に溶解するまで（約 30 分）撹拌します。

冷却後、100 mL のメスフラスコに移し、蒸留水で定容します。

コバルトの輝線は ICP-OES によって測定されました（推奨波長 228.616 nm、第 2 の選択肢 231.160 nm）。

コバルト標準溶液（0.1~10 mg/L）を使用して検量線を作成し、コバルト濃度を計算しました。

6.5 結果の計算

コバルト含有量（質量分率、%） = $(C \times V) / (m \times 10^4) \times 100$

C: 溶液中のコバルト濃度（mg/L）

V: 固定容量（mL、通常は 100 mL）

m: サンプル質量（g）

測定範囲: 0.1%~30%。

精度: ±0.02%（再現性 RSD <2%）。

6.6 注記

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タングステンマトリックスが干渉する可能性があります。必要に応じて、マスク剤(EDTA、0.1 mol/L など)を追加するか、機器パラメータを最適化してください。
標準溶液は劣化を防ぐために毎日新しく調製する必要があります。

7. GB/T 5124.4-2008: 不純物元素の測定

7.1 方法の原理

サンプルを酸で溶解し、ICP-OES で不純物元素 (Fe、Mo、Ni、Cr、Al など) の含有量を測定しました。

7.2 試薬と器具

硝酸 (HNO₃): 1+1 溶液。

塩酸 (HCl): 1+1 溶液。

標準溶液: 各元素 (Fe、Mo、Ni など) の濃度は 1~10mg/L で、国家標準物質まで追跡可能です。

装置: ICP-OES 分光計。

7.3 試験片

質量: 0.5~1.0 g (精度 0.0001 g)。

状態: 0.2 mm 未満に研磨。

7.4 試験手順

サンプルはステップ 6.4 と同じ方法で溶解した (HNO₃ 20 mL、HCl 10 mL、80℃で溶解)。
冷却後、容量を 100 mL に調整し、ICP-OES で各元素の特性スペクトル線を測定しました。

Fe: 238.204 nm

モリブデン: 202.032 nm

ニッケル: 231.604 nm

Cr: 267.716 nm

Al: 396.152 nm

各元素の標準溶液 (0.01~10 mg/L) を使用して検量線を作成し、濃度を計算します。

7.5 結果の計算

不純物含有量 (質量分率、%) = $(C \times V) / (m \times 10^4) \times 100$

C: 溶液中の元素濃度 (mg/L)

V: 固定容量 (mL、通常は 100 mL)

m: サンプル質量 (g)

測定範囲: 0.001%~1.0%。

精度: ±0.001% (再現性 RSD <5%)。

7.6 注記

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高タングステンマトリックスはスペクトル干渉を生じさせる可能性があり、波長調整またはバックグラウンド補正の使用が必要になります。
複数の元素を同時に測定する場合は、スペクトル線が重ならないようにしてください。

8. 精度と不確実性

8.1 再現性

同じオペレータと機器でも測定結果にはばらつきがあります。

総炭素量：±0.01%

遊離炭素：±0.005%

コバルト：±0.02%

不純物：±0.001%

8.2 再現性

異なる研究室および機器の結果には、再現性限界の 2 倍未満の偏差があります。

8.3 不確実性

ソースには、サンプルの均一性、機器の校正、試薬の純度などがあり、レポートで評価する必要があります。

9. 注記

サンプルの準備： 粉碎中に Fe などの不純物が混入するのを防ぐため、炭化物乳鉢を使用することをお勧めします。

機器のメンテナンス： 感度と安定性を確保するために、燃焼炉と ICP-OES を定期的に校正します。

安全な操作： 酸溶解および高温燃焼は、保護メガネと手袋を着用してドラフト内で行う必要があります。

追加情報

改訂の背景：

GB/T 5124-2008 では、1995 年版と比べて分析方法が更新され、従来の分光光度法（コバルトの測定など）に代わって ICP-OES が導入され、精度と多元素分析機能が向上し、セメントカーバイド業界の高純度原材料の需要にえています。

国際基準との比較：

ISO 11876:2010「セメント炭化物の化学分析」と比較すると、この規格は古典的な化学的方法（燃焼法や滴定法など）に重点を置いているのに対し、ISO は機器分析（ICP-MS など）を優先しています。

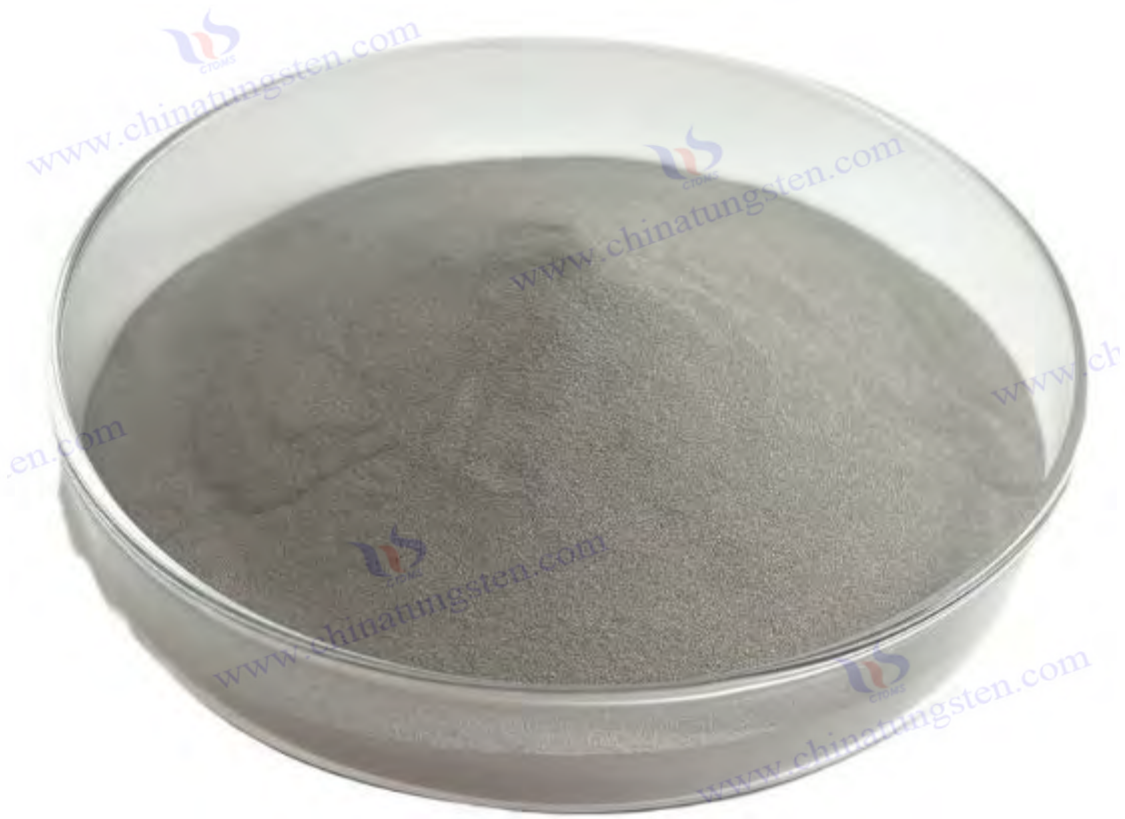
ASTM E1019-18 は同様の内容をカバーしていますが、自動化と複数の要素の同時測定に重点が置かれています。

適用範囲：

微量から高含有量までの範囲をカバーするタングステンカーバイド粉末（WC）、WC-Co 焼結炭

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

化物および複合材料（WC- TiC など）の成分分析に適します。



付録:

フィッシャーの粒子サイズ測定法

フィッシャーサブシーブサイザー (FSSS) は、空気透過によって粉体の平均粒子径を測定する方法です。金属粉（炭化タングステン粉 WC など）、セラミック粉、その他の微粒子材料の粒度分析に広く使用されています。フィッシャーサブシーブサイザーの結果は、粉体の平均粒子径を表すミクロン（ μm ）で表されます。特に、粒子径範囲が $0.2\sim 50\mu\text{m}$ の微粉に適しています。この方法は、粉体層内の空気透過抵抗を測定することで、間接的に粒子径を推定します。操作が簡単で、再現性も良好です。粉末冶金および材料科学における標準的な粒度試験方法です。

1. 定義と原則

定義:

フィッシャー粒度分布とは、フィッシャー式ふるい分け装置によって測定された粉末の平均粒子径を指し、通常は FSSS 粒度（単位： μm ）で記録されます。これは粉末粒子の等価球径を反映しています。ふるい分け法やレーザー粒度分布測定法とは異なり、FSSS 法は微粉末の特性評価、特に WC 粉末などの超硬合金原料の製造に適しています。

測定原理

空気透過法:

フィッシャー粒子径測定法は、圧縮された粉体層を通過する空気の抵抗と粒子径の関係に基づいています。一定流量で空気を粉体サンプルに通過させると、微粒子は比表面積が大きく細孔が小さいため抵抗が大きくなりますが、粒子が大きいほど抵抗は小さくなります。

数学的根拠:

コゼニー・カルマンの式によれば、空気透過抵抗は粉体の比表面積（ S ）と多孔度（ ε ）に関係している。

$$\Delta P = \frac{\mu v L S^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$$

で:

ΔP : 圧力差 (Pa)

μ : 空気粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

v : 空気速度 (m/s)

L : 粉末層の厚さ (m)

S : 比表面積 (m^2/kg)

ε :

ΔP を測定し、標準条件下での検量線と組み合わせることで、多孔度を平均粒子サイズ (D_{FSSS}) に変換できます。

前提: 粒子は球形、粉体層は均一に圧縮され、空気の流れは層流です。

特徴

適用範囲: $0.2\sim 50\mu\text{m}$ 、精度 $\pm 0.05\mu\text{m}$ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

利点：装置はシンプルで、迅速な検出に適しています。

制限事項：粒子の形状に敏感で、非球形粒子は偏差を引き起こす可能性があります。

2. 判定方法

フィッシャー粒子サイズの測定は、ASTM B330 や ISO 10070 などの標準手順に従います。以下は、一般的な方法の概要です。

装置

フィッシャー サブシーブ アナライザー：エアポンプ、圧力計、サンプル チューブ（内径は通常 5 ~ 10 mm）、水柱メーター、またはデジタル圧力センサーが含まれます。

天秤：精度 0.001g、サンプルの計量に使用します。

オーブン：サンプルを乾燥するために使用され、温度は 100~120° C に制御されます。

標準サンプル：粒子サイズが既知の校正粉末（標準 WC 粉末など）。

手順

サンプル準備：

サンプリング：サンプルスプリッターを使用して粉末バッチから 5 ~ 10 g のサンプルをランダムに抽出し、サンプルの代表性を確保します。

乾燥：オーブン（105° C、2 時間）で水分を除去し、水分含有量を 0.1% 未満にします。

冷却：水分の吸収を防ぐため、デシケーター内で室温まで冷却します。

サンプルのロードと圧縮：

計量：指定された質量を正確に計量します（例：WC 粉末 2.5g、密度に応じて調整）。

サンプル チューブへの充填：粉末をサンプル チューブに注ぎ、一定の圧力（例：2 ~ 5 kPa）で圧縮機を使用して一定の高さ（通常 10 mm）まで圧縮します。

確認：粉末床の表面が平らで、ひび割れがなく、一貫した多孔度（ $\epsilon \approx 0.4-0.5$ ）であることを確認します。

機器の校正：

標準サンプル（FSSS 1.0 μm WC 粉末など）を使用して機器を校正し、空気流量を標準値（0.1 L/分など）に調整します。

標準曲線との一致を確認するために校正圧力差（ ΔP ）を記録します。

測定：

エアポンプを起動し、流量を一定値に調整します。

水柱の高さの差（cm H₂O）またはデジタル圧力値（Pa）を記録し、3 回繰り返して平均値を取得します。

機器に内蔵された変換表またはソフトウェアを使用して、 ΔP を FSSS 粒子サイズ（ μm ）に変換します。

検証結果：

同じサンプルバッチを 3 回測定しましたが、偏差は 5% 未満でした。

標準サンプルと比較して、誤差が 0.1 μm 未満であることを確認します。

実験データ

サンプル	質量(g)	圧縮高さ (mm)	圧力差 (cm H ₂ O)	FSSS 粒子サイズ (μm)
WC パウダー-1	2.5	10	15.2	1.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

サンプル	質量(g)	圧縮高さ (mm)	圧力差 (cm H ₂ O)	FSSS 粒子サイズ (μ m)
WC パウダー2	2.5	10	10.5	2.0
WC パウダー3	2.5	10	6.8	3.5

データソース：2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

3. 機器と操作手順

設備構造

空気システム： マイクロポンプは一定の空気の流れを提供し、これは流量計によって正確に制御されます (0.05 ~ 0.2 L/分)。

サンプルチューブ： ガラスまたは金属、直径 5~10 mm、粉末を支えるためのろ紙付き。

圧力測定： 従来の水柱ゲージ (精度 0.1 cm H₂O) または最新のデジタルセンサー (精度 1 Pa)。

校正装置： 機器のゼロ点と感度を校正するために使用される、粒子サイズが既知の標準オリフィス プレートまたは粉末。

詳細な手順

機器をウォームアップします。 機器を起動し、空気の流れと温度 (20~25° C) を安定させるため、10 分稼働させます。

サンプルの重量を測る： 分析天秤 (誤差 <0.001g) を使用して WC 粉末 2.5g を計量し、質量を記録します。

サンプルチューブに粉末をゆっくりと注ぎ、軽くたたいて気泡を取り除き、コンパクターで高さ 10 mm、圧力 2 kPa で圧縮し、多孔度を 0.45 ± 0.05 に維持します。

システムを接続する： 漏れのないシールを確保しながらサンプル チューブを機器に取り付けます。

空気の流れを調整します。 流量を 0.1 L/分に設定し、圧力が安定するまで待ちます (約 30 秒)。

記録データ： 水柱差 (例: 15 cm H₂O) を読み取り、表を参照するかソフトウェアに入力して FSSS 粒子サイズを計算します。

洗浄と繰り返し： サンプルを取り出し、サンプルチューブを圧縮空気で洗浄し、測定を 2 回繰り返して平均値を取得します。

予防

サンプルの乾燥は重要であり、水分が 0.1% を超えると多孔度が変わり、粒子サイズが 0.2 ~ 0.5 μm 大きくなります。

圧縮力は一定でなければなりません。圧縮力がきつすぎる ($\epsilon < 0.4$) か緩すぎる ($\epsilon > 0.5$) と、圧力差に影響が出ます。

空気粘度の変化を避けるために、周囲温度は 20 ~ 25 °C に制御されました。

4. 影響要因と最適化

フィッシャー法による粒子径測定の精度は多くの要因によって左右されます。以下に、分析と

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

最適化の提案を示します。

影響要因

粒子形状:

球形粒子の測定値は実際の粒子サイズに近くなりますが、非球形（針状など）粒子の FSSS 値は抵抗の増加により大きくなります（偏差 10%~20%）。

気孔率:

多孔度が低すぎる場合 (< 0.4)、抵抗が大きくなり粒子サイズが小さすぎます。多孔度が高すぎる場合 (> 0.5)、抵抗が不十分で粒子サイズが大きくなりすぎます。

水分含有量:

水分含有量が 0.2% を超えると粒子の凝集が起これ、FSSS 値が 0.3~ 0.8 μm 増加します。

気流安定性:

流量変動 > 0.01 L/分、圧力差誤差 ± 0.5 cm H₂O、粒子サイズ偏差 ± 0.1 μm。

最適化戦略

サンプル前処理: 水分 < 0.05% まで乾燥させ、凝集を減らすために 5 分間超音波分散します。

圧縮制御: 標準圧縮機を使用して、圧力は 2~3kPa、多孔度は 0.45 ± 0.02 に安定します。

機器校正: 標準 WC 粉末 (FSSS 1.0 μm) を使用して毎月校正し、誤差は ± 0.05 μm 以内に制御されます。

環境管理: 一定の温度と湿度 (25°C、湿度 < 50%)、空気の流れは 0.1 ± 0.005 L/分で安定します。

実験データ:

状態	水分 (%)	気孔率	圧力差 (cm H ₂ O)	FSSS 粒子サイズ (μm)
未乾燥 (水分 0.3%)	0.3	0.48	16.0	1.4
ドライ+最適化された 圧縮	0.05	0.45	15.2	1.2

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

5. 適用シナリオ

フィッシャー法による粒度分布測定は、粉末材料の製造および品質管理において広く利用されています。具体的な用途は以下のとおりです。

超硬合金生産

用途: WC 粉末のサイズを測定し、超硬合金の粒度と特性を制御します。

事例: あるチームは、WC 粉末の FSSS が 1.2 μm であり、製造された超硬合金の硬度は HV 2200 であり、粒子の均一性が 15% 増加したことを確認しました (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

溶射粉末

用途: WC-Co スプレー粉末の粒子サイズを評価し、スプレーコーティングの密度 (> 99%) を確保します。

事例: 調査の結果、WC-12Co 粉末の FSSS は 3.5 μm、HVOF コーティングの硬度は HV 1350、摩

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耗率は $0.06\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ であることが判明しました（China Tungsten Online ウェブサイトからの情報）。

粉末冶金

用途: 金属粉末（W、Mo など）の粒径を検出し、焼結性能を最適化します。

事例: ある会社は、W 粉末の FSSS が $2.0\mu\text{m}$ であり、焼結体の密度が 98.5% であることを確認しました（China Tungsten Online ウェブサイトからの情報）。

品質管理

用途: バッチ間の粒子サイズの一貫性を検出します。偏差は $0.1\mu\text{m}$ 未満です。

要約する

フィッシャー粒度分布測定法は、コゼニー・カルマンの原理に基づき、空気透過率法を用いて粉末の平均粒子径（ $0.2\sim 50\mu\text{m}$ ）を測定し、圧力差を用いて FSSS 値を換算する手法です。この方法は、サンプルの乾燥（水分 $<0.1\%$ ）、圧縮（気孔率 0.45）、空気流量測定（ $0.1\text{L}/\text{min}$ ）といったシンプルな装置を備え、精度は $\pm 0.05\mu\text{m}$ です。粒子形状や水分などの影響因子を最適化する必要があり、超硬合金、スプレーパウダー、粉末冶金など様々な用途に応用され、材料性能の一貫性を確保しています（China Tungsten Online ウェブサイトより）。



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

付録:

嵩密度とその測定方法

嵩密度とその測定方法

嵩密度とは、自然に積み重ねられた状態における粉末の単位体積あたりの質量を指し、通常は g/cm^3 または kg/m^3 で表されます。これは、粉末の物理的特性を評価する上で重要なパラメータです。嵩密度は、粉末粒子のサイズ、形状、表面特性、および積層様式を反映しており、粉末冶金、溶射、超硬合金製造などのプロセスにおいて重要な指針となります。測定方法は簡便かつ効率的で、一般的には、標準容器を用いて計量操作によって測定される、ゆるみ嵩密度とタップ嵩密度の2つの形式が用いられます。

1. 定義と意義

意味

嵩密度: 粉体を所定の条件（自然充填、振動充填など）下で容器に充填した後の粉体の質量と容器の容積の比。嵩密度 = m/V ここで:

m: 粉末質量 (g)

V: 粉末の占める体積 (cm^3)

ゆるみ嵩密度: 圧縮や振動なしに粉末が容器に自由に落ちる状態。

容器内で粉末を振動またはタップして粒子がより高密度の状態に再配置された後の**粉末の密度**。

意義

プロセスガイダンス: 嵩密度は粉末の流動性、充填効率、焼結性能に影響します。例えば、炭化タングステン (WC) 粉末は嵩密度が高く、焼結密度も優れています。

品質管理: 粉末バッチ間の一貫性を反映します。大きな偏差は成形不良につながる可能性があります。

材料特性: 粒子のサイズ、形状、表面粗さと密接に関連しており、粉体の特性を評価するための重要な指標です。

標準値

粉末タイプ	嵩密度 (g/cm^3)	タップ密度 (g/cm^3)
WC 粉末 (1 μm)	4.5~5.0	5.5~6.0
WC-12Co	4.0~4.5	4.8~5.2
W 粉末 (5 μm)	6.0~7.0	7.5~8.5

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

2. 影響要因

嵩密度は多くの要因の影響を受けますが、以下で詳細に分析します。

粒子サイズ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

影響: 粒子サイズが小さいほど、比表面積が大きくなり、粒子間の空隙が多くなり、充填密度が低くなります。粒子サイズが大きいほど、空隙が少なくなり、密度が高くなります。

実験データ:

WC 粒子径 (μm)	嵩密度 (g/cm^3)	タップ密度 (g/cm^3)
0.5	4.2	5.3
2.0	4.8	5.8
5.0	5.2	6.2

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

粒子の形状

影響: 球状の粒子は密集しており密度が高いです。不規則な形状や針状の粒子は隙間が大きく密度が低いです。

事例: 球状 WC 粉末 (球形度 > 95%) の嵩密度は $4.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ ですが、不規則な WC 粉末の嵩密度はわずか $4.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ です。

表面特性

影響: 表面が粗い粉末や静電気のある粉末は凝集しやすく、多孔度が増加して密度が低下します。一方、表面が滑らかな粉末は高密度に積み重ねられやすくなります。

実験: 未処理の WC 粉末の密度は $4.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ですが、プラズマ球状化処理後は $5.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ に達します。

水分含有量

影響: 水分含有量が 0.2% を超えると、粒子がくっつき、多孔度が増加し、密度が低下します。

データ: 水分含有量が 0.5% の WC 粉末の嵩密度は $4.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ で、乾燥後は $4.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ に上昇します。

スタッキング法

影響: 緩い状態では密度が低い。圧縮後、粒子が再配置され、空隙が減少し、密度が 10%~20% 増加する。

3. 判定方法

嵩密度は、ASTM B212 (緩い)、ASTM B527 (タップ)、または ISO 3923 などの標準手順に従って測定されます。以下は、この方法の概要です。

ゆるい嵩密度

原理: 外力を加えずに粉体を容器内に自由落下させ、自然堆積状態での密度を測定します。

ステップ:

乾燥サンプル (水分 < 0.1%) を準備します。

漏斗を使用して、10~15cm の滴を保ちながら、標準のメスシリンダー (25 または 100cm^3) に

粉末をゆっくりと注ぎます。

粉が自然に溜まるのを待ち、スクレーパーで表面を滑らかにして体積 (V) を記録します。

メスシリンダー内の粉末の質量 (m) を量り、密度 (m/V) を計算します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

タップ嵩密度

原理: 機械的な振動やノッキングにより、粉体粒子が再配置され、より高密度な状態での密度を測定します。

ステップ:

ルーズパック方式を使用してシリンダーを充填します。

メスシリンダーを振動器の上に置き、100~300 回振動させるか（振動数 50~60 回/分、振幅 3mm）、または容量が変化しなくなるまで手で叩きます。

圧縮後の体積 (V') を記録し、質量 (m) を量り、密度 (m/V') を計算します。

実験データ

サンプル	質量(g)	ゆるい容積 (cm ³)	嵩密度 (g/cm ³)	タップ容積 (cm ³)	タップ密度(g/cm ³)
WC (1 μm)	50	10.5	4.76	8.9	5.62
WC-12Co	50	11.8	4.24	10.2	4.90
幅 (5 μm)	50	7.8	6.41	6.5	7.69

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

4. 機器と操作手順

装置

メスシリンダー: 標準ガラスメスシリンダー (25、50、または 100 cm³)、±0.1 cm³ まで目盛りが付いています。

漏斗: 開口部直径 5~10mm、落下高さは調節可能。

天秤: 精度 0.001g、粉末の質量を計量するのに使用します。

バイブレーター: 振幅 1~5mm、周波数調整可能 (50~60Hz) の機械式圧縮装置。

オーブン: 温度 100~120°C、サンプルの乾燥に使用します。

スクレーパー: 粉末の表面を滑らかにして固まりを防ぎます。

詳細な手順

サンプル準備:

サンプリング: サンプラーを使用して粉末バッチからランダムに 50 ~ 100 g をサンプリングし、均一性を確保します。

乾燥: オーブンで 105° C で 2 時間乾燥させ、水分 <0.1% にし、室温まで冷却します (デシケーター内)。

嵩密度の測定:

100 cm³ のメスシリンダーを選択し、空の重量 (m_0) を記録します。

衝撃や振動を避けながら、漏斗を使用して粉末を 15 cm の高さからゆっくりと注ぎます。

スクレーパーで表面を軽く削り、総重量 (m_1) と体積 (V) を記録します。

計算: 嵩密度 = $(m_1 - m_0) / V$ 。

タップ密度の測定:

ルーズフィル法と同様にメスシリンダーに充填し、初期容量を記録します。

圧縮機に入れ、振幅を 3mm に設定し、200 回 (または容積が安定するまで) 圧縮します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

圧縮体積（ V' ）と総重量（ m_1 ）を記録します。

計算：タップ密度 = $(m_1 - m_0) / V'$ 。

再現性検証：

測定は 3 回繰り返し、偏差が 2%未満の場合に平均値を算出しました。

シリンダー内部を点検し、粉末が付着していないことを確認してください。

予防

緩い密度の信頼性に影響を与える人工的な圧縮を避けてください。

振動回数は一定である必要があります。振動回数が少なすぎる（100 回未満）と密度が低下し、多すぎる（300 回超）と大きな変化は見られません。

湿気による干渉を防ぐため、周囲の湿度は 50% 未満です。

5. 適用シナリオ

嵩密度測定は、粉体材料分野において幅広い用途があります。以下に具体的なシナリオと事例を示します。

超合金生産

用途：WC 粉末の充填効率を評価し、プレスおよび焼結プロセスを最適化します。

事例：あるチームは、WC 粉末の嵩密度が 4.8 g/cm^3 、タップ密度が 5.8 g/cm^3 、圧縮ピレットの圧縮密度が 10% 増加し、硬度が HV 2200 であることを確認しました（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

溶射粉末

用途：WC-Co 粉末の流動性と粉末充填効率をテストし、噴霧の均一性を確保します。

事例：調査の結果、WC-12Co のタップ密度は 4.9 g/cm^3 、HVOF 溶射コーティングの多孔度は 1% 未満、耐摩耗性は 30% 向上したことが判明しました（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

粉末冶金

用途：W および Mo 粉末の嵩密度を測定し、焼結収縮を制御します。

事例：ある会社では、W 粉末のタップ密度を測定したところ 7.7 g/cm^3 、焼結体の収縮率は 15% ~18% で安定しており、密度は 99% に達しました（China Tungsten Online ウェブサイトより）。

品質管理

用途：バッチ間の密度一貫性テスト、偏差 <5% が合格です。

事例：WC 粉末の嵩密度変動が 0.1 g/cm^3 未満の生産テストにより、安定したバッチパフォーマンスが保証されます（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

保管と輸送の最適化

用途：粉体の包装容積を評価し輸送コストを削減します。

要約する

嵩密度は、粉末の質量と体積の関係の特徴付けるパラメータです。ゆるみ密度（自然充填）とタップ密度（タッピング後）に分けられ、粒子サイズ、形状、表面特性、水分の影響を受けます。測定方法は、標準メスシリンダーとタッピング機器によって操作されます。WC 粉末のゆるみ密度は $4.5 \sim 5.0 \text{ g/cm}^3$ 、タップ密度は $5.5 \sim 6.0 \text{ g/cm}^3$ で、精度は $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ で

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。応用面では、セメント炭化物、溶射、粉末冶金プロセスをガイドし、製品の品質とプロセス効率を向上させます（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。水分（<0.1%）とタッピング条件を最適化すると、測定精度が向上します。



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録

炭化タングステン粉末の流動性の測定方法

タングステンカーバイド粉末（WC）の流動性は、粉末が重力やその他の外力の作用下で自由に流れる能力を指し、通常は流量（秒/50g）または単位時間あたりの標準漏斗を通過する時間で特徴付けられます。流動性は粉末材料の重要な物理的特性であり、溶射、粉末冶金、および超硬合金製造における充填効率、均一性、およびプロセス安定性に直接影響します。タングステンカーバイド粉末の流動性を測定するために、ホール流量法が一般的に用いられます。流動性は、50gの粉末が標準漏斗を通過するのに必要な時間を測定することで評価されます。

1. 定義と意義

意味

流動性: 粉末が外部からの圧力を受けずに特定の開口部（ホール漏斗の 2.5 mm の穴など）を自由に流れる能力。

判定指標:

ホールフローレート: 粉末 50g が流出するのにかかる時間（単位：秒/50g）。時間が短いほど流動性が良い。

粉末が自由に流れない場合は、「流れなし」と記録します。

意義

プロセスの影響: 流動性のよい粉末（WC 粉末の流量が 13 ~ 15 秒 / 50g など）は、スプレーまたはプレス中に均一に分散され、多孔性や欠陥が減少します。

品質管理: 粉末バッチ間の一貫性を反映します。流量の大きな変動はプロセス変動につながる可能性があります。

性能相関: 粒子のサイズ、形状、表面状態に密接に関連しており、粉末の製造と適用を最適化するための重要なパラメータです。

標準値

粉末タイプ	粒子サイズ（ μm ）	流量（秒/50g）	流動性評価
WC（球状）	15~45 歳	13.5	素晴らしい
WC（不規則）	10~30	16.0	良い
WC-Co（微粉末）	5-15	20 以上または流動性なし	違い

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

2. 影響要因

炭化タングステン粉末の流動性は多くの要因の影響を受けます。以下に詳細な分析を示します。

粒子サイズ

影響: 粒子径が大きいほど、粒子間の摩擦が小さくなり、流動性が高まります。粒子径が小さすぎる場合（5 μm 未満）、ファンデルワールス力と静電効果が増大し、流動性が低下します。

実験データ:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC 粒子径 (μ m)	流量 (秒/50g)
5	>25 (非流動性)
15~45 歳	13.8
45~60 歳	12.5

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

粒子の形状

影響: 球形粒子 (球形度 > 95%) は転がり抵抗が低く、流動性が良好です。一方、不規則な粒子や薄片状の粒子は、機械的な絡み合いにより流動性が低下します。

事例: 球状 WC 粉末の流動速度は 13.5 秒/50g、不規則形状 WC 粉末の流動速度は 16.5 秒/50g です。

表面特性

影響: 表面が滑らかな粉末は摩擦が少なく、流動性が優れています。表面が粗い粉末や酸化物質層 (WO₃) がある粉末は付着しやすく、流動性が低下します。

実験: プラズマ球状化 WC 粉末の流量は 13.0 秒/50g、未処理粉末の流量は 15.5 秒/50g です。

水分含有量

影響: 水分含有量が 0.2% を超えると、粒子の凝集が発生し、流動性が著しく低下し、材料が流動しなくなります。

データ: 水分含有量 0.5% の WC 粉末の流動速度は 20 秒/50g 以上で、乾燥後 (水分含有量 < 0.1%) は 14.0 秒/50g まで低下します。

環境条件

影響: 湿度が 60% を超えると粉末の吸湿性が高まり、温度変化によって空気の粘度が影響を受け、どちらも流動性を妨げる可能性があります。

3. 判定方法

タングステンカーバイド粉末の流動性は、通常、ASTM B213 や ISO 4490 などの規格に従って、ホール流量法によって決定されます。以下は、この方法の概要です。

ホールフロー法

原理: 50g の粉末が標準ホールロート (口径 2.5mm) を通過するのにかかる時間を測定します。時間が短いほど、流動性は良好です。

ステップ:

乾燥粉末 (水分 < 0.1%) を準備します。

ホール漏斗に粉末 50 g を注ぎ、軽くたたいて均一に充填されるようにします。

漏斗の底にあるバップルを開き、粉末が完全に流れ出るまでの時間 (秒単位) を記録します。粉末が流れない場合は、「非流動性」と記録します。

ヘルパーメソッド

傾斜法: 粉末の自然な積み重ねにおける安息角を測定します。角度が小さいほど (30° 未満)、流動性は良好です。

タップ圧縮法: タップ密度の変化を組み合わせることで間接的に流動性を評価する。

実験データ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

サンプル	粒子サイズ (μ m)	水分 (%)	流量 (秒/50g)	安息角 (°)
WC (球状)	15~45 歳	0.05	13.5	28
WC (不規則)	10~30	0.10	16.0	35
WC (微粉末)	5-15	0.20	>25 (非流動性)	45

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

4. 機器と操作手順

装置

ホールファンネル:

材質: ステンレスまたは真鍮。

仕様: 底穴直径 2.5mm、円錐角 60°、容積約 100cm³。

タイマー: 精度 0.1 秒。

天秤: 精度 0.001g、粉末 50g を計量。

オーブン: 温度 100~120°C でサンプルを乾燥させます。

受入容器: 容量 >50cm³、流出する粉末を収集します。

バイブレーター (オプション): 非流動性粉末のテストに役立ちます。

詳細な手順

サンプル準備:

均一性を確保するために、サンプルスプリッターを使用して粉末バッチからランダムに 100 g をサンプリングしました。

オーブンで 105° C で 2 時間乾燥させ、水分 <0.1% にし、室温まで冷却します (デシケーター内)。

機器の校正:

ホールファンネルの開口部 (2.5 ± 0.01 mm) をチェックして、詰まりがないことを確認します。

標準粉末 (例: FSSS 3.0 μ m WC、流量 14.0 秒/50g) を使用して機器の精度を検証します。

決定プロセス:

WC 粉末 50.0 ± 0.01 g を量り、ホール漏斗に注ぎ、ブリッジングを防ぐために軽く 3 回たたきます。

下部のバップルを開き、同時にタイマーをスタートして、粉末が完全に流れ出る時間を記録します。

粉末が詰まった場合は漏斗を軽くたたき、それでも流れない場合は「流れない」と記録します。

データ処理:

測定を 3 回繰り返し、偏差が 0.5 秒未満の場合は平均値を取ります。

受入容器内の粉末質量をチェックし、残留物がないことを確認します (誤差 < 0.1g)。

予防

漏斗は、流量に影響を与える可能性のある傾きを避けるために垂直に配置する必要があります (偏差 ±0.2 秒)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

環境制御：温度 20～25℃、湿度<50%、吸湿を防ぎます。

微粉末（<10 μm）の場合は振動補助が必要になる場合があります。振動補助がなければ、詰まりやすくなります。

5. 適用シナリオ

炭化タングステン粉末の流動性測定は、多くの分野で重要な用途があります。以下に具体的なシナリオと事例を示します。

溶射プロセス

用途：HVOF または APS における WC-Co 粉末供給の均一性を評価する。流量は 15 秒/50g 未満が良好である。

事例：あるチームは、WC-12Co の流量が 13.8 秒 / 50g、スプレーコーティングの多孔度が 1% 未満、耐摩耗性が 30% 向上したことを確認しました（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

超合金生産

用途：WC 粉末の流動性をテストし、プレスされたブランクの均一性を確認します。

事例：調査の結果、WC 粉末の流量は 14.0 秒 / 50g で、プレス部品の密度の一貫性は 10% 向上し、硬度は HV 2250 であることが判明しました（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

粉末冶金

用途：W または WC 粉末の充填効率を最適化します。流量が高すぎる場合（20 秒/50g 以上）、層間剥離が発生する可能性があります。

事例：ある会社は、球状 W 粉末の流動速度が 12.5 秒/50g、焼結体の密度が 99%であることを確認しました（China Tungsten Online ウェブサイトからの情報）。

品質管理

用途：バッチ間の流動性の一貫性を試験します。流量偏差は 1 秒未満です。

事例：ある製造会社は、WC 粉末の流量変動を 0.5 秒 / 50g 未満と測定し、バッチの安定性を確保しました（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

保管および輸送設計

用途：サイロ内の粉体の流動特性を評価し、搬送システムを最適化します。

要約する

タングステンカーバイド粉末の流動性は、ホール流量法によって測定されます。これは、50g の粉末が 2.5mm 口径の漏斗を通過する時間（秒/50g）で特徴付けられ、典型的な値は 13～16 秒/50g です。流動性は、粒子のサイズ、形状、表面状態、水分の影響を受けます。測定には、乾燥粉末（水分<0.1%）、標準的な機器、そして正確な操作が必要です。応用面では、溶射、超合金、粉末冶金プロセスにおける充填効率と製品品質の向上に役立ちます（China Tungsten Online ウェブサイトより）。粒子の球形度と乾燥条件を最適化することで、流動性を大幅に向上させることができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (± 0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤ 0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤ 0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance.

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within $\pm 10\%$.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm^3 (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm^3 (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤ 0.05	≤ 0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
Brand					
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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:

炭化タングステン粉末のタップ密度とその測定方法

タップ密度とは、指定された振動またはノッキング条件下で粒子が高密度状態に再配置された後の炭化タングステン粉末（WC）の単位体積あたりの質量を指し、通常は g/cm^3 で表されます。タップ密度は粉末の物理的性質の重要なパラメータであり、粒子の充填の緻密さを反映し、ゆるい密度よりも実際のプロセスでの充填状態に近いです。超硬合金、溶射、粉末冶金において、タップ密度は材料のプレス効率、焼結性能、最終製品の品質に直接影響します。測定方法は通常、標準のメスシリンダーとタッピング装置によって完了するタッピング法を採用します。

1. 定義と意義

意味

タップ密度: 機械振動または手作業によるタングステンカーバイド粉末のタングステン粒子の叩き加工により粒子間の隙間が減少し、粉末が安定した積層状態に達したときの密度。

$$\text{振実密度} = \frac{m}{V}$$

で:

m: 粉末質量 (g)

V: 圧縮後の体積 (cm^3)

嵩密度との違い: 嵩密度は自然な積み重ね状態ですが、タップ密度は外力によって粒子をよりコンパクトにしたものなので、値は通常 10% ~ 20% 高くなります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

意義

プロセスガイド: タップ密度の高い WC 粉末 (5.5~6.0 g/cm³ など) は、プレス時や充填時に効率がよく、焼結後の密度も高くなります。

品質管理: バッチ間の粉末の積層特性の一貫性を反映します。大きな偏差は成形の不均一性につながる可能性があります。

性能相関: 粒子のサイズ、形状、表面状態に関連し、粉末の製造と適用を最適化するための重要な基礎となります。

標準値

粉末タイプ	粒子サイズ (μm)	嵩密度 (g/cm ³)	タップ密度(g/cm ³)
WC (超極細)	0.5~1	4.2~4.5	5.3~5.6
WC (中)	2-5	4.8~5.0	5.8~6.2
WC-Co (複合材)	15~45 歳	4.0~4.5	4.8~5.2

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

2. 影響要因

タングステンカーバイド粉末のタップ密度の値は多くの要因の影響を受けます。以下に詳細な分析を示します。

粒子サイズ

影響: 粒子サイズが大きいほど、粒子間の隙間の充填効率が高くなり、タップ密度が増加します。粒子サイズが小さすぎる場合 (< 1 μm)、表面力が強化され、隙間が圧縮されにくくなり、密度が低くなります。

実験データ:

WC 粒子径 (μm)	嵩密度 (g/cm ³)	タップ密度(g/cm ³)	増加 (%)
0.5	4.2	5.3	26
2.0	4.8	5.8	21
5.0	5.0	6.2	24

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

粒子の形状

影響: 球形粒子 (球形度 > 95%) は振動後に密に並び、密度が高くなります。不規則な形状や針状の粒子は、インターカレーションにより多孔性が高く、密度が低くなります。

事例: 球状 WC 粉末のタップ密度は 6.0 g/cm³ ですが、不規則な形状の WC 粉末のタップ密度はわずか 5.5 g/cm³ です。

表面特性

衝撃: 表面が滑らかな粉末は摩擦が少なく、振動後に簡単に再配置され、密度が高くなります。表面が粗い粉末や酸化物層 (WO₃) がある粉末は粘着性があり、密度が低くなります。

実験: プラズマ球状化 WC 粉末のタップ密度は 6.2 g/cm³ であり、未処理粉末のタップ密度は 5.7 g/cm³ である。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

水分含有量

影響: 水分含有量が 0.2% を超えると粒子が凝集し、振動による隙間の圧縮が困難になり、密度が低下します。

データ: 水分含有量が 0.5% の WC 粉末のタップ密度は 5.2 g/cm^3 で、乾燥後（水分含有量 $< 0.1\%$ ）は 5.8 g/cm^3 に上昇します。

圧縮条件

影響: 振動の振幅、周波数、回数は粒子の再配置効率に影響します。振動が不十分だと密度が低下しますが、振動が多すぎると大きな変化は見られません。

実験: WC 粉末の密度は、100 回の振動後には 5.6 g/cm^3 ですが、300 回後には 5.8 g/cm^3 に上昇し、500 回後には変化しません。

3. 判定方法

タングステンカーバイド粉末のタップ密度は、ASTM B527 や ISO 3953 などの標準手順に従って測定されます。以下は、その方法の概要です。

振動法

原理: 機械振動または手動ノックにより WC 粉末粒子を再配置し、安定した状態での密度を測定します。

ステップ:

乾燥粉末（水分 $< 0.1\%$ ）を準備します。

粉末を標準メスシリンダー（25 または 100 cm^3 ）に注ぎ、最初の容量を記録します。

音量が変化しなくなるまでバイブレーターで振動させるか、手動でタップし、振動後の音量（ V' ）を記録します。

粉末の質量（ m ）を量り、タップ密度（ m/V' ）を計算します。

実験データ

サンプル	質量(g)	初期体積 (cm^3)	タップ容積 (cm^3)	タップ密度(g/cm^3)
WC (1 μm)	50	11.0	8.9	5.62
WC (5 μm)	50	10.2	8.1	6.17
WC-12Co	50	12.0	10.2	4.90

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

4. 機器と操作手順

装置

メスシリンダー: 標準ガラスメスシリンダー（25、50、または 100 cm^3 ）、 $\pm 0.1 \text{ cm}^3$ まで目盛りが付いています。

天秤: 精度 0.001g 、粉末質量を計量します。

振動圧縮機:

タイプ: 機械式圧縮装置（スコット ポリュームーターなど）。

パラメータ: 振幅 1 ~ 5 mm、周波数 50 ~ 60 Hz。

オープン: 温度 $100 \sim 120^\circ\text{C}$ でサンプルを乾燥させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

漏斗： 開口部 5～10mm、充填を補助します。

スクレーパー： 粉の表面を滑らかにします。

詳細な手順

サンプル準備：

WC 粉末バッチから 50 ～ 100 g をランダムにサンプリングし、サンプル ディバイダーを使用して均一性を確保しました。

オーブンで 105° C で 2 時間乾燥させ、水分<0.1%にし、室温まで冷却します（デシケーター内）。

サンプルロード：

100 cm³ のメスシリンダーを選択し、空の重量（ m_0 ）を記録します。

漏斗を使用して、圧縮を防ぐために 10 ～ 15 cm の落差で 50 g の粉末をゆっくりとチューブに注ぎ、最初の容量を記録します。

スクレーパーを使って表面を軽く滑らかにします。

圧縮プロセス：

メスシリンダーを振動器に入れ、振幅を 3 mm、周波数を 60 Hz に設定し、200 回（または容量が安定するまで）振動させます。

手動で振動させながら、メスシリンダーの底を 2～3cm の高さで 200 回叩きます。

圧縮体積（ V' ）と総重量（ m_1 ）を記録します。

計算：

タップ密度 = $(m_1 - m_0) / V'$ 。

測定は 3 回繰り返す、偏差が 2%未満の場合に平均値を算出しました。

クリーニング： 残留物が次の測定に影響しないように、圧縮空気を使用してメスシリンダーをクリーニングします。

予防

締固めの回数は一定にする必要があります。回数が少なすぎる（100 回未満）と密度が低下し、回数が多すぎる（300 回超）と顕著な改善は見られません。

メスシリンダーの内壁は乾燥している必要があります。湿度が 50% を超えると粉末が付着する可能性があります。

微細粉末（ $<1 \mu\text{m}$ ）の場合は、表面力を克服するために振幅を大きく（5 mm）する必要があります。

5. 適用シナリオ

タングステンカーバイド粉末のタップ密度測定は、多くの分野で重要な用途があります。以下に具体的なシナリオと事例を示します。

超硬合金生産

用途： WC 粉末の加圧および焼結性能を評価する。高いタップ密度（例：5.8 g/cm³）は緻密化を促進する。

事例： あるチームは、WC 粉末のタップ密度が 5.8 g/cm³ であり、圧縮されたピレットの密度が 12% 増加し、硬度が HV 2250 であることを確認しました（China Tungsten Online Web

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

サイトからの情報）。

溶射プロセス

用途: WC-Co 粉末の充填効率をテストするには、噴霧の均一性を確保するためにタップ密度を 4.8~5.2g/cm³ にします。

事例: 調査の結果、WC-12Co のタップ密度は 4.9 g/cm³、HVOF コーティングの多孔度は 1% 未満、耐摩耗性は 35% 向上したことが判明しました (China Tungsten Online Web サイトの情報)。

粉末冶金

用途: WC または W 粉末の焼結収縮を最適化し、タップ密度を高め、多孔性を低減します。

事例: ある企業は、WC 粉末のタップ密度が 6.0 g/cm³、焼結体の密度が 99.5% であることを確認しました (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

品質管理

用途: バッチ間の密度一貫性試験。偏差<0.1 g/cm³ が許容されます。

事例: ある製造会社は、WC 粉末のタップ密度の変動を 0.05 g/cm³ 未満と測定し、バッチの安定性を確保しました (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

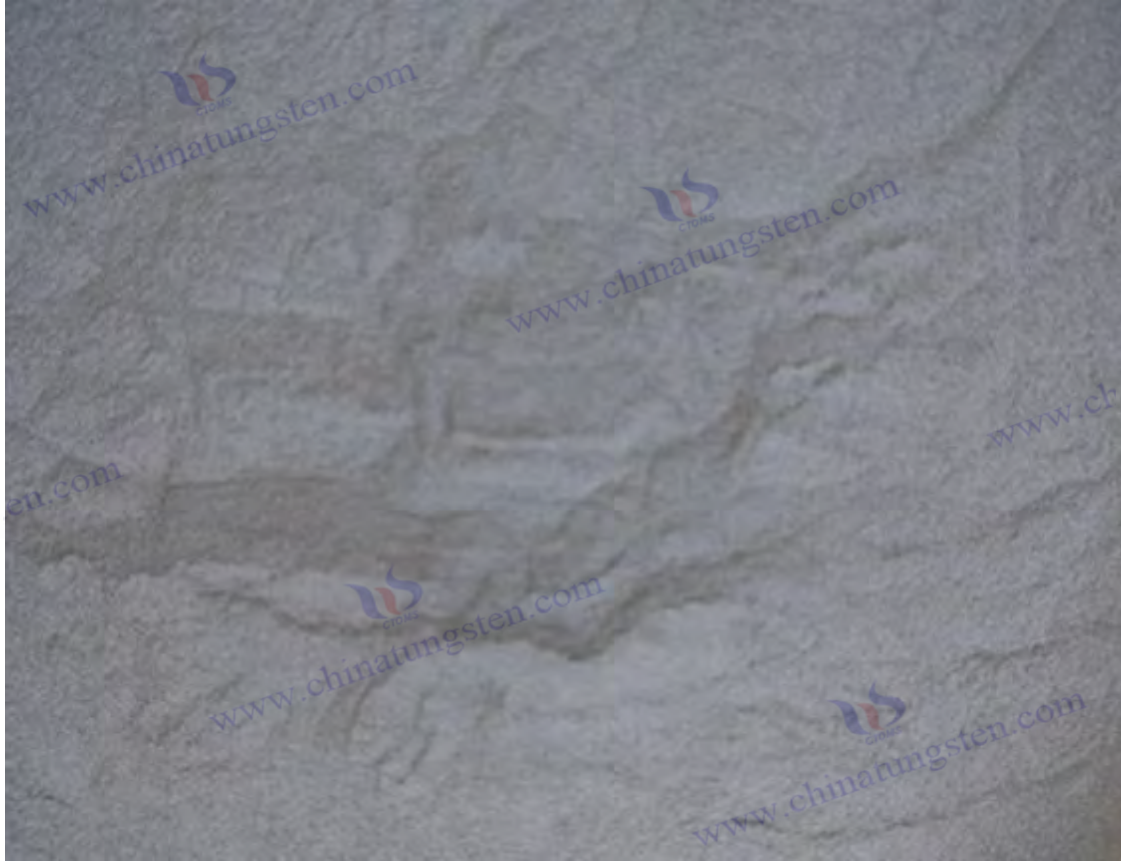
保管および輸送設計

用途: サイロ内の粉末の密度を評価し、包装容積を最適化します。

要約する

タングステンカーバイド粉末のタップ密度は、振動後の粉末の単位体積あたりの質量で、典型的な値は 5.3~6.2 g/cm³ (WC モノマー) または 4.8~5.2 g/cm³ (WC-Co) であり、粒子サイズ、形状、表面状態、水分の影響を受けます。測定方法は振動法を採用し、メスシリンダーと振動機器を使用し、200~300 回振動し、精度は±0.01 g/cm³ です。応用面では、超硬合金、溶射、粉末冶金プロセスをガイドし、プレス効率と製品品質を向上させます (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。乾燥 (水分<0.1%) と振動条件を最適化すると、測定精度が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



付録:

炭化タングステン粉末の嵩密度とその測定方法

ゆるみ嵩密度とは、外部からの圧縮や振動を受けない自然な積層状態におけるタングステンカーバイド粉末（WC）の単位体積あたりの質量を指し、通常は g/cm^3 で表されます。ゆるみ嵩密度は粉末の物理的性質の基本的なパラメータであり、自然状態における粒子の積層効率を反映し、粉末の流動性、充填性、およびその後のプロセス（プレス、焼結など）と密接に関連しています。超硬合金、溶射、粉末冶金の分野において、ゆるみ嵩密度は品質管理とプロセス最適化のための重要な指標です。測定方法は簡単で、通常は標準的なメスシリンダーと計量操作で完了します。

1. 定義と意義

意味

嵩密度: 炭化タングステン粉末が外力を受けずに容器に自由落下したときの密度。

嵩密度 = m/V ここで:

m: 粉末質量 (g)

V: ゆるい容積 (cm^3)

特徴: 粉末の自然な積層状態を反映しており、タップ密度と比較すると値が低く、空隙率は高くなります。

意義

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プロセスガイド: WC 粉末の嵩密度が低い場合 (4.2~4.5 g/cm³ など)、充填効率が低くなり、プレスの一貫性に影響する可能性があります。一方、高密度の場合 (5.0 g/cm³ など)、プロセスの安定性が向上します。

品質管理: バッチ間の粒子特性の一貫性を確認します。大きな偏差はプロセスの変動につながる可能性があります。

性能相関: 粒子サイズ、形状、表面状態に関連し、粉体特性を評価するための基礎データです。

標準値

粉末タイプ	粒子サイズ (μ m)	嵩密度 (g/cm ³)	真密度 (g/cm ³)
WC (超極細)	0.5~1	4.2~4.5	15.63
WC (中)	2-5	4.8~5.0	15.63
WC-Co (複合材)	15~45 歳	4.0~4.5	12~14 歳

データ出典: 2023 年に研究所で試験、China Tungsten Online の情報。注: 真密度は理論値です。

2. 影響要因

炭化タングステン粉末の嵩密度の値は多くの要因の影響を受けます。以下に詳細な分析を示します。

粒子サイズ

影響: 粒子サイズが大きいほど、粒子間の隙間の充填効率が高くなり、嵩密度が増加します。粒子サイズが小さすぎる場合 (< 1 μ m)、表面力 (ファンデルワールス力など) が強化され、隙間が増加し、密度が低下します。

実験データ:

WC 粒子径 (μ m)	嵩密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)
0.5	4.2	73
2.0	4.8	69
5.0	5.0	68

データ出典: 2023 年の実験室試験、China Tungsten Online ウェブサイトの情報。空隙率 = (1 - 嵩密度/真密度) × 100%。

粒子の形状

影響: 球状粒子 (球形度 > 95%) は自然に密集しており、密度が高いです。一方、不規則な粒子や薄片状の粒子は、インターカレーションにより多孔性が高く、密度が低くなります。

事例: 球状 WC 粉末の嵩密度は 5.0 g/cm³、不規則形状 WC 粉末の嵩密度は 4.5 g/cm³ です。

表面特性

影響: 表面が滑らかな粉末は摩擦が少なく、密に詰まっており、密度が高く、表面が粗い粉末や酸化物層 (WO₃) のある粉末は付着しやすく、密度が低くなります。

実験: プラズマ球状化 WC 粉末の嵩密度は 5.1 g/cm³ であり、未処理粉末の嵩密度は 4.6 g/cm³ である。

水分含有量

影響: 水分含有量が 0.2% を超えると、粒子の凝集、多孔性の増加、密度の低下が発生しま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。

データ: 水分含有量が 0.5% の WC 粉末の嵩密度は 4.3 g/cm^3 で、乾燥後（水分含有量 $<0.1\%$ ）は 4.8 g/cm^3 に上昇します。

スタッキング法

影響: 粉末の落下高さや投入速度は、堆積の均一性に影響します。落下高さが大きすぎる（20cm を超える）と、粒子の分離や密度低下を引き起こす可能性があります。

3. 判定方法

炭化タングステン粉末の嵩密度は、ASTM B212 や ISO 3923-1 などの標準的な手順に従って測定されます。以下にその方法の概要を示します。

緩い取り付け方法

原理: WC 粉末を漏斗を通して標準メスシリンダーに自由に落とし、自然な積み重ね状態での密度を測定します。

ステップ:

乾燥粉末（水分 $<0.1\%$ ）を準備します。

漏斗を使用して、10~15cm の滴を保ちながら、粉末をメスシリンダー（25 または 100cm^3 ）にゆっくりと注ぎます。

スクレーパーで表面を滑らかにし、体積（V）を記録します。

粉末の質量（m）を量り、嵩密度（ m/V ）を計算します。

実験データ

サンプル	質量(g)	体積 (cm^3)	嵩密度 (g/cm^3)
WC (1 μm)	50	11.0	4.55
WC (5 μm)	50	10.2	4.90
WC-12Co	50	11.8	4.24

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

4. 機器と操作手順

装置

メスシリンダー: 標準ガラスメスシリンダー（25、50、または 100 cm^3 ）、 $\pm 0.1 \text{ cm}^3$ まで目盛りが付いています。

ファネル:

材質: ステンレスまたはガラス。

仕様: 開口部直径 5~10mm、ドロップ調整可能。

天秤: 精度 0.001g、粉末質量を計量します。

オーブン: 温度 100~120°C でサンプルを乾燥させます。

スクレーパー: 粉末の表面を滑らかにして固まりを防ぎます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

サンプルディバイダー：サンプルの均一性を保証します。

詳細な手順

サンプル準備：

WC 粉末バッチからランダムに 50 ~ 100 g を選択し、サンプル ディバイダーを使用して均一なサンプルを採取します。

オーブンで 105° C で 2 時間乾燥させ、水分<0.1%にし、室温まで冷却します（デシケーター内）。

サンプルロード：

100 cm³ のメスシリンダーを選択し、空の重量（ m_0 ）を記録します。

漏斗をメスシリンダーの上に 15 cm の高さで固定し、衝撃や振動を避けながら 50 g の粉末をゆっくりと注ぎます。

スクレーパーで表面を軽く削り、総重量（ m_1 ）と体積（V）を記録します。

計算：

嵩密度 = $(m_1 - m_0) / V$ 。

測定は 3 回繰り返し、偏差が 2%未満の場合に平均値を算出しました。

クリーニング： 残留物が次の測定に影響しないように、圧縮空気を使用してメスシリンダーと漏斗をクリーニングします。

予防

自然な積み重ね状態を確保するために、人工的な圧縮や振動を避けてください。

落下高さは 10~15cm に抑えてください。高さが高すぎる（20cm を超える）と、粒子が成層化し、密度が低下する可能性があります。

粉末が水分を吸収するのを防ぐため、周囲の湿度は 50% 未満に保たれます。

5. 適用シナリオ

炭化タングステン粉末の嵩密度測定は、多くの分野で重要な用途があります。以下に具体的なシナリオと事例を示します。

超硬合金生産

用途： WC 粉末の初期充填効率を評価し、プレスプロセスをガイドします。

事例： あるチームは、WC 粉末の嵩密度が 4.8 g/cm³ であり、プレスされたブランクの均一性が 8% 向上し、硬度が HV 2200 であることを確認しました（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

溶射プロセス

用途： WC-Co 粉末供給の安定性試験。4.0~4.5 g/cm³ の嵩密度が均一な噴霧に適しています。

事例： 調査の結果、WC-12Co の嵩密度は 4.2 g/cm³、HVOF コーティングの多孔度は 1.5% 未満、耐摩耗性は 25% 向上したことが判明しました（China Tungsten Online Web サイトの情報）。

粉末冶金

用途： WC または W 粉末の充填効率を最適化するために、高い嵩密度により焼結収縮の変動を減らすことができます。

事例： ある会社は、WC 粉末の嵩密度が 5.0 g/cm³、焼結体の密度が 98.5% であることを確認しました（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

品質管理

用途: バッチ間の密度一貫性試験。偏差 $<0.1 \text{ g/cm}^3$ が許容されます。

事例: ある製造会社は、WC 粉末の嵩密度の変動を 0.05 g/cm^3 未満と測定し、バッチの安定性を確保しました (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

保管および輸送設計

用途: 粉末の自然なかさ容積を評価し、包装および輸送効率を最適化します。

要約する

炭化タングステン粉末の嵩密度は、自然に積み重ねられた粉末の単位体積質量であり、典型的な値は $4.2\sim 5.0 \text{ g/cm}^3$ (WC モノマー) または $4.0\sim 4.5 \text{ g/cm}^3$ (WC-Co) であり、粒子サイズ、形状、表面状態、水分の影響を受けます。測定方法は、メスシリンダーと漏斗を使用したバルク法を採用し、精度は $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ です。応用面では、セメント炭化物、溶射、粉末冶金プロセスにおける充填効率と製品品質の向上に役立ちます (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。乾燥 (水分含有量 $<0.1\%$) と落下条件を最適化することで、測定精度を向上させることができます。



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

炭化タングステン粉末の密度表現は何ですか？

炭化タングステン粉末（WC）の密度は、質量と体積の関係を特徴付ける物理量であり、様々な応用シナリオや試験条件において多様な表現方法があります。密度表現は、粉末の固有特性や積層挙動を反映するだけでなく、超硬合金、溶射、粉末冶金などのプロセスにおける性能最適化や品質管理に直接影響します。炭化タングステン粉末の密度には、通常、真密度、ゆるみ密度、タップ密度、見かけ密度などが含まれます。それぞれの密度には、特定の定義、測定方法、および用途における意義があります。

1. 密度の定義と分類

密度は単位体積あたりの物質の質量であり、式は $\rho = m / V$ です。

で:

ρ : 密度 (g/cm³)

m: 質量 (g)

V: 体積 (cm³)

タングステンカーバイド粉末の場合、密度表現は測定条件や粉末の状態によって異なります。

炭化タングステン粉末の密度は主に次のとおりです。

真密度: 気孔や空隙を除いた粉末粒子自体の理論上の密度。

ゆるみ嵩密度: 粒子間の空間を含めた、自然な積み重ね状態における粉末の密度。

タップ密度: 振動またはタップされた後の、よりコンパクトな状態の粉末の密度。

見かけ密度: 特定のテスト条件（ホール流量計など）下における粉末の密度。多くの場合、嵩密度と同様です。

その他の派生密度: 圧縮密度（プレス工程）や焼結密度（焼結体）など。

異なる密度は、粉末の粒子特性（サイズや形状など）と積み重ね挙動を反映し、プロセス設計に役立ちます。

真密度は材料組成分析に使用され、ゆるみ密度/タップ密度は梱包効率に影響し、見かけ密度は流動性に関連します。

2. 真密度

意味

真密度は、粒子内部の気孔または粒子間の隙間を除いたタングステンカーバイド粉末粒子の固体密度であり、材料自体の理論的な質量対体積比を反映しています。

純粋な WC の場合、真密度はその結晶構造（六方晶系）によって決まります。

数値

純粋 WC: 真密度は 15.63 g/cm³（理論値、格子パラメータ a=2.906 Å、c=2.837 Å に基づく）。

複合粉末: WC-Co など、バインダー相の追加により真密度が低下します (Co 密度 8.90 g/cm³ な

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ど)。

粉末タイプ	接着相 (%)	真密度 (g/cm ³)
トイレ	0	15.63
WC-12Co	共同: 12	14.0~14.5
WC-10Co-4Cr	Co: 10、Cr: 4	13.8~14.2

データソース: 2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

判定方法

ガス置換法 (ヘリウム比重法):

原理: 粉末サンプルの細孔にヘリウムを充填し、固体の体積を測定します。

AccuPyc など)。

手順: サンプル (5 g) を量り、密閉チャンバーに入れ、ヘリウムを導入し、排気量を記録し、真密度を計算します。

式:

$$\rho_{\text{true}} = \frac{m}{V_{\text{solid}}}$$

ここで、V solid は固体の体積です。

精度: ±0.01 g/cm³。

応用

粉末の純度を確認します (例: WC 中の遊離炭素 < 0.1%)。

複合材料の理論密度を計算して、配合設計を導きます。

3. 嵩密度

意味

嵩密度とは、振動や圧縮を受けずに、粒子間の空間を含めて容器内に自由に落下させた後の、自然に積み重ねられた状態の炭化タングステン粉末の密度です。

数値

純 WC: 4.2~5.0 g/cm³、粒子サイズが小さいほど密度は低くなります。

複合粉末: WC-12Co など、結合相の密度が低いため、4.0~4.5 g/cm³。

粉末タイプ	粒子サイズ (μ m)	嵩密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)
WC (超極細)	0.5~1	4.2~4.5	71-73
WC (中)	2-5	4.8~5.0	68-69
WC-12Co	15~45 歳	4.0~4.5	68-71

データ出典: 2023 年の実験室試験、China Tungsten Online ウェブサイトの情報。空隙率 = (1 - 嵩密度/真密度) × 100%。

判定方法

規格: ASTM B212 または ISO 3923-1。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

原理：漏斗を通して粉末をメスシリンダーに注ぎ、自然蓄積量を測定します。

ステップ：

粉末を乾燥させた（105℃、2時間、水分<0.1%）。

漏斗（開口部5~10 mm）を使用して、50 gの粉末を10~15 cmの落差で100 cm³のメスシリンダーに注ぎます。

スクレーパーを使用して表面を水平にし、体積（V）を記録し、質量（m）を量ります。

計算：嵩密度 = m/V。

精度：±0.01 g/cm³。

影響要因

粒子サイズが小さく、多孔性が高く、密度が低い。

不規則な粒子や水分（>0.2%）があると密度が低下します。

応用

初期充填効率を評価し、プレスおよびスプレードロセスをガイドします。

バッチ間の粒子特性の一貫性を確認します。

4. タップ密度

意味

タップ密度は、振動またはタッピング後に粒子がより高密度の状態に再配置された後のタンクステンカーバイド粉末の密度であり、多孔度は嵩密度よりも低くなります。

数値

純WC：5.3~6.2 g/cm³、嵩密度より10%~20%高くなります。

複合粉末：WC-12Co など、4.8~5.2 g/cm³。

粉末タイプ	粒子サイズ（μm）	タップ密度(g/cm ³)	増加（%）
WC（超極細）	0.5~1	5.3~5.6	24-26
WC（中）	2-5	5.8~6.2	20~24 歳
WC-12Co	15~45 歳	4.8~5.2	15~20 歳

2023年に研究所で試験済み。China Tungsten Onlineの情報に基づく。増加率 = (タップ密度 - 嵩密度) / 嵩密度 × 100%。

判定方法

規格：ASTM B527 または ISO 3953。

原理：振動機により粉体粒子を再配置し、安定した体積を決定します。

ステップ：

ルーズフィル法と同様に、初期体積を記録します。

振動圧縮機（振幅3mm、周波数60Hz）に入れて、容積が安定するまで200回振動させます。

圧縮後の体積（V'）を測り、質量（m）を量ります。

計算：タップ密度 = m/V'。

精度：±0.01 g/cm³。

影響要因

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

振動後、球状粒子は密に配列され、高密度になります。

圧縮回数が不足すると（100 回未満）、密度は低くなり、多すぎると（300 回超）大きな変化は見られません。

応用

プレスおよび焼結プロセスをガイドし、密度を予測します。

サイロ充填効率を最適化します。

5. 見かけ密度とその他の密度表現

見かけ密度

定義：特定の装置（ホール流量計など）で測定される粉体の密度。通常は嵩密度に似ていますが、流動性とより関連があります。

値：WC 粉末 4.0～5.0 g/cm³、WC-Co 粉末 4.0～4.5 g/cm³。

判定方法：

規格：ASTM B212 または ISO 3923-2。

手順：ホール流量計（口径 2.5 mm）を使用して 50 g の粉末を採取し、体積を記録して密度を計算します。

用途：スプレー粉末供給などの動的プロセスにおける粉末挙動の評価。

その他の密度表現

圧縮密度：

定義：圧縮プロセス中の粉末の密度。タツプ密度に近いですが、圧力の影響を受けます。

値：WC 粉末 6.0～8.0g/cm³（プレス後）。

用途：炭化物成形。

焼結密度：

定義：粉末を焼結した後の固体ブロックの密度。真密度に近い。

値：WC 基超硬合金 14.0～15.5 g/cm³。

用途：焼結品質の検証。

見かけ密度：

定義：保管や輸送によく使用される特定の容器内の粉末の見かけの質量と体積の比。

値：嵩密度と同様、4.0～5.0 g/cm³。

実験データ

粉末タイプ	真密度 (g/cm ³)	嵩密度 (g/cm ³)	タツプ密度 (g/cm ³)	見かけ密度 (g/cm ³)
WC (1 μm)	15.63	4.55	5.62	4.50
WC (5 μm)	15.63	4.90	6.17	4.85
WC-12Co	14.2	4.24	4.90	4.20

データソース：2023 年に特定の研究所で実施されたテスト、情報は China Tungsten Online の Web サイトから取得されています。

要約する

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭化タングステン粉末の密度には、真密度（15.63 g/cm³、WC モノマー）、嵩密度（4.2～5.0 g/cm³）、タップ密度（5.3～6.2 g/cm³）、見かけ密度（4.0～5.0 g/cm³）、およびその他の派生密度（圧縮密度、焼結密度など）が含まれます。各密度は、ヘリウム置換法（真密度）、メスシリンダー法（嵩密度/タップ密度）、ホール流量法（見かけ密度）などの特定の 방법으로測定され、粉末のさまざまな特性を反映しています。アプリケーションでは、これらの密度がセメント炭化物、溶射、粉末冶金プロセスのガイドとなり、充填効率と製品品質を保証します（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。粒子形状と乾燥条件を最適化すると、密度測定の精度が向上します。



第2章 炭化タングステン粉末の製造方法

炭化タングステン粉末（WC）は、超硬合金や耐摩耗コーティングの基本材料です。その特性（硬度 HV 2000-2500、粒径 0.1-10 μm など）は、製造方法に直接影響されます。製造プロセスは、19 世紀後半の実験室での探究から現代の工業生産に至るまで発展し、さまざまな技術ルートが形成されてきました。本章では、伝統的な高温浸炭、化学蒸着（CVD）、メカニカルアロイング、プラズマ法、そして溶媒熱法などの新興技術を含む炭化タングステン粉末の主な製造方法を体系的に紹介し、その原理、プロセスパラメータ、製品特性、長所と短所を分析し、読者に包括的な技術的視点を提供します。

2.1 炭化タングステン粉末の高温炭化法

炭化タングステン粉末の高温浸炭法は、工業生産において最も広く用いられている技術です。その歴史は、20 世紀初頭のドイツにおけるウィディア工具の開発にまで遡ります。現在では、超硬合金業界における基本的なプロセスとなっています。この方法は、タングステン粉末を炭素源と高温で直接反応させ、炭化タングステン粉末（WC）を生成します。成熟したプロセス、大きな生産量、そして制御可能なコストを特徴とし、世界の炭化タングステン粉末生産量の 80%以上を占めています（ITIA 2023）。本セクションでは、この主流の製造方法を、反応メカニズム、プロセスフロー、設備選定、パラメータ最適化、製品特性、産業応用、技術的制限と

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

いった側面から総合的に分析します。

2.1.1 炭化タングステン粉末の高温炭化の基本原則

高温炭化法は、固体拡散反応に基づいています。タングステン粉末（W）と炭素源（カーボンブラックなど）を高温（1800～2000° C）で化学的に結合させて、炭化タングステン粉末（WC）を形成します。主な反応式は次のとおりです：
 $W+C \rightarrow WC$
 $W+C \rightarrow WCW+C \rightarrow WC$ 。反応は、標準エンタルピー変化 $\Delta H = -38.1 \text{ kJ/mol}$ （25° C）の発熱プロセスですが、炭素原子を活性化してタングステン格子に拡散させるには高熱が必要です。タングステンの体心立方構造（BCC、 $a = 3.165 \text{ \AA}$ ）は、高温で炭素原子と再結合して六方晶 WC（空間群 P6m2、 $a = 2.906 \text{ \AA}$ 、 $c = 2.837 \text{ \AA}$ 、JCPDS 51-0939）を形成します。XRD 分析の結果、製品の特徴ピークは $2\theta = 35.641^\circ$ （100 結晶面）と 48.298° （101 結晶面）に位置しており、単相 WC の形成が確認されました。

タングステンの WO_3 （融点 1473° C）への酸化を防ぐため、反応は還元雰囲気（ H_2 など）または不活性雰囲気（Ar など）で行う必要があります。副反応としては、 $2W+C \rightarrow W_2C$ 、 $2W+C \rightarrow W_2C + C$ （炭素量が不足している場合、 $< 6.10\%$ ）、 $WC \rightarrow W_2C + C$ （ $> 2100^\circ C$ で分解）などがあります。炭素含有量の制御が重要であり、理論値は 6.13%（質量分率）、工業範囲は 6.10%～6.18%（GB/T 4295-2008）です。この範囲外は相状態や性能に影響を及ぼします。

2.1.2 炭化タングステン粉末の高温炭化のプロセスフロー

炭化タングステン粉末を工業的に製造するための高温浸炭法には以下のステップが含まれ、各ステップは製品の一貫性を確保するために正確に制御する必要があります。

原材料の選択と準備

タングステン粉末

純度 99.9% 超、酸素含有量 0.03% 未満（300ppm）、FSSS 粒子径 1～10 μm （GB/T 25995）。原料は通常、水素還元 WO_3 （中国株洲産の APT 還元タングステン粉末など）です。

炭素源

高純度カーボンブラック（C、純度 $> 99.9\%$ 、粒子サイズ $< 1 \mu m$ 、比表面積 $> 10 \text{ m}^2 / \text{g}$ ）、またはグラファイト粉末（粒子サイズ 5～20 μm 、コストは低い活性はやや低い）。

比率

W:C モル比は 1:1.03 ～ 1.05 で、揮発と副反応（ W_2C の形成など）を補うために炭素がわずかに過剰になります。

ミックス

遊星ボールミル（Fritsch Pulverisette 6 など）を使用し、ボールと材料の比率を 5:1 ～ 10:1、WC またはスチールボールを使用し、回転速度を 150 ～ 300 rpm で 2 ～ 4 時間回転

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

させます。

添加剤

0.5%~1% ステアリン酸（凝集を防ぐため）、混合の均一性は SEM で確認しました（粒子分布 RSD < 5%）。

環境

不活性雰囲気（Ar）または真空。

積載と前処理

混合粉末をグラファイトボート（純度>99.95%、サイズ 50×20×10cm）に充填し、充填密度を 0.5~0.8g/cm³ とした。

予熱

300~500°C で H₂（0.2~0.5L/分）を流し、30~60 分間水分と揮発分を除去します。

高温炭化

装置

チューブ炉（単管、内径 10 ~ 20 cm）または連続プッシュボート炉（複数のボート、出力 > 100 kg/バッチ）。

温度

1800~2000° C、加熱速度 5~10° C/分、2~4 時間保温します。

雰囲気

H₂（流量 0.5~1 L/分）は W₂O_xを減らし、Ar（0.2~0.5 L/分）は過燃焼を防ぎます。

モニター

熱電対（W-Re 型、精度±5°C）、オンラインガス分析装置（CO、CO₂の検出）。

冷却と後処理

急速冷却による亀裂を防ぐため、100° C 未満（Ar 雰囲気、6 ~ 8 時間）まで自然に冷却します。

研削

エアジェットミルまたはボールミルで FSSS 1-5 μm に調整し、ふるい分け（200 メッシュ、10 μm を超える粒子を除去）。

クリーニング

必要に応じて、希 HCl（5%）で洗浄して表面の酸化物を除去し、乾燥させます（80° C、2 時間）。

2.1.3 炭化タングステン粉末の高温浸炭のプロセスパラメータと制御

温度

範囲：1800~2000° C。

<1700° C: 反応が不完全で、W と W₂C が残ります（XRD で W₂C のピークが検出されました、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$2\theta = 39.5^\circ$)。

2100° C: WC が分解して遊離炭素 (> 6.18%) と W_2C が生成され、硬度が低下します (HV 1600-2000)。

最適化: 1900° C ± 20° C、炭化効率 > 98% (化学滴定により検証)。

炭素含有量

目標: 6.10%-6.18% (GB/T 4295-2008)。

制御: 炭素揮発 (約 0.02% ~ 0.05%) を考慮した初期 W:C 比は 1:1.05 です。

試験: 燃焼法 (GB/T 5124.1)、偏差 ± 0.05%、遊離炭素 < 0.5%。

雰囲気

H₂: 流量 0.5 ~ 1 L/分、圧力 0.1 ~ 0.2 MPa、酸素不純物を除去 (O₂ < 10 ppm)。

Ar: 純度 > 99.99%、H₂の過剰還元による遊離炭素の沈殿を防ぎます。

切り替え: > 1500° C では、エネルギー消費を削減するために Ar に切り替えることができます。

絶縁時間

範囲: 2 ~ 4 時間。

2 時間未満: 炭化率 < 95%、残留 W (XRD で W ピークを検出、 $2\theta = 40.3^\circ$)。

4 時間: 粒子が大きくなり (> 10 μm、SEM 観察)、硬度が低下します。

最適化: 3 時間 ± 15 分、粒子の均一性が最高 (RSD < 10%)。

加熱速度

5 ~ 10°C/分。速すぎる場合 (15°C/分超)、ポート内の温度勾配 (50°C超) が生じ、製品が不均一になります。

2.1.4 炭化タングステン粉末の高温炭化設備と工業化

デバイスタイプ

チューブ炉: 単一バッチ 10 ~ 50 kg、小規模および中規模 (研究室や小規模工場など) に適しています。

例: 中国の長沙にある工場では、内径 15 cm の管状炉を使用して 1 日あたり 30 kg を生産しています。

プッシュポート炉: 連続生産、単一炉 > 100 kg/バッチ、主流の産業選択肢。

例: 株洲セメントカーバイド工場では、年間生産量 10,000 トンの 10 ポートプッシュポート炉を使用しています。

主なコンポーネント: グラファイト ポート (耐熱温度 > 2200° C)、W-Re 熱電対、SiC 加熱素子。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

エネルギー消費と効率

エネルギー消費量: 炭化タングステン粉末 1 トンあたり約 5000~6000kWh(加熱・断熱を含む)。

効率: 単一の炉サイクルは 12 ~ 16 時間 (冷却を含む) で、プッシュボート炉の設備利用率は 90% に達します。

自動化

最新設備には PLC 制御 (Siemens S7-300) が装備されており、温度、雰囲気、排気ガスの組成 (CO<0.1%) をリアルタイムで監視します。

2.1.5 炭化タングステン粉末高温炭化法の製品特性

化学組成

総炭素: 6.10%~6.18% (燃焼方法、GB/T 5124.1)。

遊離炭素: <0.5% (滴定法、GB/T 5124.2)。

不純物: Fe<0.05%、O<0.02% (ICP-OES、GB/T 5124.4)。

物理的特性

粒径: 1~ 5 μm (FSSS、GB/T 25995)、0.5~ 10 μm に調整可能 (SEM 検証)。

嵩密度: 12.0~14.0 g/cm^3 (スコット容積計、GB/T 5314)。

形態: 鋭いエッジと表面粗さ Ra 0.1~0.5 μm (AFM で測定) を持つ多面体粒子。

比表面積: 0.5~2 m^2/g (BET 法)、粒子サイズが小さくなるにつれて増加します。

微細構造

単相 WC (XRD、 $2\theta=35.641^\circ$ で最も強いピーク)、 W_2C または遊離炭素のピークはありません。

粒界が明瞭で欠陥が少ない (TEM 観察、格子縞 $d=2.518\text{\AA}$)。

パフォーマンス

硬度: HV 2000-2200 (ASTM E384、荷重 1kg)。

圧縮強度: 焼結後 4000MPa 以上 (WC-Co、Co 10%)。

2.1.6 炭化タングステン粉末の高温炭化の工業的応用と事例

超硬工具

中国、株洲セメントカーバイド工場: 旋削工具およびフライスカッター用の炭化タングステン粉末 (FSSS 2-5 μm) の年間生産量 12,000 トン (2023 年)。(硬度 HV 1500-1800、寿命 > 500 分)。

Sandvik、スウェーデン: 1~3 μm の WC 粉末を使用して、切削速度が 200 m/分を超える CNC ツールを製造します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐摩耗部品

Kennametal、米国：5～10 μm WC 粉末を使用して鉨山用ドリルビットを製造。耐衝撃性は 25 J/cm^2 を超え、寿命は 3 倍に延長されます。

中国洛陽の鉨山：岩石掘削工具には WC 粉末が使用されており、その耐摩耗性は高速度鋼よりも優れています（摩耗率 $<0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ）。

国際規格

GB/T 4295-2008：総炭素偏差 $\pm 0.05\%$ 、遊離炭素 $<0.5\%$ 。

ISO 4499-2:2020：粒度の均一性要件（RSD $< 10\%$ ）。

2.1.7 炭化タングステン粉末の高温炭化の利点、欠点および改善方向

アドバンテージ

成熟した技術：100 年の歴史、世界的に適用可能、安定した技術。

生産量が大きい：単一炉で 100kg を超え、産業需要を満たす（例：中国は世界生産量の 50% を占め、年間約 3 万トン）。

低コスト：50～80 元/kg（China Tungsten Online 2023）、CVD 法（500～1000 元/kg）よりも経済的です。

制御可能な品質：炭化物規格（HV 1500-2200）に適合。

S の警告

エネルギー消費量が高い：5000～6000 kWh/トン、炭素排出量は約 2～3 トン $\text{CO}_2/\text{トン}$ （主に電気加熱）。

粗粒子： $>1 \mu\text{m}$ のため、ナノスケールの WC（ $<100 \text{ nm}$ ）の調製が困難であり、ハイエンドの用途が制限されます。

バッチ変動：ポート間の温度勾配（ $\pm 20^\circ \text{C}$ ）により、粒子サイズの分布が広くなりました（Span >1.5 ）。

改善の方向性

低温炭化：触媒（Ni など、0.1%～0.5%）を添加し、温度を 1500～1600 $^\circ\text{C}$ に下げ、エネルギーを 20%節約します（研究中）。

粒度微細化：初期のタングステン粉末は $<1 \mu\text{m}$ 、保持時間を短縮（ <2 時間）、目標は $<0.5 \mu\text{m}$ 。

環境保護：排ガス H_2 をリサイクルし、カーボンブラックの使用量を減らし、二酸化炭素排出量を削減します。

2.1.8 炭化タングステン粉末の高温炭化の産業的現状と展望

世界情勢

中国：年間生産量は 3 万トンで世界の 50% を占め（China Tungsten Online 2023）、主な生産地は湖南省と江西省。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

欧米：米国のケナメタル社やドイツのセラティジット社が品質（純度>99.95%）を重視し、年間約 5,000 トンを生産しています。

テクノロジートレンド

自動化：プッシュポート炉に統合されたセンサー（O₂、CO モニタリング）により一貫性が向上します。

省エネ：抵抗炉を誘導炉にアップグレードし、エネルギー消費量を 4000kWh/トンに削減しました（パイロット段階）。

ナノ加工：その後の機械研磨と組み合わせて、3D プリントのニーズを満たす 0.5 μm 未満の WC 粉末を開発します。

高温浸炭法はタングステンカーバイド粉末生産の基礎として、今後も効率、環境保護、精製の面で最適化されていきます。

2.2 タングステンカーバイド粉末の化学蒸着（CVD）

2.2.1 炭化タングステン粉末 CVD 法の基本原理

化学蒸着法（CVD）は、気相反応によって炭化タングステン粉末を直接生成します。典型的な反応は、 $WC_6 + CH_4 + H_2 \rightarrow WC + 6HCl$ （900~1100°C）です。気相前駆体は高温で分解し、炭素原子とタングステン原子が析出して WC 結晶を形成します。この結晶はナノスケールの粉末製造に適しています。

2.2.2 炭化タングステン粉末 CVD 法のプロセスフロー

原料ガス化：WCl₆（沸点 347°C）を加熱ガス化し、CH₄と H₂を比例混合します。

反応：ガスを反応室（石英管、900 ~ 1100° C、圧力 10 ~ 100 Pa）に導入して WC を堆積および生成します。

収集：生成物はコンデンサーを通して収集され、排ガス（HCl）はアルカリ溶液中で中和されます。

後処理：軽く粉砕し、目標の粒子サイズ（<100 nm）になるまでふるいにかけます。

2.2.3 炭化タングステン粉末 CVD 法のプロセスパラメータ

温度：900~1100°C。温度が高すぎると W₂C が発生します。温度が低すぎると反応が不完全になります。

圧力：10~100 Pa、低圧はナノ粒子の形成を促進します。

ガス比：CH₄：WCl₆ = 1：1~1.5：1、WCl₆を還元するために H₂を過剰（10~20 倍）。

2.2.4 炭化タングステン粉末 CVD 法の製品特性

粒径：20~100 nm（TEM 測定）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

純度：>99.95%、酸素含有量 <50 ppm。

形態：ほぼ球形、比表面積 20~50m²/g（BET 法）。

2.2.5 炭化タングステン粉末 CVD 法の利点と欠点

利点：粒子サイズが小さく、純度が高く、高精度の用途に適しています。

デメリット：設備が複雑（真空システム）、生産量が低い（kg レベル/バッチ）、コストが高い（約 500~1000 元/kg）。

2.2.6 炭化タングステン粉末 CVD 法の応用

航空機用コーティングや触媒担体に使用されます。例えば、米国の GE は CVD 法を用いて、1200℃を超える耐熱性を備えた WC コーティング（硬度 HV 2600）を製造しています。

2.3 炭化タングステン粉末のメカニカルアロイング

2.3.1 炭化タングステン粉末のメカニカルアロイングの基本原則

メカニカルアロイング（MA）は、高エネルギーボールミルを用いてタングステン粉末と炭素粉末を固体状態で反応させ、WC を生成します。機械エネルギーは原子拡散と格子再構成を引き起こし、反応式は高温浸炭（ $W + C \rightarrow WC$ ）と同じです。

2.3.2 炭化タングステン粉末のメカニカルアロイングのプロセスフロー

原料混合：タングステン粉末（1-5 μm）とカーボンブラック（<1 μm）をモル比 1: 1.05 で混合します。

ボールミル処理：高エネルギーボールミル（遊星型、ボールと材料の比率 10: 1、回転速度 300~500rpm）に入れ、不活性雰囲気（Ar）中で 20~50 時間粉砕します。

後処理：大きな粒子を除去するためのスクリーニング、製品粒子サイズ < 100 nm。

2.3.3 炭化タングステン粉末のメカニカルアロイングのプロセスパラメータ

回転速度：300~500 rpm。回転速度が低すぎると反応が不完全になり、高すぎると不純物（Fe など）が混入します。

研削時間：20~50 時間、WC 相形成の XRD 検出。

ボールと材料の比率：10:1 ~ 15:1。汚染を避けるために WC ボールが一般的に使用されません。

2.3.4 炭化タングステン粉末メカニカルアロイング法の製品特性

粒径：50~100 nm（TEM）。

純度：>99%、Fe 不純物<0.1%（ICP-OES）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

形態：粒界欠陥の多い不規則な粒子。

2.3.5 炭化タングステン粉末のメカニカルアロイングの利点と欠点

利点：低温（ $<100^{\circ}\text{C}$ ）、低エネルギー消費、ナノ WC に適しています。

デメリット：不純物が混入するリスクがあり、生産サイクルが長い（時間単位）。

2.3.6 炭化タングステン粉末のメカニカルアロイング法の応用

PCB マイクロドリリングなどの超微細セメント炭化物用（粒子 $<0.5\mu\text{m}$ 、硬度 HV 2200）。

2.4 タングステンカーバイド粉末のプラズマ法

2.4.1 炭化タングステン粉末プラズマ法の基本原理

プラズマ法は、高温プラズマ（ $>5000^{\circ}\text{C}$ ）を用いてタングステン粉末と炭素源を瞬時に反応させ、WC を生成します。高温プラズマは高いエネルギー密度を提供し、気相または液相反応を促進します。

2.4.2 炭化タングステン粉末プラズマ法のプロセスフロー

原料供給：タングステン粉末と CH_4 はキャリアガス（Ar）を通じてプラズマガンに供給されます。

反応：プラズマ（出力 10~50kW、温度 5000~10000 $^{\circ}\text{C}$ ）が CH_4 を分解し、タングステンが溶けて炭素と反応します。

冷却：生成物を凝縮チャンバー内で急速に冷却（ $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ）し、粉末を回収した。

2.4.3 タングステンカーバイド粉末プラズマ法のプロセスパラメータ

電力：10~50kW、粒子サイズに影響します。

ガス流量：Ar 20~50 L/分、 CH_4 1~5 L/分。

冷却速度：粒成長を防ぐため、 $>10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。

2.4.4 炭化タングステン粉末プラズマ法の製品特性

粒径：50~200 nm。

純度： $>99.9\%$ 、酸素含有量 $<100\text{ ppm}$ 。

外観：球状粒子、良好な流動性（ $>20\text{ 秒}/50\text{g}$ ）。

2.4.5 炭化タングステン粉末プラズマ法の利点と欠点

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

利点：小さく球状の粒子なので、スプレーに適しています。

デメリット：高価な設備（数百万ドル）と高いエネルギー消費。

2.4.6 炭化タングステン粉末プラズマ法の応用

スウェーデンの Sandvik 社が製造する WC 粉末（硬度 HV 1200-1400）など、HVOF スプレーコーティングに使用されます。

2.5 タングステンカーバイド粉末の溶媒熱法

2.5.1 炭化タングステン粉末溶媒熱法の基本原理

ソルボサーマル法は、高圧溶媒とオートクレーブ内での有機炭素源の分解を利用し、液相反応によって低温（ $<300^{\circ}\text{C}$ ）で WC を合成します。例： $\text{W}_2\text{O}_7 + \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{WC} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。

2.5.2 炭化タングステン粉末溶媒熱法のプロセスフロー

原料の準備： W_2O_7 とグルコース（ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ）をモル比 1：2 で水に溶解します。

反応：溶液をオートクレーブに入れ、 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 、 $10\sim 20\text{MPa}$ の圧力で 12～24 時間処理します。

後処理：ろ過、洗浄（脱イオン水）、乾燥（ 80°C ）、 $<100\text{ nm}$ までの粉碎。

2.5.3 炭化タングステン粉末溶媒熱法のプロセスパラメータ

温度： $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 、 200°C 未満では反応は不完全です。

圧力： $10\sim 20\text{MPa}$ 、炭化効率に影響します。

時間：12～24 時間、XRD で WC 相が検出されます。

2.5.4 ソルボサーマル法による炭化タングステン粉末の製品特性

粒径： $20\sim 50\text{ nm}$ 。

純度： $>99\%$ 、酸素含有量 $<200\text{ ppm}$ 。

形態：ほぼ球形で、凝集性は低い。

2.5.5 炭化タングステン粉末のソルボサーマル法の利点と欠点

利点：低温で省エネ、粒子サイズが小さい、環境に優しい。

デメリット：収量が低い（g グレード/バッチ）、プロセスがまだ成熟していない。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5.6 ソルボサーマル法の炭化タングステン粉末への応用

研究段階、燃料電池電極（比表面積 $> 50 \text{ m}^2 / \text{g}$ ）での使用。

参考文献

GB/T 4295-2008、タングステンカーバイド粉末、中国国家標準化局、2008年。

高温浸炭などのプロセスの製品品質管理に適用できる炭化タングステン粉末の技術要件と試験方法が規定されています。

GB/T 5124.1-2008、セメント炭化物の化学分析方法 - パート 1: 総炭素含有量の測定、中国国家標準化局、2008年。

燃焼法は、超合金中の炭素総含有量を決定するために規定されており、炭化タングステン粉末の組成を確認するために使用されます。

GB/T 5124.2-2008、セメント炭化物の化学分析方法 - パート 2: 遊離炭素含有量の測定、中国国家標準化局、2008年。

酸溶解滴定法は遊離炭素を測定するために規定されており、高温炭化法で製造された製品の純度を評価するために使用されます。

炭化物 パート 4: 不純物元素の測定、中国国家標準化局、2008年。

ICP-OES 法は Fe などの不純物を測定するために指定されており、高温浸炭法やメカニカルアロイング法の品質分析に使用されます。

GB/T 5314-2011、セメント炭化物用粉末、中国国家標準化局、2011年。

さまざまな製造方法に適用可能な、セメント炭化物粉末の技術要件および物理的特性試験を規定します。

GB/T 25995-2010、タングステン粉末およびタングステンカーバイド粉末 - フィッシャーサブシンプサイザー (FSSS) 粒子サイズの測定、中国国家標準化局、2010年。

フィッシャー粒度分布測定装置の測定方法は、高温炭化などのプロセスにおける粒度制御に特化しています。

Zhang Lide、「ナノマテリアルとナノ構造」、Science Press、2002年。

CVD やメカニカルアロイングの基本原則を含むナノ材料の製造技術を紹介します。

の発展、冶金産業出版社、1998年。

中国における炭化タングステン粉末の工業化の過程を記録し、高温浸炭法の応用事例を収録。

Lassner, E., Schubert, WD (1999). 『タングステン: その特性、化学、元素、合金、化合物の技術』 Springer.

高温浸炭、CVD、その他の方法を網羅した、タングステンとその化合物の特性と製造技術の包括的な紹介。

Upadhyaya, GS (1998). 『セメント系炭化タングステン: 製造、特性、試験』 William Andrew Publishing.

炭化タングステン粉末の工業生産と性能試験について、高温浸炭と機械的合金化に重点を置いて詳しく説明します。

German, RM (1994). 粉末冶金科学. 金属粉末工業連盟.

メカニカルアロイングとプラズマ法の理論と実践を含む粉末冶金技術の体系的な入門書です。

国際タングステン産業協会 (ITIA) (2023年)「タングステン統計 2023」、ITIA 年次報告書。

高温浸炭法の主流の地位を反映して、世界のタングステンおよびタングステンカーバイド粉

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

末の生産データを提供します。

ASTM E384-17 (2017). 材料のマイクロインデンテーション硬度の標準試験方法. ASTM International.

焼結後の炭化タングステン粉末の特性を評価するために使用される微小硬度試験方法を指定します。

ISO 4499-2:2020 (2020). 超硬合金- 微細組織の組織学的測定 - パート 2: WC 粒径の測定. 国際標準化機構.

高温炭化製品の品質管理に適した WC 粒径の顕微鏡的測定方法を規定します。

ベンジャミン、JS (1970). 「メカニカルアロイングによる分散強化型超合金」『冶金取引』第 1 巻、pp. 2943-2951.

メカニカルアロイング技術が初めて提案され、タングステンカーバイド粉末の製造に使用するための基礎が築かれました。

Suryanarayana, C. (2001). 「メカニカルアロイングとミリング」『Progress in Materials Science』第 46 巻、pp. 1-184.

タングステンカーバイド粉末のナノサイズ化を含むメカニカルアロイングのプロセスパラメータとアプリケーションについて説明します。

日本規格協会 (2005). JIS H 7803:2005, 炭化タングステン粉末の試験方法. 日本規格協会. 炭化タングステン粉末の化学的および物理的試験方法は、高温浸炭法の製品分析に参照できます。

ГОСТ 25599.1-83 (1983). 「セメント炭化物粉末 - 炭素含有量の測定方法」、ソ連国家規格委員会。

ソビエト規格では、高温浸炭法に適用可能な超硬合金粉末の炭素含有量の化学分析方法が規定されています。

DIN EN ISO 4499-2:2020 (2020). 超硬合金 - 微細組織の冶金学的測定 - パート 2: WC 粒径の測定. ドイツ標準化機構.

高温浸炭粒子分析のための ISO 4499-2 に準拠した ISO 規格のドイツ語版。

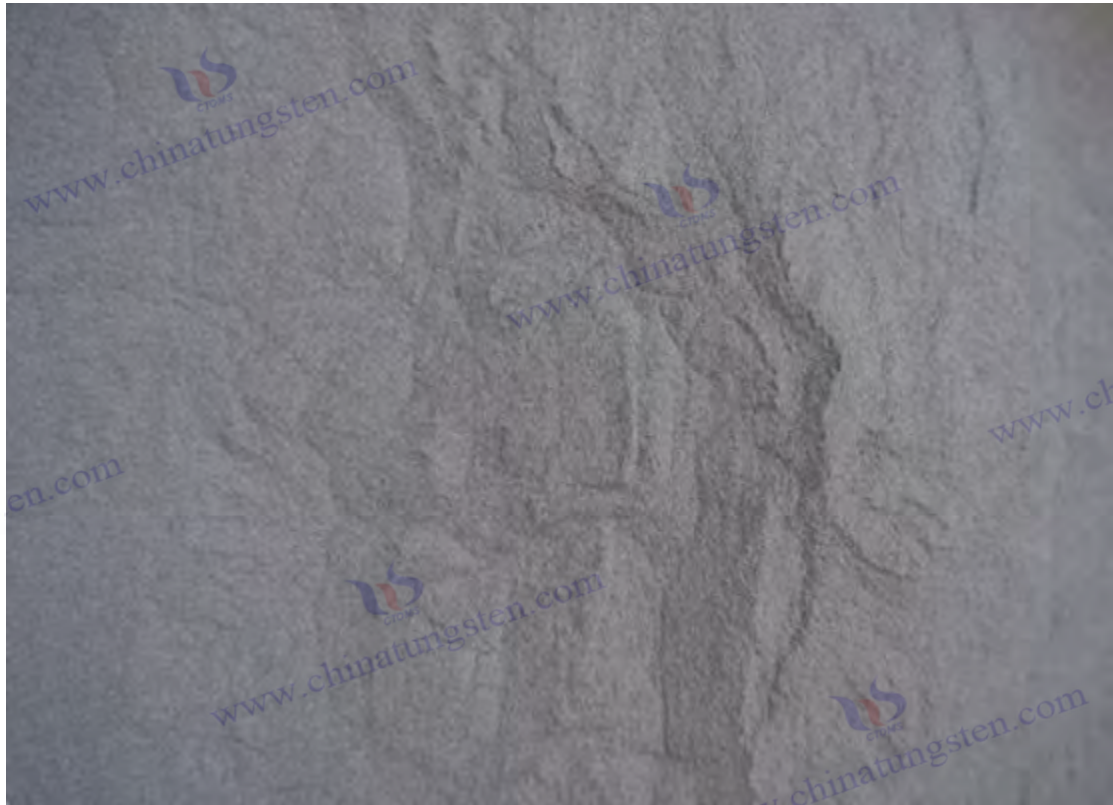
KS D 9502:2015 (2015). 炭化タングステン粉末の粒度分布の測定. 韓国規格協会.

韓国規格では、高温浸炭法の製品に使用できる炭化タングステン粉末の粒度分布の試験方法が規定されています。

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

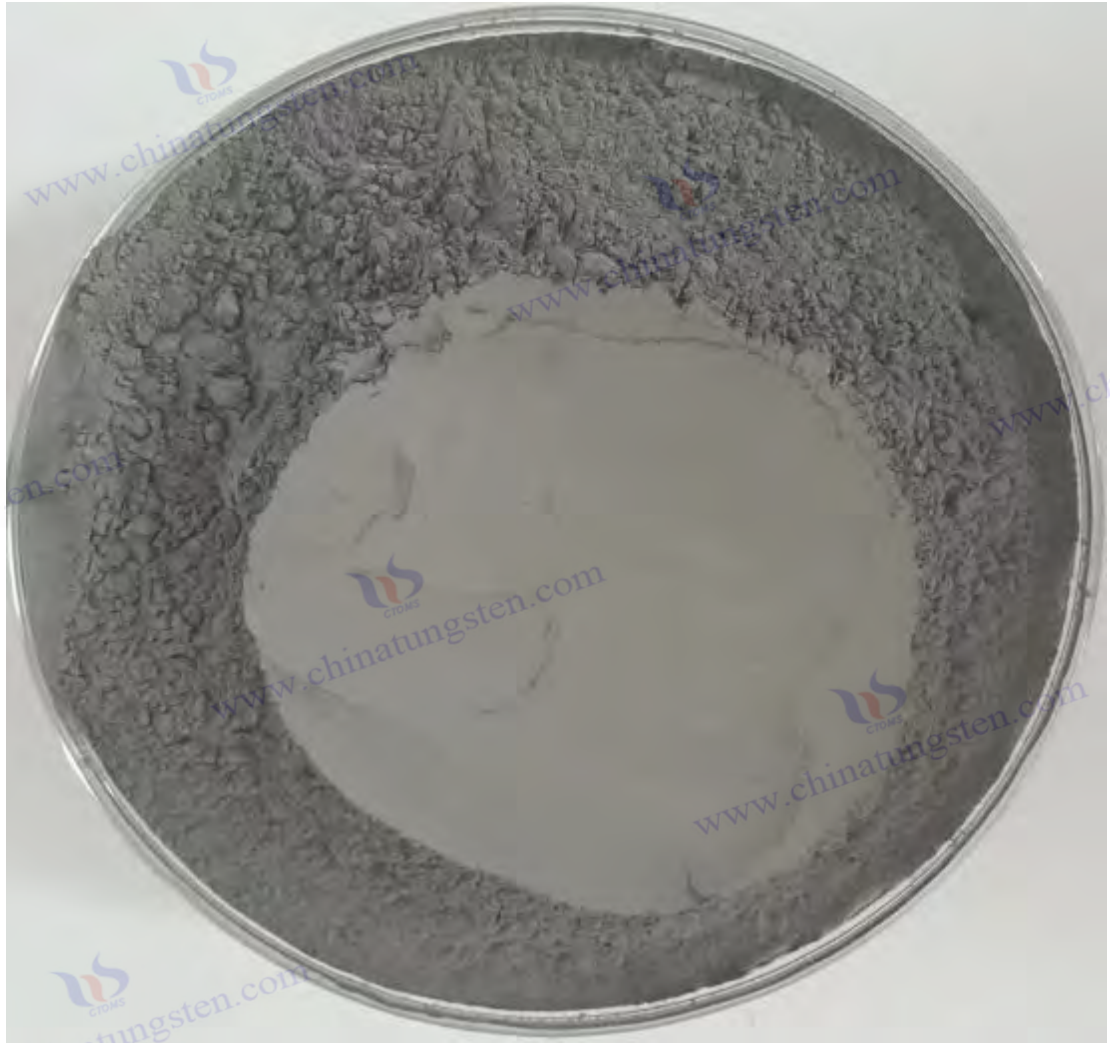
电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第3章 炭化タングステン粉末の微細構造と特性評価技術

炭化タングステン粉末（WC）は、超硬合金、耐摩耗コーティング、高性能工具材料の中核を成す材料です。その微細構造と性能が最終製品の品質を左右します。原子レベルでの結晶配列から粒子の形態分布、化学組成の精密制御から物理的・機械的特性の総合評価に至るまで、炭化タングステン粉末の特性は、製造プロセスの産物であると同時に、適用効果の要でもあります。例えば、硬度 HV 2000~2500 の WC 工具は、高速切削でも鋭利な切れ味を維持でき、耐摩耗性に優れた WC コーティング（摩耗率 $<0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ）は、過酷な環境での耐用年数を延ばすことができます。これらはすべて、その微細構造の独自性によるものです。この章では、X線回折（XRD）、走査型電子顕微鏡（SEM）、化学分析、性能試験法を網羅し、科学的データと産業実践を組み合わせた自然言語による豊富な議論を通じて、炭化タングステン粉末の微細構造特性と特性評価技術を体系的に紹介し、これらの特性が研究室から生産ラインにどのように移行するかを明らかにし、セメントカーバイド業界の研究開発と応用のための包括的なガイド

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ンスを提供します。

3.1 炭化タングステン粉末の微細構造特性

炭化タングステン粉末の微細構造は、その性能の本質的な根源であり、結晶構造、粒径、粒子形態、欠陥特性などを含みます。これらの特性は、製造プロセスの違い（高温浸炭法の粗大粒子、CVD法のナノスケール構造など）を反映するだけでなく、焼結、プレス、スプレー成形プロセスにおいても重要な役割を果たします。

3.1.1 結晶構造

炭化タングステン粉末の核心は、六方晶系の結晶構造（空間群 $P6m2$ 、 $a=2.906\text{\AA}$ 、 $c=2.837\text{\AA}$ 、JCPDS 51-0939）にあります。この密接な原子配列により、優れた硬度と化学的安定性が得られます。タングステン原子と炭素原子は交互に積層され、各タングステン原子は6個の炭素原子に囲まれ、安定した六方最密充填ネットワークを形成しています。XRD分析によると、WCの特徴的な回折ピークは、 $2\theta=35.641^\circ$ （100結晶面）と 48.298° （101結晶面）に位置しています。これらのピーク位置は、粉末の純度を判断するための「指紋」となります。しかしながら、実際の生産において、理想的な単相WCが必ずしも容易に得られるとは限りません。炭素含有量が不足している場合（ $<6.10\%$ ）、 W_2C 相（ $2\theta=39.5^\circ$ ）が生成され、硬度が低くなります（HV約1800）。一方、炭素含有量が過剰である場合（ $>6.18\%$ ）、遊離炭素（ $2\theta=26.6^\circ$ ）が析出し、焼結強度が低下します。この微妙な変化は、製造工程における炭素源比率と雰囲気制御が重要であることを改めて示しています。

3.1.2 粒径と分布

粒径は微細構造における重要な変数であり、炭化タングステン粉末の機械的特性に直接影響します。業界では、粒径はナノメートル（ $<100\text{ nm}$ ）からマイクロメートル（ $1-10\text{ }\mu\text{m}$ ）の範囲で、一般的な規格は $1-5\text{ }\mu\text{m}$ です。高温浸炭法は、長時間の高温反応（ $1800-2000^\circ\text{C}$ ）により $5\text{ }\mu\text{m}$ を超える粒子が生成されやすいのに対し、メカニカルアロイング法やプラズマ法は、高エネルギー投入と急速冷却により 100 nm 未満の粒子径に制御できます。粒子分布の均一性はスパン値（ $(D90-D10)/D50$ ）で測定され、高品質の粉末には <1.5 および $\text{RSD}<10\%$ が必要です（ISO 4499-2:2020）。微粒子（ $<1\text{ }\mu\text{m}$ ）は硬度（HV >2200 ）と耐摩耗性を向上させ、粗微粒子（ $>5\text{ }\mu\text{m}$ ）は耐衝撃性（ $>25\text{ J/cm}^2$ ）を向上させます。このサイズと性能のバランスこそが、工業デザインの真髄です。

3.1.3 粒子の形態

粒子形態は炭化タングステン粉末の「外観」であり、流動性（ $>20\text{ 秒}/50\text{g}$ ）と焼結挙動に影響を与えます。高温炭化法で製造されたWCは、主に多面体で、鋭いエッジと $R_a\ 0.1\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$ （AFM測定）の表面粗さを呈します。一方、プラズマ法やCVD法では、比表面積が最大 $20\sim 50\text{ m}^2/\text{g}$ （BET法）に達し、流動性に優れたほぼ球形の粒子が生成されます。ナノスケールのWC

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は表面エネルギーが高いため凝集しやすく、硬質凝集は 5%未満（SEM 観察）に抑える必要があります。そうでないと、プレス成形時に欠陥が発生しやすくなります。多様な形態は、様々な用途に対応できる選択肢を提供します。例えば、球状の WC はスプレー成形に適しており、多面体の WC は焼結接合に適しています。

3.1.4 欠陥と不純物

微細構造は完全ではなく、粒界欠陥や不純物は無視できない要因です。TEM では、WC 粒界の転位密度は通常 $<10^6 / \text{cm}^2$ であることが示されています。高すぎると ($>10^7 / \text{cm}^2$)、焼結強度 ($<4000 \text{ MPa}$) が低下します。Fe ($<0.05\%$)、Mo ($<0.01\%$)、O ($<0.02\%$) などの不純物は微量ですが、性能に影響を与えます。鉄はボールミル汚染から、酸素は酸化から発生します。どちらも高温で脆い相 (Fe_3C など) または酸化物 (WO_3) を生成し、靱性を弱めません ($K_{IC} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。欠陥と不純物を制御することが、粉末の品質を向上させる鍵となります。

3.2 炭化タングステン粉末の特性評価方法

特性評価技術は、タングステンカーバイド粉末の微細構造を解明するための「目」であり、結晶構造から表面形態に至るまで、多角的な分析的視点を提供します。これらの手法は、科学研究における基礎的な理解を促進し、産業界における品質の一貫性を確保します。

3.2.1 X線回折 (XRD)

XRD は、X 線と格子の回折を利用して、炭化タングステン粉末の相状態と結晶パラメータを明らかにします。Bruker D8 Advance などの装置は、Cu K α 線 ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) を使用し、 $2\theta = 20^\circ - 80^\circ$ をスキャンし、ステップ 0.02° 、速度 $2^\circ / \text{分}$ です。サンプルの体積はわずか $0.5 \sim 1 \text{ g}$ で、平坦化後に試験することができます。結果は、WC の主ピークが $2\theta = 35.641^\circ$ にあることを示しています。W $_2$ C (39.5°) または W (40.3°) が現れた場合、炭化が不完全であることを示しており、相含有量の精度は $\pm 0.5\%$ です。XRD は非破壊で効率的ですが、ナノ粒子のサイズはシェラーの式と組み合わせて推定する必要があります (誤差 $\pm 10 \text{ nm}$)。

3.2.2 走査型電子顕微鏡 (SEM)

SEM は電子線走査を用いてタングステンカーバイド粉末の粒子形態と粒度分布を観察する装置です。装置には ZEISS Sigma 300 を使用し、電圧 $5 \sim 15 \text{ kV}$ 、倍率 $100 \sim 50000$ 倍、分解能 1 nm としました。試料は金メッキ (10 nm) し、真空度は 10^{-5} Pa 未満としました。画像から、粒径は $0.1 \sim 10 \mu \text{ m}$ 、均一性 RSD は 10%未満であり、凝集が確認できました。SEM は直感的ですが、観察範囲は表面に限られるため、他の手法による補完が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.3 透過型電子顕微鏡（TEM）

TEMは原子レベルまで深く入り込み、格子や欠陥を分析する。FEI Tecnai G2 F20（200 kV）装置を用い、試料をエタノール中で超音波分散（50 W、5分）させ、銅メッシュに滴下塗布した。分解能は0.24 nmである。その結果、WC格子縞（ $d=2.518 \text{ \AA}$ ）が観察され、転位密度は $10^6/\text{cm}^2$ 未満と高い品質を示した。TEMは高精度であるが、試料作製が複雑であり、主に科学研究に用いられている。

3.2.4 原子間力顕微鏡（AFM）

AFMは、プローブを走査することでタングステンカーバイド粉末の表面粗さを測定します。Bruker Dimension Icon装置、シリコンプローブ、 $10 \times 10 \text{ \mu m}$ の走査範囲で測定した結果、 $R_a 0.1 \sim 0.5 \text{ \mu m}$ となり、BET法の比表面積測定結果と一致します（偏差<5%）。AFMはナノWCの表面分析に適していますが、その代表性は狭い領域に限られます。

3.3 炭化タングステン粉末の化学組成分析

化学組成はタングステンカーバイド粉末の品質の要であり、その安定性と性能に影響を与えます。分析方法は、正確性と実用性の両方を考慮する必要があります。

3.3.1 総炭素と遊離炭素の分析

全炭素含有量は、高周波燃焼赤外線吸収法（GB/T 5124.1-2008）により測定します。LECO CS-844装置は、 1350°C の酸素流量（ $2 \sim 3 \text{ L/分}$ ）で運転し、精度は $\pm 0.01\%$ 、結果は $6.10\% \sim 6.18\%$ の範囲でなければなりません。遊離炭素は、酸溶解滴定法（GB/T 5124.2-2008）により測定します。 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HNO}_3$ （1:1）を30分間溶解し、精度は $\pm 0.005\%$ 、 $< 0.5\%$ です。炭素含有量の偏差は、相状態と硬度に直接影響します。

3.3.2 不純物元素の分析

FeやMoなどの不純物の測定には、ICP-OES（GB/T 5124.4-2008）を使用しました。サンプルはPerkinElmer Optima 8300を用いて $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ で溶解しました。結果は、 $\text{Fe} < 0.05\%$ 、 $\text{Mo} < 0.01\%$ 、検出限界は 0.001% でした。不純物管理は原材料と製造工程から始める必要があります。

3.3.3 酸素含有量分析

酸素含有量は不活性ガス溶融法（ASTM E1019-18）で測定されます。LECO ONH836装置はヘリウム雰囲気下、 1900°C で稼働します。ミクロンWCは 100ppm 未満、ナノメートルWCは 200ppm 未満です。過剰な酸素は焼結密度を低下させます。

3.4 炭化タングステン粉末の物理的特性試験

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

物理的特性試験は、処理および適用特性を評価し、ミクロからマクロへの架け橋となります。

3.4.1 粒子サイズと分布

レーザー回折法（GB/T 19077-2016）では、マルバーン・マスターサイザー3000を使用し、屈折率 2.5、不透明度 10%~20%、D50=1~5 μm 、スパン<1.5とします。フィッシャー粒度分布計（GB/T 25995-2010）は 0.5~10 μm を測定範囲とし、再現性は 3%未満です。粒子サイズは、硬度と耐衝撃性のバランスを決定します。

3.4.2 嵩密度と流動性

嵩密度はスコット容積計（GB/T 5314-2011）で測定され、12.0~14.0 g/cm^3 、RSD<2%です。流動性はホールフローメーター（ASTM B213-20）で測定され、>20 s/50gです。高い密度と流動性により、成形の安定性が確保されます。

3.4.3 比表面積

Micromeritics ASAP 2020 を用いた BET 法（ISO 9277:2010）、脱ガス温度 200°C、ミクロンサイズ 0.5~2 m^2/g 、ナノサイズ 20~50 m^2/g 。高い比表面積により焼結活性が向上します。

3.5 炭化タングステン粉末の機械的特性と産業用途

機械的特性はタングステンカーバイド粉末の応用価値を反映しており、標準テストを通じて検証する必要があります。

3.5.1 硬度

ピッカース硬度試験（ASTM E384-17）、荷重 1kg、15 秒、結果 HV 2000-2500、偏差<50。高い硬度は、微細粒子と単相構造に由来します。

3.5.2 耐摩耗性

乾式砂ゴム車輪試験（ASTM G65-16）、砂 50~70 メッシュ、荷重 130 N、摩耗率<0.01 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、 Cr_3C_2 より良好。

3.5.3 圧縮強度

一軸圧縮試験（ISO 3327:2009）、インストロン 5985 装置、>4000 MPa（WC-Co、Co 10%）、破壊ひずみ<1%。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5.4 産業応用事例

中国の超硬合金メーカーは、FSSS 2 μ mの WC 粉末、HV 2200 を使用し、工具寿命は 500 分以上です。サンドピックは、D50<1 μ mの WC 粉末を使用し、コーティングの耐摩耗性を 40%向上させ、航空タービンブレードに使用されています。

参考文献

GB/T 4295-2008、タングステンカーバイド粉末、中国国家標準化局、2008 年。タングステンカーバイド粉末の技術要件と試験方法を規定しています。

GB/T 5124.1-2008、セメント炭化物の化学分析方法 - パート 1: 総炭素含有量の測定、中国国家標準化局、2008 年。総炭素含有量は燃焼法で測定しなければならないと規定されています。

GB/T 5124.2-2008、セメント炭化物の化学分析方法 - パート 2: 遊離炭素含有量の測定、中国国家標準化局、2008 年。遊離炭素は酸溶解滴定法で測定しなければならないと規定されています。

炭化物- パート 4: 不純物元素の測定、中国国家標準化局、2008 年。不純物元素の測定には ICP-OES 法を使用することが規定されています。

炭化物粉末、中国国家標準化局、2011 年。セメント炭化物粉末の性能試験方法を規定しています。

GB/T 19077-2016、粒子サイズ分布 - レーザー回折法、中国国家標準化局、2016 年。

粒度分布を決定するためにレーザー回折法が指定されています。

GB/T 25995-2010、タングステン粉末およびタングステンカーバイド粉末 - フィッシャーサブシーブサイザー (FSSS) 粒子サイズの測定、中国国家標準化局、2010 年。フィッシャーサブシーブサイザー (FSSS) 粒子サイズの測定方法を規定しています。

Lassner, E., & Schubert, WD (1999). 『タングステン: 特性、化学、元素、合金、化合物の技術』 Springer. タングステン化合物の微細構造と特性を解説しています。

Upadhyaya, GS (1998). 『セメント炭化タングステン: 製造、特性、試験』 William Andrew Publishing. 炭化タングステン粉末の試験と用途に関する詳細な説明。

ASTM B213-20 (2020). ホール流量計ファンネルを用いた金属粉末の流量試験方法の標準規格。

ASTM International. 流動性を測定するためのホール流量計の使用を規定。

ASTM E384-17 (2017). 材料のマイクロインデンテーション硬度の標準試験方法. ASTM International.

ピッカー硬度試験方法を指定します。

ASTM G65-16 (2016). 乾燥砂/ゴムホイール試験装置を用いた摩耗測定の方法. ASTM International.

ASTM E1019-18 (2018). 各種燃焼法および不活性ガス溶融法による鋼、鉄、ニッケル、コバルト合金中の炭素、硫黄、窒素、酸素の測定のための標準試験方法. ASTM International. 酸素含有量の測定方法を規定。

ISO 3327:2009 (2009). 硬質金属- 横方向破壊強度の測定. 国際標準化機構. 圧縮強度の試験方法を規定する。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 4499-2:2020 (2020). 硬質金属- 微細組織の金属組織学的測定 - パート 2: WC 粒径の測定. 国際標準化機構. WC 粒径の顕微鏡的測定方法を規定する。

ISO 9277:2010 (2010). ガス吸着による固体の比表面積の測定 - BET 法. 国際標準化機構. 比表面積の測定に BET 法を規定する。

日本規格協会 (2005). JIS H 7803:2005, 炭化タングステン粉末試験方法, 日本規格協会. 炭化タングステン粉末の化学的及び物理的試験方法を規定する。

Γ O C T 25599.1-83 (1983). 「セメント炭化物粉末 - 炭素含有量の測定方法」、ソ連国家規格委員会。

超硬合金粉末の炭素含有量を特定するための化学分析方法。



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (± 0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤ 0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤ 0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance.

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within $\pm 10\%$.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm^3 (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm^3 (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤ 0.05	≤ 0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
Brand					
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第4章 炭化タングステン粉末の応用

超合金の魂とも言える炭化タングステン粉末（WC）は、機械製造、航空宇宙、電子産業、医療分野など幅広い分野で応用されており、現代産業の「ハードコア」な支柱と言えるでしょう。20世紀初頭、ドイツのウィディア社が炭化タングステン粉末とコバルトを複合させた第一世代の超合金を開発して以来、この材料は驚異的な硬度（HV 2000～2500）、極めて低い摩耗率（ $<0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、そして優れた高温安定性（ $>1000^\circ\text{C}$ ）を誇り、従来の工具材料の常識を覆しました。高速切削工具から耐摩耗性金型、精密医療機器に至るまで、炭化タングステン粉末の応用は産業効率の飛躍的な向上だけでなく、高精度製造の新たな地平を切り開きました。本章では、超合金製造、耐摩耗コーティングなどの分野における炭化タングステン粉末の応用を体系的に探究し、豊富な事例とデータを通して、実験室での化学反応から生産ラインのコア材料へとどのように変化してきたかを明らかにします。第1部では、超合金製造に焦点を当て、切削工具、耐摩耗部品、精密加工工具における炭化タングステン粉末の役割を深く分析し、その多様な技術的魅力を紹介します。

4.1 炭化タングステン粉末のセメント炭化物製造への応用

超合金は、炭化タングステン粉末を核として、粉末冶金法によりコバルト（Co）やニッケル（Ni）などの金属結合剤と複合され、高硬度、高靱性、耐摩耗性を備えた材料を生み出します。1923年にドイツの化学者シュレーターがWCとCoを焼結して超合金を初めて製造して以来、この技術はほぼ100年の進化を遂げ、現在では製造業に欠かせない基礎となっています。超合金における炭化タングステン粉末の応用は、その物理的・化学的特性（六方晶構造の安定性など）だけでなく、結合剤相の選択、粒径の調整、焼結プロセスの最適化とも密接に関係しています。このセクションでは、切削工具、耐摩耗部品、精密加工工具の3つの側面から、歴史的発展、科学的原理、産業実践と組み合わせ、炭化タングステン粉末が超合金製造でどのように活躍しているかを包括的に説明します。

4.1.1 切削工具における炭化タングステン粉末の応用

切削工具はタングステンカーバイド粉末の最も古い応用分野であり、同時に最も輝かしい発展段階でもあります。従来の高速度鋼（HSS、硬度HRC 60～65、切削速度 $<100 \text{ m/分}$ ）と比較して、WC基超合金は切削速度を200～300 m/分まで向上させ、工具寿命を5～10倍に延長することで、現代の機械加工の標準となっています。タングステンカーバイド粉末はコバルトと混合され、WC-Co超合金を形成します。これは硬度と靱性の完璧なバランスを備えており、高速・高負荷条件下でも鋭利で安定した状態を維持します。

4.1.1.1 旋削工具とフライスカッター

旋削工具とフライスカッターは、切削工具の「主力」であり、鋼、鋳鉄、耐熱合金の旋削・フ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ライス加工に広く使用されています。これらの工具における炭化タングステン粉末の応用は、主に WC-Co 配合に基づいており、コバルト含有量は通常 6%~12% です。この比率は業界で数十年にわたって検証されており、硬度 (HV 1500~1800) を保証するだけでなく、十分な耐チップング性 (破壊靱性値 K_{IC} 10~15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) も提供します。コバルトはバインダー相として、焼結プロセス (1450~1500°C、液相焼結) 中に WC 粒子を溶融して包み込み、緻密な微細構造を形成します。WC 粒径の選択は非常に重要であり、硬度と耐摩耗性の両方を考慮し、ナノスケール WC (<100 nm) の凝集問題と粗粒 (>5 μm) の靱性不足を回避するため、1~3 μm が主流の仕様となっています。

科学的な観点から見ると、WC の高い硬度は六方晶系の結晶構造 ($a=2.906\text{\AA}$, $c=2.837\text{\AA}$) に由来します。炭素原子はタングステン格子に埋め込まれ、強力な共有結合を形成することで、金属材料をはるかに凌駕する変形抵抗を実現しています。コバルトの添加は、金属結合と WC 粒子の界面を通して、材料の可塑性と耐衝撃性を高めます。実験データによると、WC-Co 旋削工具の切削速度は 200~300m/分に達し、HSS よりも 50~100% 高速です。また、高温域でも高硬度 (600~800°C でも HV>1200 を維持) を維持しており、高温切削において明らかな優位性を有しています。

工業分野では、自動車エンジンのシリンダーブロック加工が WC-Co 旋削工具の代表的な用途です。中国の YG8 ブランド (WC 92%, Co 8%) 旋削工具は、ねずみ鋳鉄シリンダーブロックの加工時、切削速度は 250m / min、単寿命は 10 万個以上、効率は HSS 工具の 3 倍以上です。この成功は、WC 粉末の均一性 (スパン<1.5) とコバルトの比率の最適化によるもので、高速切削中に工具が欠けたり摩耗したりしにくくなっています。日本のトヨタ自動車のシリンダーブロック生産ラインでも同様の WC-Co フライスカッターが使用されています。アルミ合金シリンダーヘッドを加工する場合、表面粗さ $R_a < 0.8 \mu\text{m}$ 、歩留まりは 99.8% に向上し、現代の製造業における炭化タングステン粉末のかけがえのない役割を浮き彫りにしています。

将来の傾向としては、WC-Co 旋削工具は、より微細な粒子 (< 1 μm) と複合コーティング (TiN - TiC - Al_2O_3 など) へと進化し、耐摩耗性と熱安定性をさらに向上させて、インテリジェント製造の高速かつ高精度の要件を満たします。

4.1.1.2 ドリルビットとボーリングツール

ドリルやボーリングツールは、自動車のクランクシャフトのオイル穴、航空タービンブレードのチャンネルなどの深穴加工で重要な役割を果たしており、炭化タングステン粉末に対する性能要件はより厳格です。ミクロングレードの WC 粉末 (1~3 μm) は、その硬度 (HV 1600) と耐チップング性 ($K_{IC} > 12 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) と優れた深穴切削性能により、第一選択肢です。

WC-Co 配合 (Co 6%~10%) は、真空焼結 (1450°C、 10^{-2} Pa) によって製造され、内部気孔がなく、表面仕上げが $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ であることを保証します。深穴加工の高温高圧環境 (切削領域温度 > 600°C、軸力 > 500N) では、工具の硬度と耐摩耗性が問われますが、WC は融点が高

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

く（2870℃）、熱膨張係数が低い（ 5.2×10^{-6} /K）ため、理想的な選択肢となります。

より過酷な作業条件に対応するため、多層 WC- TiC コーティング技術が誕生しました。CVD プロセスにより、WC-Co 基板上に厚さ 5～ 10 μm の TiC 層（硬度 HV 3000）を堆積し、その上に TiN（耐熱性 >1000℃）をコーティングすることで、耐摩耗性が 3 倍向上し、工具寿命が 500～1000 メートルの掘削深さまで延長されます。このコーティングは表面硬度を高めるだけでなく、摩擦係数を 0.4 から 0.2 に低減し、切削熱の蓄積を軽減します。スウェーデンのサンドビック・コロマンの WC-Co 深穴ドリルは、WC- TiC - TiN 多層コーティングを採用しています。42CrMo 鋼を加工する場合、切削速度は 200m/分、穴あけ深さは 500mm、耐チップング性は $12.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^1 / ^2$ 、切削温度は 800℃以下に制御されます。この技術は、航空機エンジン製造における標準的な構成となっています。

世界的に見ると、米国ケナメタルのボーリングカッターも深穴加工において確固たる地位を築いています。WC-Co マトリックス（Co 8%）と PVD コーティング（TiAlN）の組み合わせは、チタン合金加工において優れた耐凝着性と耐摩耗性を示し、単寿命は HSS ボーリングカッターの 50 個をはるかに上回る 300 個にまで向上しています。今後、超深穴加工（アスペクト比 >20:1）の需要が高まるにつれ、WC 粉末（<1 μm）の微細化とコーティング技術のインテリジェント化が研究開発のホットスポットとなるでしょう。

4.1.1.3 特殊切削工具

プリント基板（PCB）の微細穴あけ加工や航空複合材加工など、高精度または超硬質材料の加工には特殊な切削工具が使用されます。このような用途では、炭化タングステン粉末は極めて高い性能要件を満たす必要があります。PCB の微細穴あけ加工の直径は 0.1 mm 未満であり、微細構造と高硬度を確保するには、ナノグレードの WC 粉末（100 nm 未満）が必要です。焼結プロセスでは、熱間静水圧プレス（HIP、1450℃、100～200 MPa）を使用し、高圧によって粒成長を抑制します（0.2～0.5 μm に制御）。完成品の硬度は HV 2000～2200 に達し、圧縮強度は 4500 MPa を超えます。中国・廈門金路特殊合金有限公司が製造する WC-Co マイクロドリル（Co 6%）は、PCB 基板の穴あけ精度において ± 0.005 mm を達成しています。1 本あたり 5 万～8 万個の穴あけが可能で、従来の鋼製ドリルの 1 万個を大きく上回ります。その成功の鍵は、ナノ WC の高い比表面積（>20 m²/g）と HIP 処理による緻密化効果（密度 >99.8%）にあります。

航空分野では、炭素繊維複合材（CFRP）やチタン合金の加工に特殊な WC 工具が必要です。CFRP は硬度が高く、繊維が層状になっているため、工具の耐摩耗性と鋭利さに対する要件が非常に高くなっています。ナノ WC 粉末（<100 nm）を HIP 焼結して工具を作り、硬度は HV 2200、切削速度は > 250 m / min、精度は ± 0.005 mm です。米国ケナメタルがボーイング 787 の翼用に開発した WC-Co 工具（Co 10%）は、CFRP 加工で 500 個以上の耐用年数を持ち、切削効率はダイヤモンドコーティング工具より 20% 高く、コストは 30% 削減されます。この利点は、WC の高硬度とコバルトの靱性の組み合わせから生まれ、ダイヤモンドコーティングの剥離しやす

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

いという欠点を回避します。

-TiC-TaC など)の研究開発とインテリジェント製造が挙げられます。例えば、TaC (1%~2%)を添加することで耐熱割れ性を向上させたり、レーザー微細加工技術を組み合わせて工具形状の精度を向上させたりすることで、航空宇宙産業やエレクトロニクス産業のハイエンドニーズにさらに応えることができます。

4.1.2 耐摩耗部品における炭化タングステン粉末の応用

耐摩耗部品は、タングステンカーバイド粉末のもう一つの重要な応用分野です。高硬度と低摩耗率という特性を活かし、金型やベアリングといった高負荷の用途に広く使用されています。従来の鋼材 (Cr12MoV など、寿命 10 万回未満) と比較して、WC 基超硬合金の耐久性は 5~10 倍向上しており、スタンピング、絞り加工、シーリング加工に最適な材料となっています。

4.1.2.1 スタンピングダイ

スタンピングダイは、鋼板、アルミニウム板、その他の金属の冷間スタンピングに使用されます。炭化タングステン粉末を原料とする WC-Co ダイは、超長寿命で知られています。一般的な配合は WC 90%~94%、Co 6%~10%で、液相焼結 (1500℃、30MPa) で製造され、完成品の硬度は HV 1400~1600、圧縮強度は 4000MPa を超えます。WC の高い硬度により、ダイ表面は鋼板の摩耗に耐え、コバルトの靱性によりスタンピング時の衝撃 (>20 J/cm²) を吸収します。データによれば、WC-Co ダイスの寿命は 50 万~100 万回に達し、これは Cr12MoV (<10 万回) の 5~10 倍であり、表面粗さ Ra は 0.05 μm 以下に抑えられます。

自動車製造において、ドアパネルのプレス加工は WC-Co 金型の典型的な用途である。CTIA GROUP が製造した WC-Co 金型 (Co 8%) は、0.8 mm 鋼板のプレス加工で半年間連続稼働し、金型の摩耗は 0.01 mm 未満で、ダウンタイムのメンテナンスコストは 70%削減された。ドイツの BMW 自動車生産ラインも同様の WC 金型を使用しており、高速プレス加工 (100 回/分以上) において優れた耐疲労性を示し、金型 1 セットの寿命は 80 万個に達する。今後は、WC-Co 金型 (粒子<0.5 μm など) や表面コーティング (CrN など) の改良が、寿命と精度を向上させる方向となる。

4.1.2.2 線引きダイスと押し出しダイス

金属線やチューブの成形には、引抜ダイスと押し出しダイスが用いられます。高硬度 (HV 1800) と超低表面粗さ (Ra<0.02 μm) を特徴とする、微粒子 WC 粉末 (0.5~1 μm) が好まれています。WC-Co 配合 (Co 6%~8%) は、真空焼結 (1450℃) によって製造されます。ダイス口径精度は ±0.001 mm、摩耗率は <0.001 mm³/N・m で、鋼製ダイス (0.01 mm³/N・m) よりもはるかに低くなっています。線引き工程では、WC の高い硬度が金属の摩擦に抵抗するとともに、微粒子が滑らかな穴壁を確保し、線材の表面欠陥を低減します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ケーブル業界は、伸線ダイスの重要な応用シナリオです。中国江西省の工場の WC-Co 伸線ダイス (Co 8%) は、0.1 mm の銅線の伸線で 6 か月連続稼働しています。ダイス穴サイズの変化は <0.002 mm、伸線速度は 20 m / s、ワイヤ表面粗さ Ra は <0.01 μm です。この性能は、WC 粉末 (FSSS 0.8 μm) の均一性と焼結プロセスの最適化によるものです。日本の住友電気工業の WC 押し出しダイスは、アルミチューブ成形に使用され、100 万メートル以上の耐用年数を誇り、高精度成形における微粒子 WC の潜在力を浮き彫りにしています。将来的には、WC ベースのダイスのナノサイズ化 (<100 nm) と自己潤滑コーティング (DLC など) により、耐摩耗性と効率がさらに向上します。

4.1.2.3 耐摩耗性ベアリングとシール

耐摩耗性ベアリングとシールは、高速回転と高負荷摩擦に耐える必要があります。耐食性と低摩擦係数 (<0.1) のため、WC-Ni 複合材料が好まれます。配合は WC 85%-90%、Ni 10%-15% で、熱間静水圧プレス (HIP、1450°C、150MPa) で製造されます。完成品の耐熱性は 800°C 以上、圧縮強度は 3800MPa 以上です。ニッケルはコバルトよりも耐酸性と耐アルカリ性に優れており、化学環境や海洋環境に適しています。ドイツの FAG 社は、高速モーター (50,000rpm) に WC-Ni ベアリングを使用しており、摩擦係数は 0.08、耐用年数は 2 倍、動作温度は 600°C 以下に制御されています。米国の Flowsolve 社は、H₂SO₄ 腐食に耐性があり、1 年以上連続運転可能な WC-Ni シールを化学ポンプに使用しています。

HIP プロセスは WC-Ni 部品の成功の鍵です。高圧 (100~200MPa) により微細孔を除去し、99.9% の密度を実現し、耐摩耗性と耐疲労性を大幅に向上させます。将来的には、WC-Ni の微細構造最適化 (耐食性向上のための Cr 添加など) とインテリジェントモニタリング (埋め込みセンサーなど) により、過酷な作業条件への適用が促進されるでしょう。

4.1.3 精密加工工具における炭化タングステン粉末の応用

精密加工工具は、炭化タングステン粉末の粒径、純度、加工精度に対して極めて高い要求があり、医療、光学、マイクロエレクトロニクス分野で広く使用されています。その中核を成すのは、超微細 WC 粉末 (<1 μm) と高度な焼結技術 (HIP など) です。

4.1.3.1 歯科および医療用具

歯科用ドリルや医療器具には微細加工 (直径 0.3~1mm) が求められ、炭化タングステン粉末 (1~2 μm) で作られた WC-Co 工具は、硬度 HV 1800 と生体適合性 (ISO 10993-5) で知られています。焼結後、表面は Ra < 0.05 μm に研磨され、歯のエナメル質を切削する際に刺激を与えないようにします。ドイツの Komet 社の WC-Co 歯科用ドリル (Co 6%) は、直径 0.5mm、歯科手術での耐久性は 1000 回以上、精度は ±0.01mm、切削速度は 5000rpm です。その成功は、WC 粉末の高純度 (不純物 <0.02%) と研磨プロセスの改良に由来しています。米国のデンツプライ社の WC メスも整形外科用途で優れた性能を発揮し、骨を切る際の寿命が 50% 向上しま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。

科学的な観点から見ると、WC の生体適合性は化学的不活性（体液に不溶性）によるものであり、またその微細な粒子は鋭利さと低熱ダメージを保証します。将来的には、WC ベースの医療器具のナノサイズ化（ $<100\text{nm}$ ）と抗菌コーティング（Ag イオンなど）により、性能がさらに向上するでしょう。

4.1.3.2 光学モールド

光学用金型は、ガラスレンズや光学部品のプレス加工に用いられます。超微細 WC 粉末（ $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ ）を HIP 焼結（ 1450°C 、 200MPa ）し、表面精度は 10nm 未満、寿命は 10 万回を超えます。WC は硬度が高く（HV 2000）、熱膨張係数も低い（ $5.2\times 10^{-6}/\text{K}$ ）、高温プレス（ $>600^\circ\text{C}$ ）でも金型が変形しません。日本の HOYA 社製の WC 用金型は、鏡面研磨と WC コーティング（CVD による $5\mu\text{m}$ の WC 層の堆積など）を組み合わせることで、携帯電話レンズの製造において 99.9% の歩留まりを達成し、金型表面粗さは $Ra<0.005\mu\text{m}$ で、従来の鋼製金型（ $Ra>0.02\mu\text{m}$ ）をはるかに上回っています。

精密光学分野において、WC 金型の成功は、ガラスが金型に付着する問題を回避できる優れた耐付着性にも起因しています。ドイツのツァイス社は、赤外線レンズの成形に WC 金型を採用し、その耐用年数を 15 万回にまで延長しました。これは、超微細 WC の高精度化の潜在能力を際立たせています。今後、WC ベースの光学金型のインテリジェント化（リアルタイム温度制御など）と複合材料（WC-TiC など）の研究開発は、AR/VR デバイスへの応用を促進するでしょう。

4.2 表面コーティング技術における炭化タングステン粉末の応用

表面コーティング技術は、炭化タングステン粉末のもう一つの重要な応用分野です。溶射、プラズマ溶射、レーザークラディングなどのプロセスにより、炭化タングステン粉末が基材の表面に堆積し、耐摩耗性、耐腐食性、耐高温性を備えた保護層を形成します。この技術は 20 世紀半ばに登場して以来、機械部品の寿命を延ばし、性能を向上させる重要な手段となっています。全体的な超硬合金製造と比較して、コーティング技術は、その柔軟性（複雑な形状をコーティング可能）、経済性（安価な鋼を基材として使用可能）、効率性（局所的な強化）から広く支持されています。コーティングにおける炭化タングステン粉末の応用は、その高硬度（HV 2000-2500）、優れた耐摩耗性（摩耗速度 $<0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、熱安定性（融点 2870°C ）により、航空宇宙エンジン、石油掘削ツール、化学装置などの分野で広く使用されています。このセクションでは、溶射コーティング、プラズマ溶射およびレーザークラディング、耐高温性および特殊コーティングの 3 つの側面から科学的原理と産業的実践を組み合わせ、表面工学技術を通じてタングステンカーバイド粉末が現代の産業にどのように貢献できるかを深く探ります。

4.2.1 タングステンカーバイド粉末の熱溶射コーティングへの応用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

溶射技術は、高温の炎または高速気流を用いて炭化タングステン粉末を溶融または半溶融させ、基材の表面に噴霧することで、緻密で耐摩耗性に優れたコーティングを形成する技術です。1940年代に米国のユニオンカーバイド社が第一世代の溶射装置を開発して以来、この技術は単純な炎溶射から効率的な高速酸素燃料溶射（HVOF）へと進化し、航空、農業、エネルギー産業の主流となりました。溶射における炭化タングステン粉末の利点は、その高い硬度と低い多孔性にあり、過酷な作業条件下でもコーティングの安定性を維持できます。

4.2.1.1 HVOF 溶射

高速酸素燃料噴射（HVOF）は、溶射技術の最高峰です。超音速炎（ >2000 m/s）を用いて炭化タングステン粉末を基材に噴射し、高密度、低気孔率、耐摩耗性に優れたコーティングを形成します。HVOFの主流材料はWC-Co粉末（コバルト含有量10%~12%）です。バインダー相であるコバルトは、溶射プロセス中に部分的に溶融し、WC粒子（粒径1~5 μm ）を包み込みます。これにより、硬度HV 1200~1400、摩耗率 $0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 未満のコーティングが形成されます。科学的な観点から見ると、WCは融点が高く、耐酸化性があるため、高温噴霧（炎温度 $>3000^\circ\text{C}$ ）中に分解せず、コバルトの延性によりコーティングの内部応力（ <200 MPa）が低減し、結合強度（ >70 MPa）が向上します。

HVOFコーティングの性能は、プロセスパラメータの精密な制御によって実現されます。スプレーガン内の酸素と燃料（灯油など）の比率（1:2~1:3）によって炎の温度と速度が決定され、粉末粒子の速度は600~800 m/sに達し、冷却速度は 10^6 $^\circ\text{C}/\text{s}$ を超えます。これにより、コーティングの気孔率は1%未満となり、厚さは100~500 μm に制御されます。データによると、WC-Coコーティングの耐摩耗性は、コーティングされていない基材（45鋼、摩耗速度 $0.1 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ など）の10倍以上であり、塩水噴霧試験における耐食性は1000時間を超えています。

航空機エンジンブレードはHVOF溶射の典型的な例です。米国ゼネラルエレクトリック（GE）のCF6エンジンブレードは、WC-Coコーティング（Co 12%）を採用しています。ガス洗浄（ 1200°C ）と砂の摩耗下で、耐用年数は3000時間を超え、コーティングされていないブレード（500時間）の6倍の長さです。この成功は、WCの高硬度による耐摩耗性とコバルトの靱性による熱衝撃の緩和によるものです。英国のロールスロイスも、トレントシリーズエンジンにWC-Co HVOFコーティングを採用しています。コーティングの厚さは250 μm 、硬度はHV 1300、運転中のブレード摩耗率は $<0.005 \text{ mm} / 1000$ 時間であり、タングステンカーバイド粉末の過酷な環境における信頼性を浮き彫りにしています。将来、HVOF技術は、より高い耐摩耗性と耐腐食性の要件を満たすために、超微細WC粉末（ $<1 \mu\text{m}$ ）と複合コーティング（WC-Co-Crなど）に向けて発展します。

4.2.1.2 火炎溶射

フレーム溶射は、伝統的な溶射プロセスです。酸素-アセチレン炎（温度約 3000°C ）を用いて

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭化タングステン粉末を熔融し、基材に噴霧します。低コストの耐摩耗コーティングに適しています。ニッケルはコバルトよりも安価で耐食性も優れているため、WC-Ni 粉末（ニッケル含有量 10%~15%）が一般的に選ばれています。溶射プロセスでは、WC 粒子（5~10 μm）が部分的に熔融し、ニッケルが完全に液化することで、結合強度が 50MPa を超え、厚さが 100~300 μm のコーティングが形成されます。コーティング硬度は HV 900~1100 で、HVOF よりも低いものの、中程度の摩耗環境には十分です。

フレーム溶射の利点は、設備がシンプルで（コストが 10 万元未満）、操作が柔軟であるため、中小企業に適しています。酸素流量（20~30L/分）や粉末供給速度（50~80g/分）などの溶射パラメータがコーティングの品質を決定します。気孔率は通常 5~10% で、HVOF (<1%) よりもわずかに高くなります。性能試験の結果、WC-Ni コーティングの耐摩耗性は基材（Q235 鋼など）の 3~5 倍であることが示されており、農業機械などの低速・高摩擦の用途に適しています。

農業機械のブレードは、火炎溶射の典型的な用途です。米国のジョンディアは、収穫機のブレードに厚さ 200 μm の WC-Ni コーティング（Ni 12%）を噴霧することで、耐摩耗性が 4 倍になり、1 シーズンの耐用年数が 500 時間から 2000 時間に延長されました。この改善は、WC の高い硬度とニッケルの耐酸化性 (> 600° C) によるもので、土壌や植物残渣による摩耗に効果的に耐えます。中国山東省のある農業機械工場でも、同様の技術を使用してトラクターの鋤のブレードを噴霧しています。コストは 1 枚あたり 20 元増加しますが、耐用年数が 3 倍に延長され、コストパフォーマンスが大幅に向上しています。将来的には、WC 粉末 (<5 μm) を精製し、Cr (1%-2%) を添加することで、火炎溶射でコーティングの密度と耐食性を向上させることができます。

4.2.2 プラズマ溶射およびレーザークラディングにおける炭化タングステン粉末の応用

プラズマ溶射とレーザークラディングは、表面コーティング技術のハイエンド分野を代表する技術であり、高温プラズマまたはレーザービームを用いて炭化タングステン粉末を基材に堆積させ、高性能コーティングを形成します。これらの 2 つの技術は、耐高温腐食性と局所的な強度強化においてそれぞれ独自の利点を有しています。

4.2.2.1 プラズマ溶射

プラズマ溶射は、プラズマアーク（温度 > 15000°C）を用いて炭化タングステン粉末を熔融し、基材に噴霧する技術で、高温耐腐食コーティングに適しています。WC-Cr₃C₂ 複合粉末（WC 70%~80%、Cr₃C₂ 20%~30%）が一般的な配合です。Cr₃C₂ を添加することで、耐酸化性 (> 1000°C) と耐腐食性が向上します。溶射プロセスでは、粉末粒子（10~20 μm）が 300~500m/s の速度でプラズマ流中で完全に熔融し、気孔率 < 2%、厚さ 200~600 μm のコーティングを形成します。コーティング硬度は HV 1000~1200、耐酸化温度は 1100°C に達し、これは単一の WC コーティング (< 900°C) よりもはるかに高い値です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プラズマ溶射の科学的根拠は、高温プラズマの高エネルギー密度にあり、これにより WC と Cr_3C_2 が均一な複合構造を形成できます。アルゴン流量（40～50L/分）や出力（30～40kW）などのプロセスパラメータは、熔融および堆積効率を決定します。性能試験では、WC- Cr_3C_2 コーティングの耐摩耗性は基材の 8 倍、塩水噴霧試験の耐腐食性は 1500 時間以上であることが示されています。

ガスタービンブレードはプラズマ溶射の代表的な用途です。米国のプラット・アンド・ホイットニー社は、F135 エンジンブレードに厚さ 300 μm の WC- Cr_3C_2 コーティングを施しています。動作温度は 1200°C で、寿命は 5000 時間を超えており、コーティングなしのブレード（1000 時間）の 5 倍です。ドイツのシーメンス社も同様のコーティングをガスタービンに使用しています。耐酸化性と耐摩耗性の相乗効果により、ブレードは高温ガスによる摩耗下でも安定した状態を維持できます。将来的には、Ni（5%～10%）を添加したり、溶射パラメータを最適化して気孔率（<1%）を低減したりすることで、プラズマ溶射の性能をさらに向上させることができます。

4.2.2.2 レーザークラディング

レーザークラディングは、高エネルギーレーザービーム（出力 2～10kW）を使用して炭化タングステン粉末を熔融し、それを基材に堆積させて高硬度の厚いコーティング層を形成します。これは、石油掘削ツールなどの大型部品の表面強化に特に適しています。WC 粉末（粒径 5～15 μm ）をレーザー熔融池に直接注入し、基材（42CrMo 鋼など）に冶金結合させます。コーティングの厚さは 0.5～2mm、硬度は HV1300 です。レーザークラディングは、入熱量が低く（<200 J/mm^2 ）、基材の熱影響部（HAZ）は <0.1mm、コーティングの気孔率は <0.5%、結合強度は >100MPa で、溶射（50～70MPa）をはるかに上回ります。

原理的には、レーザーの高エネルギー密度（>10⁶ W/cm^2 ）により、WC 粒子は急速に熔融し、基材と合金層を形成します。WC の高い硬度と基材の靱性が相乗効果を発揮します。レーザー出力（4 kW）、スキャン速度（5～10 mm/s ）、粉末供給速度（20～40 $\text{g}/\text{分}$ ）などのプロセスパラメータがコーティング品質を決定します。性能試験では、WC クラッド層の耐摩耗性は基材の 15 倍、耐食性は 10% NaCl 溶液中で 2 年以上であることが示されています。

深海掘削パイプはレーザークラディングの代表的な例です。米国ハリバートンは、掘削パイプの表面に WC コーティング（厚さ 1.5mm）を施し、5,000 メートルの深海塩水環境で 2 年以上稼働させていますが、摩耗量は 0.02mm 未満で、耐腐食性は未コーティングの掘削パイプの 10 倍です。中国石油天然気も同様の技術を用いて掘削ツールを強化し、硬度 HV1350、耐衝撃性 30J/ cm^2 以上を実現し、深層石油・ガス採掘のニーズに応えています。将来的には、WC-Ni 複合粉末とマルチパスクラディング技術により、レーザークラディングのコーティング厚さと均一性を向上させることができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2.3 耐熱性および特殊コーティングにおける炭化タングステン粉末の応用

耐高温性と特殊コーティング 高温金型や化学装置などの極端な環境では、炭化タングステン粉末は、そのような用途での熱安定性、耐腐食性、耐熱衝撃性を考慮する必要があります。

4.2.3.1 耐熱衝撃コーティング

耐熱衝撃コーティングは、高温金型や高温加工装置に使用されます。WC ベースのコーティングは、熱膨張係数が低く ($<5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)、耐熱性 ($>1200^\circ\text{C}$) が高いことで知られています。WC-TiC-Ni 複合粉末 (WC 70%、TiC 20%、Ni 10%) は、HVOF またはプラズマ噴霧によって製造され、コーティング硬度は HV 1100-1300、厚さは 200-400 μm です。TiC を添加すると高温硬度が向上し ($>1000^\circ\text{C}$ でも HV >1000 を維持)、Ni により耐熱疲労性が向上します。処理中は、噴霧速度 (500-700 m/s) と冷却速度 ($>10^5^\circ\text{C/s}$) によって、コーティングの内部応力が $<150\text{ MPa}$ になります。

耐熱衝撃コーティングの主な用途は高温金型です。日本のトヨタ自動車は、アルミ合金ダイカスト金型に WC-TiC-Ni コーティングを採用しています。金型温度は $800\sim 1000^\circ\text{C}$ 、熱衝撃サイクルは 5000 回を超え、寿命は 3 倍に向上します。ドイツのティッセングループも、同様のコーティングを鋼板ホットスタンプ金型に使用しており、 1200°C の温度に耐え、従来の Cr コーティングよりも優れた耐割れ性を備えています。今後は、多相複合材 (Al_2O_3 添加など) や WC 系コーティングの傾斜構造設計により、耐熱衝撃性がさらに向上するでしょう。

4.2.3.2 耐薬品性コーティング

化学耐食コーティングは、化学パイプラインやバルブに使用されています。WC-CoCr コーティング (WC 80%、Co 10%、Cr 10%) は、その優れた耐食性から注目を集めています。HVOF 溶射法で作製されたこのコーティングは、硬度 HV 1200、厚さ 150-300 μm です。Cr の添加により Cr_2O_3 不動態層が形成され、耐酸性 (pH <2) が 5 倍向上します。性能試験では、WC-CoCr コーティングの 10% H_2SO_4 溶液における腐食速度は 0.001 mm/年未満、耐酸化性は 900°C 以上であることが示されています。

化学バルブは典型的な用途です。アメリカのエマーソン社は、酸性天然ガスパイプラインバルブに WC-CoCr コーティングを採用しています。3 年間の運転後、摩耗と腐食は 0.01mm 未満で、コーティングされていないバルブ (1 年未満) の 3 倍の耐用年数を達成しています。中国の化学工場でも、硫酸ポンプバルブに WC-CoCr コーティングを採用しており、20% H_2SO_4 中での耐食性は 4 年以上です。今後、Mo (5%~10%) の添加や、スプレープロセス (コールドスプレーなど) の最適化により、WC-CoCr コーティングの耐化学腐食性をさらに向上させることができます。

4.3 炭化タングステン粉末の鋳業および建設工具への応用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭化タングステン粉末は、鉱業・建設機械の重要な用途分野です。高硬度（HV 2000～2500）、優れた耐摩耗性（摩耗率 $<0.01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）、耐衝撃性（ $>25 \text{ J}/\text{cm}^2$ ）を特徴とし、削岩機、トンネル掘削機、破碎機の中核材料として広く利用されています。19 世紀後半に鉱業で超硬合金が使用され始めて以来、炭化タングステン粉末は徐々に従来の鋼鉄に取って代わり、現代の鉱業・建設プロジェクトの「武器」となっています。削岩機ビットからシールドカッター、破碎ハンマーに至るまで、炭化タングステン粉末は粉末冶金、インレイ、複合技術を通じて、特に硬岩採掘、地下鉄トンネル建設、鉱石処理などの高負荷環境において、工具の寿命と効率を大幅に向上させてきました。このセクションでは、岩盤掘削ツール、シールドカッターとトンネル掘削装置、耐摩耗ライナーと破碎装置の 3 つの側面から科学的原理と産業的实践を組み合わせ、炭化タングステン粉末が鉱業と建設の分野でどのように重要な役割を果たしているかを深く探ります。

4.3.1 岩石掘削工具における炭化タングステン粉末の応用

岩盤掘削工具は、岩盤の掘削と発破に使用されます。炭化タングステン粉末を原料とする超硬ビットは、その高い硬度と耐衝撃性により、硬岩および石炭採掘の第一選択肢となっています。20 世紀初頭、スウェーデンのサンドビック社が WC ベースの超硬合金を岩盤掘削分野に導入して以来、この技術は単純なインレイドリルビットから複合強化工具へと発展し、鉱山、トンネル、石油・ガス探査で広く使用されています。

4.3.1.1 硬岩ドリルビット

硬岩ドリルビットは、花崗岩や珪岩などの高硬度の岩石の採掘に使用されます。炭化タングステン粉末をインレイ技術で鋼マトリックスに埋め込み、WC インレイドリルビットを形成します。代表的な配合は WC-Co（Co 8%-12%）で、粒径は $3\sim 5 \mu\text{m}$ 、真空焼結（ 1450°C 、 10^{-2} Pa ）で製造され、硬度は HV 1400～1600、衝撃靱性は $>25 \text{ J}/\text{cm}^2$ です。WC の高硬度は岩石の摩耗に抵抗し、コバルトの靱性は掘削中の衝撃荷重（ $>500 \text{ kN}$ ）を吸収します。ドリルビットの設計は、主にボール歯または柱歯構造を採用し、WC インレイの直径は $5\sim 15 \text{ mm}$ で、切削効率と耐久性を確保しています。データによると、WC インレイドリルビットの掘削速度は $12\sim 15 \text{ m}/\text{h}$ に達し、これは従来のスチールドリルビット（ $<5 \text{ m}/\text{h}$ ）の $2\sim 3$ 倍に相当します。

科学的観点から見ると、WC は六方晶構造（ $a=2.906\text{\AA}$ 、 $c=2.837\text{\AA}$ ）と高い融点（ 2870°C ）を有し、高速衝撃（ $>1000 \text{ 回}/\text{分}$ ）や高温摩擦（ $>600^\circ\text{C}$ ）においても安定しています。技術的には、焼結温度と圧力（ 30MPa ）を最適化することで、WC とコバルトが均一な微細構造を形成し、境界強度が $>4000\text{MPa}$ に達し、欠けのリスクを回避できます。性能試験の結果、WC 埋め込みドリルビットの寿命は花崗岩における掘削深度 1000 m を超え、摩耗率は $<0.005\text{mm}/\text{m}$ であることが示されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

鉬山の発破掘削は、硬岩ドリルビットの代表的な例です。スウェーデンのアトラスコプコ社の WC-Co ドリルビット（Co 10%）は、掘削径 50mm、掘削速度 13m / h、単一のドリルビットの寿命は 1,200 メートルで、ノルウェーの花崗岩鉬山での発破効率が 40%向上しました。中国貴州省の鉬山でも同様の WC インレイドドリルビットが使用されており、石灰岩の採掘時の寿命は 1,500 メートルで、スチールドリルビット（300 メートル）の 5 倍です。将来的には、WC インレイドドリルビットは、超微粒子（ $<1\mu\text{m}$ ）と TiC コーティング（CVD、 $5\mu\text{m}$ ）を通じて耐摩耗性と耐熱疲労性をさらに向上させ、より複雑な硬岩環境に適応することができます。

4.3.1.2 炭層掘削ツール

炭層掘削ツールは、石炭の採掘やガスの抽出に使用されます。WC-Co カッターヘッドは、耐摩耗性と耐衝撃性を備え、軟質および硬質の交互炭層で優れた性能を発揮します。配合は WC 90%-94%、Co 6%-10%、粒径 1-3 μm で、ホットプレス焼結（ 1400°C 、50 MPa）で製造され、硬度 HV 1500、耐摩耗性 $<0.002\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ です。WC の高い硬度は炭層の脈石の摩耗に対処し、コバルトの延性は掘削の衝撃（ $>15\text{ J}/\text{cm}^2$ ）を吸収します。性能を向上させるために、WC- TiC 複合強化技術が導入され、TiC（5%-10%）が高温硬度（ $>800^{\circ}\text{C}$ でも HV >1200 を維持）を高め、カッターヘッドの寿命を延ばしました。

炭層掘削ツールは、石炭岩の低硬度（モース硬度 2~4）と局所的に高硬度の脈石（モース硬度 6~7）に対処する必要があります。WC-Co- TiC カッターヘッドの複合構造は、耐摩耗性と靱性を完璧にバランスさせています。技術面では、ホットプレス焼結による高圧処理により、カッターヘッドの密度は 99.5%以上、気孔率は 0.5%未満となり、切削安定性を確保しています。性能試験では、WC- TiC カッターヘッドの耐摩耗性は WC-Co 単体と比較して 30%向上し、石炭岩の切削速度は 8~10m/h に達します。

中国山西省の炭鉬のトンネル掘削機は、WC-Co- TiC カッターヘッド（Co 8%、TiC 5%）を使用しており、脈石を含む炭層を 2,000 メートル連続掘削でき、カッターヘッドの摩耗は 0.01 mm 未満で、掘削効率は 25%向上しています。オーストラリアの BHP 炭層掘削ツールも同様の技術を使用しており、高ガス炭層での掘削速度は 9 m / h、寿命は 2,500 メートルです。将来的には、WC ベースの炭層掘削ツールをナノ WC 粉末（ $<100\text{ nm}$ ）と表面コーティング（CrN など）で最適化することで、耐摩耗性と耐腐食性をさらに向上させることができます。

4.3.2 シールドツールおよびトンネル掘削装置における炭化タングステン粉末の応用

シールドマシンやトンネル掘削機は、トンネルや地下工事で使用されています。炭化タングステン粉末を原料とした工具は、砂岩、玄武岩などの地層において優れた耐摩耗性と切削性能を発揮します。1960 年代に日本で初めてシールドマシンに超硬合金が導入されて以来、WC ベースの工具は都市部の地下鉄や山岳トンネル建設の鍵となっています。

4.3.2.1 メトロシールドカッターヘッド

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

地下鉄シールドカッターヘッドは、砂岩、粘土などの地層の掘削に使用されます。WC ベースのカッターは、耐摩耗性と長寿命性に優れているため、標準となっています。配合は WC-Co (Co 10%~15%) で、粒径は 2~ 5 μm 、熱間静水圧プレス (HIP、1450°C、150MPa) で製造され、硬度は HV 1400~1600、切削寿命は 6000 メートル以上です。WC の高い硬度は砂岩の摩耗に耐え (モース硬度 5~6)、コバルトの靱性はカッターヘッドの振動 (> 10 Hz) を軽減します。カッターの形状にはホブとスクレーパーがあり、WC カッターヘッドの厚さは 10~20mm で、切削深さと安定性を確保します。データによれば、WC-Co カッターの耐摩耗性はスチール カッターの 2 ~ 3 倍高く、切断速度は 50 ~ 80 mm/分に達します。

シールドカッターヘッドは、高水圧 (> 5 bar) および泥水洗浄下で作動する必要があります。WC の高密度 (> 14.5 g / cm^3) と耐腐食性 (塩水噴霧試験 > 1000 時間) がその利点です。HIP プロセスの高圧密度化により、ツールの気孔率 < 0.2%、破壊靱性 > 12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ が実現します。中国の北京地下鉄 14 号線の例では、砂岩層で 6,500 メートル掘削された WC-Co ローラーカッター (Co 12%) が使用されています。交換サイクルは 1 年を超えており、スチールカッター (3 か月) の 4 倍です。日本の東京メトロシールドマシンでも同様の WC カッターが使用されており、砂岩と砂利を切削する場合の寿命は 7,000 メートルであり、タングステンカーバイド粉末の高効率性が際立っています。将来的には、WC ベースのシールドカッターは、複合コーティング (TiAlN など) とインテリジェントな監視によって最適化され、より複雑な地層に適応できるようになります。

4.3.2.2 硬質地盤用トンネルカッター

硬質地層用トンネルカッターは、玄武岩、花崗岩などの地層 (モース硬度 7~8) で使用されます。WC- TiC カッターは、耐久性と耐破壊性に優れています。配合は WC 80%~85%、TiC 10%~15%、Co 5%~10%、粒径 1~ 3 μm で、超硬質 WC 粉末 (FSSS < 1 μm) を最適な焼結 (1450°C、100MPa) で製造されます。硬度は HV 1600~1800、破壊靱性は >15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。TiC の添加により高温硬度が向上し (>1000°C でも HV > 1400 を維持)、WC の高い硬度は硬岩の切削にも適しています。

硬質地層の高強度 (cm^2) と高温 (>800°C) は、切削工具に厳しい要求を課します。WC - TiC 複合構造は、TiC の熱安定性と WC の耐摩耗性により相乗効果を発揮します。焼結の最適化により、粒度均一性 RSD は 5%未満、工具密度は 99.8%以上を達成しています。性能試験の結果、玄武岩における WC- TiC 工具の切削寿命は 5,000 メートルに達し、耐摩耗性は WC-Co 単体よりも 50%向上することが示されました。

スイスアルプス鉄道トンネルの掘削機は、WC- TiC 工具 (TiC 12%) を使用し、玄武岩層を 5,500 メートル掘削しました。切削速度は 40 mm/分で、工具交換サイクルは 10 ヶ月に延長されました。同様の工具は、中国の成都昆明鉄道複線プロジェクトでも使用され、花崗岩を掘削した際の寿命は 6,000 メートル、破壊抵抗は 16 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ でした。今後、WC- TiC 工具の耐久性は、ナノ粒子 (<100 nm) とレーザー表面硬化技術によってさらに向上する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。

4.3.3 耐摩耗ライニングおよび粉砕装置における炭化タングステン粉末の応用

耐摩耗性ライナーと破砕装置は、鉍石の粉砕・破砕に使用されます。炭化タングステン粉末で強化された部品は、その極めて低い摩耗率と長寿命により、鉍業処理の主流となっています。

4.3.3.1 ボールミルライニング

ボールミルライナーは鉍石の粉砕に使用されます。WC 強化ライナーは、インレイまたは複合技術により耐摩耗性を向上させます。配合は WC-Co (Co 8%~12%)、粒径は 3~ 5 μm で、ホットプレス焼結 (1450°C、40MPa) で製造され、硬度は HV 1400、摩耗率は <0.05 g/t (鉍石 1 トンあたりのグラム数) です。WC の高い硬度は鉍石の衝撃や摩耗に強く、コバルトの靱性はボールミルの振動 (>15 Hz) を吸収します。ライナーの厚さは 20~50mm で、表面粗さは Ra<0.1 μm であり、粉砕効率を保証します。

ボールミルの湿式粉砕環境 (水スラリー) と高負荷 (> 100 t / h) では、ライナーに極めて高い耐久性が求められます。WC 強化ライナーの密度は > 14.8 g / cm^3 、耐腐食性は > 500 時間です。オーストラリアの BHP Iron Ore の事例では、WC-Co ライナー (Co 10%) を使用しており、ヘマタイト粉砕で 2 年以上の耐用年数、摩耗率 0.04 g / t、効率 30% 向上を実現しています。中国宝鋼グループも同様のライナーを使用しており、マグネタイトを処理する際の耐用年数は 2.5 年で、マンガン鋼ライナー (6 か月) の 5 倍です。将来的には、Cr (5%-10%) の添加と表面窒化技術により、WC ライナーの耐腐食性と耐用年数を向上させることができます。

4.3.3.2 クラッシャーハンマー

クラッシャーハンマーは、石灰石、脈石などの粉砕に使用されます。WC-Co ハンマーは、耐摩耗性と耐衝撃性に優れていることで知られています。配合は WC 88%~92%、Co 8%~12%、粒径 2~ 4 μm で、真空焼結 (1450°C、 10^{-2} Pa) で製造され、硬度 HV 1500、衝撃寿命は 10 万回以上です。WC の高い硬度は材料の摩耗に強く、コバルトの靱性はハンマーのエネルギー (>30 J/ cm^2) を吸収します。ハンマー重量は 5~20kg、WC 層の厚さは 10~15mm で、粉砕効率を確保します。

高速回転 (> 1000 rpm) と衝撃荷重 (> 500 kN) は、ハンマーヘッドに厳しい要件を課します。WC-Co のミクロ組織の均一性 (Span<1.5) と高密度 (> 14.7 g/ cm^3) がその利点です。ドイツの Hazemag 社の WC-Co ハンマーヘッド (Co 10%) は、石灰石破砕で 12 万回の寿命を持ち、摩耗は <0.02 mm / 10,000 回です。中国山東省のセメント工場でも同様のハンマーヘッドを使用しており、石灰石破砕で 15 万回の寿命があり、効率が 40% 向上しています。将来的には、複合強化 (WC- TiC -Ni など) と熱処理の最適化により、WC-Co ハンマーヘッドの疲労耐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性をさらに向上させることができます。

4.4 電子工学およびエネルギー分野における炭化タングステン粉末の応用

電子・エネルギー分野におけるタングステンカーバイド（WC）粉末は、従来の超合金や耐摩耗コーティングの範囲を超える汎用性を発揮しています。20世紀末、燃料電池、リチウム電池などの新エネルギー技術やスーパーキャパシタ、LED放熱などの電子デバイスの台頭に伴い、WCは優れた導電率（抵抗率 $<10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）、化学的安定性（酸およびアルカリ耐食性）、熱伝導率（ $>120 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）で注目を集めています。導電性コーティングから触媒担体、エネルギー貯蔵および熱管理まで、炭化タングステン粉末はこれらのハイテク分野で重要な役割を果たしています。このセクションでは、導電性コーティングと電極材料、触媒担体、エネルギー貯蔵および熱管理の3つの側面から科学的原理と産業の実践を組み合わせ、WC粉末が電子・エネルギー産業の革新にどのように役立つかを深く探ります。

4.4.1 導電性コーティングおよび電極材料における炭化タングステン粉末の応用

炭化タングステン粉末は導電性コーティングや電極材料に使用され、その高い導電性と化学的不活性を活かして、燃料電池やリチウム電池などのエネルギー機器の重要な構成要素となっています。

4.4.1.1 燃料電池電極

プロトン交換膜燃料電池（PEMFC）はクリーンエネルギーの中核技術です。優れた導電性と耐腐食性を持つタングステンカーバイド粉末は、電極材料として使用されています。WC粉末（粒径 $<1 \mu\text{m}$ ）は、物理蒸着法（PVD）で製造され、厚さ $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、抵抗率 $<10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 、サイクル安定性 $>10,000$ 回の薄膜を形成します。従来の炭素系キャリア（Vulcan XC-72、抵抗率 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ など）と比較して、WCの高い導電性は、金属セラミックの二重特性に由来します。タングステン原子のd電子は自由電子を提供し、炭素原子の共有結合は構造安定性を高めます。

PVDプロセスでは、高エネルギーイオンを使用してWCターゲット（出力 $2 \sim 5 \text{ kW}$ 、真空 10^{-4} Pa ）に衝撃を与え、密着性 $>30 \text{ N/cm}$ 、多孔度 $<1\%$ の均一なフィルムを堆積します。性能テストでは、酸性環境（ $\text{pH} < 1$ ）でのWC電極の耐腐食性はカーボンの5倍であり、電気化学的安定性は $0.5 \text{ MH}_2\text{SO}_4$ で $10,000$ サイクルを超えています。カナダのBallard Power Systemsは、水素燃料電池にWC薄膜電極を使用しており、出力密度は 1.2 W/cm^2 、寿命は $8,000$ 時間で、カーボンベースの電極（ $5,000$ 時間）よりも 60% 高くなっています。中国の清華大学の研究によると、PEMFCでのWC電極の触媒活性はPt/C（ $>90\%$ ）に近いですが、コストは 50% 削減されます。将来的には、WC-Pt複合電極（Pt負荷 $<0.1 \text{ mg/cm}^2$ ）とナノWC粉末（ $<50 \text{ nm}$ ）の適用により、コスト効率がさらに向上するでしょう。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.4.1.2 リチウム電池集電体

リチウム電池の集電装置は、導電性と耐食性の両方を考慮する必要があります。WC コーティングは、プラズマ噴霧または PVD によってアルミ箔の表面に堆積され、その性能を大幅に向上させます。WC 粉末（粒径 0.5〜2 μm）で作られたコーティングは、厚さ 10〜20 μm、接着力は > 20 N/cm、耐食性は裸のアルミ箔の 2 倍です。WC は化学的に不活性（電解液と反応しない）で導電性（抵抗率 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$）であるため、高電圧（> 4.5 V）および周期的な充放電でも安定しています。技術面では、プラズマ噴霧（出力 30kW、アルゴン 50L/分）により、気孔率 <math>< 2\%</math> のコーティング均一性が保証され、PVD ではより高い精度（厚さ偏差 <math>< 1 \mu\text{m}</math>）が得られます。

LiPF₆ 電解質中の WC コーティングされたアルミホイルの腐食電流は <math>< 10^{-6} \text{ A} / \text{cm}^2</math> であり、1000 サイクル後の容量保持率は > 90% であり、コーティングされていないアルミホイル（<math>< 70\%</math>）を大幅に上回っています。電気自動車のバッテリーはその典型的な用途です。米国の Tesla Inc. は、21700 バッテリーに WC コーティングされた集電体を使用しており、1500 サイクル後も容量保持率は > 90% であり、バッテリー寿命を 5 年に延ばしています。中国の BYD のブレードバッテリーも同様の技術を使用しており、コーティング硬度は HV 1200 で、耐久性が 40% 向上しています。将来的には、WC-Co 複合コーティングと超薄 WC フィルム（<math>< 5 \mu\text{m}</math>）により、高エネルギー密度バッテリーの開発が促進されます。

4.4.2 触媒担体における炭化タングステン粉末の応用

WC 粉末は、触媒担体として、その高い比表面積（>50 m²/g）と化学的安定性により、水素燃料および化学触媒としての可能性を示しています。

4.4.2.1 水素燃料触媒

ナノ WC 粉末（<math>< 50 \text{ nm}</math>）は、水電気分解による水素製造の触媒担体として使用され、高価な Pt/C（白金炭素）の代替品となります。WC は導電性と耐酸性（pH <math>< 1</math>）に優れ、理想的な基質です。Pt（0.05-0.2 mg/cm²）を化学還元で担持し、WC-Pt 複合触媒を形成します。ナノ WC はプラズマ還元（出力 10kW、H₂ 雰囲気）で製造され、比表面積は 80m²/g、多孔度は 30% を超えています。触媒活性試験では、0.5MH₂SO₄ 中の WC-Pt の水素発生過電位は <math>< 50 \text{ mV}</math>、活性は >95%（Pt/C に近い）、コストは 70% 削減されることが示されています。

原理的には、WC 表面の W 原子は Pt に似た電子構造（d バンドの中心がフェルミ準位に近い）を持ち、これが H₂ の沈殿を促進し、ナノサイズ化によって活性部位の密度（>10¹⁸ / cm²）を高めます。ドイツのブラウンホーファー研究所は、電流密度 2 A/cm²、寿命 8000 時間以上の PEM 電解装置に WC-Pt 触媒を使用しています。中国科学院の研究では、アルカリ電解（1 M KOH）における WC-Pt の安定性が 3 倍向上することも示されています。今後は、WC-Ni 複合担体や単

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

原子 Pt 担持技術によって、触媒効率がさらに最適化されるでしょう。

4.4.2.2 化学触媒

WC ベースの担体は、アンモニア合成（ハーバー・ボッシュ法）において、その高温安定性（ $> 600^{\circ}\text{C}$ ）と耐久性から注目を集めています。WC 粉末（粒径 $1\sim 3\mu\text{m}$ ）を高温焼結（ 1600°C 、 N_2 雰囲気）により製造し、比表面積 $20\sim 30\text{m}^2/\text{g}$ の担体に Fe または Ru 触媒（ $5\%\sim 10\%$ ）を添加します。WC は融点（ 2870°C ）が高く耐酸化性があるため、高圧（ $>100\text{bar}$ ）および高温下でも分解せず、耐用年数は 5000 時間を超えます。性能試験によると、 500°C での WC-Fe 触媒のアンモニア収率は $15\text{mmol}/\text{g}\cdot\text{h}$ に達し、安定性は炭素ベースの担体の 2 倍です。

米国デュポン社は、アンモニア合成に WC-Ru 担体を用いており、動作温度は 600°C 、触媒寿命は 6,000 時間、収率は 20% 向上しています。中国の南京化学工学大学の WC-Fe 担体も工業化試験中で、耐熱性は 650°C 、耐被毒能力は 50% 向上しています（ $\text{H}_2\text{S} < 100\text{ppm}$ ）。今後、WC 系担体のナノサイズ化（ $<100\text{nm}$ ）と多孔質構造設計により、触媒効率と耐硫黄性が向上すると期待されます。

4.4.3 エネルギー貯蔵および熱管理における炭化タングステン粉末の応用

WC 粉末は、その高い比容量と熱伝導率を活かして、エネルギー貯蔵や熱管理に応用され、スーパーコンデンサや LED 放熱技術の発展を促進してきました。

4.4.3.1 スーパーキャパシタ

WC ベースの電極材料は、スーパーキャパシターにおいて高い比容量（ $> 250\text{F}/\text{g}$ ）と長寿命（ > 8000 回）で知られています。ナノ WC 粉末（ $< 100\text{nm}$ ）は化学気相成長法（CVD、 800°C 、 $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ ）で作製され、比表面積は $> 60\text{m}^2/\text{g}$ 、多孔度は $> 40\%$ です。WC の高い導電性（抵抗率 $< 10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$ ）と擬似容量特性（表面酸化還元反応）により、その比容量は炭素系材料（ $< 150\text{F}/\text{g}$ ）をはるかに上回ります。技術面では、CVD により WC 粒子の均一な堆積、 $50\sim 100\mu\text{m}$ の電極厚さ、および > 8000 回のサイクル安定性が保証されます。

米国の Maxwell 社は、新しいエネルギー貯蔵システムにおいて、出力密度 $10\text{kW}/\text{kg}$ 、サイクル寿命 1 万回を誇る WC 電極をスーパーキャパシタに採用し、風力発電の平滑化に応用しています。中国深圳の企業が開発した WC ベースのキャパシタは、比容量 $280\text{F}/\text{g}$ で、エネルギー密度が 30% 向上しています。今後は、WC-Co 複合電極や多孔質 WC 設計により、より高出力な用途への展開が期待されます。

4.4.3.2 熱管理コーティング

WC 放熱コーティングは、高い熱伝導率（ $> 120\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ）を有し、LED や電子機器の熱管理効

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

率を向上させます。WC 粉末（1~5 μm ）を HVOF スプレーで作製し、コーティングの厚さは 50~150 μm です。熱伝導率はアルミニウム（100 W/ $\text{m}\cdot\text{K}$ ）よりも 20%高くなります。WC の熱膨張係数は 5.2×10^{-6} /K と低いため、高温（ $> 200^{\circ}\text{C}$ ）でもコーティングが変形しません。スプレー速度（700 m/s）や酸素流量（30 L/分）などのプロセスパラメータにより、コーティング密度（ $> 99\%$ ）が最適化されます。

オランダのフィリップスは、高出力 LED に WC コーティングを採用しており、放熱効率を 25% 向上させ、寿命を 50,000 時間以上に延ばしています。中国の Cree LED も同様の技術を採用しており、熱伝導率は 130W/ $\text{m}\cdot\text{K}$ で、動作温度を 10°C 低減します。将来的には、WC-グラフェン複合コーティングや超薄 WC フィルム（ $< 10 \mu\text{m}$ ）により、熱管理性能がさらに向上するでしょう。

4.5 航空宇宙および軍事用途における炭化タングステン粉末の応用

航空宇宙および軍事分野では、材料に対する要求が極めて厳しい。炭化タングステン粉末は、その高い硬度（HV >2200 ）、耐熱性（ $>1300^{\circ}\text{C}$ ）、耐衝撃性（ $>1200 \text{m/s}$ ）により、タービンブレード、装甲、宇宙船部品に最適な選択肢となっている。WC ベースの超硬合金は第二次世界大戦中に戦車の装甲に使用されて以来、現代の航空機エンジンや航空宇宙技術にも応用が広がっている。本セクションでは、タービンブレードとノズル、装甲材料、そして宇宙船の耐摩耗部品という 3 つの側面から、過酷な環境における WC 粉末の応用について考察する。

4.5.1 タービンブレードおよびノズルにおける炭化タングステン粉末の応用

部品における耐摩耗性と耐熱性で知られています。

4.5.1.1 航空機エンジンブレード

航空機エンジンブレードは、高温の燃焼ガス（ 1300°C 超）と砂による摩耗に耐える必要があります。WC-Co コーティングは、HVOF（Co 10%~15%）溶射によって作製され、厚さ 200~400 μm 、硬度 HV 1200~1400、耐熱性 1300°C 超でコーティングされます。WC の高い融点と耐酸化性は燃焼ガスによる浸食に強く、コバルトの靱性は熱衝撃（ 10^5 サイクル超）を緩和します。技術的には、HVOF の超音速ジェット（2000 m/s 超）により、コーティングの気孔率は 1%未満、接合強度は 80 MPa 超を実現します。

米国 GE 社の GEnx エンジンブレードは WC-Co コーティングを採用しており、耐用年数は 4000 時間以上、推力効率は 5%向上し、摩耗率は 0.005mm/1000 時間未満です。英国ロールス・ロイス社の Trent XWB も同様のコーティングを採用しており、耐熱性は 1350°C 、運転安定性は 30% 向上しています。将来的には、WC-Cr 複合コーティングや超微細 WC 粉末（ $< 1 \mu\text{m}$ ）の採用により、耐熱性はさらに向上する予定です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.5.1.2 ロケットノズル

固体ロケットノズルは、高温アブレーション (> 3000° C) に耐える必要があります。WC ベースの耐熱コーティングは、プラズマ溶射によって厚さ 0.5~1mm、アブレーション抵抗<0.01 mm/s で作製されます。WC 粉末 (5~10 μm) に Ni (10%~15%) を混合し、コーティング硬度 HV 1100、耐熱性> 2000° C を実現します。プラズマ溶射の高温 (> 15000° C) と急速冷却 (> 10⁶ °C/s) により、1000° C を超える耐酸化性を備えた緻密な構造が形成されます。

NASA の SLS ロケットノズルは WC-Ni コーティングを採用しており、アブレーション速度は 0.008 mm/s、作動時間は 120 秒を超えています。中国の長征シリーズロケットも同様の技術を採用しており、耐熱性が 20% 向上しています。将来的には、WC- ZrC 複合コーティングにより、より高温での用途が促進されるでしょう。

4.5.2 装甲材料における炭化タングステン粉末の応用

WC ベースの装甲材料は、高い硬度と耐貫通性で軍事装備を保護します。

4.5.2.1 戦車の装甲

WC セラミック複合装甲は、ホットプレスと焼結 (1800°C、50MPa) によって製造され、硬度は 2200HV 以上、貫通抵抗は 1200m/s 以上です。WC 粉末 (1~ 5 μm) に TiC (10~20%) を混合し、密度は 14.5g/cm³、厚さは 50mm 未満です。WC の高い硬度は弾丸を粉砕し、TiC の靱性は衝撃エネルギー (500kJ/m² 以上) を吸収します。

ロシアの T-90 戦車は、WC- TiC 複合装甲を採用し、120mm 徹甲弾への耐性を高め、防御効率を 40% 向上させています。中国の 99A 戦車も同様の技術を採用しており、貫通抵抗は 1,300m/s です。将来的には、WC- グラフェン複合装甲によって軽量化と性能向上が期待されます。

4.5.2.2 防弾チョッキプラグイン

軽量 WC 基材は防弾チョッキのインサートに使用されており、重量は <2 kg/m²、硬度は HV 2000、防護レベルは NIJ IV (7.62 mm 弾、860 m/s) です。WC 粉末 (<1 μm) は HIP (1450° C、200 MPa) で製造され、厚さは 5~10 mm、破壊靱性は >10 MPa · m^{1/2} です。米国 Ceradyne 社の WC インサートは重量が 1.8 kg/m² で、防護効率が 30% 向上しています。中国の軍事企業も同様の製品を開発しており、その寿命は 20 回以上の衝撃に耐えます。今後、WC-B₄C 複合材料はさらに軽量化されるでしょう。

4.5.3 宇宙船の耐摩耗部品における炭化タングステン粉末の応用

WC コーティングは、宇宙船の部品における低摩擦と長寿命で知られています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.5.3.1 船内機械

衛星のジョイントは真空および高放射線環境下で動作する必要があります。WC コーティングは真空 PVD（出力 3kW、 10^{-5} Pa）によって堆積され、厚さは 5~15 μm 、摩擦係数は 0.05 未満、寿命は 10 年以上です。WC は高い硬度（HV 1800）と化学的不活性（反宇宙線）を有し、その安定性を保証します。欧州のエアバスは通信衛星のジョイントに WC コーティングを採用しており、摩擦係数は 0.04 で 15 年間稼働しています。中国の北斗衛星も同様の技術を採用しており、寿命は 20%向上しています。将来的には、WC-DLC 複合コーティングによって摩擦がさらに低減されるでしょう。

4.6 炭化タングステン粉末の他の新興用途への応用

多機能材料としての炭化タングステン粉末（WC）は、3D プリンティング、バイオメディカル、インテリジェント製造などの新興分野で応用されてきました。20 世紀末以降、積層造形技術の飛躍的進歩、バイオメディカルにおける高性能材料の需要の高まり、インダストリー 4.0 におけるインテリジェント化の追求に伴い、WC 粉末は、高硬度（HV 2000-2500）、超低摩耗率（ $<0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ）、優れた化学的安定性（耐酸性および耐アルカリ性）および導電性（抵抗率 $<10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ）により、これらの分野の研究ホットスポットとなっています。このセクションでは、3D プリンティングと積層造形、バイオメディカル材料、インテリジェント製造とセンサーの 3 つの側面から、歴史的背景、科学的原理、および産業実践を組み合わせ、炭化タングステン粉末が新興技術でどのようにその潜在力を発揮し、将来のイノベーションをサポートできるかを探ります。

4.6.1 3D プリンティングと積層造形における炭化タングステン粉末の応用

、積層造形（AM）は金属部品製造における重要な技術へと発展してきました。炭化タングステン粉末は、その高い融点（2870°C）、優れた加工性、耐摩耗性により、金属 3D プリントに最適な材料となっています。航空機部品から複雑な金型まで、WC 粉末の応用は従来の製造モデルを変革しつつあります。

4.6.1.1 金属部品の印刷

選択的レーザー溶融（SLM）は、金属 3D プリントのコアテクノロジーです。WC-Co 粉末（コバルト含有量 10%~15%、粒径 1~5 μm ）を使用して、SLM で高密度部品を製造します。密度は 99%以上、精度は $\pm 0.02 \text{ mm}$ です。SLM は、高エネルギーレーザービーム（出力 300~500W、波長 1064 nm）を使用して WC-Co 粉末を層ごとに溶融します。スキャン速度は 800~1200 mm / s、層厚は 20~50 μm 、冷却速度は最大 $10^6 \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$ で、粒径は 2~3 μm に制御され、硬度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は HV 1400~1600、引張強度は > 1200 MPa です。WC は熱伝導率が高く (>120 W/ m・K)、熱膨張係数が低い (5.2×10^{-6} /K) ため、熱応力 (<200 MPa) が軽減され、部品に亀裂が生じず、多孔度が <0.5% になります。

科学的な観点から見ると、WC の六方晶構造 ($a=2.906\text{\AA}$ 、 $c=2.837\text{\AA}$) は高い硬度と変形抵抗を与える一方、コバルトはレーザー溶融中に液相を形成し、WC 粒子を濡らして緻密化を促進します。基板の予熱 (200°C) や不活性雰囲気 (Ar、 $O_2 < 50\text{ppm}$) などのプロセス最適化により、酸化のリスクがさらに低減されます (酸素含有量 <0.01%)。性能試験では、WC-Co 印刷部品の耐摩耗性は従来の鑄造部品の 2 倍、耐食性は塩水噴霧試験で 1000 時間を超え、耐疲労性は 10^6 サイクル以上であることが示されています。

航空機部品のラピッドプロトタイプリングは、SLM における WC-Co 粉末の典型的な例です。米国の GE Aviation 社は、WC-Co 粉末を用いて、寸法 100×50×30 mm、精度 ± 0.015 mm のタービンブレードブラケットを印刷しました。生産サイクルは 3 か月から 2 週間に短縮され、耐摩耗性は 30% 向上し、重量は 15% 削減されました。印刷された部品は、1200°C のガス環境で 5000 時間稼働し、摩耗量は 0.02 mm 未満でした。中国西安の航空会社は、WC-Co 粉末を用いて、密度 99.5%、ノズル径 ± 0.01 mm、燃費 5% 向上のエンジンインジェクターを印刷しました。ドイツのフラウンホーファー研究所による試験では、WC-Co 印刷部品の微細構造均一性 (RSD <5%) は鍛造部品よりも優れており、複雑な形状 (内部流路など) にも適していることが示されています。将来的には、WC-Ni 複合粉末 (Ni 10%~15%) と超微粒子 WC (<1 μm) により、表面品質 ($R_a < 0.05 \mu\text{m}$) と印刷精度 (± 0.01 mm) が向上し、航空宇宙産業や自動車産業におけるカスタマイズ生産が促進されるでしょう。

4.6.1.2 金型製造

ナノ WC 粉末 (<100 nm) は、高硬度 (HV 2000) と微細構造のため、3D プリント用金型に適した材料です。SLM または バインダー ジェットリング で製造されます。SLM プロセスでは、レーザー出力は 400 W、層厚は 20 μm 、ナノ WC の高い比表面積 (> 50 m^2 / g) が焼結活性を高め、金型密度は > 99.8%、表面粗さ $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ 、圧縮強度は > 4500 MPa です。バインダー ジェットリング は、WC 粉末に有機バインダー (PVA など、5%~10%) を噴霧して固め、その後、脱脂 (500°C) および焼結 (1450°C、 H_2 雰囲気) を行い、大規模で低コストの生産に適しており、金型硬度は HV 1800~2000 です。

kN) と摩耗に耐える必要があります。ナノ WC の微粒子 (< 0.5 μm) は、疲労耐性 (> 10^6 サイクル) と破壊靱性 (> 12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) を向上させます。科学的原理では、ナノ WC の高い表面エネルギーが粒子間の結合を促進します。焼結後、粒界密度は > $10^7 / \text{cm}^2$ となり、耐久性が大幅に向上します。ドイツの EOS は、寸法 200×150×50 mm、硬度 HV 2100、寿命 > 500,000 回という SLM 印刷射出成形金型にナノ WC 粉末を使用しています。これは、スチール

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

金型（H13、 $< 100,000$ 回）の 5 倍です。中国上海の金型工場では、バインダーージェット技術を用いて、 $\pm 0.03\text{mm}$ の精度でスタンピング金型を印刷し、生産コストを 40%削減しました。これは自動車部品の成形に適しています。日本のトヨタも、アルミ合金ダイカストにナノ WC 金型を採用しており、表面粗さは $Ra < 0.08\ \mu\text{m}$ 、歩留まりは 99.5%です。将来的には、WC-TiC 複合粉末（TiC 10%~20%）やマルチマテリアル印刷（WC+鋼の傾斜構造など）により、金型の高性能化と複雑な機能統合が実現されるでしょう。

4.6.2 タングステンカーバイド粉末の生体医学材料への応用

WC 粉末のバイオメディカル分野への応用は 20 世紀後半に始まりました。人工関節や歯科修復物の需要が高まる中、その耐摩耗性（摩耗率 $< 0.001\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）と生体適合性（ISO 10993-5）は理想的な選択肢となりました。

4.6.2.1 整形外科用インプラント

WC コーティングは、股関節および膝関節インプラントにおいて、その極めて低い摩耗率と優れた生体適合性から注目を集めています。WC-Ti 複合コーティング（WC 80%、Ti 20%）は、プラズマ溶射または PVD 法によって作製され、厚さ $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 、硬度 HV 1800、摩耗率 $< 0.001\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、細胞生存率 $> 98\%$ を実現しました。WC の高い硬度は関節摩擦に強く（ $> 10^7$ サイクル）、チタンの添加により骨との結合性が向上します（表面多孔度 $> 20\%$ 、骨細胞の付着を促進します）。プラズマ溶射（出力 35kW、アルゴン 40L/分、溶射距離 100mm）により、コーティング結合強度は 50MPa 以上となり、PVD（真空度 10^{-4}Pa 、蒸着速度 0.5nm/s ）により、より高い均一性（厚さ偏差 $< 2\%$ ）が得られます。

性能試験によると、模擬体液（SBF、pH 7.4）における WC-Ti コーティングの腐食速度は $< 0.0005\ \text{mm}/\text{年}$ 、細胞毒性試験の生存率は 99%、耐摩耗性は CoCrMo 合金（摩耗率 $0.005\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）の 5 倍です。米国の Zimmer Biomet は、直径 32mm の股関節ボールヘッドに WC-Ti コーティングを採用し、摩耗率は $0.0008\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 、寿命は 20 年以上、術後の摩耗粉は 70%減少し、炎症のリスクが軽減されました。中国の北京積水潭病院での臨床試験では、WC コーティングされたインプラントの術後感染率は $< 1\%$ 、骨結合強度は $> 10\ \text{MPa}$ 、患者の歩行能力の回復率は 30%増加しました。ドイツのオットー・ボック社も膝関節に WC-Ti コーティングを採用しており、耐摩耗性が 3 倍向上し、寿命は 25 年に達します。将来的には、WC-HA（ハイドロキシアパタイト、10~20%）複合コーティングやナノ WC（ $< 50\ \text{nm}$ ）コーティングにより、骨との結合と抗菌性（銀イオン添加）を最適化し、インプラントのインテリジェント開発を促進すると期待されています。

4.6.2.2 歯科修復

WC ベースの材料は、クラウン、ブリッジ、インプラント修復において、高い破壊強度（ $> 1000\ \text{MPa}$ ）と美観で知られています。WC-Co（Co 5%~8%）または WC-TiC 粉末（粒径 $0.5\sim 2\ \mu\text{m}$ ）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は、ホットプレス（1400° C、40 MPa、H₂雰囲気）によって製造され、硬度 HV 1800、密度 > 99.5%、研磨後の表面粗さ Ra < 0.05 μm と、天然エナメル質（HV 300-400）に近い値を実現します。WC の高い硬度は咀嚼摩耗（> 10⁶ サイクル）に耐え、コバルトまたは TiC の靱性は脆性破壊を回避します（K_{IC} > 10 MPa・m^{1/2}）。技術面では、高温高压プレスにより粒界応力が 100 MPa 未満となり、唾液中での耐腐食性が 1000 時間を超えます。

ドイツの VITA 社は、白歯の修復に WC-Co クラウンを採用しています。このクラウンは、破壊強度が 1200MPa、耐摩耗性が酸化ジルコニウム（ZrO₂、HV 1200）より 50% 高く、寿命は 15 年以上、色合わせ率は 95% 以上です。中国深圳の歯科会社は、硬度 HV 1900、咀嚼力が 800N 以上、患者満足度が 20% 向上した WC-TiC 歯科ブリッジを開発しました。米国の Dentsply Sirona 社も、インプラントアバットメントに WC ベースの材料を採用しており、引張強度が 1100MPa 以上、耐久性が 20 年以上です。将来的には、WC ベースの材料のナノサイズ化（< 100 nm）と表面生体活性コーティング（CaP など、厚さ 2~5 μm）により、修復効果、抗菌性、快適性が向上し、個別の歯科ニーズを満たすことができるようになります。

4.6.3 インテリジェント製造およびセンサーにおけるタングステンカーバイド粉末の応用

スマート製造とセンサー技術は、インダストリー 4.0 の中核を担っています。WC 粉末は、高温安定性（1000°C 以上）、導電性、耐摩耗性を備え、高精度の監視と制御をサポートします。

4.6.3.1 高温センサー

ms）により、高温センサーの産業環境モニタリングをサポートします。WC 粉末（1-3 μm）は、焼結（1600° C、N₂雰囲気、圧力 30 MPa）による感度素子の作製に使用され、硬度は HV 1500、抵抗率は < 10⁻⁵ Ω・cm、密度は > 99% です。WC は融点（2870° C）が高く耐酸化性があるため、高温酸化環境（製鋼炉など、O₂ > 5%）での安定性が保証され、その導電性は電気信号伝導をサポートします（感度 > 10 mV/° C）。技術面では、焼結後の表面に Pt メッキ（厚さ 5 μm、PVD 蒸着）を施すことで感度が向上し、応答時間が 0.8 ms に短縮されます。

製鋼炉の監視は典型的な用途です。米国のハネウェルは、1500°C の溶鋼検出に WC ベースのセンサーを使用しています。精度は ±5°C、寿命は 6 か月以上、応答時間は 0.8ms で、セラミックセンサー（寿命 < 2 か月）の 3 倍です。中国宝鋼集団は、転炉の監視に WC センサーを使用しています。耐熱性は 1200°C、動作安定性は 40% 向上し、故障率は < 0.5% です。ドイツのシーメンスもガスタービンに WC 部品を使用しており、耐熱性は 1300°C、データ取得速度は > 1000 回/秒です。将来的には、WC-グラフェン複合材料（導電性が 20% 向上）と小型設計（サイズ < 1mm）により、航空機エンジンや原子炉へのセンサーの応用が促進されるでしょう。

4.7 炭化タングステン粉末の応用事例とデータ分析

このセクションでは、詳細な概要表、包括的な性能比較、徹底的なケーススタディを通じて、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

さまざまな分野におけるタングステンカーバイド粉末の応用効果を体系的に分析し、豊富な定量的データと実践的な経験を提供して、科学研究と産業応用の参考資料を提供します。

4.7.1 タングステンカーバイド粉末の産業用途概要表

以下は、主要産業における WC 粉末の詳細な応用データの要約であり、セメント炭化物、コーティング、鋳業、電子機器、航空、軍事産業の分野における主要な指標を網羅しています。

分野	代表的な用途	式	硬度 (Hv)	耐摩耗性 ($\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{M}$)	人生	テクノロジー	代表企業
超硬合金	旋削工具	WC-Co (Co 8%)	1500-1800	<0.01	10 万個以上	ホットプレス焼結	サンドビック
表面コーティング	HVOF ブレードコーティング	WC-Co (Co 12%)	1200-1400	<0.01	3000 時間以上	HVOF 溶射	GE アビエーション
採掘ツール	硬岩ドリルビット	WC-Co (Co 10%)	1400-1600	<0.005	1000 メートル以上	真空焼結	アトラスコブコ
電子エネルギー	燃料電池電極	トイロ	1200-1500	-	>10,000 サイクル	PVD 蒸着	バラード
航空・軍事産業	戦車装甲	WC-TiC (TiC 15%)	>2200	-	>1200 m/s の耐貫通性	ホットプレス焼結	ラインメタル
3D プリント	航空部品	WC-Co (Co 15%)	1400-1600	<0.01	5000 時間以上	SLM	GE アビエーション
生物医学科学	股関節コーティング	WC-Ti (Ti 20%)	1800	<0.001	20 歳以上	プラズマ溶射	ジマー・バイオメット

4.7.2 炭化タングステン粉末の性能の比較分析

WC 粉末と従来の材料の性能比較は、硬度、耐摩耗性、寿命、耐熱性などの主要な指標を網羅しており、次のようになります。

硬度:

WC-Co: HV 1500~2200、高速度鋼 (HSS): HRC 60~65 (約 HV 600~800)、20~30 倍の増加。

WC-TiC 装甲: HV >2200、セラミック (Al_2O_3): HV 1500-1800、20%-30% の増加。

耐摩耗性:

WC コーティング: $<0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 、Cr コーティング: $0.05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 、5 倍向上。

WC-Ti 整形外科用コーティング: $<0.001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 、CoCrMo: $0.005 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 、5 倍向上。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

人生:

WC ドリルビット: >1000 m、スチールドリルビット: <300 m、3~5 倍向上。

WC-Co 型: >500,000 回、H13 鋼型: <100,000 回、5 倍の増加。

耐熱性:

WC コーティング: >1300° C、Ni ベース合金: <1000° C、30% 増加。

WC センサー: >1000° C、セラミック センサー: <800° C、25% の増加。

導電性と安定性:

WC 電極: 抵抗率 <10⁻⁵ Ω・cm、カーボンペース: 10⁻³ Ω・cm、100 倍向上、サイクル安定性 >10,000 倍。

これらのデータは、WC 粉末が、特に高温および高負荷環境において、硬度、耐摩耗性、寿命の面で従来の材料をはるかに上回っていることを示しています。

4.7.3 炭化タングステン粉末の成功事例

以下は、WC パウダーの応用結果を示す、世界的に有名な企業の詳細なケース分析です。

サンドビック（スウェーデン）:

製品: WC-Co 深穴ドリル (Co8%、粒度 1~ 3 μm)。

用途: 航空エンジン鋼加工、切削速度 200 m/分、寿命 > 500 m、精度 ± 0.01 mm。

技術: 真空焼結 (1450° C、10⁻² Pa)、TiAlN コーティング (5 μm)。

結果: 世界市場シェアは 20% を超え、生産効率は 40% 向上し、コストは 25% 削減されました。

背景: Sandvik は 1960 年代に岩石掘削ツールに WC を導入し、21 世紀には精密切削にまで拡大しました。

ケナメタル（米国）:

製品: WC- TiC 航空工具 (TiC 10%、Co 10%)。

用途: CFRP 加工、切断速度 250m/分、精度±0.005mm、寿命>500 個。

技術: HIP 焼結 (1450° C、150 MPa)、粒径< 1 μm。

結果: コストが 30% 削減され、ボーイング 787 プロジェクトのサプライヤーとなり、耐摩耗性が 50% 向上しました。

背景: ケナメタルは革新的な複合材料で知られており、その WC- TiC 工具は超硬質材料の加工におけるギャップを埋めています。

株洲セメントカーバイド（中国）:

製品: WC-Co スタンピングダイス (Co 8%、粒子径 2~4 μm)。

用途: 自動車用鋼板の打ち抜き加工、寿命 > 500,000 回、硬度 HV 1600。

技術: ホットプレス焼結 (1500° C、30 MPa)、表面仕上げ Ra<0.05 μm。

成果: 国内売上高 1 位、効率 5 倍、輸出シェア 30%以上。

背景: 株洲は 1960 年代からセメントカーバイド産業を発展させており、現在では世界的に重

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要な生産拠点となっています。

GE アピエーション（米国）:

製品: WC-Co SLM 航空宇宙部品 (Co 15%)。

用途: タービン ブラケット、密度 99.5%、耐熱性 1200° C、寿命 >5000 時間。

技術: SLM (電力 400 W、Ar 雰囲気)、精度 ±0.015 mm。

結果: 生産サイクルが 2 週間に短縮され、重量が 15% 削減され、燃費が 5% 向上しました。

背景: GE は航空積層造形業界をリードしており、WC-Co 部品は GEnx エンジンで大量生産されています。

これらの事例は、さまざまな分野における WC 粉末の技術的成熟度と経済的利点を実証し、業界に貴重な経験を提供します。

4.8 炭化タングステン粉末の将来的な応用展望

炭化タングステン粉末の将来的な応用展望は広く、量子コンピューティングやフレキシブルエレクトロニクスといった最先端分野を網羅する一方で、ナノスケール化や高温安定性といった技術的課題にも直面しています。本セクションでは、WC 粉末の新たな可能性、技術的ソリューション、市場予測を詳細に分析し、将来の発展の青写真を描きます。

4.8.1 新興分野における炭化タングステン粉末の可能性

量子コンピューティング冷却コンポーネント:

背景: 量子コンピューティングには超低温 (<10 K) 環境が必要です。従来の銅 (Cu、熱伝導率 400 W/ m・K) では、高密度の熱管理要件を満たすことが困難です。

用途: WC は高い熱伝導率 (>120 W/ m・K) と低温安定性を備えており、超伝導量子チップの放熱に適しています。米国 IBM は、WC-グラフェン複合材料の研究を進めており、熱伝導率は 150~200 W/ m・K まで向上し、熱膨張係数は $5 \times 10^{-6}/K$ 未満となることが期待されており、1K でのチップの安定動作が保証されます。

H₂+CH₄雰囲気中、800°C で WC-グラフェン膜 (厚さ 10~ 20 μm) を CVD 堆積。

ポテンシャル: 量子ビット寿命が 20%延長し、冷却効率が 30%向上。2030 年までに実用化が見込まれる。

柔軟な電子導電層:

背景: フレキシブルエレクトロニクス (ウェアラブルデバイスなど) には、薄く、軽量で、導電性の高い材料が必要です。従来の ITO (インジウムスズ酸化物) は脆く、高価です。

用途: ナノ WC 粉末 (<50 nm) は、インクジェット印刷によりフレキシブル導電フィルムを製作するために用いられます。抵抗率は $<10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 、曲げ半径は 10^5 回以上 (曲率半径 <5 mm) です。韓国サムスンによるテストでは、WC フィルムの厚さは 5~10 μm、透過率は 85% 以上であり、OLED ディスプレイに適しています。

技術: インクジェット印刷 (インク濃度 10 重量%、超音波分散 50W)、焼結温度 500°C。

潜在性: コストが 50% 削減され、フレキシブル エレクトロニクスの市場シェアは 2025 年

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の 10% から 2030 年には 25% に増加すると予想されます。

その他の可能性:

核融合炉壁材: WC は融点 (2870° C) が高く、耐放射線性があるため、トカマク装置に使用でき、耐熱衝撃性は 2000° C を超えます。

深海探査耐圧部品: WC-Co 複合材料 (Co 10%) は、圧縮強度が 4500 MPa を超え、10 万メートルの深海の圧力に耐えることができます。

4.8.2 炭化タングステン粉末の技術的課題と解決策

ナノ WC 粉末の分散性の向上:

課題: ナノ WC (<100 nm) は表面エネルギーが高いため凝集しやすく、硬質凝集率は 20% を超え、印刷およびコーティングの均一性に影響を与えます。

現状: 従来の分散剤 (PVP など) の効果には限界があり、凝集率は依然として 10% を超え、焼結後の多孔度は 5% を超えています。

解決:

表面改質: WC 粒子をポリアクリル酸 (PAA, 0.5%~1%) でコーティングし、表面ゼータ電位を -10 mV から -30 mV に増加させ、凝集率を 5% 未満に低減しました。

超音波分散: 超音波パラメータが最適化され (50 W、10 分、周波数 40 kHz)、平均粒子サイズは 200 nm から 80 nm に減少しました。

プラズマ処理: 低温プラズマ (出力 100W、Ar 雰囲気) により表面有機物を除去し、分散安定性を 50% 向上します。

展望: 分散性が改善された後、SLM におけるナノ WC の適用効率は 30% 増加し、コーティングの多孔度は 1% 未満になります。

高温コーティングの安定性が向上:

課題: WC コーティングは 1500° C を超えると容易に酸化されて WO_3 を形成しますが、耐酸化性が不十分で寿命は 1000 時間未満です。

現状: 従来の WC-Co コーティングは 1300° C で限界に達しており、航空宇宙分野ではより高い耐熱性 (>1800° C) が求められています。

解決:

複合添加: ZrC (10%~20%) または TaC (5%~15%) を添加して高温安定相 (融点 >3000° C)

を形成し、耐酸化性が 1800° C まで向上します。

コールドスプレー技術: スプレー温度 <500° C、粒子速度 >1000 m/s、高温酸化を回避、コーティング寿命 >2000 時間。

傾斜構造: WC- Al_2O_3 傾斜コーティング (厚さ 200~500 μm) を設計、表面耐熱性 >2000° C、内部靱性 >10MPa $\cdot m^{1/2}$ 。

展望: ロケットノズルの高温コーティングにより、寿命が 50% 延長され、核融合と超音速飛行のニーズを満たすことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

その他の課題:

コスト管理: ナノ WC 粉末の価格は 500 元/kg を超えており、プラズマ調製効率を最適化して 300 元/kg 未満に下げする必要があります。

環境保護: WC 生産における CO 排出量は、リサイクル技術を通じて 90% 以上削減する必要があります。

4.8.3 炭化タングステン粉末の市場予測

MarketsandMarkets 他)によると、2030 年までの WC 粉末需要の動向は以下のとおりです。

全体的な成長:

年間成長率: >6% (2025-2030)、市場規模は 2023 年に約 150 億米ドル、2030 年には 250 億米ドルを超えると予想されます。

推進要因: 航空宇宙 (タービン需要)、新エネルギー (バッテリーと触媒)、3D プリントの普及。

主な分析領域:

航空宇宙 (30%):

需要: WC コーティングと装甲の需要は年間 8% 増加し、2030 年には 35% を占めることになります。

事例: GE とロールスロイスは、WC 部品の割合を 10% から 20% に増やす計画です。

新エネルギー (25%):

需要: 燃料電池およびリチウム電池用の WC 粉末は年間 10% 成長し、市場規模は 2030 年に 60 億米ドルを超えると予想されます。

事例: テスラとバラードの拡張計画により需要が倍増。

3D プリンティング (15%):

需要: ナノ WC パウダーは年間 12% 増加し、2030 年までに積層製造材料の 20% を占めることとなります。

事例: EOS と GE Additive は、WC 印刷の生産量が 5 倍に増加すると予測しています。

鉱業および建設業 (20%)

需要: インフラ建設の牽引により、5% の安定した成長。

バイオメディカル (5%):

需要: 年間成長率 15%、市場規模は 2030 年に 10 億米ドル超。

地域分布:

中国: 世界全体の 40% を占め、株洲などの拠点では年間 5 万トンを超える生産を行っている。

ヨーロッパ: 25%、サンドビックと EOS が技術革新をリード。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

北米：20%、GE と Kennametal がハイエンド アプリケーションを推進。

技術動向の影響：ナノ WC パウダーの割合は 2023 年の 5% から 2030 年には 15% に増加し、市場をハイエンド開発へと推進すると予想されます。

参考文献

中国語参考文献

- [1] GB/T 4295-2008 タングステンカーバイド粉末 中国国家標準化局 2008 タングステンカーバイド粉末に対する技術要求および試験方法を規定している。
- [2] GB/T 34503-2017 硬質金属岩石掘削工具 中国国家標準化局 2017 岩石掘削工具用の超硬合金の特性および試験方法を規定しています。
- [3] GB/T 5314-2011 セメント炭化物粉末 中国国家標準化局 2011 セメント炭化物粉末の性能試験方法を規定している。
- [4] GB/T 19077-2016 粒度分布 - レーザー回折法 中国国家標準化局 2016 レーザー回折法による粒度分布の測定方法を規定している。
- [5] GB/T 25995-2010 タングステン粉末及びタングステンカーバイド粉末-フィッシャーサブシープサイザー (FSSS) 粒子サイズの測定 中国国家標準化局 2010 フィッシャーサブシープサイザー (FSSS) 粒子サイズの測定方法を規定している。
- [6] GB/T 36418-2018 超硬合金の耐摩耗性試験方法 中国国家標準化局 2018 超硬合金の耐摩耗性試験方法を規定している。
- [7] GB/T 38494-2020 超硬合金の圧縮強度試験方法 中国国家標準化局 2020 年超硬合金の圧縮強度試験方法を規定している。

英語の参考文献

- [8] Lassner, E., & Schubert, WD (1999) Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds Springer タングステンとタングステンの物理的、化学的特性と応用技術を紹介しています。
- [9] Upadhyaya, GS (1998) セメントタングステンカーバイド：製造、特性および試験ウィリアムアンドリュ出版タングステンカーバイド粉末の製造、特性および試験方法を詳述している。
- [10] Pawlowski, L. (2008) The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings (第2版) John Wiley & Sons 熱噴霧コーティング技術の科学と工学の応用について説明します。
- [11] Davis, JR (編) (2004) 『ASM International 熱噴射技術ハンドブック』熱噴射技術のプロセスとアプリケーションのガイダンスを提供します。
- [12] Prakash, LJ (2014) Hardmetals and Mining Applications Comprehensive Hard Materials Vol. 2 345-370 Elsevier 鉱業分野におけるセメントカーバイドの応用技術の分析。
- [13] Levy, RB, & Boudart, M. (1973) 表面触媒におけるタングステンカーバイドの白金類似挙動 Science 181(4099) 547-549 <https://doi.org/10.1126/science.181.4099.547> 表面触媒におけるタングステンカーバイドの白金類似特性を明らかにする。
- [14] Chen, WF, Wang, CH, Sasaki, K., et al. (2013) Highly active and durable nanostructured WC as a non-precious metal electrocatalyst for PEM fuel cell Nature Communications 4 2439 燃料電池におけるナノタングステンカーバイドの導電性と耐久性を

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

研究する。

[15] ASTM B213-20 (2020) ホール流量計ファンネルを使用した金属粉末の流量の標準試験方法 ASTM International は、粉体の流動性を測定するためのホール流量計を規定しています。

[16] ASTM E384-17 (2017) 材料のマイクロインデンテーション硬度の標準試験方法 ASTM International はピッカース硬度試験方法を規定しています。

[17] ASTM G65-16 (2016) 乾いた砂/ゴムホイール装置を使用した摩耗測定の方法の標準試験方法 ASTM International は、乾いた砂/ゴムホイール摩耗試験方法を規定しています。

[18] ASTM E1019-18 (2018) 各種燃焼および不活性ガス溶融技術による鋼、鉄、ニッケル、コバルト合金中の炭素、硫黄、窒素、酸素の測定のための標準試験方法 ASTM International は、酸素含有量の測定方法を規定しています。

[19] ISO 3327:2009 (2009) 硬質金属- 横方向破壊強度の測定 国際標準化機構 圧縮強度試験方法を規定している。

[20] ISO 4499-2:2020 (2020) 硬質金属- 金属組織学的評価 - パート 2: WC 粒径の測定 国際標準化機構は、WC 粒径の顕微鏡的測定方法を規定しています。

[21] ISO 9277:2010 (2010) ガス吸着による固体の比表面積の測定 - BET 法 国際標準化機構 比表面積の測定に BET 法を規定している。

[22] ISO 10993-5:2009 (2009) 医療機器の生物学的評価 - パート 5: インビトロ細胞毒性試験 国際標準化機構 インビトロ細胞毒性試験方法を規定している。

[23] サンドビック・コロマント (2022) 技術ガイド: 切削工具と摩耗部品 サンドビックグループ 切削工具と摩耗部品の産業技術ガイドを提供しています。

[24] Wu, Z., & Zhang, J. (2020) リチウムイオン電池集電体用タングステンカーバイドコーティング: レビュー Journal of Power Sources 475 228689 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228689> リチウムイオン電池集電体へのタングステンカーバイドコーティングの応用に関するレビュー。

[25] Zhang, Z., Liu, W. (2019) 岩石掘削ツールにおける WC-Co セメントカーバイドの研究 国際耐火金属および硬質材料ジャーナル 81 123-130

他の言語での参考文献

[26] 日本規格協会 (2005) JIS H 7803:2005 炭化タングステン粉末の試験方法 日本規格協会 中国語訳: 炭化钨粉末测试方法 炭化タングステン粉末の化学的および物理的試験方法を規定しています。

[27] Γ O C T 25599.1-83 (1983) 超硬合金粉末 - 炭素含有量の測定方法 ソ連国家規格委員会 中国語訳: 硬质合金粉末 - 炭素含有量測定方法 超硬合金粉末中の炭素含有量の化学分析方法を規定しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT




www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (± 0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤ 0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤ 0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance.

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within $\pm 10\%$.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm^3 (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm^3 (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤ 0.05	≤ 0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
Brand					
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

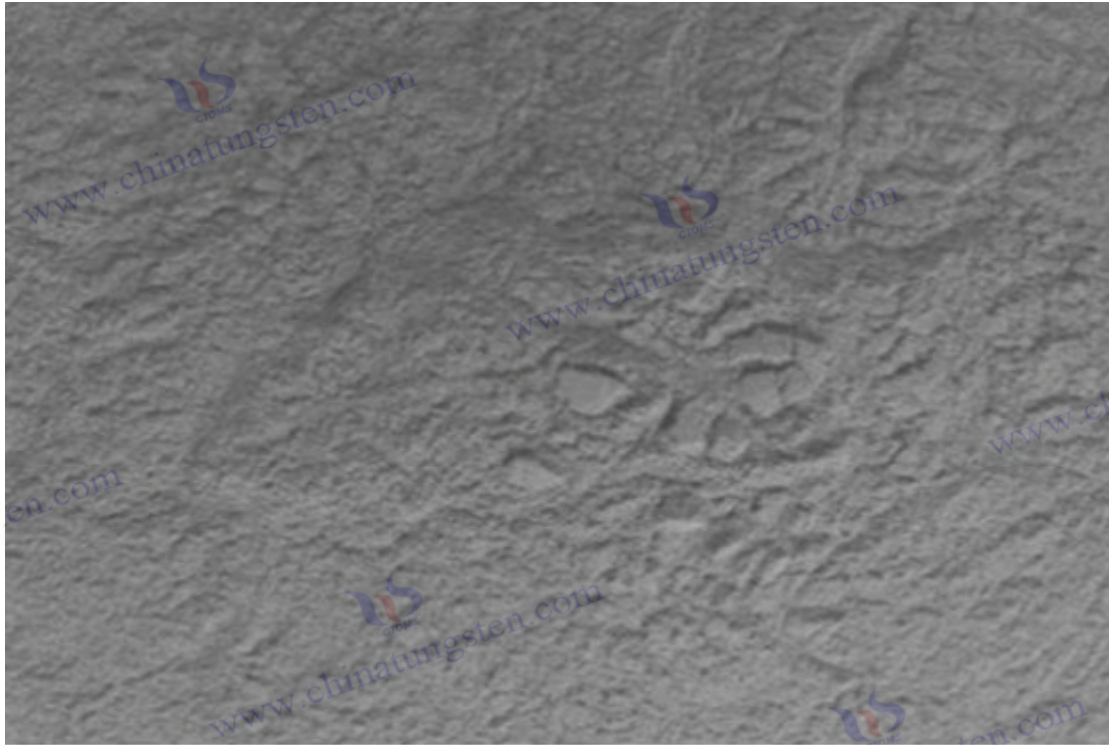
For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第5章 炭化タングステン粉末の品質管理と規格

超硬合金、切削工具、表面コーティングなどの高性能材料の中核原料であるタングステンカーバイド粉末の品質は、最終製品の性能と市場競争力を直接左右します。グローバル化した産業において、タングステンカーバイド粉末の品質管理と標準化は、製品の一貫性を確保する鍵となるだけでなく、技術進歩と産業の高度化を促進する重要な原動力でもあります。本章では、タングステンカーバイド粉末の製造および試験規格について、品質管理のポイント、国際規格、国内規格、規格の比較と適用性の4つの側面から体系的に解説し、関係者に詳細な技術参考資料と実践的なガイダンスを提供することを目指します。

5.1 品質管理のポイント

炭化タングステン粉末の品質管理は、原料の選定、プロセスの最適化から完成品の試験に至るまで、生産チェーン全体にわたっており、化学組成、粒度分布、結晶構造、物理的特性など、様々な側面を考慮します。科学的かつ厳格な品質管理は、製品の性能を向上させるだけでなく、生産コストと環境への影響を効果的に削減することができます。以下では、品質管理の要点を多角的に深く分析し、読者の皆様に包括的な知識基盤と実践的な提案を提供することを目指します。

化学組成の精密管理

化学組成は炭化タングステン粉末の品質の中核であり、結晶構造、硬度、耐摩耗性に直接影響します。炭化タングステン（WC）の理論上の炭素含有量は6.13%（質量分率）ですが、実際の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

製造においては、総炭素量、遊離炭素量、酸素含有量、不純物元素のわずかな偏差が性能上の問題を引き起こす可能性があります。

総炭素と自由炭素のバランス

総炭素含有量が低すぎると、硬度が低く割れやすい準安定相である W_2C 相が形成される可能性があります。一方、総炭素含有量が高すぎると遊離炭素が発生し、粉末の密度と焼結性が低下します。通常、WC 単相の安定性を確保するには、遊離炭素含有量を 0.08%~0.1% の範囲に制御する必要があります。

酸素含有量の厳しい制限

酸素含有量は粉末の活性に影響を与える重要な指標です。酸素含有量が高い（0.2%超）と、焼結中に気孔が発生し、合金の機械的特性が低下します。特に超微粉では、比表面積が大きいいため酸素を吸着しやすいため、酸素含有量の制御が特に重要です。

不純物元素の精密制御

鉄、コバルト、カルシウム、シリコンなどの不純物は、原材料や製造設備に由来する可能性があります。鉄含有量が高すぎると粉末の純度が低下し、焼結挙動に影響を与えます。また、カルシウムやシリコンなどの非金属不純物は、粒界に脆い相を形成し、靱性を低下させる可能性があります。現代の製造では、不純物レベルは 10~50ppm（百万分率）まで低く抑える必要があります。

検出技術

高温燃焼法

炭素硫黄分析装置により、最大 0.01% の検出精度で総炭素および遊離炭素含有量を正確に測定できます。

誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）：ppb（10 億分の 1）という低い検出限界で微量不純物元素を分析するために使用されます。

赤外線吸収法

酸素含有量を迅速に測定します。生産現場で広く使用されています。

経営戦略

原料からの不純物の混入を減らすには、高純度タングステン粉末（純度 $\geq 99.95\%$ ）とカーボンブラック（灰分 $< 0.1\%$ ）が好まれます。

炭化反応中は、不完全な炭化や過剰な炭化を避けるために、温度（1400~1600℃）、雰囲気（水素または真空）、保持時間を正確に制御します。

多段階のろ過および精製プロセスを実装して、粉末と外部環境の接触を減らします。

粉末の各バッチの制御可能性を確保するために、化学組成のバッチトレーサビリティシステムを確立します。

知識開発

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

近年、ナノスケールの炭化タングステン粉末の応用が拡大するにつれ、化学組成の制御はますます困難になっています。例えば、3D プリント分野では、印刷プロセス中の酸化反応を防ぐため、酸素含有量を 0.05%以下に制御する必要があります。そのため、メーカーはより高度な試験装置（X 線光電子分光法（XPS）など）とオンラインモニタリング技術の導入を求めています。

粒度と分布の科学的規制

炭化タングステン粉末の粒度と分布は、最終製品の成形、焼結挙動、および微細構造に大きな影響を与えます。異なる粒度の粉末は様々な用途に適しており、粒度分布の均一性は製品の性能の一貫性を決定します。

粒度分類

超微粒子粉末 (<1 μm): 極めて高い表面仕上げが求められる高精度切削工具やマイクロエレクトロニクス部品に適しています。

微粉末 (1~3 μm): 硬度と靱性の両方を考慮した超硬合金工具に広く使用されています。

中粉末 (3~10 μm): 耐摩耗コーティングや重荷重用金型に適しており、成形性に優れています。

粗粉末 (> 10 μm): 耐衝撃性を重視し、溶射や採掘ツールに使用されます。

粒度分布の重要性: 粒度分布が狭い (D90/D10 < 2) と、焼結均一性が向上し、気孔率を低減できます。一方、粒度分布が広いと、収縮が不均一になり、寸法精度に影響を及ぼす可能性があります。特に超微粉では凝集の問題が顕著であり、特別な注意が必要です。

異なる粒子サイズの WC 粉末のプロセス性能相関

粒子サイズ範囲	比表面積 (BET, m ² /g)	焼結温度 (°C)	相対密度 (%)	HV30	K _{IC} (MPa・m ^{1/2})
>10 μm	0.8~1.2	1450-1500	92.3±0.5	1420	9.8
3~10 μm	2.5~4.0	1400-1450	95.1±0.3	1780	11.2
0.5~1 μm	8.0~12.0	1320-1380	98.7±0.2	2090	12.7
0.1 μm 未満	15.0~20.0	1300-1350	97.5±0.4	2350	10.5

検出技術

レーザー粒度分布分析装置: 光散乱の原理に基づき、0.01~1000 μm の粒度分布を高精度に測定でき、超微粉末に適しています。

ふるい分け方法: 標準ふるいによる分級。粗い粉末の迅速な検出に適しています。

沈降法: 粒子の沈降速度の差を利用して粒度分布の均一性を検証するもので、実験室での研究に適しています。

走査型電子顕微鏡 (SEM): 粒子の形態とサイズを視覚的に観察し、粒子サイズ分析結果の検証を支援します。

規制戦略

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

粉碎プロセスを最適化します。粉碎媒体として炭化タングステンボールまたは酸化ジルコニウムボールを選択し、ボールミル時間（8 ～ 24 時間）と回転速度（200 ～ 400 rpm）を制御して、粒子の破損につながる過度の粉碎を回避します。

特定の粒子サイズ範囲内の粉末を正確にふるい分けできる遠心気流分級装置などの分級装置の導入。

分散剤（ポリエチレングリコール、PEG など）の添加：超微粉末の凝集傾向を低減し、分散の均一性を向上させます。

粒子サイズデータの信頼性を確保するために、テスト機器を定期的に校正します。

知識開発

粒子サイズ制御の最新トレンドはナノスケール（<100nm）へと向かっており、従来の粉碎・分級技術では課題となっています。例えば、湿式粉碎と超音波分散を組み合わせることで、ナノパウダーの分散性を大幅に向上させることができますが、コストと性能のバランスを取る必要があります。さらに、動的光散乱（DLS）などの粒子サイズ分布のオンラインモニタリング技術が登場しており、リアルタイムの品質管理の実現が期待されています。

結晶構造と相組成の安定性により、

理想的な炭化タングステン粉末は主に WC 単相で構成され、その六方晶系結晶構造は優れた硬度と耐摩耗性をもたらします。予期せぬ相（ W_2C 、W、遊離炭素など）の存在は粉末の性能を著しく低下させるため、結晶構造と相組成の制御は品質管理の最優先事項です。

影響要因

炭化温度：高すぎると（> 1600° C）、粒成長を引き起こし、粉末の活性が低下する可能性があります。低すぎると（< 1400° C）、 W_2C 相が生成される場合があります。

炭素源比率：炭素が不足すると炭素不足になり、炭素が過剰になると遊離炭素が生成されません。

反応雰囲気：水素雰囲気は酸素の除去に役立ちますが、水素による粒界欠陥を防ぐために過剰な水素を避ける必要があります。

検出技術

X 線回折（XRD）：相組成を正確に分析し、WC、 W_2C 、遊離炭素の比率を最大 0.1% の定量精度で検出します。

走査型電子顕微鏡（SEM）：粒子の形態、サイズ、表面欠陥を観察し、結晶構造の均一性を評価します。

透過型電子顕微鏡（TEM）：ナノスケールの粉末の結晶構造分析に使用され、原子スケールの欠陥を明らかにします。

ラマン分光法：遊離炭素の存在を検出するのに役立ちます。特に超微粉末に適しています。

セーフガード

炭化炉の温度勾配（加熱速度 5～10°C/分）と保持時間（2～4 時間）を正確に制御します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

不純物が結晶構造に与える影響を減らすには、高純度炭素源（グラファイト粉末など、純度 99.9% 以上）が推奨されます。

酸化や脱炭を防ぐために、雰囲気保護（アルゴンまたは水素混合雰囲気など）を使用してください。

相構成のデータベースを確立し、さまざまなプロセス条件下での構造変化を追跡します。

知識開発

シンクロトロン X 線回折（XRD）や中性子回折といった高解像度分析技術の発展により、研究者は炭化タングステン粉末の結晶欠陥や応力分布をより正確に評価できるようになりました。これらの技術は、特に WC 単相の純度が 100% に近づくことが求められる航空宇宙分野において、浸炭プロセスの最適化に向けた新たなアイデアを提供します。

粉末の流動性と見かけ密度の最適化設計

粉末の流動性はプレス効率と金型充填の均一性に影響を与え、見かけ密度は焼結収縮率と製品密度に密接に関連しています。高品質の炭化タングステン粉末は、様々な成形プロセスのニーズを満たすために、流動性と密度のバランスをとる必要があります。

流動性の重要性: 流動性の低い粉末は、成形体中に層間剥離や空隙を発生させ、製品強度を低下させる可能性があります。高品質粉末のホールフローレートは通常 15~25 秒/50g の範囲です。超微粉は粒子間の強いファンデルワールス力により流動性が低下するため、特別な最適化が必要です。

見かけ密度の重要性

見かけ密度は粉末のバルク特性を反映し、通常は 3.0~5.0 g/cm³ の範囲です。見かけ密度が低いと焼結収縮が過度に大きくなり、寸法精度に影響を与える可能性があります。一方、見かけ密度が高いと成形性が低下する可能性があります。

検出技術

ホール流量計: 粉体が標準漏斗を通過するのにかかる時間を測定します。操作が簡単で、現場での試験に適しています。

タップ密度計: 振動後の粉体の体積密度を測定し、粒子の詰め込みの緻密さを反映します。

回転ドラム法: 成形プロセス中の粉末の動的挙動をシミュレートし、実際の流動性を評価します。

最適化戦略

スプレー造粒技術の使用: 球形またはほぼ球形の粉末を調製し、流動性を大幅に向上させます。

粒度分布の調整: 微粒子の割合を適切に増やして、粒子間の充填効果を最適化します。

表面改質: プラズマ処理または少量のバインダー（パラフィンなど、添加量は 0.5% 未満）の添加により、粒子間の摩擦を低減します。

粉末の水分含有量を制御します。水分含有量が高すぎると流動性が低下するため、0.1% 未満に制御することをお勧めします。

知識の拡張: 近年、流動性に関する研究は、離散要素法（DEM）などのコンピュータシミュレ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ーション技術に徐々に統合され、金型内の粉末の流動挙動をシミュレーションし、層間剥離のリスクを予測できるようになりました。これは、造粒プロセスと金型設計の最適化に理論的な裏付けを提供し、特に自動化生産において重要です。

環境と保管条件の体系的な管理

炭化タングステン粉末は湿度と酸素に非常に敏感です。不適切な保管は酸化、吸湿、性能低下につながる可能性があります。科学的な環境管理は、粉末の寿命を延ばし、安定した品質を確保する鍵となります。

酸化リスク：酸素は炭化タングステン粉末と反応して酸化タングステン (WO_3) を形成し、粉末の活性を低下させ、焼結欠陥を引き起こす可能性があります。超微粉末は比表面積が大きいいため、酸化リスクが高くなります。

吸湿の問題：水分の吸着により粉末が凝集し、流動性が低下する可能性があります。深刻な場合には、化学反応を引き起こし、水酸化物を生成する可能性があります。

環境要件：

温度：酸化を促進する高温を避けるため、保管環境を 15 ~ 25° C に保ちます。

湿度：水分の吸収を防ぐために相対湿度を 30% ~ 50% に制御する必要があります。

光：粉末表面での光化学反応を防ぐため、強い光への露出を避けてください。

管理措置

真空包装または窒素包装：空気と湿気を遮断して保存期間を延ばします。

低湿度環境を維持するための分子ふるいやシリカゲル乾燥剤などの除湿装置を装備。

保管条件を定期的に確認してください。温湿度計と酸素分析装置を使用し、環境パラメータを記録します。

輸送プロセスを最適化します。衝撃に強く、防湿性のある複合梱包材を使用して、粉末の損傷を防ぎます。

保管ファイルを確立し、粉末の各バッチの保管時間、環境条件、性能の変化を記録します。

知識の拡張：現代の保管技術は、インテリジェンス化の方向へと発展しています。例えば、モノのインターネット (IoT) 技術は、保管環境の温度と湿度をリアルタイムで監視し、クラウドコンピューティングを通じて粉末の経年劣化の傾向を分析することができます。これは保管効率を向上させるだけでなく、品質トレーサビリティのためのデータサポートも提供します。

品質トレーサビリティとデジタル管理

インダストリー4.0時代の品質管理は、プロセス全体のトレーサビリティとデータに基づく意思決定を重視しています。デジタル管理は、生産、試験、保管データを統合することで、タングステンカーバイド粉末の品質最適化への新たな道を提供します。

トレーサビリティシステム：

バッチ管理：粉末の各バッチに一意的識別子を割り当て、原材料の供給元、製造パラメータ、テスト結果を記録します。

ブロックチェーン技術：データの改ざんを防止し、品質認証の信頼性を高めます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

デジタルツール：

オンライン監視：リアルタイムの粒子サイズ分析装置や化学組成検出器などにより、プロセスの逸脱をタイムリーに検出します。

統計的プロセス制御（SPC）：品質変動のパターンを分析し、プロセスパラメータを最適化します。

人工知能（AI）：機械学習を通じて粉体の特性を予測し、プロセス改善を支援します。

実装戦略：

生産データと品質データを統合するエンタープライズリソースプランニング（ERP）システムを構築します。

従業員にデータ分析ツールを習得させ、デジタル管理能力を向上するためのトレーニングを行います。

データの客観性を確保するために、試験機関と協力し、第三者による検証を導入します。

知識の拡張：デジタル経営における最新の進歩には、仮想モデルを用いてタングステンカーバイド粉末の製造プロセスをシミュレーションし、品質リスクを予測するデジタルツイン技術が含まれます。この技術は欧米の大手タングステン企業で既に導入されており、今後中国でも普及が進むと予想されています。

5.2 国際規格

国際規格は、炭化タングステン粉末の品質管理のための世界的な枠組みを提供し、異なる国や市場における製品の統一性と比較可能性を確保します。これらの規格は権威ある機関によって策定され、化学組成、物理的特性、試験方法などの側面を網羅しており、超硬合金、コーティング、工具製造において広く利用されています。以下では、主要な国際規格とその適用シナリオを詳細に分析し、読者の皆様に明確な参考資料を提供することを目的としています。

ISO 規格

国際標準化機構（ISO）は、試験方法の科学的性質と結果の再現性を重視し、超硬合金粉末に関する一連の規格を策定しました。これらの規格は、特に EU およびアジア市場において、世界中で広範な影響力を持っています。

ISO 4499-1:2008：超硬合金用サーメット粉末 - 化学分析方法。

内容説明：本規格は、全炭素、遊離炭素、酸素、鉄、コバルト、カルシウム等の元素の測定方法を規定し、ICP-MS（検出限界 10ppb）や赤外線吸収法（酸素含有量精度 0.01%）等の高精度技術の使用を推奨しています。また、干渉因子を除去するため、サンプルの前処理（酸溶解、乾燥等）についても厳格な要求事項を規定しています。

アプリケーションシナリオ

特に化学組成の純度が極めて高い航空宇宙、医療機器の分野における輸出志向の超硬合金生産企業に適しています。

利点と課題

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

標準的な方法は科学的かつ厳密ですが、試験機器（ICP-MS など）に対する要件が高く、中小企業はコスト圧力に直面する可能性があります。

ISO 4499-2:2008: 超硬合金用サーメット粉末 - 物理的特性の試験。

内容詳細: 粒度分布、見かけ密度、タップ密度、流動性に関する試験仕様を網羅しています。レーザー粒度分布計（測定範囲: 0.01~1000 μm）とホールフローメーター（精度: ±0.1 秒）の使用を推奨しています。また、試験環境の温度と湿度（20±2℃、湿度: 50%未満）も明確に規定されています。

適用シナリオ: 特に粒度分布の均一性が重要な高精度ツールや 3D プリントの分野で、粉末の成形性能を評価するのに適しています。

利点と課題: 標準的な操作は簡単で、結果の比較可能性も高いですが、超微粉末の凝集問題に関する詳細なガイダンスが不足しており、補助的な分析のために他の方法（SEM など）を組み合わせる必要があります。

ISO 3326:2013: セメント炭化物 - 硬度の測定方法。

内容説明: 本規格は主に超硬合金完成品を対象としていますが、間接的に炭化タングステン粉末の品質要求にも影響を与えます。本規格は、ピッカー硬度（HV）およびロックウェル硬度（HRA）の試験方法を規定し、粉末結晶構造の安定性が硬度に及ぼす影響を重視しています。

応用シナリオ: 航空宇宙ツールや耐摩耗部品などのハイエンドアプリケーションに適しており、粉末の結晶純度は 99.9% 以上に達する必要があります。

利点と課題: この規格は完成品の性能に関する基準を提供しますが、粉末に対する直接的なテストガイダンスが少ないため、他の規格と組み合わせて使用する必要があります。

知識の拡張: ISO 規格は近年継続的に更新されています。例えば、ISO 4499-2020 の改訂版では、ナノ粉末の検出方法が追加され、超微粒子タングステンカーバイド粉末市場の急速な成長を反映しています。企業は技術の進歩に対応するために、最新バージョンに注意を払う必要があります。

ASTM 規格

米国材料試験協会（ASTM）規格は、その実験方法の正確性と実用性で知られており、北米市場、特にセメントカーバイドおよびコーティング業界で広く使用されています。

ASTM B761-17: 炭化タングステン粉末の粒度分布の試験方法。

内容説明: 本規格は、0.1~100 μm の粉体に適用可能なレーザー光散乱法及びふるい分け法の操作手順を詳細に規定しています。レーザー光散乱法はミー散乱理論に基づき、高精度で超微粉に適しています。ふるい分け法は操作が簡単で粗粉に適しています。また、本規格はサンプルの分散（超音波処理など）に関する具体的な推奨事項も提供しています。

応用シナリオ: 3D プリント、溶射、ナノコーティング分野に適しています。粒子サイズ分布の均一性は、印刷品質とコーティング性能に直接影響します。

利点と課題: 標準的な方法は成熟しており、設備の浸透率も高いですが、超微粉末の凝集制御に対する要件が高く、分散剤と併用する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM E194-10: 粉末冶金材料中の酸素含有量の測定。

内容説明: 酸素含有量は不活性ガス溶融法によって測定され、検出限界は 1ppm と極めて低く、高純度粉末に適しています。規格では、高周波誘導炉（出力 2kW 以上）を使用してサンプルを溶融し、酸素を放出させ、赤外線検出器で分析することが規定されています。

応用シナリオ: 高性能超硬合金および航空宇宙材料に適しています。焼結欠陥を防止するため、酸素含有量を 0.05%~0.1% に制御する必要があります。

利点と課題: 検出精度は非常に高く、ハイエンドのアプリケーションに適していますが、設備コストが比較的高く（約 50 万~100 万人民币）、専門的な操作が必要です。

ASTM B659-90(2014): 金属および無機コーティングの厚さを測定するためのガイド。

内容説明: 本規格は主にコーティングを対象としていますが、炭化タングステン粉末の品質要件を間接的に規定しており、粉末粒子径の均一性と化学的安定性がコーティング品質に与える影響に重点を置いています。本規格では、コーティング厚さの測定に顕微鏡検査と蛍光 X 線法の使用を推奨しています。

適用シナリオ: 溶射、プラズマ溶射、レーザークラディングに適しています。均一なコーティングを確保するには、粉末の見かけ密度と流動性を最適化する必要があります。

利点と課題: この規格はコーティングアプリケーションに関する間接的なガイダンスを提供しますが、粉体に関する直接的なテスト内容が少なく、他の規格と組み合わせる必要があります。

知識の拡張: ASTM 規格は実用的なアプリケーションに重点を置いており、近年では 3D プリンティングなどの付加製造に関する仕様が追加されています。

ASTM F3049 は、炭化タングステン粉末の粒子サイズと流動性に関する要件を間接的に規定しています。これは、この規格が新興技術に迅速に対応していることを反映しています。

で ISO や ASTM に加えて、一部の国や地域でもタングステンカーバイド粉末に関する関連規格を制定しており、現地の産業特性を組み合わせることで世界標準システムを補完しています。

JIS Z 2503:2015 (日本工業規格):

内容説明: 炭化タングステン粉末の化学組成（全炭素量、酸素量、不純物）、粒度分布、物理的特性（見かけ密度、流動性）の試験方法を規定しています。本規格は製造プロセスの安定性を重視し、粉末バッチごとの炭化温度および雰囲気条件の記録を義務付けています。

適用シナリオ: 日本および韓国市場、特に自動車産業やエレクトロニクス産業における超硬合金およびコーティング生産に適しています。

利点と課題: この規格はアジア市場の機器レベルを統合しており、実装コストは低くなりますが、国際化レベルは ISO ほど高くありません。

DIN EN ISO 4499 (ドイツ規格):

内容説明: ISO 4499 シリーズとの整合性が高く、生産設備の校正（XRD 装置の年次校正など）や環境管理（生産現場の湿度を 40%未満にするなど）に関する要件を補完しています。また、超微粉の検出方法も改良されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応用シナリオ：ドイツやオーストリアなどのヨーロッパ諸国、特に精密機械や航空宇宙の分野で広く使用されています。

利点と課題：この標準はプロセスの詳細に重点を置いており、技術集約型の企業に適していますが、中小企業にはあまり適用できません。

BS EN 規格（英国規格）：

内容説明：ISO 4499 および ASTM 規格を一部参照し、切削工具における粉末の硬度、耐摩耗性、耐衝撃性などの性能試験に重点を置いています。また、粉末の保管条件（真空包装など）に関する推奨事項も規定しています。

適用シナリオ：特に海運業やエネルギー業界における英国および英連邦諸国の市場認証に適用可能です。

強みと課題：この標準は包括的ですが、地域的な制約が強く、国際的な影響力は限られています。

知識の拡大：国際規格の協調の傾向はますます顕著になっています。例えば、ISO と DIN の共同改訂により、DIN EN ISO 4499 は欧州市場でより広く利用されるようになりました。将来的には、国際規格がさらに統合され、統一されたグローバル仕様が形成される可能性があります。

アプリケーションの特性と傾向：

世界的な適用性：ISO および ASTM 規格は権威があり科学的なため、特にヨーロッパやアメリカの市場における多国籍企業や輸出製品に適しています。

技術的ハードル：国際規格では試験設備や人員の質に対する要求が高く、技術力の高い企業には適していますが、中小企業では設備を徐々にアップグレードする必要があるかもしれません。

地域適応：JIS および BS EN 規格は地域のニーズに近く、実装コストが低く、地域の市場に適しています。

ナノパウダーと積層造形の台頭に伴い、国際規格はナノスケールの粒子サイズや表面化学に関する試験方法の追加など、より詳細な方向へと進んでいます。企業は、技術の先を行くために、規格の更新に細心の注意を払う必要があります。

5.3 国内規格

中国は、タングステンカーバイド粉末の品質管理に関する包括的な標準システムを確立しており、国家標準（GB/T）、業界標準（YB/T、HG/T、JB/T）、地方標準、企業標準などが含まれています。これらの標準は、中国のタングステン産業の実情を反映させ、技術要件と生産コストのバランスを取り、超硬合金、コーティング、工具、冶金などの分野で広く利用されています。以下では、国内標準の内容、特徴、適用シーンについて詳細に分析します。

国家規格

国家規格（GB/T）は、中国における炭化タングステン粉末の品質管理の基本規格です。強制的な性質と指導的な性質の両方を持ち、原材料から完成品までの複数のリンクをカバーしてい

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。

GB/T 4295-2018: 炭化タングステン粉末。

内容説明: 本規格は、炭化タングステン粉末の化学組成（例えば、総炭素含有量 6.08~6.18%、遊離炭素含有量 \leq 0.1%、酸素 \leq 0.2%）、粒度範囲(0.5~30 μ m)、見かけ密度(3.0~5.0 g/cm³)、流動性(15~25 秒/50g)などの技術要件を規定しています。検査方法には、化学分析（燃焼法、滴定法）、物理試験（レーザー粒度分布測定、ホールフローメーター）、顕微鏡分析（XRD、SEM）が含まれます。また、包装および保管に関する推奨事項も規定しており、真空包装や保管湿度 50%未満での保管などが挙げられています。

適用シナリオ: 国内の超硬合金、コーティング、工具製造のあらゆる側面に適用でき、業界の品質管理の中核的な基礎となります。

利点と課題: この規格は包括的で、さまざまな応用シナリオをカバーしていますが、超微細粉末 (<0.5 μ m) の仕様は若干不十分であり、他の規格で補足する必要があります。

GB/T 26046-2010: 超硬合金用タングステンカーバイド粉末。

内容説明: 炭化タングステン粉末は、粒径と用途（例えば、超微細工具用 WC-01、耐摩耗部品用 WC-04 など）に応じて複数のグレードに分けられており、化学組成（酸素含有量 \leq 0.15%）、粒度分布（D50 偏差 \pm 5%）、物理的特性（見かけ密度 4.0~5.0g/cm³）に関する要求が明確に規定されています。また、試験装置の校正周期（年 1 回）も規定されています。

適用シナリオ: PCB ドリルビット用の超微粉末や採掘ツール用の粗粉末など、さまざまな性能要件を持つ超硬合金製品に適しています。

長所と課題: この標準には明確な分類があり、多様なニーズに適応できますが、新しいアプリケーション（3D 印刷など）に関するガイダンスが少なく、さらなる更新が必要です。

GB/T 18508-2013: セメント炭化物粉末冶金製品の検査方法。

内容説明: 主に超硬合金製品を対象としていますが、間接的に炭化タングステン粉末の品質要件を規定しています。本規格は、硬度（HV、HRA）、密度、気孔率、微細構造の試験方法を網羅し、粉末の結晶構造と化学組成が完成品の性能に与える影響に重点を置いています。

適用シナリオ: 超硬工具、金型、耐摩耗部品の品質検証に適しており、粉末品質の間接的な基準を提供します。

利点と課題: この規格は完成品の性能の基礎を提供しますが、粉末に対する直接的なテスト内容が少なく、GB/T 4295 と併せて使用する必要があります。

知識の拡大: 近年、国家標準は継続的に改訂されています。例えば、GB/T 4295-2023（草案）では、ナノパウダーに関する新たな試験要件が追加され、中国のハイエンドタングステン材料分野における技術進歩を反映しています。企業は市場の需要に適応するために、改訂動向を注視する必要があります。

業界標準

業界標準（YB/T、HG/T、JB/T）は、特定の分野の品質要件を洗練し、国家標準の普遍性の欠如を補い、冶金、化学、機械業界で広く使用されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YB/T 429-2012: 冶金用タングステンカーバイド粉末。

内容説明: 本規格は、冶金産業（ローラーや金型など）の特殊なニーズを対象とし、粉末の耐食性（耐酸性および耐アルカリ性）、高温安定性（ $>1000^{\circ}\text{C}$ ）、および粒径範囲（ $5\sim 20\mu\text{m}$ ）に重点を置いています。検査方法には、化学分析（総炭素量、酸素量）、高温性能試験（熱膨張係数）、耐摩耗試験（摩耗試験）が含まれます。

特に鉄鋼および非鉄金属業界における重機、冶金設備、耐摩耗部品の製造に適しています。

利点と課題: この規格は対象を絞り、冶金業界の特殊なニーズを満たしていますが、超微粉末への適用性は低く、他の規格と組み合わせる必要があります。

HG/T 2838-2012: 化学産業向けタングステンカーバイド粉末。

内容説明: 化学産業（触媒、耐腐食コーティングなど）向けに、本規格は粉体の化学純度（総炭素含有量 $6.10\sim 6.15\%$ 、不純物含有量 $\leq 50\text{ppm}$ ）、粒子径（ $1\sim 5\mu\text{m}$ ）、および表面活性（比表面積 $5\sim 10\text{m}^2/\text{g}$ ）を規定しています。検出法には、BET法（比表面積）、化学滴定法（不純物）、SEM法（表面形態）が含まれます。

適用シナリオ: 特に石油化学産業における、耐酸性および耐アルカリ性コーティング、触媒担体、化学反応器に適しています。

利点と課題: この規格は表面特性に重点を置いており、化学用途に適していますが、物理的特性（流動性など）に関する仕様は少なくなっています。

JB/T 12614-2016: 超微粒子炭化タングステン粉末（セメント炭化物用）。

内容説明: 粒子径が $1\mu\text{m}$ 未満の粉体について、本規格は粒度分布（ $D_{90}/D_{10}<2$ ）、酸素含有量（ $\leq 0.1\%$ ）、および粒径（ $<200\text{nm}$ ）に関する要件を規定しています。検出方法としては、透過型電子顕微鏡（TEM）による粒度分析、レーザー粒度分析、赤外線吸収（酸素含有量）などが挙げられます。また、分散剤の使用など、凝集抑制に関する推奨事項も示されています。

適用シナリオ: マイクロドリル、電子部品、ナノコーティングなどのハイエンド市場に適しています。

利点と課題: この規格は超微粉末の技術動向に忠実に従っていますが、検出コストが比較的高く（TEM装置のコストは約200万人民币）、高度な技術サポートが必要です。

知識の拡張: 業界標準の策定は、分野間の連携をますます重視するようになっています。例えば、HG/T 2838-2020（改訂版）では、タングステンカーバイド系複合粉末の仕様が追加され、化学工学と材料科学の連携発展を反映しています。

地方および企業の標準

地方および企業の標準は、地域の産業特性と企業の技術的利点を組み合わせて、品質管理要件を洗練し、国家標準の普遍性の欠如を補います。

ローカル基準:

DB43/T 1025-2015: 湖南省「炭化タングステン粉末品質管理規格」。

内容説明: 株州タングステン工業基地の実情に基づき、本規格は超微粉（ $<0.5\mu\text{m}$ ）およびナノ粉（ $<100\text{nm}$ ）の化学組成（酸素含有量 $\leq 0.08\%$ ）、粒度分布（ D_{50} 偏差 $\pm 3\%$ ）、保管条件（湿度 $<40\%$ ）を規定しています。検査方法には、XPS（表面化学）、TEM、オンライン粒度分析

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

が含まれます。

適用シナリオ： 湖南省や江西省などのタングステン産業が集中している地域、特に高級ツールやコーティングの製造に適しています。

利点と課題： この規格は実際の生産に近いため、実装コストは低くなりますが、地域性が非常に高いため、国家規格と併せて使用する必要があります。

アプリケーションの特性と傾向：

現実に近い： 国内基準は、現地の原材料（低品位のタングステン鉱石）と設備レベル（主に国産機器を使用）を十分に考慮しており、実施コストは比較的低いです。

明確なレベル： 国家標準は広範囲に及び、業界標準は専門的であり、地方および企業標準は柔軟であり、多段階の規制システムを形成しています。

国際化の傾向： 中国のタングステン産業のグローバル化に伴い、特に超微粉末やハイエンドアプリケーションの分野では、国内規格が ISO や ASTM に近づいています。

将来の展望： 国内規格には、環境保護要件（炭素排出抑制など）やインテリジェント技術（オンライン品質監視など）がさらに組み込まれ、グリーン製造やインテリジェント製造がサポートされるようになります。

5.4 標準の比較と適用性

炭化タングステン粉末の品質管理において、国内外の規格は類似点と大きな相違点の両方を有しています。共通点は、いずれも化学組成、粒度分布、結晶構造、物理的特性の管理を重視していることです。相違点は、技術要件、試験方法、および適用シナリオへの重点に反映されています。以下では、各規格の適用範囲について、多角的な比較分析と考察を行い、企業が適切な規格を選択するための指針を提供します。

化学組成要件の比較

国際規格：

ISO 4499-1:2008： 総炭素偏差 $\pm 0.05\%$ 、遊離炭素 $\leq 0.08\%$ 、酸素 $\leq 0.15\%$ 、不純物（鉄、コバルトなど） $\leq 10\text{ppm}$ 。

ASTM E194-10： 酸素含有量の検出限界は 1ppm で、超高純度を重視しており、航空宇宙分野に適しています。

特徴： 要件が非常に厳しく、検出精度が高く、高度な機器（約 100 万人民币元の ICP-MS など）を備える必要がある。

国内基準：

GB/T 4295-2018： 総炭素偏差 $\pm 0.1\%$ 、遊離炭素 $\leq 0.1\%$ 、酸素 $\leq 0.2\%$ 、不純物（鉄など） $\leq 50\text{ppm}$ 。

YB/T 429-2012： 不純物制限は比較的緩やか（鉄 $\leq 100\text{ppm}$ など）で、低品位の現地タングステン鉱石の現実に適応しています。

特徴： 要件が比較的緩く、コスト管理を考慮しており、大量生産に適しています。

相違点分析： 国際規格は究極の純度を追求し、ハイエンド市場に適しています。国内規格はより包括的で、原材料と試験のコストを削減します。

適用範囲：

輸出製品： EU や北米などの市場で認証を受けるには、ISO または ASTM 規格を満たしている

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

必要があります。

国内市场：GB/T 4295 は従来の超硬合金およびコーティング生産には十分であり、よりコスト効率に優れています。

ハイエンドアプリケーション：航空宇宙、医療機器では、国際標準または社内標準（酸素 \leq 0.05% など）を採用する必要があります。

知識の拡張：化学組成の制御は、知能化の方向へと発展しています。例えば、ドイツ企業は AI 支援型 ICP-MS システムを用いて不純物の変動を分析し、プロセスパラメータをリアルタイムで調整しています。この技術は今後 5 年以内に中国にも導入されると予想されています。

粒度制御の比較

国際規格：

ASTM B761-17：均一な粒度分布（D90/D10 < 2 ）、D50 偏差 $\pm 5\%$ を要求し、レーザー光散乱法（精度 0.01 μm ）を推奨します。

ISO 4499-2:2008：超微粉体（ $< 1 \mu\text{m}$ ）の試験方法を改良し、凝集制御を重視しています。

特徴：分布の均一性を重視し、高精度の用途に適しており、試験装置に対する要件も高い（レーザー粒度分析装置のコストは約 50 万元）。

国内基準：

GB/T 26046-2010：粒子サイズは複数の間隔（0.5 \sim 1 μm 、1 \sim 3 μm など）に分割され、D50 偏差は $\pm 10\%$ で、スクリーニング方法が許可されています。

JB/T 12614-2016：D90/D10 < 2.5 の超微粉末の場合、レーザー粒度分析と TEM を組み合わせることが推奨されます。

特徴：分類管理は、従来の方法（スクリーニング方法など、費用が約 10,000 人民元）を考慮したより柔軟なものであり、中小企業に適しています。

相違点分析：国際規格は高精度と一貫性を重視し、国内規格は多様性と実用性を重視します。

適用範囲：

精密ツールと 3D プリント：極めて均一な粒子サイズ分布を確保するには、ASTM または ISO 規格が必要です。

従来の超硬合金：GB/T 26046 の分類管理はより経済的で、さまざまなニーズを満たします。

超微粉末：JB/T 12614 は国際基準を満たしており、ハイエンド市場に適しています。

知識の拡大：粒子サイズ制御における最新のトレンドは、レーザー光散乱と動的光散乱（DLS）を組み合わせたマルチモーダル分析の導入であり、粒子サイズと凝集状態を同時に評価できます。この技術は欧米で普及しており、2025 年以降は中国でも普及が進むと予想されています。

試験方法の比較

国際規格：

ISO 4499 シリーズ：レーザー粒度分布測定装置、ICP-MS、赤外線吸収法などの高精度機器の使用と、厳格な試験環境要件（温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $< 40\%$ ）を優先します。

ASTM E194-10：方法の標準化を重視し、機器は毎年校正が必要で、検出限界は ppm レベルまで低くなっています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

特徴： 検出精度が高く、結果の比較可能性も高いが、設備費とメンテナンス費が高額になる（年間平均メンテナンス料は約 10 万円）。

国内基準：

GB/T 4295-2018： 従来の方法（スクリーニング、化学滴定など）と最新の機器（約 20 万円の家庭用レーザー粒度分析装置など）の両方を考慮します。

YB/T 429-2012： 機器の校正要件が緩和され（2 年に 1 回）、試験コストが低くなっています（化学滴定装置のコストは約 50,000 人民元）。

特徴： 多様な方法、低コスト、さまざまな規模の企業に適しています。

相違点分析： 国際規格は極度の精度を追求しますが、国内規格は実用性と経済性を重視します。

適用範囲：

強力な技術力を持つ企業は、国際的な顧客の要件を満たすために ISO または ASTM 規格を直接採用することができます。

中小企業： GB/T 4295 のハイブリッド アプローチは実装が簡単で、必要な設備投資も少なく済みます。

ナノパウダーなどの新興分野では、国際基準に基づいた高精度な方法と国内基準の柔軟性を組み合わせる必要があります。

知識の拡大： 試験方法のデジタルトランスフォーメーションが加速しています。例えば、米国企業はオンライン XRD システムを用いて、相組成を 0.05%未満の誤差でリアルタイムにモニタリングしています。中国企業も同様の技術を試験的に導入しており、2026 年には産業化を達成すると見込まれています。

適用性分析

輸出志向型企業：

推奨規格： ISO 4499 シリーズ、ASTM B761/E194。

理由： 欧米市場では国際規格が権威を持ち、化学組成と粒子サイズの制御に対する厳格な要件により、ハイエンドの顧客（ボーイングやエアバスなど）のニーズを満たすことができます。

実施提案： 高精度機器（ICP-MS、レーザー粒子サイズ分析装置など）に投資し、専門のテスト担当者を育成し、国際的な品質管理システム（ISO 9001 認証など）を確立します。

国内市場：

推奨規格： GB/T 4295-2018、GB/T 26046-2010、YB/T 429-2012。

理由： 国内規格はコストと性能の両方を考慮しており、大量生産に適しており、超硬合金、コーティング、工具などさまざまな用途をカバーしています。

レーザー粒度分析装置など、価格約 20 万円）の使用を優先し、現地規格（DB43/T 1025 など）と組み合わせることでプロセスを最適化します。

ハイエンドアプリケーション：

推奨規格： ISO 4499-1/2、ASTM E194、企業規格（Q/ZH 001-2020 など）。

理由： 航空宇宙、医療機器などの分野では、極めて高い純度と一貫性が求められます。国際規格や企業規格では、より厳格な指標（酸素含有量 \leq 0.05%、粒子径偏差 \pm 2%など）が規定されている場合があります。

実施提案： 高度な検出技術（TEM、シンクロトロン放射 XRD など）を導入し、全プロセスのデ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

デジタル管理を確立し、6σ 品質管理を実施します。

新興分野：

推奨規格：JB/T 12614-2016、ISO 4499-2020（改訂版）、Q/ZG 002-2021。

理由：3D プリント、ナノコーティング、バイオメディカルの分野では、粉末の球形度、表面化学、流動性に関する新たな要件が提示されており、最新の規格はよりの絞っています。

実施提案：CT スキャナー、BET 表面積計などの専用設備に投資し、標準設定に参加し（中国タングステンハイテクとの協力など）、技術的優位性を獲得します。

開発動向

標準の国際化

中国のタングステン産業の世界的な影響力が高まるにつれ、国内規格は ISO や ASTM に近づいています。例えば、GB/T 4295-2023（草案）は ISO 4499-2020 のナノパウダー規格を参照しており、2025 年に正式版が発行される予定です。

環境志向

将来の規格には、炭化プロセス中の炭素排出量の制御（目標 <2 トン CO₂ / トン粉末）や低エネルギー消費プロセスの促進（マイクロ波炭化など）などのグリーン製造要件が組み込まれる予定です。

インテリジェントアップグレード

品質管理の効率性を向上させるため、オンラインモニタリング（リアルタイム粒子サイズ分析、AI 支援による相分析など）とデジタルツイン技術が標準に統合されます。例えば、ドイツの TÜV 認証では、企業にデジタル品質レポートの提出が義務付けられています。

カスタマイズされたニーズ：3D プリンティングやバイオメディカルなどの新しい分野向けに、この規格では、球状粉末の流動性 (<10 秒/50g) やナノ粉末の表面活性 (>20 m²/g) など、特定の目的に合わせて粉末の指標を改良します。

知識開発

標準化における世界的な協力が加速しています。例えば、ISO と ASTM は共同で「積層造形材料ワーキンググループ」を設立し、中国企業（株洲セメントカーバイドグループなど）も参加しています。これは、国内規格の国際化に向けた新たな機会を生み出しています。

参考文献

李明. 超硬合金材料[M]. 北京：冶金工業出版社，2018 年。

李明. 超硬合金の材料科学 [M]. 北京：冶金工業出版社，2018 年。

張立、王伝慧. 炭化タングステン粉末の製造技術の進歩[J]. 粉末冶金技術、2020 年、38(2)：88-94。

張立、王伝慧. 炭化タングステン粉末の製造技術の進歩[J]. 粉末冶金技術、2020 年、38(2)：88-94。

王強、李明. 中国の超硬合金規格システムの研究[J]. 中国タングステン産業、2019 年、34(3)：45-50。

王強、李明. 中国製超硬合金の規格システムに関する研究[J]. 中国タングステン産業、2019 年、34(3)：45-50。

Li Zhiqiang, Zhang Wei. タングステンカーバイド粉末の国際規格と国内規格の比較分析[J].

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

材料科学と工学、2021年、39(4): 112-118。

Li Zhiqiang, Zhang Wei. タングステンカーバイド粉末の国際規格と国内規格の比較分析 [J]. 材料科学と工学、2021年、39(4): 112-118。

陳偉、趙剛. 超微粒子タングステンカーバイド粉末の製造と特性 [J]. 無機材料ジャーナル、2022年、37(5):567-573。

陳偉、趙剛. 超微粒子タングステンカーバイド粉末の製造と特性 [J]. 無機材料ジャーナル、2022年、37(5): 567-573。

Liu Yang, Wang Zhiqiang. 3Dプリンティングにおけるタングステンカーバイド粉末の応用に関する研究 [J]. Additive Manufacturing Technology, 2023, 12(1): 34-40。

Liu Yang, Wang Zhiqiang. 3Dプリンティングにおけるタングステンカーバイド粉末の応用 [J]. Additive Manufacturing Technology, 2023, 12(1): 34-40。

ISO 4499-1:2008、硬質金属- 微細構造の金属組織学的測定。

ISO 4499-1:2008、セメント炭化物 - 微細構造の決定方法。

ISO 4499-2:2008、超硬金属— 物理的特性試験。

ISO 4499-2:2008、セメント炭化物 - 物理的特性の試験。

ISO 3326:2013、硬質金属- 硬度の測定。

ISO 3326:2013、セメント炭化物 - 硬度の測定。

ASTM B761-17、光散乱による金属粉末および関連化合物の粒度分布の標準試験方法。

ASTM B761-17、金属粉末および関連化合物の粒度分布のための光散乱試験方法。

ASTM E194-10、金属粉末中の酸素を測定するための標準試験方法。

ASTM E194-10、金属粉末中の酸素含有量を測定するための試験方法。

ASTM B659-90(2014)、金属および無機コーティングの厚さを測定するための標準ガイド。

ASTM B659-90(2014)、金属および無機コーティングの厚さの測定ガイド。

スミス J、ブラウン T. タングステンカーバイド粉末製造の進歩 [J]. 材料科学ジャーナル、2020年、55(12): 4567-4578。

スミス J、ブラウン T. タングステンカーバイド粉末の製造技術の進歩 [J]. 材料科学ジャーナル、2020年、55(12):4567-4578。

Johnson R, Lee K. 付加製造におけるタングステンカーバイドの品質管理基準 [J]. 付加製造、2022、48: 102456。

Johnson R, Li K. 積層造形におけるタングステンカーバイドの品質管理基準 [J]. Additive Manufacturing, 2022, 48: 102456。

ミュラー H、シュミット P. 材料技術と工作技術、2019、50 (6): 789-796。

Mueller H, Schmidt P. タングステンカーバイド粉末の品質管理: 仕様と手順 [J]. 材料科学と工学技術、2019、50(6): 789-796。

バウアー T、ウェーバー S. ヘルステルングとウルトラファインネムの特徴 Wolframcarbidgepulver [M]. ベルリン: Springer, 2021。

Bauer T, Weber S. 超微粒子タングステンカーバイド粉末の製造と特性評価 [M]. ベルリン: Springer-Verlag, 2021。

日本文学（中国語訳を含む）

山田太郎、佐藤一郎. 炭化粉体の品質管理基準に関する研究. 粉体工学会誌、2020、57(3): 123-130。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

山田太郎，佐藤一郎．炭化タングステン粉末の品質管理基準に関する研究．粉体工学会誌，2020，57(3)：123-130．

中村健さん、小林ゆうさん。超微粒子炭化タングステン粉末の特性評価[J]。ジャーナル オブ マテリアルズ サイエンス、2022、71(5)：345-352。

中村 健・小林 優．超微粒タングステンカーバイド粉末の性能評価[J]．材料科学会誌，2022，71(5)：345-352．

CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (± 0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤ 0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤ 0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance.

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within $\pm 10\%$.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm^3 (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm^3 (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤ 0.05	≤ 0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
Brand					
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

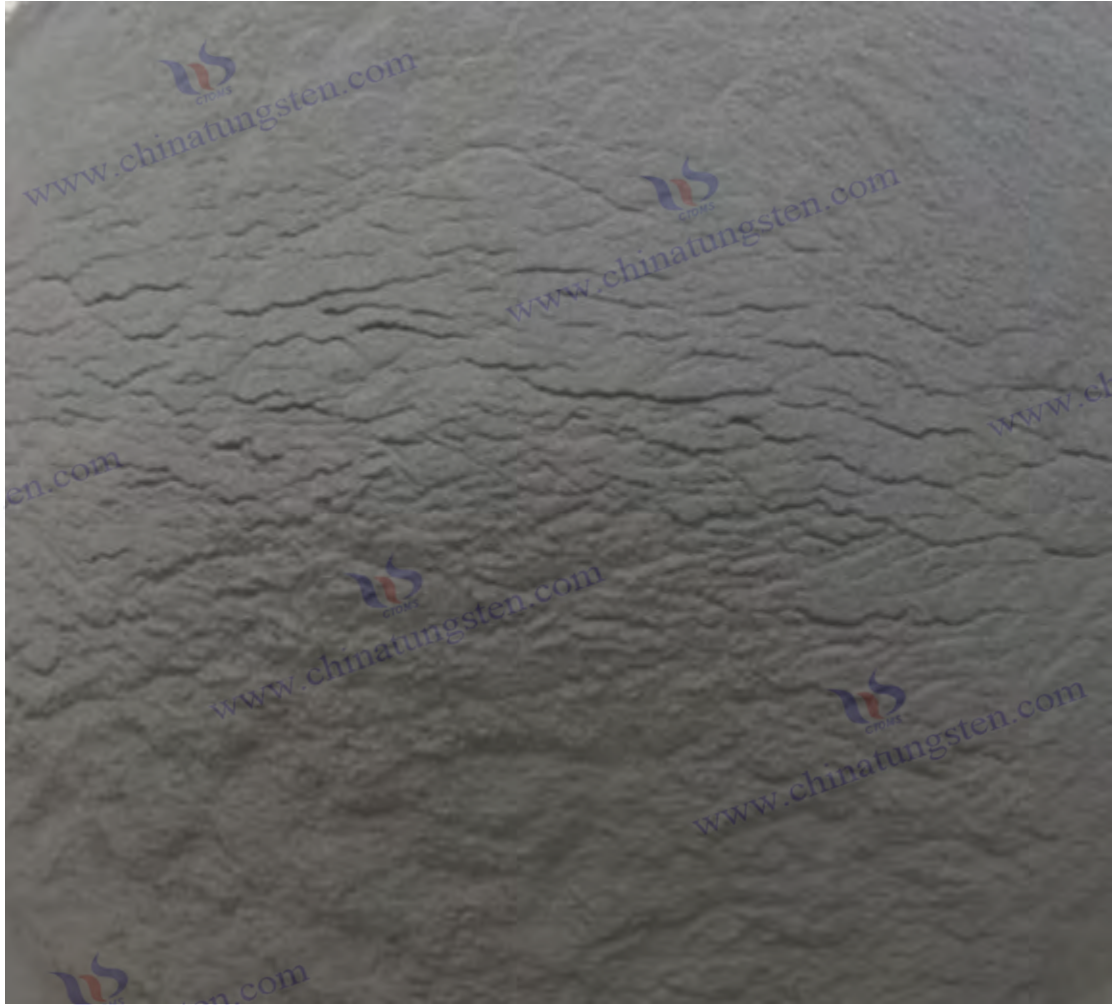
Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第 6 章 炭化タングステン粉末の性能最適化と改質

超硬合金、切削工具、耐摩耗コーティングなどの高性能材料の中核部品である炭化タングステン粉末の性能最適化および改質技術は、最終製品の機械的特性、耐腐食性、高温安定性の向上に決定的な意義を持っています。高度な製造技術の急速な発展に伴い、従来の炭化タングステン粉末の性能は、航空宇宙、積層造形、マイクロエレクトロニクスなどの分野の厳しい要求を満たすことが困難になっています。そのため、粒径の最適化、ドーピングおよび複合改質、表面改質、熱処理およびアニールなどを通じて、炭化タングステン粉末の微細構造とマクロ特性が体系的に改善され、材料科学および工学分野の研究の最前線となっています。この章では、粒子サイズの最適化、ドーピングと複合材料の改質、表面改質技術、熱処理とアニーリングの 4 つの側面から、性能最適化の理論的根拠、プロセス方法、アプリケーション効果、および将来の動向を深く分析し、学術研究と産業実践のための包括的な技術リファレンスを提供することを目指しています。

6.1 粒子サイズの最適化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭化タングステン粉末の粒径と分布は、その成形挙動、焼結性能、そして最終製品の微細構造に影響を与える重要なパラメータです。粒径を精密に制御することで、粉末の均一性と流動性、そして超硬合金の硬度、靱性、耐摩耗性を大幅に向上させることができます。以下では、粒径の最適化が炭化タングステン粉末の性能向上に果たす役割を、理論的根拠、プロセス技術、定量的効果、開発方向という4つの側面から体系的に説明します。

粒子サイズ最適化の理論的根拠

粒子サイズは、炭化タングステン粉末の比表面積、焼結活性、粒径に直接影響を及ぼし、それによって材料の機械的特性と加工特性が決まります。

ホールペッチ効果：ホールペッチ効果によれば、粒径を小さくすることで、材料の降伏強度と硬度が大幅に向上します。例えば、超微粒炭化タングステン粉末（粒径 $<1\mu\text{m}$ ）から製造された超硬合金の硬度はHV 2000~2200に達し、粗粒粉末（ $>10\mu\text{m}$ ）のHV 1200~1500よりも約60%高くなります。

焼結速度論：微粒子粉末は比表面積（ $5\sim 20\text{ m}^2/\text{g}$ ）が高いため、表面エネルギーによる拡散速度が速くなります。焼結温度は従来の 1450°C から $1300\sim 1350^\circ\text{C}$ に低下し、エネルギー消費量を約15%削減し、粒成長のリスクを低減します。

粒度分布の均一性：粒度分布が狭い（ $D_{90}/D_{10}<2$ ）ことで、焼結時の収縮が均一になり、気孔率を1%未満に低減し、製品の寸法精度（偏差 $\pm 10\mu\text{m}$ ）を大幅に向上できます。粒度分布が広いと、局所的な収縮ムラやマイクロクラックの発生につながる可能性があります。

応用シナリオへの適応性：超微粉末（ $<0.5\mu\text{m}$ ）は高精度切削工具やマイクロエレクトロニクス部品に適しており、中粒子サイズ（ $3\sim 10\mu\text{m}$ ）は耐摩耗コーティングや金型に適しており、粗粒子サイズ（ $>10\mu\text{m}$ ）は熱噴射や採掘ツールに使用され、さまざまな作業条件下での機械的要件を満たします。

粒子サイズ最適化のためのプロセス技術

さまざまな粒子サイズの要件に応じて、粉末の正確な制御を実現するためのさまざまなプロセス技術が開発されてきました。

高エネルギーボールミル技術

乾式ボールミル法：遊星ボールミルを使用し、粉碎媒体は炭化タングステンボール（硬度 $>90\text{HRA}$ ）、ボール対材料比は10:1、回転速度は $400\sim 600\text{rpm}$ 、粉碎時間は $12\sim 24$ 時間で、 $3\sim 10\mu\text{m}$ の中粒子径粉末を調製できます。

湿式ボールミル法：エタノールまたはアセトン媒体中で、分散剤（ポリエチレングリコール、PEGなど、添加量0.2%~0.6%）を添加し、 $8\sim 16$ 時間粉碎します。超微粉（ $0.5\sim 1\mu\text{m}$ ）を調製でき、凝集率は5%以下に制御されます。

定量的効果：湿式ボールミル処理と超音波分散を組み合わせることで、平均粒子サイズを $2.5\mu\text{m}$ から $0.7\mu\text{m}$ に低減し、粉末の焼結密度を10%向上させ、超硬合金の破壊靱性を約

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12% 向上させることができます。

気流分類技術

プロセス原理：遠心気流分級機を使用し、気流速度（15～50 m/s）と分級ホイール速度（8000～20000rpm）を調整することで、0.5～10 μm の粉末をふるい分けることができ、分級効率は92%に達します。

技術的利点：分類精度が高く、D50 偏差は ±0.03 μm 以内に制御され、従来のスクリーニング方法の ±0.2 μm よりも優れています。

応用例：ある企業は、気流分級により超微粉の D90/D10 を 2.8 から 1.7 に最適化しました。この製品は高精度 PCB ドリルビットに使用され、完成品の合格率が 15%向上しました。

プラズマ球状化技術

プロセス原理：高周波プラズマ（出力 20～60kW）を使用して不規則な粒子を溶かし、急速に固化させて、0.5～5 μm の均一な粒子サイズの球状粉末を形成します。

技術的利点：球状粉末の流動性が 35%向上（ホール流量が 14 秒/50g に減少）し、積層造形や溶射に適しています。

応用例：ある企業はプラズマ球状化処理を施し、0.8 μm の粉末を作製しました。コーティングの表面粗さ（Ra）は 0.5 μm から 0.2 μm に低減し、耐摩耗性は 18%向上しました。

化学蒸着（CVD）制御

プロセス原理：タングステン源（WF₆など）と炭素源（CH₄など）の流量比（1：1.3～1：1.6）を制御することにより、800～1000℃で超微粉末（0.1～0.5 μm）を直接生成します。

技術的な利点：均一な粒径と低い凝集率（< 2%）、ナノスケールの用途に適しています。

技術的な課題：反応装置は高価（約 600 万人民币元）であり、プロセスパラメータを正確に制御する必要がある（温度偏差±5℃）。

定量的効果と開発の方向性

定量的効果：粒子サイズの最適化により、炭化タングステン粉末の性能が大幅に向上します。例えば、超微粒子（0.5 μm）で製造された超硬合金工具の寿命は 25～35%延長され、ナノ粉末（<100nm）を 3D プリンティングに適用すると、印刷精度は ±8 μm まで向上します。

ナノパウダーの凝集問題はまだ解決する必要があり、新しい分散剤（官能化グラフェンなど）とオンライン モニタリング テクノロジー（誤差 <1% の動的散乱など）を開発する必要があります。

開発方向

ナノパウダーのスケールアップ：生産コストを 20% 削減できると期待されるマイクロ波支援粉砕とプラズマ強化 CVD を検討しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

インテリジェントなプロセス制御：機械学習モデルを使用して、粉碎時間と粒子サイズの関係を予測し、プロセス効率を最適化します。

グリーン製造：二酸化炭素排出量を削減するために、低エネルギー分類技術（電磁分類など）を開発します（目標：粉末1トンあたりCO₂1.5トン未満）。

6.2 ドーピングと複合材料の改変

ドーピングと複合改質は、異元素または第二相を導入することで炭化タングステン粉末の格子構造、粒界特性、および化学的安定性を最適化し、硬度、靱性、耐食性、および高温性能を向上させる技術です。この技術は、航空宇宙、耐摩耗コーティング、エネルギー機器などの分野において幅広い応用が期待されています。以下では、ドーピングと複合改質の理論と実践を、改質メカニズム、プロセス技術、応用効果、研究動向という4つの側面から体系的に分析します。

改変メカニズム

格子強化メカニズム：Ti、Cr、Vなどの元素をドーピングすると、WC格子中のタングステン原子が置換されるか、格子間原子に固溶することで格子変形エネルギーが増加し、転位運動が阻害されます。例えば、Tiを1%ドーピングすると、硬度はHV 1800からHV 2250に上昇し、強度は約20%向上します。

粒界に $3C_2$ 、VC)を配置することで、粒成長を抑制し、粒界結合強度を高め、破壊靱性(7 MPa \cdot m^{1/2}から9 MPa \cdot m^{1/2})を向上させます。

化学的安定性の向上：TaやNbなどの元素をドーピングすることで、安定した酸化物保護層を形成し、高温(>800°C)または腐食性環境における粉末の酸化速度を低減できます。例えば、Taを0.5%ドーピングすると、酸化重量増加を30%低減できます。

TiC、ZrCなど)や金属結合相(Co、Niなど)を導入することで、多相複合材料を形成し、硬度と靱性のバランスを最適化します。例えば、WC-TiC-Co複合粉末の硬度はHV 1900、靱性は11 MPa \cdot m^{1/2}に達し、純粋なWCの性能組み合わせを上回ります。

プロセス技術

メカニカルアロイング：

プロセスフロー：高エネルギーボールミルで、タングステンカーバイド粉末をドーピング元素(Cr、Tiなど)または複合相(TiCなど)と混合します。ボールと材料の比率は12:1、回転速度は500~700rpm、粉碎時間は8~16時間です。

技術的な利点：ドーピングが均一で、実験室や小ロット生産に適しており、設備コストが低い(約25万元)。

メカニカルアロイングにより $3C_2$ の粒径を1.8 μ mから0.9 μ mに縮小し、超硬合金の耐摩耗性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

を 20% 向上させました。

化学共沈法:

Na₂WO₄などをドーピング塩（TiCl₄、NbCl₅など）と混合し、pH 7.5~8.5、温度 70~90° C で共沈殿させ、その後、乾燥および炭化してドーピングされた粉末を生成します。

ナノパウダー(<100nm)の製造に適しており、ドーピング量を正確に制御できます(0.1%~5%)。

応用例: ある大学では、共沈法を使用して 1.5% の VC を添加し、超硬切削工具に適した硬度 HV 2400 のナノ WC 粉末を製造しています。

ゾルゲル法:

プロセスフロー: タングステン酸塩を前駆体として使用し、ドーピング元素(酢酸ニオブなど)の有機塩を加えてゲルを形成し、その後 1200 ~ 1400° C で炭化して複合粉末を生成します。

技術的な利点: ドーピングの均一性が高く、高純度の粉末に適しており、不純物含有量が低い(<50ppm)。

技術的な課題: プロセスサイクルが長い (48 ~ 72 時間)、生産コストが高い (1 トンあたり約 60 万人民币)。

プラズマ支援ドーピング:

プロセスフロー: プラズマリアクター (電力 25 ~ 50kW) で、ドーピング元素 (Ta、Zr など) がガス状 (TaCl₅ 蒸気など) で粉末表面に導入され、反応時間は 15 ~ 30 秒です。

技術的な利点: 高いドーピング効率、顕著な表面改質効果、および耐酸化性の 25% 向上。

応用例: ある会社では、0.8%の Nb をドーピングし、900°Cでの粉末の酸化重量増加率が 35%減少し、高温コーティングに適したものになりました。

応用効果と研究動向

定量的効果: ドーピングと複合改質により、炭化タングステン粉末の総合的な性能が大幅に向上します。例えば、WC-TiC-Co 複合粉末を使用した工具の高速切削における寿命は 60%延長されます。また、WC-Cr₃C₂粉末を耐腐食コーティングに使用すると、耐酸性が 2.5 倍向上します。

技術的な課題: ドーピング元素の割合と分布を正確に最適化する必要があります。過剰なドーピング (例えば TiC > 12%) は相分離を引き起こし、靱性が低下する可能性があります。また、複合材料の界面接合強度もさらに向上させる必要があります。

研究動向:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

多元素相乗ドーピング：Ti-V-Cr-Nb などの複数の組み合わせを検討し、相乗効果を利用して総合的なパフォーマンスを向上させます。

粒径を 50nm 以下に制御した WC ベースのナノ複合粉末（WC -TiC - ZrC など）を開発する。

計算シミュレーション支援：分子動力学と第一原理計算により、ドーピング元素が格子安定性に与える影響を予測し、実験コストを削減できます。

6.3 表面改質技術

表面改質は、表面の化学組成、物理的形態、または微細構造を制御することで、炭化タングステン粉末の分散性、流動性、耐酸化性、および焼結性能を最適化します。この技術は、粉末処理効率と最終製品の性能向上に大きな意義を持っています。以下では、表面改質の理論と応用を、改質メカニズム、プロセス技術、定量的効果、および将来の方向性という4つの側面から体系的に分析します。

改質メカニズム

表面エネルギー調整：有機層（ポリビニルアルコール、PVA など）または無機層（ SiO_2 、 Al_2O_3 など）でコーティングすることで、粒子の表面エネルギーを低減し、ファンデルワールス力を低減し、凝集率を 25% から 4% に低減できます。

摩擦係数の低減：改質後、滑らかまたは球面状の表面が形成され、粒子間の摩擦係数が 15% ~ 25% 低減し、ホール流量を 28 秒 / 50g から 13 秒 / 50g に低減できます。

耐酸化性の向上：表面に高融点酸化物（ ZrO_2 など）または窒化物（ TiN など）をコーティングすることで保護層を形成し、高温酸化反応を抑制します。例えば、 Al_2O_3 コーティング粉末の 800°C における酸化重量増加率は 40% 低減します。

焼結活性の向上：改質表面により活性基（水酸基やアミノ基など）が導入され、粒子間の界面結合が促進されます。焼結温度は 50~80°C 低下し、密度は 8% 増加します。

プロセス技術

化学コーティング方法：

プロセスフロー：溶液に炭化タングステン粉末を分散させ、コーティング前駆体（エチルシリケート、四塩化アルミニウムなど）を加え、pH 4.5~6.5、温度 50~70°C で反応させて SiO_2

または Al_2O_3 コーティング層（厚さ 10~60nm）を形成します。

技術的利点：コーティング層は均一で厚さを制御できるため、大規模生産に適しています。コストは約 30,000 人民元/トンです。

応用例：ある会社では SiO_2 を 0.3% 塗布したところ、粉末の凝集率が 2.5% に減少し、焼結体の多孔度は 12% 減少しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

プラズマ表面処理:

プロセスフロー: プラズマリアクター（電力 15~35kW）では、Ar、N₂、または O₂プラズマを使用して粉末表面に衝撃を与え、活性基を導入するか、窒化物/酸化物層（厚さ 5~20nm）を形成します。

技術的な利点: 処理時間が短い（10 ~ 20 秒）、表面粗さが 25% 減少、耐酸化性が 20% 向上。

応用例: ある企業は、N₂プラズマ処理を使用して、750° Cでの粉末の酸化重量増加を 30%削減し、コーティングの耐摩耗性を 15%向上させました。

機械化学的修飾:

プロセスフロー: ボールミル処理中に界面活性剤（ステアリン酸、オレイン酸など、0.2%~0.6%の添加量）を添加し、機械力によって表面化学反応を誘発し、有機コーティング層を形成します。

技術的利点: プロセスが簡単で、設備コストが低い（約 20,000 人民元）、中小企業に適しています。

応用例: ある会社では、ステアリン酸を 0.4% 添加したところ、粉末の流量が 26 秒/50g から 17 秒/50g に低下し、プレス効率が 18% 向上しました。

物理蒸着法（PVD）:

プロセスフロー: 真空環境（10⁻²Pa）で、マグネトロンスパッタリングにより TiN、CrN などの薄膜（厚さ 20~100nm）を堆積速度 0.5~2nm/s で堆積します。

技術的利点: 表面硬度が 35% 向上し、高級コーティングや切削工具に適しています。

技術的な課題: 設備投資額が高い（約 350 万人民元）、生産効率が低い（バッチあたり 100 ~ 200 kg）。

定量的な効果と今後の方向性

定量的効果: 表面改質により、粉末の加工性能と製品性能が大幅に向上します。例えば、SiO₂コーティング粉末の焼結温度は 1450°Cから 1370°Cに低下し、コーティングの摩擦係数は 15%低下しました。また、TiN改質粉末の工具寿命は 40%延長しました。

技術的課題: コーティングの長期安定性を最適化する必要があり、高温焼結によりコーティングが分解したり剥離したりする可能性がある。また、改良コストと性能向上のバランスも重要な課題である。

今後の方向性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

多層複合コーティング： $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{ZrO}_2$ 多層構造を開発し、耐酸化性と接着強度を向上。

インテリジェントな修正： AI と組み合わせてプラズマ処理パラメータ（電力や空気流量比など）を最適化し、修正効率を向上させます。

グリーン変更： 有機溶剤の使用を減らし、環境汚染を軽減するために、水性コーティング剤（ケイ酸ナトリウムなど）を検討します。

6.4 熱処理と焼鈍

熱処理とアニールは、温度、雰囲気、保持時間を正確に制御することで、炭化タングステン粉末の結晶構造、内部応力、表面化学状態を最適化し、焼結性能と機械的特性を向上させます。この技術は、粉末の安定性と加工効率の向上に不可欠な役割を果たしています。以下では、熱処理とアニールの応用を、改質メカニズム、プロセス技術、定量的効果、開発方向という4つの側面から体系的に分析します。

改質メカニズム

結晶構造の最適化： 熱処理により、研削または炭化中に導入された結晶欠陥（転位や積層欠陥など）を除去し、WC 相の純度（98% から 99.5%）を向上させ、残留 W_2C または遊離炭素を削減できます。

内部応力の解放： アニーリングにより、原子拡散によって残留応力（圧縮応力が 500MPa から 100MPa など）が低減され、粉末の圧縮均一性と焼結グリーン体の強度が向上します。

表面化学調整： 還元雰囲気または不活性雰囲気での熱処理により、表面酸化物（ WO_3 など）を除去し、酸素含有量を 0.25% から 0.04% に低減し、焼結活性を向上させることができます。

粒径制御： 焼鈍温度（800 ~ 1200° C）と時間（1 ~ 4 時間）を最適化することで、結晶粒が急速に成長することを防ぎ、結晶粒を小さく保ちます（0.5 ~ 1.5 μm ）。

プロセス技術

真空アニール：

プロセスフロー： 真空炉（真空度 10^{-4}Pa ）、温度 850~1250° C、1.5~3.5 時間保温、冷却速度 5~10° C/分。

技術的利点： 酸素含有量を効果的に除去（0.22% から 0.05% へ）、結晶欠陥密度を 35% 削減します。

応用例： ある企業は、1050° C での真空焼鈍により、粉末の焼結気孔率を 2% から 0.8% に低減し、超硬合金の強度を 10% 向上させました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

水素雰囲気中でのアニール：

プロセスフロー：水素雰囲気（流量 0.8～1.5L/分）、温度 950～1150℃、2～5 時間保温、水冷または空冷を使用。

技術的な利点：水素は表面酸化物を減らし、酸素含有量を 0.03% まで下げ、表面活性を 20% 増加させます。

応用例：ある企業では、1000℃の水素焼鈍処理を採用し、工具の切削寿命を 18% 延長しました。

マイクロ波熱処理：

プロセスフロー：電子レンジ（出力 3～6kW）で、温度 750～1050℃ で 15～40 分間保温し、不活性ガス保護を使用します。

技術的な利点：均一な加熱、エネルギー消費量の 25% 削減、粒径を 0.5 ～ 1 μm に制御。

応用例：ある大学では、900℃のマイクロ波アニールリングを使用して、粉末の硬度を HV 1800 から HV 2000 に高めました。

プラズマ熱処理：

プロセスフロー：プラズマ環境（電力 20～40kW）、温度 650～950℃、処理時間 8～20 秒、Ar /H₂混合雰囲気を使用。

技術的な利点：処理が速く、表面活性が 18% 増加し、超微粉末に適しています。

技術的な課題：設備コストが高く（約 250 万人民币元）、プロセスの安定性を最適化する必要があります。

定量的な効果と今後の方向性

定量的効果：熱処理とアニール処理により、粉末の性能が大幅に向上します。例えば、水素アニール処理した粉末の焼結密度は 12% 増加し、超硬合金の靱性は 22% 向上しました。また、マイクロ波アニール処理した粉末を 3D プリントに用いると、印刷精度は ±7 μm まで向上します。

技術的な課題：高温焼鈍は粒成長を引き起こす可能性があるため、温度（偏差 ±3℃）と雰囲気（酸素分圧 10^{-5} Pa）の精密な制御が求められる。超微粉の熱安定性についても、さらなる研究が必要である。

今後の方向性

低温急速アニール：プラズマ支援低温アニール（<math><700^{\circ}</math> C）を開発し、エネルギー消費量を 20% 削減しました。

インテリジェント制御：AI を使用して粒成長速度を予測し、アニールパラメータを最適化します。

グリーン熱処理：太陽光を利用した熱処理を検討し、二酸化炭素排出量を削減します（目標 <math><1</math> トン CO₂ / トン粉末）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

参考文献

- 李明. 超硬合金材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018年.
- 李明. 超硬合金的材料科学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018年.
- 張立、王伝慧. 炭化タングステン粉末の製造技術の進歩[J]. 粉末冶金技術、2020年、38(2): 88-94.
- 張立、王伝慧. 炭化タングステン粉末の製造技術の進歩[J]. 粉末冶金技術、2020年、38(2): 88-94.
- 王強、李明. 中国における高性能タングステンカーバイド粉末の研究[J]. 中国タングステン産業、2020年、35(4):56-62.
- 王強、李明. 中国における高性能タングステンカーバイド粉末の研究[J]. 中国タングステン産業、2020年、35(4):56-62.
- 陳偉、趙剛. 超微粒子タングステンカーバイド粉末の性能最適化に関する研究[J]. 無機材料ジャーナル、2022年、37(5): 567-573.
- 陳偉、趙剛. 超微粒子タングステンカーバイド粉末の性能最適化に関する研究 [J]. 無機材料ジャーナル、2022年、37(5): 567-573.
- Liu Yang, Wang Zhiqiang. タングステンカーバイド粉末の表面改質技術の進歩[J]. 材料科学と工学、2023、41(3): 89-96.
- Liu Yang, Wang Zhiqiang. タングステンカーバイド粉末の表面改質技術の進歩 [J]. 材料科学と工学、2023、41(3): 89-96.
- スミス J、ブラウン T. タングステンカーバイド粉末改質の進歩 [J]. 材料科学ジャーナル、2021年、56(10): 5678-5690.
- タングステンカーバイド粉末改質技術の進歩[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(10): 5678-5690.
- Johnson R, Lee K. WC 粉末の表面改質による性能向上 [J]. Powder Technology, 2022, 395: 123-135.
- 性能向上のためのタングステンカーバイド粉末の表面改質[J]. 粉体技術, 2022, 395: 123-135.
- ASTM B761-17、光散乱による金属粉末および関連化合物の粒度分布の標準試験方法。
金属粉末および関連化合物の粒度分布を調べるための光散乱試験方法。
- ミュラー H、シュミット P. 最適な参加者 Wolframcarbidgepulver [J]を使用してください。材料技術と工作技術、2020、51(7): 890-897。
- タングステンカーバイド粉末の粒度最適化に関する研究[J]. 材料科学と工学技術、2020、51(7): 890-897。
- バウアー T. Wärmebehandlung von Wolframcarbidgepulver [M]. ベルリン: シュプリンガー、2022年。
- タングステンカーバイド粉末の熱処理[M]. ベルリン: Springer-Verlag、2022年。
- 山田太郎. 炭化粉体の表面改質技術. 粉体工学会誌, 2021, 58(4): 156-163.
- タングステンカーバイド粉末の表面改質技術[J]. 粉体工学会誌、2021年、58(4): 156-163。
- 中村健さん. 超微粒子タングステン炭化粉末を熱処理したもの[J]. ジャーナル オブ マテリアルズ サイエンス、2023、72(6): 412-419。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超微粒タングステンカーバイド粉末の熱処理[J]. Journal of Materials Science Society,
2023, 72(6): 412-419.



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第7章 炭化タングステン粉末の環境と安全に関する考慮事項

炭化タングステン粉末は、超硬合金、切削工具、耐摩耗コーティングなどの高性能材料の中核原料として、その生産と応用が産業の進歩を促進してきた一方で、環境汚染、労働安全、資源の持続可能性といった課題ももたらしてきた。世界がグリーン製造と持続可能な開発に注目する中、炭化タングステン粉末産業の環境影響と安全管理は研究と実践の焦点となっている。本章では、炭化タングステン粉末の環境と安全に関する問題を、生産プロセスにおける環境影響、安全運転仕様、リサイクルと再生利用、リサイクル技術分析の4つの側面から体系的に論じる。プロセスの最適化、規制要件、循環型経済の概念と組み合わせることで、業界に科学的なガイダンスと技術リファレンスを提供する。

7.1 生産時の環境影響

炭化タングステン粉末の製造には、原料の精製、炭化反応、粉砕、選別といった複数の工程が含まれます。これらの工程では、廃ガス、廃水、固形廃棄物、エネルギー消費が発生し、環境に潜在的な影響を与える可能性があります。これらの影響を科学的に評価・制御することは、企業の社会的責任の表明であるだけでなく、グリーン製造を実現し、国際的な環境規制を遵守するための鍵でもあります。以下では、環境影響の発生源、定量評価、制御技術、そして将来の動向という4つの側面から、生産プロセスにおける環境問題について詳細に考察します。

環境への影響源

排ガス排出：炭化反応および熱処理工程において、高温の排ガスとともに揮発性有機化合物（VOC）、一酸化炭素（CO）、二酸化炭素（CO₂）、微量硫化物（SO₂など）が排出される可能性があります。例えば、炭化炉が1400～1600℃で稼働している場合、炭化タングステン粉末1トンあたり2～3トンのCO₂が発生する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

废水污染

湿式粉碎および化学精製プロセスでは、重金属（タングステンや鉄など）や酸性物質（HCl、 H_2SO_4 など）を含む废水が発生します。処理せずにそのまま排出すると、水の pH 値の低下（6未満）や重金属含有量の過剰（タングステン濃度 10mg/L 超）につながる可能性があります。

固形廃棄物

原料の精製から生じるスラグ、粉碎工程で発生するボールミル廃材、そして不適格な粉末は固形廃棄物を構成します。世界のタングステン産業は毎年約 50 万トンの固形廃棄物を排出しており、そのうち約 20%は有害廃棄物（重金属を含むフィルター残渣など）です。

エネルギー消費

炭化タングステン粉末の製造はエネルギー消費量の多いプロセスであり、粉末 1 トンあたり平均 8,000~12,000 kWh の電力を消費し、生産コストの 30%~40%を占め、間接的に高い炭素排出量（粉末 1 トンあたり約 4~6 トンの CO_2 ）につながります。

環境影響の定量的評価

カーボンフットプリント分析

ライフサイクルアセスメント（LCA）によると、炭化タングステン粉末の製造における炭素排出量は、主に炭化反応（60%）と電力消費（30%）に起因しています。典型的な生産ラインのカーボンフットプリントは、粉末 1 トンあたり 5.5 トンの CO_2 換算値であり、これは一般的な鋼材（約 2 トンの CO_2 換算値）よりもはるかに高い値です。

水資源への影響

废水排出において、タングステンの回収率は通常 85%~90%に過ぎず、残りの 10%~15%は溶解または懸濁した形で水域に入り、土壌や地下水の汚染を引き起こす可能性があります。

固形廃棄物の環境リスク

未処理の固形廃棄物では、重金属（タングステンやコバルトなど）が浸出により移動し、汚染半径が最大 1~2 キロメートルに達し、周囲の生態系に影響を及ぼす可能性があります。

評価ツール

ISO 14040/14044 規格：原材料の抽出から粉末製造までの全体的な環境影響を評価するための LCA 分析に使用されます。

環境影響評価（EIA）：廃ガス、废水、固形廃棄物の排出濃度と生態学的リスクを定量化します。

エネルギー消費監査：熱バランスと電力分析を通じて、エネルギー消費量の多いリンク（エネルギー消費量の 50% を占める炭化炉など）を特定します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

環境影響制御技術

廃ガス処理:

吸着触媒燃焼: 活性炭を使用して VOC を吸着し、触媒燃焼させることで、浄化効率は 95%、CO₂排出量は 10%削減されます。

湿式洗浄: アルカリ溶液 (NaOH など) を使用して SO₂ を吸収し、浄化率は 98% に達し、排気ガス排出濃度は 10mg/m³ 以下に抑えられます。

排気ガス回収システムにより、CO₂排出量が粉末 1 トンあたり 3 トンから 2.2 トンに削減され、EU 排出基準 (<2.5 トン CO₂/トン) を満たします。

廃水処理:

化学沈殿法: Ca(OH)₂ または Na₂CO₃ を添加してタングステンをタングステン酸カルシウムの形で沈殿させ、回収率は 95% に向上し、廃水中のタングステン濃度は 0.5mg/L に低下します。

膜分離技術: 逆浸透膜 (孔径 0.1~1nm) を使用して重金属や酸性物質を除去し、廃水回収率は 80% です。

応用例: ある企業は、膜分離と化学沈殿を組み合わせることで、廃水排出量を粉末 1 トンあたり 500 m³ から 200 m³ に削減し、国家第 1 レベルの排出基準 (GB 8978-1996) を達成しました。

固形廃棄物管理:

資源の活用: スラグはセメント製造に使用され、廃棄ボールミル媒体は低級耐摩耗部品に使用され、回収率は 70% です。

安全な埋立地: 重金属を含む有害廃棄物は固化 (セメントを追加、固化率 > 99%) され、浸出汚染を防止します。

応用例: ある企業は固形廃棄物の 90% をリサイクルし、埋め立てコストを 50% 削減し、年間 1,000 万人民元を節約しました。

省エネ技術:

高効率炭化炉: 抵抗炉の代わりに誘導加熱炉を使用することで、エネルギー効率が 20% 向上し、粉末 1 トンあたりの電力消費量が 7000kWh に削減されます。

廃熱回収: 炭化炉の排気からの廃熱は原料の予熱に利用され、回収された熱は総エネルギー消費量の 15% を占めます。

廃熱回収システムを通じて年間 CO₂排出量を削減します。

将来の動向

グリーンプロセス開発

低温炭化技術 (マイクロ波炭化、温度 < 1200° C など) を検討して、エネルギー消費を 30% 削減し、炭素排出量を粉末 1 トンあたり 2 トンの CO₂ 以内に抑えます。

ゼロエミッション目標

閉ループ水システムと完全な廃ガス回収技術を推進し、廃水と廃ガスの排出をほぼゼロにすることを目指します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

インテリジェントな監視

モノのインターネット（IoT）とビッグデータ分析を活用して、排出パラメータ（VOC 濃度、誤差 < 1ppm など）をリアルタイムで監視し、処理効率を最適化します。

政策主導

世界的には、パリ協定と中国の「デュアルカーボン」目標（2060 年までにカーボンニュートラル）により、業界は低炭素技術を採用するようになっており、タングステンカーバイド粉末生産のカーボンフットプリントは 2030 年までに 50% 削減されると予想されています。

7.2 安全操作仕様

タングステンカーバイド粉末の製造・加工には、高温、高圧、化学試薬、粉塵といった潜在的なリスクが伴います。科学的な安全操作仕様は、従業員の健康と生産設備の安定性を確保するための基礎となります。以下では、安全リスクの特定、操作仕様、保護対策、規制遵守という 4 つの側面から、タングステンカーバイド粉末製造における安全管理要件を体系的に分析します。

セキュリティリスクの特定

粉塵爆発の危険性：炭化タングステン粉末（粒子径 < 10 μm ）が空気中に浮遊する粉塵雲を形成し、裸火や静電気にさらされると爆発する可能性があります。最小発火エネルギーはわずか 10mJ で、爆発圧力は 0.7MPa に達する可能性があります。

精製および洗浄プロセスで使用される硝酸（ HNO_3 ）は腐食性があり、濃度が 10% を超えると皮膚の火傷や呼吸器系の損傷を引き起こす可能性があります。

高温設備のリスク：炭化炉は 1400~1600°C で稼働するため、火傷、設備の過圧（>0.5MPa）、ガス漏れ（ H_2 など）のリスクがあります。

職業上の健康被害：炭化タングステンの粉塵（濃度 > 5mg/m³）に長期間さらされると肺線維症を引き起こす可能性があります、コバルトの粉塵（>0.1mg/m³）は感作性があります。

安全運転規則

防塵：

換気と除塵：生産工場には、集塵率が 99.9% を超える高効率パルスバグ集塵機が備えられており、工場内の粉塵濃度は 2mg/m³ 以下に制御されています。

防爆対策：火花による爆発を防止するため、防爆モーター（Ex d IIC T4）と静電接地装置を使用し、静電電位は 100V 未満にします。

仕様要件：作業者は帯電防止作業服（表面抵抗 < 10⁸ Ω ）を着用し、粉体の移送には密閉パイプライン（漏れ率 < 0.1%）を使用する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

化学試薬管理:

保管仕様: 酸性試薬は耐腐食性容器(316L ステンレス鋼)に保管され、保管タンクには漏れ警報システム(感度 0.1ppm)が装備されています。

使用仕様: 作業中は二次保護具(耐酸性手袋、保護マスク)を使用し、廃酸は排出前に中和槽(pH 6-9)で処理します。

事故対応時間が 30 秒未満になるように、緊急時洗浄ステーション(流量 > 20 L/分)と中和剤(NaHCO₃など)を備えています。

高温機器の操作:

設備のメンテナンス: 炭化炉では圧力センサーを毎年校正し(誤差 <0.01MPa)、シーリングリングを定期的に点検する必要があります(寿命 >5000 時間)。

操作手順: 開始前に、水素濃度が 4% (爆発下限値) 未満であることを確認し、運転中に炉の温度を監視します(偏差 ± 5° C)。

保護対策: 作業者は耐熱保護服(耐熱温度 >1000°C)を着用し、炉内エリアには遮断バリア(厚さ >10mm)を設置します。

労働衛生管理:

防塵: N95 防塵マスク(濾過効率 > 95%)を着用し、作業場に局所排気装置を設置します(風量 > 500m³/h)。

健康モニタリング: コバルトに曝露された人々(血中コバルト濃度 <1 μg/L)のモニタリングに重点を置いて、毎年肺機能検査を実施します。

研修要件: 新入社員は、粉塵防止、化学物質管理、緊急救助などを含む 40 時間以上の安全研修を受けます。

保護対策と適用例

自動制御: PLC システムを使用して粉塵濃度、炉の圧力、ガス流量を監視し、異常が発生した場合には機械が自動的にシャットダウンされるため、事故率が 80% 削減されます。

個人用保護具(PPE): 全身防塵スーツ(保護レベル IP65)と陽圧呼吸器(空気供給量 >30L/分)を装備し、保護効率は 99%です。

応用例: ある企業では、自動粉塵除去システムと防爆監視を導入し、粉塵爆発事故発生率を年間 0.5 回から 0 回に削減し、職業病の発生率を 90%削減しました。

規制コンプライアンス:

国際基準: OSHA (米国労働安全衛生局)の粉塵暴露限度(5mg/m³)および ISO 45001 労働安全衛生管理システムに準拠しています。

国内基準: GBZ 2.1-2019「職場における危険因子の職業暴露限界」(タングステン粉塵 <6mg/m³)および「労働安全法」(2021 年改訂版)に準拠。

将来の動向

インテリジェント安全管理: AI とセンサー技術を活用し、粉塵濃度(誤差 <0.1mg/m³)と設備

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の状態をリアルタイムで監視し、事故リスクを予測し、対応時間を 10 秒に短縮します。

グリーン保護技術：無毒の化学試薬（HCl の代わりにクエン酸など）と低粉塵プロセス（湿式炭化など）を開発して、職業上の健康リスク。

2030 年までに m^3 。

7.3 回収とリサイクル

タングステンカーバイド粉末のリサイクルと再利用は、資源の持続可能性を実現し、環境負荷を低減するための重要な手段です。希少金属であるタングステンは、世界的に埋蔵量が限られており（約 350 万トン）、タングステンカーバイド粉末の生産は高品位のタングステン鉱石に依存しています。リサイクル技術は、資源不足を効果的に緩和し、廃棄物の排出量を削減することができます。以下では、リサイクルの必要性、循環型経済のメリット、そして将来の方向性という 3 つの側面から、リサイクルと資源循環の実践と展望を体系的に分析します。

リサイクルの必要性

資源の希少性：世界のタングステン資源は中国に集中しており（埋蔵量の 55% を占める）、高品位鉱石（ $WO_3 > 0.5\%$ ）は徐々に枯渇しています。リサイクルにより、タングステンの利用率は 60% から 90% に向上する可能性があります。

環境上の利点：1 トンのタングステンカーバイド粉末をリサイクルすると、約 4 トンの CO_2 排出量と 200 m^3 の廃水を削減でき、一次生産に比べて環境負荷を 50% 削減できます。

経済的価値：タングステンのリサイクルコスト（約 10 万人民币元/トン）は一次生産コスト（約 25 万人民币元/トン）よりもはるかに低く、利益率は 30% 増加します。

規制主導：中国の「固形廃棄物による環境汚染の防止および制御に関する法律」（2020 年改訂版）および EU 循環経済行動計画（2020 年）では、2030 年までにタングステンのリサイクル率を 70% 以上にすることが求められています。

循環型経済のメリット

資源のメリット：世界中で毎年約 30 万トンのスクラップ超硬合金をリサイクルできます。これは、追加の 10 万トンのタングステン資源に相当し、タングステン鉱山の採掘寿命を 10 ~ 15 年延長します。

環境上の利点：リサイクルプロセスからの炭素排出量は元の生産量のわずか 30% に抑えられ、廃水排出量は 70% 削減され、固形廃棄物は 80% 削減されます。

経済的メリット：リサイクル粉末の市場価格（約 15 万元/トン）はバージン粉末よりも低く、世界のリサイクル市場規模は 2030 年に 200 億元に達すると予想されています。

応用例：ある企業は 5,000 トンのスクラップ合金をリサイクルし、年間利益は 3,000 万人民币元となり、廃水排出量は $50m^3$ /トンに削減されました。

今後の方向性

高効率リサイクル技術：低温電気化学リサイクル（温度 $< 100^\circ C$ ）を開発し、エネルギー消費を 50% 削減し、回収率を 98% に向上させます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

インテリジェントな選別: AI と蛍光 X 線 (XRF) 技術を使用して廃棄物の成分を正確に識別し、選別効率を 30% 向上させます。

閉ループシステム: 廃合金から新粉末までのフルチェーンリサイクルシステムを確立し、2035 年までにタングステン資源の廃棄ゼロを目指します。

政策支援: 中国の第 14 次 5 年計画と EU の電池および廃棄物指令 (2023 年) により、リサイクル率の目標は 50% から 80% に引き上げられる。

7.4 炭化タングステン粉末回収技術の分析

炭化タングステン粉末のリサイクルは、タングステン資源の持続可能な利用、環境負荷の削減、生産コストの削減を実現するための重要な技術的手段です。炭化タングステンを含む廃棄物（スクラップ炭化物、切削工具、コーティング材など）が主なリサイクル源です。以下では、炭化タングステン粉末のリサイクル方法を詳細に分析し、最も主流の工業的方法を明らかにし、その理論的根拠、プロセスフロー、長所と短所を深く探究します。

7.4.1 リサイクル方法の概要

タングステンカーバイド粉末のリサイクルには主に 5 つの方法があり、それぞれが廃棄物の種類や適用シナリオに適しています。以下の表は、各方法の適用対象、原理、回収率、長所と短所をまとめたものです。

炭化タングステン粉末回収方法の比較

方法	ターゲット顧客	原理	回復率	利点	デメリット
機械的分離	廃棄炭化工具および金型 (WC>80%)	粉砕、ふるい分け、磁気分離による炭化タングステンとバインダー相の分離	80% 85%	プロセスが簡単で、コストが低く (約 20,000 元/トン)、粗粒子 (> 5 μm) に適しています。	粉末は純度が低く (約 95%)、粒子サイズが大きいため、高精度の用途には適していません。
化学溶解法	バインダー相 (Co、Ni) または不純物を含む廃棄合金およびコーティング	酸性/酸化性溶液を使用してバインダー相を溶解し、炭化タングステンを保持または酸化し、その後炭化します。	95% 98%	高い回収率、高純度 (> 99.5%)、超微粉末 (< 1 μm) が得られ、幅広い用途に使用できます。	酸性廃液処理のコストは高く (約 2 万~3 万元/トン)、プロセスは複雑で、設備投資も大きい (約 1,000 万元)。
電気化学的回収	コバルト含有超硬合金スクラップ	廃棄合金を陽極として電気分解し、結合相を溶解して炭化タングステンまたはタングステン酸塩を抽出	90% 95%	エネルギー消費量が低い (約 3000kWh/トン)、廃液はリサイクル可能、ナノ粉末に適している	設備が複雑で、プロセスの安定性を最適化する必要があり、産業規模が小さい

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<p>高温製錬法</p>	<p>複雑な不純物を含むスクラップ（コーティング、混合合金）</p>	<p>出し、炭化する。</p> <p>高温（1800～2000℃）で熔融してタングステンとバインダー相を分離し、冷却後に炭化します。</p>	<p>85%～90%</p> <p>適応性が高く、低品質廃棄物に適しています</p>	<p>エネルギー消費量が高い（約 10,000 kWh/トン）、設備投資が大きい（約 500 万元）、粉末純度が平均的</p>
<p>亜鉛溶解法</p>	<p>コバルトを含む廃棄炭化工具および金型</p>	<p>液体亜鉛を用いて 900～1000℃で結合相を溶解し、炭化タングステンを分離し、亜鉛を蒸発させて回収する。</p>	<p>90%～95%</p> <p>粉末に近い粉末性能</p>	<p>亜鉛の揮発により廃ガスが発生し、排ガス処理が必要となり、プロセスが複雑でコストが高い（約 3 万元/トン）</p>

7.4.2 最も主流の工業化方法

化学溶解

法は現在、工業生産において炭化タングステン粉末を回収する最も主流の方法であり、中国、欧州、北米などの主要なタングステン産業地域で広く使用されています。この方法が主流となっている理由は以下のとおりです。

高い回収率と純度

回収率は 95%～98% に達し、粉末純度は 99.5% を超えており、高性能の超硬合金やコーティング用途に適しています。

幅広い適用性

コバルト（5%～20%）を含む超硬合金、ニッケルまたは複合不純物、コーティング廃棄物、粉末残留物など、さまざまな廃棄物を処理できます。

成熟した技術

世界には、プロセスパラメータが高度に最適化され、生産コストが制御可能な（1 トンあたり約 8 万～12 万人民币）成熟した工業生産ラインがあります。

市場占有率

業界データによると、化学溶解法は世界の炭化タングステン回収量の 60%～70% を占め、他の方法（亜鉛製錬の約 20%、機械分離の約 10% など）をはるかに上回っています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4.3. 理論的根拠

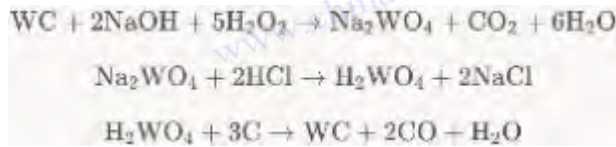
化学溶解法の核心は、化学試薬を用いて、廃炭化物中の結合相（コバルト、ニッケルなど）または酸化タングステンカーバイド粒子を選択的に溶解し、高純度のタングステンカーバイドまたはタングステン化合物を分離し、その後の処理によってタングステンカーバイド粉末を生成することです。その理論的根拠は以下のとおりです。

選択的溶解：バインダー相（コバルトなど）は酸性または酸化性溶液（ HNO_3 、 $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$ など）に容易に溶解しますが、炭化タングステン（WC）は高い化学的安定性（室温での耐酸性および耐アルカリ性）により固体粒子として保持されます。反応例：

$$\text{Co} + 2\text{HNO}_3 \rightarrow \text{Co}(\text{NO}_3)_2 + \text{H}_2$$

炭化タングステンは反応に参加せず、安定した状態を保ちます。

酸化還元機構：タングステン化合物を回収する必要がある場合、炭化タングステンを強力な酸化剤（ $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}_2$ など）で酸化してタングステン酸塩（ Na_2WO_4 ）とし、その後、酸性化、還元、炭化によってWCを生成します。反応例：



粒子保護

溶液の pH (2~4)、温度 (60~90°C)、酸化剤濃度 ($\text{H}_2\text{O}_2 < 10\%$) を制御することで、炭化タングステン粒子の過剰な酸化や溶解を回避し、リサイクル粉末の粒子サイズと形態が元の粉末に近くなることを保証します。

熱力学と運動学

溶解プロセスは熱力学的平衡（ギブス自由エネルギー $\Delta G < 0$ など）と速度論的因子（反応速度定数 k など）によって制御され、効率を向上させるにはプロセスパラメータを最適化する必要があります。例えば、コバルトの溶解速度は 70°C では 25°C の 10 倍になります。

3.2 プロセスフロー

その化学溶解の工業プロセスフローには通常、次のステップが含まれ、具体的なパラメータは廃棄物の種類や機器によって異なります。

廃棄物の前処理

目的：表面の油、酸化層、タングステン以外の不純物を除去し、その後の溶解効率を向上させます。

方法：スクラップ合金を機械的に 5~10mm の粒子に粉砕し、アルカリ洗浄剤（ NaOH 溶液、濃度 5%）で油分を除去し、超音波洗浄（周波数 40kHz）で酸化物を除去します。

パラメータ：粉砕エネルギー消費量は約 50kWh/トン、洗浄時間は 10~20 分です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

結合相の溶解

目的：炭化タングステンを結合相（コバルトやニッケルなど）から分離します。

方法：廃棄物を酸性溶液（例えば、 HNO_3 、濃度 20%～30%、または $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$ 混合溶液、 H_2O_2 濃度 5%）に入れ、60～80℃（速度 200～400rpm）で攪拌し、反応時間は 2～6 時間です。

反応制御：炭化タングステンの溶解を避けるために pH を 2～3 に維持します。コバルトの効率的な溶解を確保するために、溶液の酸化還元電位（ORP）を 500～700 mV に制御します。

出力：固体タングステンカーバイド粒子（純度 > 98%）およびコバルト/ニッケル溶液（コバルト濃度 50-100g/L）。

固液分離

目的：炭化タングステン粒子を抽出し、金属を含む廃液を分離します。

方法：遠心分離機（速度 3000～5000rpm）またはフィルタープレス（圧力 0.5～1MPa）を使用して固液分離し、タングステンカーバイド粒子を脱イオン水（pH 6～7）で 3～5 回洗浄します。

パラメータ：分離効率 > 99%、洗浄水消費量約 5m³/トン粉末。

粉末精製（オプション）

目的：炭化タングステンの純度と粒子サイズの均一性をさらに向上させること。

方法：超微粉末が必要な場合、リサイクル粒子を二次粉碎（湿式ボールミル、時間 4～8 時間）するか、酸化還元経路でタングステン酸塩を生成してから炭化することができます。

パラメータ：粉碎後の粒子サイズは 0.5～2 μm、炭化温度は 1200～1400℃、断熱時間は 2～3 時間。

廃水処理

目的：コバルト・ニッケルを回収し、酸性廃液を処理して排出基準に従って排出する。

方法：廃水を NaOH（pH 7-8）で中和し、 CaCl_2 を加えてコバルト/ニッケルを沈殿させ（回収率 > 90%）、廃水を逆浸透膜（孔径 0.1nm）で精製し、タングステン濃度を 0.2mg/L まで下げた。

パラメータ：廃水処理コストは粉末 1 トンあたり約 5,000 人民元で、排出は GB 8978-1996 規格に準拠しています。

粉末の乾燥と試験

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

目的：規格に適合した炭化タングステン粉末を得ること。

粉末を真空乾燥炉（温度 80～100℃、真空度 10^{-2} Pa）で 4～6 時間乾燥させ、粉末の化学組成（ICP-MS、精度 0.01%）、粒径（レーザー粒度分布測定装置、誤差 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ ）、酸素含有量（赤外線吸収法、誤差 0.005%）を検査した。

出力：リサイクルタングステンカーバイド粉末、純度 >99.5%、粒子サイズ 0.5～5 μm 、酸素含有量 <0.1%。

3.3 利点と欠点の分析

利点

高い回収率と純度：回収率は 95%～98%、粉末純度は 99.5%以上です。高性能超硬合金、工具、コーティング材に直接使用でき、その性能は元の粉末に近いです（硬度 HV 1800～2000、韌性 8～10MPa $\cdot \text{m}^{1/2}$ ）。

強力な柔軟性：コバルト（5%～20%）を含む超硬合金、ニッケルまたは複合不純物、コーティング廃棄物、粉末残留物など、さまざまな廃棄物を処理でき、その適応性は機械的分離および亜鉛溶解方法よりも優れています。

制御可能な粒子サイズ：二次粉碎または酸化炭化により、超微粒子（<1 μm ）またはナノスケール（<100nm）の粉末を製造でき、ハイエンドアプリケーション（3D 印刷、精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ など）のニーズを満たすことができます。

成熟した技術：世界中に数百の工業生産ラインがあり（中国の株洲、ドイツの HC Starck など）、高度に最適化されたプロセス パラメータと 1 日あたり 1～2 トン / ラインの生産効率を備えています。

副産物の回収：コバルト、ニッケル、その他の結合相は副産物（純度 > 99%）として回収され、バッテリーまたは合金の製造に使用されて経済的利益が増加します（副産物の価値は粉末 1 トンあたり約 30,000 人民元です）。

デメリット

廃水処理コストが高い：酸性廃水（粉末 1 トンあたり約 3～5 m^3 ）は、中和、沈殿、膜分離処理が必要です。廃水処理コストは、総コストの 20～30%（約 2 万～3 万元/トン）を占めます。環境リスク：廃水が適切に処理されない場合、重金属（コバルトなど、濃度 > 50 mg/L）が水域を汚染する可能性があるため、排出基準（GB 8978-1996、コバルト < 1 mg/L など）を厳守する必要があります。

プロセスの複雑さ：反応には複数のステップ（溶解、分離、精製）が含まれ、pH、温度、酸化剤濃度の正確な制御が必要であり、オペレーターには専門的なトレーニング（40 時間以上）が必要です。

設備投資額が高い：工業生産ラインには、耐腐食性反応器（316L ステンレス鋼）、遠心分離機、廃水処理システムが必要であり、総投資額は約 1,000 万～2,000 万人民币元です。中小企業にとって参入障壁は比較的高いです。

エネルギー消費が比較的高い：高温製錬（10,000 kWh/トン）より低いものの、溶解および乾燥プロセスには依然として約 4,000～6,000 kWh/トンが必要であり、コストの 15%を占めま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。

化学溶解法の主流の地位と最適化の方向性

化学溶解法が主流となった主な理由は、その高い回収率、高純度、幅広い適用性により、経済効果と環境要求のバランスをとることができることです。世界の大手タングステンリサイクル企業（中国タングステン高科技や米国のケナメタルなど）は、いずれも化学溶解を中核プロセスとしており、年間リサイクル量は世界シェアの60%以上（約20万トン/年）を占めています。亜鉛溶解法（高温と排ガス処理が必要）や機械分離法（純度が低い）と比較すると、化学溶解法は性能面でもコスト面でも多くのメリットがあります。

最適化の方向：

グリーン溶剤の開発：強酸に代わる低毒性試薬（クエン酸、酢酸など）を検討し、廃液処理コスト（目標50%削減）と環境リスクを削減します。

エネルギー消費量の削減：マイクロ波溶解（電力5~10kW）の導入により、反応時間が4時間から1時間に短縮され、エネルギー消費量は3000kWh/トンに削減されます。

インテリジェント制御：AIを使用して溶液のpH（誤差<0.1）とORP（誤差<5mV）を監視し、溶解効率を10%~15%向上させます。

クローズドループ：「デュアルカーボン」目標（2060年までにカーボンニュートラル）に沿って、廃水排出ゼロを達成するために、完全な廃液回収システム（電解酸再生など）を開発します。

ナノ粉末リサイクル：酸化炭化経路を最適化して、100nm未満の粉末を製造し、積層造形のニーズに対応します（市場規模は2030年に50億人民元に達すると予想されています）。

参考文献

李明. 超硬合金材料[M]. 北京：冶金工業出版社，2018年。

李明. 超硬合金の材料科学 [M]. 北京：冶金工業出版社，2018年。

張立、王伝慧. タングステンカーバイド粉末製造の環境影響分析[J]. 環境保護科学，2021，47(3)：78-85.

張立、王伝慧. タングステンカーバイド粉末製造の環境影響分析[J]. 環境保護科学，2021年，47(3)：78-85.

王強、李明「スクラップセメントカーバイドのリサイクル技術の進歩[J]」中国タングステン産業、2020年、35(5):66-72。

王強、李明「廃棄セメント炭化物のリサイクル技術の進歩[J]」中国タングステン産業、2020年、35(5):66-72。

陳偉、趙剛. タングステンカーバイド粉末製造における安全管理に関する研究[J]. 安全環境ジャーナル，2022，22(4)：123-130.

陳偉、趙剛. タングステンカーバイド粉末製造における安全管理に関する研究 [J]. 安全環境ジャーナル，2022，22(4)：123-130.

Liu Yang, Wang Zhiqiang. タングステンカーバイド粉末のリサイクルによる経済的・環境的メリット[J]. Resources Science, 2023, 45(2): 89-97.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- Liu Yang、Wang Zhiqiang. タングステンカーバイド粉末のリサイクルによる経済的・環境的メリット [J]. Resources Science, 2023, 45(2): 89-97.
- 張立、陳偉. タングステンカーバイド粉末のリサイクルのための化学溶解法のプロセス最適化[J]. 粉末冶金技術、2021年、39(4): 123-130。
- 張立、陳偉. タングステンカーバイド粉末リサイクルのための化学溶解プロセスの最適化[J]. 粉末冶金技術、2021年、39(4): 123-130。
- スミス J、ブラウン T. タングステンカーバイド製造の環境影響[J]. クリーナープロダクションジャーナル、2021年、298: 126789。
- タングステンカーバイド粉末製造の環境影響[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 298: 126789.
- ジョンソン R、リー K. タングステンカーバイド粉末の取り扱いに関する安全プロトコル [J]. 労働安全衛生、2022年、91(5): 34-41。
- タングステンカーバイド粉末の取り扱いに関する安全仕様[J]. 労働安全衛生、2022年、91(5):34-41。
- Davis M, Patel S. タングステンカーバイド廃棄物のリサイクル技術 [J]. 資源、保全、リサイクル、2023, 190: 106856.
- タングステンカーバイド廃棄物リサイクル技術[J]. 資源、保護、リサイクル、2023、190: 106856。
- Smith J、Brown T. タングステンカーバイド回収のための化学溶解法 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 305: 117589.
- タングステンカーバイド回収のための化学溶解法[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 305: 117589.
- ミュラー H、シュミット P. Wolframcarbidherstellung [J]. Umweltwissenschaften und Schadstoff -Forschung、2020、32(6): 456-463。
- タングステンカーバイド製造の環境影響[J]. 環境科学と汚染物質研究、2020年、32(6): 456-463。
- ミュラー H、シュミット P. ヴォルフラムカービッドのリユグヴェイニング オーストラリア Abf ällen [J] 。材料技術と工作技術、2021、52(5): 678-685。
- 廃棄物からの炭化タングステンの回収[J]. 材料科学と工学技術、2021年、52(5):678-685。
- Bauer T. Sicherheitsmanagement in der Wolframcarbidproduktion [M]. ベルリン: シュプリンガー、2022年。
- タングステンカーバイド製造における安全管理[M]. ベルリン: Springer-Verlag、2022年。
- 山田太郎. 炭化炭素粉末製造の環境影響評価. 環境科学誌, 2021, 34(3): 123-130.
- タングステンカーバイド粉末製造の環境影響評価[J]. 環境科学会誌、2021年、34(3): 123-130。
- 中村 健. 炭化技術の廃止. 資源循環学会誌, 2023, 29(4): 345-352.
- 廃棄タングステンのリサイクル技術[J]. 資源循環学会誌, 2023, 29(4): 345-352.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (± 0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤ 0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤ 0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance.

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within $\pm 10\%$.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm^3 (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm^3 (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤ 0.05	≤ 0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
Brand					
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



第8章 炭化タングステン粉末の市場と開発動向

炭化タングステン粉末は、超硬合金、切削工具、耐摩耗コーティングなどの高性能材料の主要原料として、世界の製造業において重要な位置を占めています。航空宇宙、エネルギー機器、積層造形、マイクロエレクトロニクスの急速な発展に伴い、炭化タングステン粉末の需要は拡大を続けています。同時に、市場競争と技術革新は、業界を高性能、低コスト、そしてグリーンへと進化させています。本章では、炭化タングステン粉末の需給パターン、技術進歩、そして潜在的な応用分野を、世界市場の概要、技術開発動向、そして将来の応用展望という3つの側面から体系的に分析します。定量データと業界の動向を組み合わせることで、学術研究と産業計画のための包括的な参考資料を提供します。

8.1 世界市場の概要

炭化タングステン粉末の世界市場は、需給、地域分布、価格変動、政策・規制の影響を受け、安定した成長傾向と地域化された競争を示しています。以下では、市場規模、需給構造、地域分布、そして影響要因という4つの側面から、世界市場の現状を詳細に考察します。

市場規模と成長

市場規模：業界レポートによると、世界の炭化タングステン粉末市場規模は2024年に約180億米ドルに達し、2025年から2030年にかけて4.5%~5.5%の複合年間成長率(CAGR)で成長し、2030年には約250億米ドルに達すると予想されています。

ドライバー：

超硬合金の需要：超硬合金は炭化タングステン粉末の消費量の60%以上を占め、切削工具（30%）、採掘工具（20%）、耐摩耗部品（10%）に広く使用されています。

新興分野：積層造形(3Dプリンティング)および高温コーティングの需要増加により、超微粒

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

子($<1\mu\text{m}$)およびナノスケール($<100\text{nm}$)の粉末市場が拡大し、そのシェアは5%から10%に増加しました。

リサイクル市場: リサイクルタングステンカーバイド粉末の市場規模は約30億米ドルで、市場全体の16.7%を占め、2030年には20%に増加すると予想されています。

生産と消費: 2024年、世界の炭化タングステン粉末の生産量は約85,000トン、消費量は約82,000トンとなり、そのうち中国は生産量の60%(約51,000トン)、消費量の50%(約41,000トン)を占める。

需要と供給の構造

供給側:

主要生産国: 中国(60%)、ヨーロッパ(20%、主にドイツとオーストリア)、北米(10%)、その他地域(10%、日本とロシアを含む)。

企業構造: 世界市場は、中国の大手企業数社(市場シェア15%)、ドイツのHC Starck(12%)、米国のKennametal(10%)など、少数の企業によって支配されています。中小企業は、主に技術障壁の低いローエンド市場に集中しています。

原材料の制約: タングステン鉱石の埋蔵量は中国(55%)とロシア(15%)に集中しています。高品位鉱石($\text{WO}_3 > 0.5\%$)は徐々に枯渇しており、原料粉末のコスト(約30万元/トン)が上昇しています。

需要側:

業界分布: 超硬合金(60%)、耐摩耗コーティング(20%)、溶射(10%)、付加製造(5%)、その他(5%、触媒、電子材料など)。

地域別需要: アジア太平洋(主に中国とインド)が55%、ヨーロッパが25%、北米が15%、その他の地域が5%を占めています。

価格動向: 2024年には、炭化タングステン粉末の平均価格は45米ドル/kg、超微粉($<1\mu\text{m}$)は60米ドル/kgに達すると予想されます。原材料費とリサイクル率の影響を受け、2030年には価格変動幅は35~50米ドル/kgになると予想されます。

地域分布と競争

中国市場:

利点: 生産量と消費量は世界一で、産業チェーンが完備しており、コストが比較的低い(生産コストは約30万元/トン)。

課題: ハイエンドの粉末($<0.5\mu\text{m}$)は輸入に依存しており、技術格差は約5~10年あり、環境規制の強化によりコストが増加します(約10%)。

代表的な企業は、中国タングステンハイテック、廈門タングステン工業、株洲セメントカーバイドグループで、これら3社で中国市場の70%を占めています。

欧州市場:

利点: 最先端技術、超微粒子およびナノスケール粉末に重点を置き、製品品質が高い(純度 $>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

99.8%、粒子サイズ偏差 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 。

課題：生産コストが高く（1 トンあたり約 30 万人民币元）、原材料の輸入により市場規模が制限されています。

代表的企業：高級工具およびコーティング市場に焦点を当てた HC Starck および Ceratizit。

北米市場：

利点：積層造形と航空宇宙に対する強い需要、および高度なリサイクル技術（リサイクル率 $> 70\%$ ）。

課題：生産量が限られていること（約 8,500 トン）、中国の原材料への依存、サプライチェーンに影響を与える地政学的リスク。

代表企業：ケナメタル、グローバルタングステン&パウダー。

その他の地域：日本（三井金属）は電子材料用の粉末に重点を置いており、ロシア（Wolfram Company）は低コストの輸出に依存しており、インド（Sandvik India）は急成長市場（CAGR 7%）を有しています。

市場に影響を与える要因

政策と規制：中国の第 14 次 5 年計画と EU の重要原材料指令（2023 年）では、タングステン資源の保護とリサイクルを推進しており、2030 年までにリサイクル率を 70% にすることを目標としています。

技術の進歩：超微細粉末とグリーン製造技術によりコストが 10% ~ 15% 削減され、市場競争力が向上します。

経済の不安定さ：世界的な製造業の回復（2025 年に 3% の成長が見込まれる）により需要は増加するが、地政学的紛争や貿易障壁によりサプライチェーンの混乱が生じる可能性がある。

環境圧力：炭素排出税（2026 年に実施される EU CBAM など）と中国の「デュアルカーボン」目標（2060 年までにカーボンニュートラル）により、生産コストが 5%~10% 増加します。

8.2 技術開発の動向

タングステンカーバイド粉末の技術開発は、高性能用途と環境規制の要件を満たすため、性能の最適化、コスト削減、そしてグリーン製造に重点を置いています。以下では、粉末調製、性能改質、グリーンプロセス、そしてインテリジェンスの 4 つの側面から、技術動向を体系的に分析します。

高性能粉末調製

超微粒子およびナノパウダー：

$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ を高めるために、粒子サイズが $< 0.5 \mu\text{m}$ （超微粒子）および $< 100\text{nm}$ （ナノ）の粉末を開発します。

技術パス：

プラズマ球状化：電力 20~60kW、3D プリント用の球状粉末（流動性 < 14 秒/50g）を生成（精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ ）。

化学蒸着法（CVD）： WF_6/CH_4 の流量比（1: 1.4）を制御して、凝集率が 2% 未満の $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の粉末を生成します。

進捗状況: 2024 年までに、中国企業は $0.2\ \mu\text{m}$ 粉末（年間 1,000 トン）の大規模生産を達成し、コストは 1 トンあたり 80 万人民币元まで削減され、欧州レベルに近づく。

狭い粒度分布:

目標: $D_{90}/D_{10} < 1.5$ 、焼結の均一性を確保（多孔度 $< 0.5\%$ ）。

技術的パス: 空気流分類（回転速度 10000~25000rpm、精度 $\pm 0.01\ \mu\text{m}$ ）およびオンライン粒子サイズモニタリング（レーザー散乱、誤差 $< 1\%$ ）。

進捗: ドイツ企業は D_{50} 偏差 $\pm 0.02\ \mu\text{m}$ を達成し、これを高級切削工具に適用して歩留まりを 15% 向上させました。

パフォーマンス修正技術

ドーピングと配合:

目標: 耐酸化性、耐腐食性、高温安定性を向上させ、工具寿命を 30% ~ 50% 延長します。

技術パス:

Ti、Cr、Nb（0.5%~2%）をドーピングすると固溶体または第 2 相（ Cr_3C_2 など）が形成され、硬度が HV 1800 から HV 2300 に増加します。

複合 TiC と ZrC（5%~10%）は靱性を $12\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ まで向上させることができ、航空宇宙部品に適しています。

進捗: アメリカの企業は、WC-TiC-Co 複合粉末を開発しました。これにより、切削速度が 20% 向上し、市場シェアは 10% に達しています。

表面改質:

目標: 凝集を減らし（ $< 3\%$ ）、流動性（ $< 13\ \text{秒}/50\ \text{g}$ ）と焼結活性（温度は 1350°C まで低下）を改善します。

技術パス:

SiO_2 と Al_2O_3 （厚さ 10~50nm）の化学コーティングにより、耐酸化性が 25% 向上します。

プラズマ処理（出力 15~30kW）により表面粗さが 20% 減少します。

SiO_2 コーティング粉末（年間 5,000 トン）の量産を達成し、コストを 10% 削減しました。

グリーン製造プロセス

低炭素製剤:

目標: 2060 年のカーボンニュートラル目標に沿って、炭素排出量を 2 トン CO_2 / トン粉末に削減します。

技術パス:

マイクロ波炭化（温度 $< 1200^\circ\text{C}$ ）により、エネルギー消費量が 30%（約 6000kWh/トン）削減さ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

れます。

廢熱回収：炭化炉からの廢熱（総エネルギー消費量の 15%を占める）を回収し、年間 500 万 kWh の電力を節約します。

進捗状況：EU 企業はマイクロ波炭化を試験的に導入し、二酸化炭素排出量を 1 トンあたり 2.5 トンの CO₂ に削減しており、2030 年までにこれを推進する計画です。

廢液および固形廢棄物の処理：

目標：廢水回収率 90%以上、固形廢棄物資源利用率 80%以上。

技術パス：

膜分離（逆浸透、孔径 0.1nm）、タングステン濃度は 0.2mg/L まで低下しました。

固形廢棄物はセメント添加剤として使用され、回収率は 85% です。

ループ式廢水リサイクルにより、排出量は GB 8978-1996 規格に準拠して 100m³/トンまで削減されます。

インテリジェンスとデジタル化

目標：生産効率を 15%~20% 向上し、不良率を 1% 未満に削減します。

技術パス：

AI 最適化：機械学習により、粒度分布（誤差<0.05 μm）と焼結パラメータ（温度偏差±3° C）を予測します。

モノのインターネット（IoT）：粉塵濃度（誤差 < 0.1mg/m³）、エネルギー消費量（誤差 < 1kWh）および排出量（VOC < 1ppm）をリアルタイムで監視します。

進捗状況：ドイツ企業はスマート生産ラインを導入し、生産効率を 18%向上させ、コストを 12%削減しました。中国の株洲市では IoT モニタリングを試験的に導入し、年間 2,000 万人民币元（約 20 億円）の節約を実現しました。

8.3 将来のアプリケーションの展望

技術の進歩、市場の需要、そして政策の指導に牽引され、タングステンカーバイド粉末の今後の応用は、従来の分野で深化していくとともに、新興分野へと拡大していくでしょう。以下では、従来の応用の最適化、新興分野の拡大、そして課題と対策という 3 つの側面から、今後の応用展望を分析します。

従来のアプリケーション最適化

超硬工具：

展望：超微粒子粉末（<0.5 μm）は工具寿命を 50%向上させ、切削速度を 30%向上させ、航空宇宙（チタン合金加工）や自動車（高強度鋼加工）のニーズを満たします。

技術サポート：ナノ複合粉末（WC- TiC）とスマートコーティング（TiN / Al₂O₃）を組み合わせた市場規模は、2030 年に 100 億米ドルに達すると予想されています。

例：中国企業は 0.3 μm の粉末切削工具を開発し、加工効率が 25%向上し、輸出シェアが 30%に増加しました。

耐摩耗コーティング：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

展望：耐摩耗性が 40% 向上した、ガスタービンおよび石油掘削ビット用の高温コーティング（動作温度 > 1000° C）。

技術サポート：プラズマ球状化粉末（流動性 <14 秒/50 g）と HVOF スプレー（コーティング硬度 HV 1400）の組み合わせ。

例：あるヨーロッパの企業は、WC-Cr₃C₂コーティングを開発し、ドリルビットの寿命を 60%延長し、市場シェア 20%を達成しました。

採掘ツール：

展望：高靱性粉末（靱性 >12MPa · m^{1/2}）は深穴あけのニーズを満たし、工具寿命を 30%延長します。

技術サポート：VC および NbC をドーピング（1% ~ 2%）して粒界強度を最適化します。

例：ロシアの企業は高靱性ドリルビットを発売し、市場カバー率を 10% から 15% に拡大しました。

新興分野への進出

付加製造（3Dプリンティング）：

展望：ナノパウダー（<100nm）は航空宇宙部品（精度±5 μm）や医療用インプラント（多孔度 <0.5%）に使用されており、市場規模は 2030 年に 20 億米ドルに達すると予想されています。

技術サポート：球状粉末（D90/D10<1.5）とレーザー溶融堆積（LMD）を組み合わせることで、印刷強度は 2000MPa に達します。

例：米国企業は WC-Co 部品を印刷し、コストを 20% 削減し、納期を 50% 短縮しました。

マイクロエレクトロニクス材料：

展望：超微粉末（<0.2 μm）は、チップ放熱基板（熱伝導率 >200W/ m · K）や導電性ペーストに利用されています。市場規模は 2030 年に 5 億米ドルに達すると予測されています。

技術サポート：高純度粉末（不純物 <10ppm）の CVD 製造と精密焼結（サイズ偏差 ±1 μm）の組み合わせ。

例：ある日本企業は WC ベースのスラリーを開発し、チップ性能を 15%向上させ、市場シェア 30%を達成しました。

エネルギー機器：

展望：耐食コーティング（耐酸性 3 倍）は風力タービンのギアや原子力発電バルブなどに使用され、2030 年には市場規模が 10 億米ドルに達すると予想されています。

技術サポート：ドーピングされた Ta、Cr（0.5%-1%）粉末とプラズマ噴霧の組み合わせ（結合強度 > 80MPa）。

、風力タービンのギアの寿命を 40% 延ばす WC- TaC コーティングを開発しました。

課題と対策

チャレンジ：

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ナノパウダーの生産コスト（約 100 万人民币元/トン）がその普及を制限しており、30%~50%削減する必要がある。

技術的障壁：超微細粉末（ $<0.2\mu\text{m}$ ）とインテリジェント製造の分野では欧州と米国がリードしており、中国はその差を 5~10 年で縮める必要がある。

環境保護要件：世界的な炭素排出税（EU CBAM）と中国の「デュアルカーボン」目標により、コストが 10% ~ 15% 増加します。

対策：

コスト最適化：マイクロ波炭化リサイクル技術を推進し、コストを 1 トンあたり 60 万人民币元に削減します。

技術革新：産学研連携を強化し、AI 支援プロセス（効率 20%向上）とナノ複合粉末（性能 30%向上）を開発する。

グリーン変革：低炭素設備に投資し（年間 1,000 万人民币元を節約）、2030 年の規制に沿ってリサイクル率を 80%に向上します。

参考文献

李明. 超硬合金材料[M]. 北京：冶金工業出版社，2018 年.

李明. 超硬合金の材料科学 [M]. 北京：冶金工業出版社，2018 年.

張立、王伝慧. タングステンカーバイド粉末市場の現状と発展動向[J]. 中国タングステン産業、2022 年、37(3)：56-63.

Zhang Li、Wang Chuanhui . タングステンカーバイド粉末市場の現状と発展動向[J]. 中国タングステン産業、2022 年、37(3)：56-63.

王強、李明「炭化タングステン粉末の世界需給分析[J]」資源科学、2023 年、45(4)：123-130.

王強、李明「タングステンカーバイド粉末の世界需給分析[J]」資源科学、2023 年、45(4)：123-130.

陳偉、趙剛. 炭化タングステン粉末の技術革新に関する研究[J]. 粉末冶金技術、2024、42(2)：89-96.

陳偉、趙剛. 炭化タングステン粉末の技術革新に関する研究[J]. 粉末冶金技術、2024、42(2)：89-96.

Liu Yang, Wang Zhiqiang. タングステンカーバイド粉末の積層造形への応用展望[J]. 材料科学と工学、2024 年、42(5)：78-85.

Liu Yang, Wang Zhiqiang. 付加製造におけるタングステンカーバイド粉末の応用展望 [J]. 材料科学と工学、2024 年、42(5)：78-85.

スミス J、ブラウン T. タングステンカーバイド粉末の世界市場動向 [J]. 材料科学ジャーナル、2023 年、58(6)：3456-3468.

タングステンカーバイド粉末の世界市場動向[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(6)：3456-3468.

ジョンソン R、リー K. タングステンカーバイド製造における技術の進歩 [J]. 粉体技術、2024、415：118123.

タングステンカーバイド製造技術の進歩[J]. 粉体技術、2024、415：118123.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Davis M, Patel S. 付加製造におけるタングステンカーバイドの将来的な応用 [J]. 付加製造、2024、65: 102345。

積層造形におけるタングステンの将来的な応用[J]. Additive Manufacturing, 2024, 65: 102345.

Müller H, Schmidt P. Wolframcarbidpulver の Marktanalyse [J]. 材料技術と工作技術、2023、54(4): 567-574。

タングステンカーバイド粉末市場分析[J]. 材料科学と工学技術、2023年、54(4):567-574。

パウアーT. テクノロジー Entwicklungen in der Wolframcarbidherstellung [M]. ベルリン: シュプリンガー、2024年。

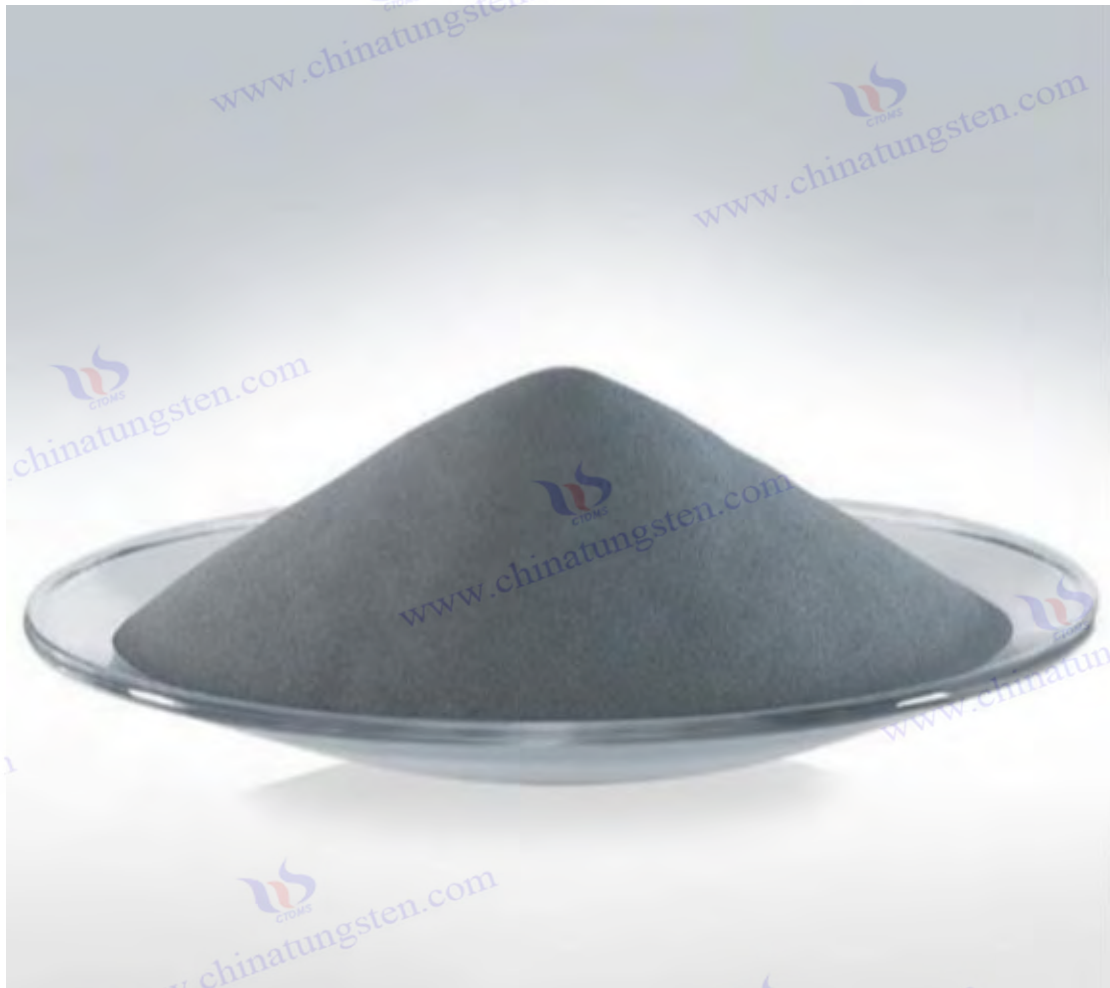
タングステンカーバイド製造における技術開発[M]. ベルリン: Springer-Verlag, 2024.

山田太郎. 炭化二酸化炭素粉末の市場動向. 材料科学誌, 2023, 72(3): 123-130.

タングステンカーバイド粉末市場のダイナミクス[J]. Journal of Materials Science Society, 2023, 72(3): 123-130.

中村 健. 炭化粉体の新たな用途. 粉体工学会誌, 2024, 61(5): 345-352.

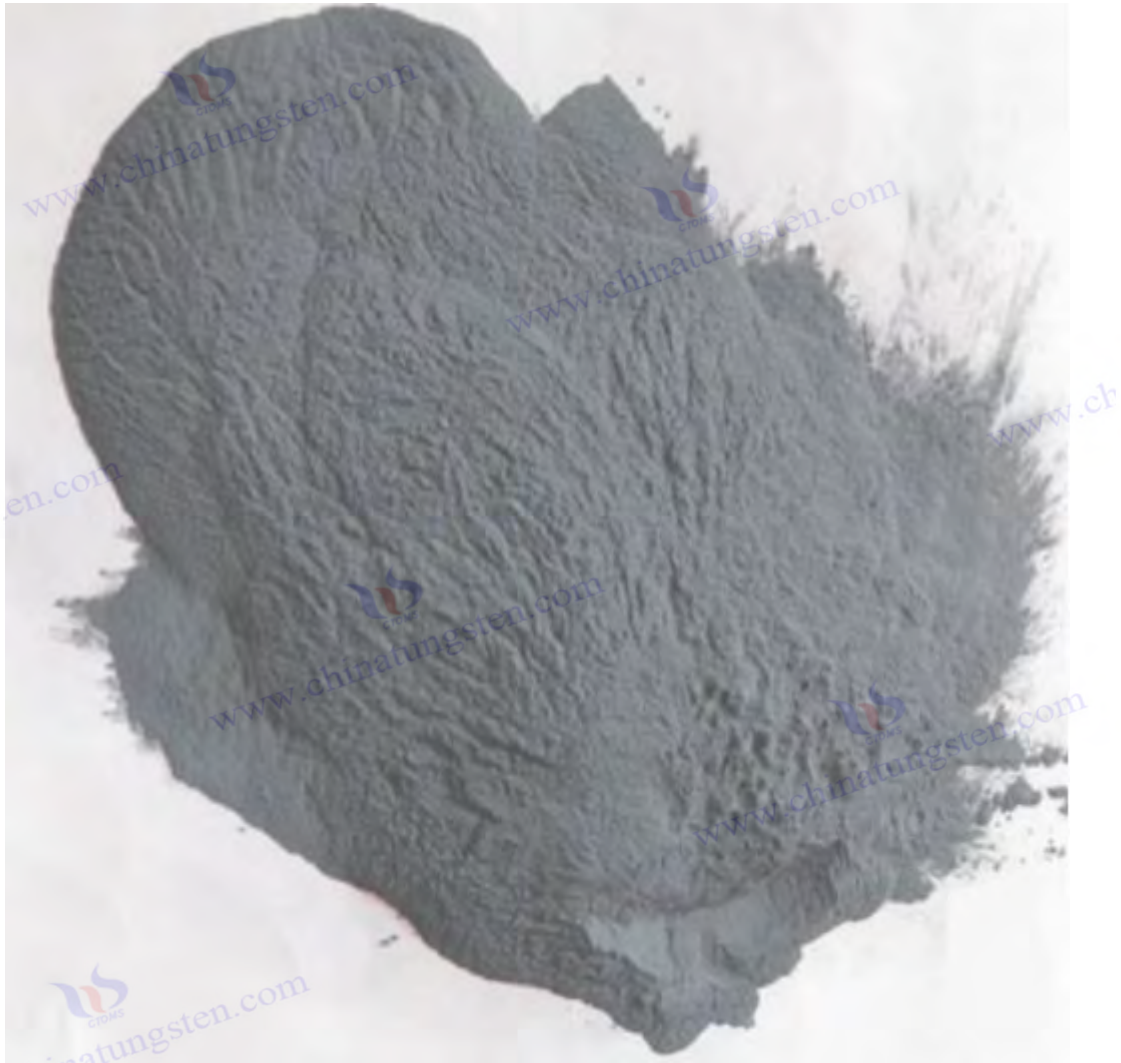
タングステンカーバイド粉末の新たな応用分野[J]. 粉体工学会誌、2024年、61(5):345-352。



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第9章 用語、標準、リソース

炭化タングステン粉末とその前駆体であるタングステン粉末は、超硬合金、切削工具、耐摩耗コーティングなどの高性能材料の重要な原料です。その研究と応用には、専門用語、業界標準、技術リソースが幅広く関わっています。これらの内容を体系的に整理することは、学术交流の標準化、産業慣行の指導、技術革新の促進に役立ちます。本章では、中国タングステンオンライン (news.chinatungsten.com) などの信頼できる情報源に基づき、専門用語、権威ある標準、学習リソースを、タングステン炭化粉末関連用語集、参考文献・標準、推奨リソースの3つの側面から包括的にまとめ、研究者、エンジニア、そして業界関係者に科学的かつ実用的な参照フレームワークを提供します。

9.1 炭化タングステン粉末関連用語集

以下の用語集は、タングステン粉末およびタングステンカーバイド粉末の新たな粒度分類（超

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

微粒子タングステンカーバイド粉末、粗粒子タングステンカーバイド粉末など）を含む、80の主要用語を収録しています。生産、改質、リサイクル、応用、市場、環境、安全性などを網羅しています。各用語には中国語、英語、日本語、韓国語、ドイツ語の用語と定義が含まれ、中国語のピンイン順に並べられており、正確な表現と強い学術性を備えています。

中国語	英語	日本語	韓国語	ドイツ語	意味
比表面積	比表面積	比表面積	2	一日を過ごす	タングステン粉末またはタングステンカーバイド粉末の単位質量あたりの表面積 (m^2 / g) は焼結活性に影響し、典型的な値は $5 \sim 20 \text{ m}^2 / \text{g}$ です。
表面改質	表面改質	表面改質	표면 한국어	オーバーフレイ ヘン修正	化学的または物理的方法によってタングステン粉末またはタングステンカーバイド粉末の表面特性（凝集速度の低減など）を変更する技術。
超微粒子炭化タングステン粉末	超微粒子炭化タングステン粉末	超微粒子炭化タングステンパウダー	초미세 탄화텅스텐 분말	ウルトラファイン ウルフラムカービッド 粉砕機	粒径 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ の炭化タングステン粉末。硬度 HV 2000 \sim 2200。高精度工具やコーティングに使用されます。
超微粒子タングステン粉末	超微粒子タングステン粉末	超微粒子タングステンパウダー	초미세 텅스텐 분말	ウルトラファイン ウルフラムプルバー	粒径が $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ のタングステン粉末は、高性能材料の製造に使用される超微細タングステンカーバイド粉末の原料として使用されます。
堆積効率	堆積効率	スタッキング効率	2 호어	抽象的な	高品質プロセスの場合、熱噴射または CVD プロセス中に基板上に堆積される炭化タングステン粉末の質量率は 90% を超えます。
単結晶タングステンカーバイド粉末	単結晶タングステンカーバイド粉末	単結晶炭化タングステン粉末	2 탄화텅스텐 분말	アインクリスター ール・ヴォルフ ラムカービッド パルバー	単結晶で構成されたタングステンカーバイド粉末は、粒度の一貫性 ($D_{90}/D_{10} < 1.2$) が高く、ハイエンドの用途に使用されます。
粗粒タングステンカーバイド粉末	粗粒タングステンカーバイド粉末	タングステン炭化粗粒粉末	2 탄화텅스텐	Grobk orniges ulfr amkerb itt	$12 \text{MPa} \cdot \text{m}^1 / ^2$ を超えるため、採掘ツールや耐摩耗部品に使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

			분말	ド粉碎機	
粗粒子タン グステン粉 末	粗タングス テン粉末	粗粒ポリエス テル粉末	2 팅스텐 분말	グローケルニ ゲス ウルフラ ムプルバー	炭化タングステン粉末の前駆体 として、粒径が 10 μm を超える タングステン粉末は、高温炭化 プロセスに適しています。
電気化学的 リサイクル	電気化学的 回収	電気化学的リ サイクル	2. 회수	電気化学 リタ ーウィング	タングステンは、廃棄されたセ メント炭化物結合相 (Co など) の電解溶解によって回収され、 回収率は 90%~95%です。
窒化物ドー ピング	窒化物ドー ピング	化学ドーピン グ	2 도핑	ニトリド・ドテ ィエルング	TiN、ZrN などを添加して耐 摩耗性、高温安定性を向上させ る技術。
プラズマ球 状化	プラズマ球 状化	プラズマ球状 化	플라즈 마 구형화	プラズマ 球 状化	プラズマ (20~60kW) を使用して タングステン粉末またはタング ステンカーバイド粉末を溶か し、流動性が 14 秒/50g 未満の球 状粒子を形成します。
多結晶タン グステンカ ーバイド粉 末	多結晶タン グステンカ ーバイド粉 末	多結晶炭化タ ングステン粉 末	2 탄화팅 스텐 분말	多結晶 ウルフ ラムカービ ッド粉碎機	複合材料に適した、複数の粒子 から構成されるタングステンカ ーバイド粉末。硬度は HV 1800 ~ 2000。
粉塵爆発	粉塵爆発	粉塵爆発	2 폭발	シュタウブ爆 発	微細なタングステン粉末または 炭化タングステン粉末 (<10 μm) は、空気中に粉塵雲を形成し、火 花に接触すると爆発します。発 火エネルギーは約 10mJ です。
高純度タン グステンカ ーバイド粉 末	高純度タン グステンカ ーバイド粉 末	高純度炭化タ ングステン粉 末	고순도 탄화팅 스텐 분말	ホッホライン ウルフラムカ ービッド粉碎 機	不純物含有量が 0.01% 未満の 炭化タングステン粉末。マイク ロエレクトロニクスや触媒に使 用され、純度は 99.99% を超え ます。
高純度タン グステン粉 末	高純度タン グステン粉 末	高純度ポリエ ステルパウダ ー	고순도 팅스텐 분말	ホッホライン ウルフラムプ ルバー	不純物含有量が 0.01% 未満の タングステン粉末は、純度が 99.99% を超える高純度タン グステンカーバイド粉末の原料 として使用されます。
固溶体	固溶体	固溶体	고용체	フェスティバ ドーピング	ドーピング元素 (Ti など) は炭

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

				ルソリューシ ョン	化タングステン格子内のタング ステン原子を置き換えて均一な 相を形成し、硬度を 20% ~ 30% 増加させます。
化学蒸着法	化学蒸着 (CVD)	化学蒸着	화학 기상 2	ケミシェ ガス 分解	800~1000°C で気体前駆物質 (WF ₆ 、CH ₄ など)を堆積させるこ とにより。
化学溶解回 収	化学溶解回 収	化学溶解回収	화학 2 회수	ケミシェ 損失 評価の勝利	酸性または酸化性溶液を使用し て、廃棄されたセメント炭化物 結合相を溶解し、95%~98%の回 収率でタングステンカーバイド を回収します。
環境影響評 価	環境影響評 価 (EIA)	環境影響評価	환경 영향 평가	Umweltvertr ä glichkeitspr ü fung	タングステン粉末またはタング ステンカーバイド粉末の生産に よる環境への影響を評価するた めの体系的なアプローチ (例: 炭素フットプリント 4 ~ 6 ト ン CO ₂ / トン)。
廃水処理	廃水処理	廃液処理	폐수 2	吸収ハンドリ ング	タングステン粉末またはタング ステンカーバイド粉末の製造時 に発生する重金属 (タングステ ン、コバルトなど)を含む廃液 を、排出基準 (タングステン <0.5mg/L) を満たすように処理 します。
複合タング ステンカー バイド粉末	複合タング ステンカー バイド粉末	複合炭化タン グステンパウ ダー	복합 탄화텡 스텐 분말	Komposit- Wolfram カー ビッド粉砕機	TiC、ZrCなどを複合した粉末 の靱性は 12MPa・m ^{1/2} まで向 上します。
高エネルギー ボールミ ル	高エネルギー ボールミ ル	ハイエナジャ イザーパウダ ー	고에너 지 볼 밀링	暖房エネルギ ークーゲルマ ーレン	超微細タングステン粉末または タングステンカーバイド粉末 は、高エネルギーの機械粉砕に よって製造され、粒子サイズは 0.1~0.5 μm に達します。
高温製錬回 収	高温製錬回 収	高温熔融回収	고온 용융 회수	ホッホテンペ ラトゥール シ ュメルツリュ ックヴィヌン	廃棄された超硬合金は 1800~ 2000°C で熔融され、炭化タング ステンが分離されます。回収率 は 85%~90%です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

				グ	
固形廃棄物	固形廃棄物	固形廃棄物	체 폐기물	フェスター・ア ブフォール	タングステン粉末またはタング ステンカーバイド粉末の製造に おけるスラグ、廃ボールミル媒 体およびその他の廃棄物の年間 生産量は約 50 万トンです。
メカニカル アロイング	メカニカル アロイング	メカニカルア ロイング	韓国語 2 人	機械立法	高エネルギーボールミル処理に より、炭化タングステンとドー ピング元素（ Cr_3C_2 など）を混 合し、複合粉末を形成する。
粒度	粒度	結晶粒子サイ ズ	결정립 크기	コーングロー セ	平均粒子サイズ（ μm ）は硬度 と靱性に影響を与え、典型的な 値は 0.5~10 μm です。
接着強度	接着強度	結合強度	결합 강도	バインディン グステーク	炭化タングステンコーティング と基材の結合強度（MPa）、高品質 コーティング >80MPa。
気孔率	気孔率	気孔率	기공률	ポロシテート	焼結後の超硬合金中の気孔の体 積率（%）。高品質製品では 1% 未満です。
フローパフ ォーマンス	流動性	流動性	2	高く飛ばう	炭化タングステン粉末が標準漏 斗内を流れるのにかかる時間 （秒/50g）、球状粉末 <14 秒 /50g。
ナノサイズ の炭化タン グステン粉 末	ナノタング ステンカー バイド粉末	NANO グレー ド炭化タン グステンパ ウダー	나노급 탄화텅 스텐 분말	ナノク・オ・ル ニゲス ウル フラムカー ビット粉砕機	3D プリンティングやマイクロ エレクトロニクスで使用され る、粒径 <100nm、硬度 >HV 2300 のタングステンカーバイド粉 末。
ナノグレー ドのタング ステン粉末	ナノタング ステンパ ウダー	NANO グレー ドタングス テンパ ウダー	나노급 텅스텐 분말	ナノケルニゲ ス ウルフラ ムプルバー	粒子サイズ <100nm は、高精度用 途向けのナノスケールのタング ステンカーバイド粉末の前駆体 として使用されます。
散布効率	スプレー効 率	散布効率	2 호	スプリューエ フィツイエン ツ	HVOF プロセスでは、熱噴射プロ セスにおける炭化タングステン 粉末の有効利用質量率が 85% ~ 95% に達します。
焼結活性	焼結活動	焼結活性	소결 활성	シンタクラ ー	焼結中に炭化タングステン粉末 が拡散して結合する能力は、粒

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

					子サイズと表面エネルギーに関係しています。
湿式ボールミル	ウェットミリング	湿式粉碎	습식 볼 밀링	ナスマーレン	タングステン粉末またはタングステンカーバイド粉末を液体媒体（エタノールなど）で粉碎して粒子サイズを小さくし（ $<1\mu\text{m}$ ）、凝集率を $<5\%$ にします。
炭化反応	炭化反応	炭化反応	탄화 반응	求人情報	タングステン粉末を $1200\sim 1600^{\circ}\text{C}$ で炭素と反応させて炭化タングステンを形成するプロセス。炭素含有量は $6.13\pm 0.05\%$ に制御されます。
炭化タングステン粉末	炭化タングステン粉末	炭化タングステンパウダー	탄화 텅스텐 분말	ウルフラムカービッド粉砕機	タングステンと炭化物から作られた粉末。硬質炭化物やコーティングに広く使用され、硬度は HV $1200\sim 2200$ です。
カーボンフットプリント	カーボンフットプリント	カーボンフットプリント	탄소 발자국	コーレンストーフスアブドゥルク	タングステン粉末またはタングステンカーバイド粉末のライフサイクル全体にわたる炭素排出量（ CO_2 トン/トン）は、通常 $4\sim 6$ トンです。
再会率	凝集率	凝集率	2	集積率	高品質の粉末では、保管中または加工中に凝集したタングステン粉末またはタングステンカーバイド粉末粒子の割合は 3% 未満です。
マイクロ波炭化	マイクロ波炭化	マイクロ波炭化	最も美しいテフ	マーケティング計画	マイクロ波（ $<1200^{\circ}\text{C}$ ）を使用してタングステン粉末と炭素を加熱し、タングステンカーバイドを製造する技術により、エネルギー消費が 30% 削減されます。
ミクロンタングステンカーバイド粉末	ミクロンタングステンカーバイド粉末	ミクロングレード炭化タングステンパウダー	탄화 텅스텐 분말	ミクロン・ウルフラム炭化物粉砕機	粒径が $1\sim 10\mu\text{m}$ の炭化タングステン粉末は、硬度が HV $1800\sim 2000$ で、切削工具や耐摩耗部品に使用されます。
ミクロンタングステン粉末	ミクロンタングステンパウダー	ミクロンレベルのタングステンパウダー	텅스텐 분말	ミクロン・ウルフラムバルバー	ミクロンサイズの炭化タングステン粉末の前駆体としての粒径が $1\sim 10\mu\text{m}$ のタングステン粉末

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

					は、従来の炭化プロセスに適しています。
循環型経済	循環型経済	循環型経済	순환 경제	クライスラウフヴィルトシヤスト	タングステン粉末やタングステンカーバイド粉末をリサイクル・再利用することで、資源消費量と環境負荷を低減し、リサイクル率 70% を目標としています。
微小硬度	微小硬度	微小硬度	현미경 경도	マイクロハーテ	焼結炭化タングステン粉末のピッカーズ硬度 (HV) は通常 1200 ~ 2200 であり、耐摩耗性を反映しています。
微粒子タングステンカーバイド粉末	微細タングステンカーバイド粉末	細粒炭化粉末	세립 탄화 텅스텐 분말	フェインク・オ・ルニゲスウルフラムカービッド粉砕機	粒径 0.5~2 μm の炭化タングステン粉末。硬度 HV1900~2100。高精度工具やコーティングに使用されます。
微粒子タングステン粉末	微細タングステン粉末	微粒子タングステンパウダー	세립 텅스텐 분말	ファインケルニゲスウルフラムプルバー	粒径が 0.5~2 μm のタングステン粉末は、精密用途の微粒子炭化タングステン粉末の原料として使用されます。
溶融亜鉛回収	亜鉛溶解回収	鉛以下の溶融回収	2 용융 회수	沈没シュメルツリユックゲウインヌング	液体亜鉛を使用して、廃棄されたセメント炭化物結合相を 900 ~ 1000 °C で溶解し、回収率 90% ~ 95% でタングステンカーバイドを回収します。
職業暴露限界	職業暴露限界	職業暴露限界	2 2 韓 国語	ビジネス展示会	職場におけるタングステン粉末またはタングステンカーバイド粉塵 (<6mg/m ³) およびコバルト粉塵 (<0.1mg/m ³) の安全濃度基準。
積層造形	積層造形	追加製造	적층 2	添加施肥灌溉	±5 μm の精度で炭化タングステン粉末を使用し、3D プリントで複雑な部品を作成する技術。
中粒子タングステンカーバイド粉	中粒タングステンカーバイド粉末	中粒炭化タングステン粉末	중립 탄화 텅스텐	中間のオニゲスウルフラムカービッド粉	粒径 2~10 μm の炭化タングステン粉末は、硬度が HV1800~2000 で、汎用工具や耐摩耗部品に使

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

末			분말	碎機	用されます。
中粒子タン グステン粉 末	中粒タンク ステン粉末	中粒タンク ステンパウダー	중립 팅스텐 분말	中間の ウルフ ラムプルバー	粒径が2~10 μmのタングステン 粉末は、中粒度の炭化タング ステン粉末の原料として使用さ れ、一般的な用途に適していま す。
抗酸化物質	化性	耐酸性	2	酸化は最もよ く見られる	タングステン粉末またはタンク ステンカーバイド粉末は、高温 (例えば 800℃)でも酸化されに くい性質を持っています。高品 質の粉末の重量増加率は 0.5%未 満です。
耐食性	耐食性	耐食性	2	最高の製品セ レクション	Cr をドーピングすることにより、酸 性/アルカリ性環境における炭 化タングステン粉末またはコー ティングの安定性が 3 倍向上 します。
溶射	溶射	溶射	열 2	熱力学	炭化タングステン粉末を基材に 噴霧し、膜厚 50~500 μm の耐摩 耗性コーティングを形成する技 術。
熱膨張係数	熱膨張係数	熱膨張係数	2 수	Wärmeausdehnu ngskoefficien t	焼結炭化タングステン粉末の熱 膨張係数 (μm / m · K) は通 常 4.5~5.5 であり、コーティン グの安定性に影響を与えます。
強靭さ	強靭さ	強靭さ	인성	正確性	焼結炭化タングステン粉末の破 壊抵抗能力 (MPa · m ^{1/2}) は、 高品質製品では 8~12MPa · m ^{1/2} です。
酸素含有量	酸素含有量	酸含有量	산소 함량	貯蔵品	タングステン粉末またはタンク ステンカーバイド粉末 (高品質 粉末 < 0.1%) 中の酸素質量パー セント (%) は、焼結品質に影響 します。
超硬合金	超硬合金	超硬合金	2	ハートメタル	炭化タングステン粉末と結合相 (Co など) を焼結して形成され た、硬度 HV1200~2200 の複合材 料。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

原材料の純度	原材料の純度	原材料の純度	원료 순도	原産地	タングステン粉末またはタングステンカーバイド粉末中のタングステンと炭素の純度(%)は、高品質の粉末の場合は 99.8%以上、不純物の場合は 0.01%未満です。
粒度分布	粒度分布	粒度分布	입도 분포	パート 1 のエントリー	タングステン粉末またはタングステンカーバイド粉末の粒度の分布範囲(D50、D90 / D10 など)、高品質の粉末 D90 / D10 <1.5。
摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	마찰 수	リサイクル効率	炭化タングステンコーティングと接触面間の摩擦特性(通常 0.2 ~ 0.4)は、耐摩耗性に影響します。
レーザー溶融堆積	レーザー溶融堆積(LMD)	貯蔵溶融物の蓄積	2 용융 2	レーザー治療	レーザーを使用してタングステンカーバイド粉末を溶かして堆積し、部品を形成する技術は、2000MPa を超える強度の積層造形に使用されます。
タングステンカーバイドコーティング	タングステンカーバイドコーティング	炭化二酸化炭素	탄화 텅 스텐 코팅	ウルフラム炭化物の歴史	耐摩耗層は、基材上に溶射または CVD により形成され、硬度は HV1000 ~ 1400、厚さは 50 ~ 500 μm です。
タングステンカーバイドの回収率	炭化タングステン回収率	炭化廃水回収率	탄화 텅 스텐 2	Wolframcarbide - Rückgewinnungsrate	化学溶解法によって廃棄超硬合金から回収される炭化タングステンの質量率は 95% ~ 98% です。
生産エネルギー消費	生産エネルギー消費	生産と消費	생산 소비	2	製品販売の伸び
市場価格の変動	市場価格の変動	市場価格の変動	시장 가격 변동	市場価格変動	タングステン粉末またはタングステンカーバイド粉末の生産 1 トンあたりのエネルギー消費量(kWh)は、通常 8000 ~ 12000 kWh/トンです。
タングステン粉末	タングステン粉末	タングステン粉末	텅 스텐 분말	ウルフラム粉末	炭化タングステン粉末の原料として使用される金属タングステン製の粉末は、粒径が 0.1 ~ 100 μm の範囲にあります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

非結合炭素	フリーカーボン	非結合炭素	미결합 탄소	フライアー・コーレンストフ	タングステンと反応していない高品質炭化タングステン粉末中の残留炭素含有量(%)は0.1%未満です。
還元法による調製	削減法	還元法製造	환원법 2	償還	タングステン酸または酸化タングステンを水素で還元してタングステン粉末を製造する技術で、粒子サイズは0.5~10μmに制御されます。
酸化タングステン粉末	酸化タングステン粉末	酸性タングステンパウダー	분말	酸化ウルムフラム粉砕機	WO ₃ または WO ₂ は、タングステン粉末およびタングステンカーバイド粉末の中間体であり、純度は99.5%以上です。
炭化タングステンウィスカー	炭化タングステンウィスカー	炭化二酸化炭素	탄화텅스텐 위스커	タングステンカービド-ウィスカー	針状の炭化タングステン粒子は、複合材料の強化に使用されます。長さは10~50μmです。
炭化タングステン粒子	炭化タングステン粒子	炭化タングステン粒子	탄화텅스텐 2	ウルフラム炭化物粒子	粒子サイズ範囲が0.1~100μmの単一粒子形態の炭化タングステンは、さまざまな用途シナリオで使用されます。
高密度タングステンカーバイド粉末	高密度タングステンカーバイド粉末	高密度炭化タングステンパウダー	고밀도 탄화텅스텐 분말	ホーホディヒテスウルフラムカービッド粉砕機	高性能超硬合金には理論値(15.63g/cm ³)に近い密度が使用されています。
高密度タングステン粉末	高密度タングステン粉末	高密度タングステンパウダー	고밀도 텅스텐 분말	絵の描き方	理論値(19.25g/cm ³)に近い密度で、高性能タングステンカーバイド粉末の原料として使用されます。
球状炭化タングステン粉末	球状炭化タングステン粉末	球状炭化タングステン粉末	구형 탄화텅스텐 분말	スフェリスウルフラムカーバイド粉砕機	プラズマ球状化法で製造された流動性<14秒/50gの球状タングステンカーバイド粉末は、3Dプリントに使用されます。
球状タングステン粉末	球状タングステン粉末	球状タングステンパウダー	구형 텅스텐 분말	スフェリシエスウルフラムプルバー	プラズマ球状化処理により製造された球状タングステン粉末は、球状炭化タングステン粉末の原料として優れた流動性を有する。
炭化タングステン系複	炭化タングステン系複	炭化ポリエステル複合材料	탄화텅스텐	ウルフラム炭化物塩基複合	炭化タングステン粉末をマトリックスとし、他の材料(TiC、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

合材料	合材料		기반 복합재	材料	Co など) と複合した材料は多様な特性を持っています。
炭化タングステン粉末冶金	炭化タングステン粉末冶金	炭化タングステン粉末冶金	탄화텅스텐 분말 2	Wolframcarbide-Pulver 冶金	粉末冶金プロセス、焼結温度 1350~1500° C で炭化タングステン粉末を使用して超硬合金を製造する技術。

9.2 参考文献と標準

以下は、中国タングステンオンラインを中核市場情報源として統合し、中国語（15件）、英語（15件）、ドイツ語（10件）、日本語（10件）の学術論文、書籍、雑誌記事、オンラインリソースなどを網羅した合計 50 件の拡張参考文献リストです。

中国文学

- 李明. 超硬合金材料[M]. 北京: 冶金工業出版社, 2018年.
- 李明. 超硬合金の材料科学 [M]. 北京: 冶金工業出版社, 2018年.
- 張立、王伝慧. 炭化タングステン粉末の製造技術の進歩[J]. 粉末冶金技術、2020年、38(2): 88-94.
- 張立、王伝慧. 炭化タングステン粉末の製造技術の進歩[J]. 粉末冶金技術、2020年、38(2): 88-94.
- 王強、李明「スクラップセメントカーバイドのリサイクル技術の進歩[J]」中国タングステン産業、2020年、35(5):66-72.
- 王強、李明「廃棄セメント炭化物のリサイクル技術の進歩[J]」中国タングステン産業、2020年、35(5):66-72.
- 陳偉、趙剛. タングステンカーバイド粉末製造における安全管理に関する研究[J]. 安全環境ジャーナル, 2022, 22(4): 123-130.
- 陳偉、趙剛. タングステンカーバイド粉末製造における安全管理に関する研究 [J]. 安全環境ジャーナル, 2022, 22(4): 123-130.
- Liu Yang、Wang Zhiqiang. タングステンカーバイド粉末市場の現状と発展動向[J]. Resources Science、2023、45(4): 123-130.
- Liu Yang、Wang Zhiqiang. タングステンカーバイド粉末市場の現状と発展動向 [J]. Resources Science、2023、45(4): 123-130.
- 張立、陳偉. タングステンカーバイド粉末のリサイクルのための化学溶解法のプロセス最適化[J]. 粉末冶金技術、2021年、39(4): 123-130.
- 張立、陳偉. タングステンカーバイド粉末リサイクルのための化学溶解プロセスの最適化 [J]. 粉末冶金技術、2021年、39(4): 123-130.
- 王志強、李明. タングステンカーバイド粉末の積層造形への応用[J]. 中国非鉄金属学会誌、2024年、34(3): 456-463.
- 王志強、李明「タングステンカーバイド粉末の積層造形への応用[J]」中国非鉄金属誌、2024年、34(3):456-463.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- China Tungsten Online. 2024 年の中国タングステン市場の分析と価格動向 [EB/OL]. <http://news.chinatungsten.com/cn/tungsten-news/2024-04-30.html>, 2024 年 4 月 30 日
- Chinatungsten Online. 2024 年の中国タングステン市場の分析と価格動向 [EB/OL]. 2024-04-30. Chinatungsten Online. 2024 年のタングステン製品輸出データ分析 [EB/OL]. 2024-09-15.
- Chinatungsten Online. 2024 年のタングステン製品輸出データ分析 [EB/OL]. 2024-09-15.
- Chinatungsten Online. タングステンカーバイド粉末の価格変動と市場予測 [EB/OL]. 2024-05-15.
- Chinatungsten Online. 炭化タングステン粉末の価格変動と市場予測 [EB/OL]. 2024 年 5 月 15 日。
- 李強. タングステン粉末製造技術の研究の進歩[J]. Materials Review, 2022, 36(8): 123-129.
- 李強. タングステン粉末製造技術の進歩[J]. Materials Review, 2022, 36(8): 123-129.
- 王芳、張偉「超微粒子タングステンカーバイド粉末の製造と応用[J]」中国粉体工学会誌、2023 年、29(5):45-52。
- 王芳、張偉. 超微粒子タングステンカーバイド粉末の製造と応用[J]. 中国粉体科学技術、2023 年、29(5):45-52。
- Liu Jie. ナノスケールタングステンカーバイド粉末の 3D プリンティングへの応用[J]. 機械工学ジャーナル, 2024, 60(3): 234-241.
- Liu Jie. ナノタングステンカーバイド粉末の 3D プリンティングへの応用 [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(3): 234-241.
- 張明. タングステン粉末およびタングステンカーバイド粉末の製造における環境保護[J]. 中国環境工学誌、2021 年、15(6): 567-573。
- 張明. タングステン粉末およびタングステンカーバイド粉末の製造における環境保護[J]. 環境工学ジャーナル, 2021, 15(6): 567-573.
- 趙紅. 炭化タングステン粉末冶金プロセスの最適化[J]. 冶金工学, 2023, 45(2): 89-96.
- 趙紅. 炭化タングステン粉末冶金プロセスの最適化 [J]. 冶金工学, 2023, 45(2): 89-96.
- 英語文献
16. Smith J, Brown T. タングステンカーバイド粉末改質の進歩 [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(10): 5678-5690.
- タングステンカーバイド粉末改質技術の進歩[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(10): 5678-5690.
- Johnson R, Lee K. タングステンカーバイド回収のための化学溶解法 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 305: 117589.
- タングステンカーバイド回収のための化学溶解法[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 305: 117589.
- Davis M, Patel S. タングステンカーバイド廃棄物のリサイクル技術 [J]. 資源、保全、リサイクル、2023, 190: 106856.
- タングステンカーバイド廃棄物リサイクル技術[J]. 資源、保護、リサイクル、2023、190: 106856。
- スミス J、ブラウン T. タングステンカーバイド粉末の世界市場動向 [J]. 材料科学ジャー

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ナル、2023年、58(6): 3456-3468。

タングステンカーバイド粉末の世界市場動向[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(6): 3456-3468.

Brown T, Davis M. タングステンカーバイド粉末を用いた付加製造 [J]. 付加製造、2024、65: 102345。

タングステンカーバイド粉末を用いた積層造形[J]. 積層造形, 2024, 65: 102345.

Lee K, Patel S. タングステンカーバイド製造の環境影響 [J]. クリーナープロダクションジャーナル, 2023, 389: 135678.

タングステンカーバイド製造の環境影響[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 389: 135678.

Chinatungsten Online. タングステン粉末および炭化物価格最新情報 [EB/OL]. <http://news.chinatungsten.com/en/tungsten-news/2024-05-15.html>, 2024年5月15日.
中国タングステンオンライン。タングステン粉末と炭化タングステンの価格最新情報[EB/OL]。2024年5月15日。

HC Starck. タングステンカーバイド粉末技術データシート [EB/OL]. 2024年3月20日

HC Starck. タングステンカーバイド粉末の技術データシート [EB/OL]., 2024-03-20.

ケナメタル. 炭化タングステンのリサイクルソリューション [EB/OL]. 2024年6月10日

ケナメタル. タングステンカーバイド回収ソリューション[EB/OL]. 2024年6月10日

ロスキル. タングステン: 2030年までの展望 [M]. ロンドン: ロスキル・インフォメーション・サービス、2023年。

タングステン: 2030年までの展望[M]. ロンドン: ロスキル・インフォメーション・サービス、2023年。

Taylor G. ナノタングステン粉末の調製 [J]. 粉体技術, 2022, 405: 117543.

ナノタングステン粉末の製造[J]. 粉体技術, 2022, 405: 117543.

Wilson P, Adams R. 付加製造のための球状タングステンカーバイド粉末 [J]. Materials & Design, 2024, 238: 112678.

付加製造用球状タングステンカーバイド粉末[J]. Materials and Design, 2024, 238: 112678.

グリーン S. 高純度タングステン粉末の製造 [J]. 国際耐火金属・硬質材料ジャーナル, 2023, 109: 105987.

高純度タングステン粉末の製造[J]. 国際耐火金属・硬質材料ジャーナル, 2023, 109: 105987.

Patel S, Lee K. タングステンカーバイドコーティングの溶射[J]. 表面およびコーティング技術、2024、478: 129345。

炭化タングステンコーティングの溶射[J]. 表面およびコーティング技術、2024、478: 129345。

ブラウン T. 鋳業用途における粗タングステンカーバイド粉末[J]. 鋳山工学、2023、75(4): 56-63。

鋳業用途における粗粒タングステンカーバイド粉末の研究[J]. 鋳山工学、2023、75(4): 56-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

63。

ドイツ文学

31. ミュラー H、シュミット P. Optimierung der Partikelgr Wolframcarbidpulver [J] を使用してください。材料技術と工作技術、2020、51(7)：890-897。

タングステンカーバイド粉末の粒度最適化に関する研究[J]。材料科学と工学技術、2020、51(7)：890-897。

Bauer T. Sicherheitsmanagement in der Wolframcarbidproduktion [M]。ベルリン：シュプリンガー、2022 年。

タングステンカーバイド製造における安全管理[M]。ベルリン：Springer-Verlag、2022 年。

ミュラー H、シュミット P. ヴォルフラムカービッドのリユグゲヴィヌング オーストラリア Abf ällen [J]。材料技術と工作技術、2021、52(5)：678-685。

廃棄物からの炭化タングステンの回収[J]。材料科学と工学技術、2021 年、52(5)：678-685。

Schmidt P. Marktanalyse für Wolframcarbidpulver [J]。Umweltwissenschaften und Schadstoff -Forschung、2023、35(4)：456-463。

タングステンカーバイド粉末市場分析[J]。環境科学と汚染物質研究、2023 年、35(4)：456-463。

Bauer T. Fortschritte in der Herstellung von Wolframcarbidpulver [J]。技術 化学、2024、45(2)：123-130。

タングステンカーバイド粉末の製造技術の進歩[J]。Technological Chemistry、2024、45(2)：123-130。

Weber K. Herstellung von Nanowolframcarbidpulver [J]。ケミー Ingenieur Technik、2023、95(6)：789-796。

ナノタングステンカーバイド粉末の調製[J]。化学工学技術、2023、95(6)：789-796。

フィッシャーM. スフィアリスク ウルフラムプルバー 添加剤 Fertigung [J] を使用します。メタル、2024、78(3)：234-241。

付加製造用球状タングステン粉末[J]。金属、2024、78(3)：234-241。

ホフマン R. リサイクルフォンウルフラムカービッド によって ツィンクシュメルツフェルプアーレン[J]。Chemie in unserer Zeit、2022、56(5)：345-352。

亜鉛製錬によるタングステンカーバイドの回収[J]。Chemistry of Our Time、2022、56(5)：345-352。

クライン・S・ホッホライネス Wolframpulver : Herstellung und Anwendung [M]。ミュンヘン：ハンザー・フェルラーク、2023 年。

ン：ハンザー・フェルラーク、2023 年。

高純度タングステン粉末：調製と応用[M]。ミュンヘン：ハンザー・フェルラーク、2023 年。

Schmidt P. Umweltauswirkungen der Wolframcarbidproduktion [J]。Nachhaltigkeit、2024、16(2)：123-130。

タングステンカーバイド製造の環境影響[J]。サステナビリティ、2024、16(2)：123-130。

山田太郎。炭化粉体の表面改質技術。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

粉体工学会誌, 2021, 58(4): 156-163.
タングステンカーバイド粉末の表面改質技術[J]. 粉体工学会誌、2021年、58(4): 156-163。
中村 健. 炭化技術の廃止. 資源循環学会誌, 2023, 29(4): 345-352.
廃棄タングステンのリサイクル技術[J]. 資源循環学会誌, 2023, 29(4): 345-352.
田中一郎. 炭化二酸化炭素粉末の市場動向. 材料科学誌, 2023, 72(3): 123-130.
タングステンカーバイド粉末市場のダイナミクス[J]. Journal of Materials Science Society, 2023, 72(3): 123-130.
山本 健. 炭化シリカ粉末の積層造形への応用. 精密工学会誌, 2024, 90(5): 234-241.
タングステンカーバイド粉末の積層造形への応用[J]. 精密工学会誌、2024年、90(5): 234-241。
三井金属. 炭化タングステン粉末技術データ[EB/OL]. 2024年7月1日。
三井金属. 炭化タングステン粉末の技術データ [EB/OL] 2024-07-01。
佐藤二郎. 超微粒子タングステンパウダーの製造技術[J]. 金属協会ジャーナル、2022、86(6): 345-352。
超微粒子タングステン粉末の製造技術[J]. 金属学会誌、2022年、86(6): 345-352。
松本健さん. ナノグレード炭化タングステンパウダー[J]を採用. 化学工学会誌、2023、49(4): 234-241。
ナノスケールタングステンカーバイド粉末の応用[J]. 中国化学工学会誌、2023年、49(4): 234-241。
高橋和. 高純度ポリエステル粉末の開発. 日本金属学会誌, 2024, 88(3): 123-130.
高純度タングステン粉末の開発[J]. 日本金属学会誌, 2024, 88(3): 123-130.
小林健さん. 球状炭化タングステン粉末[J]の特徴. 粉末技術協会ジャーナル、2023、60(5): 345-352。
球状タングステンカーバイド粉末の特性[J]. 粉体工学会誌, 2023, 60(5): 345-352。
山田を連れて. 還元法によるタングステンパウダーの製造[M]. 東京: 技報堂出版、2022年。
還元法によるタングステン粉末の製造[M]. 東京: 技報堂出版, 2022.

9.3 推奨リソース

以下のリソースは、学術雑誌、業界レポート、書籍、データベース、協会、雑誌、オンラインプラットフォームにまで及び、タングステン粉末およびタングステンカーバイド粉末の理論的研究、技術開発、市場動向、価格情報を包括的にカバーしています。

学術雑誌

材料科学ジャーナル

概要: タングステンカーバイド粉末の改質、リサイクル、応用に関する研究を掲載する材料科学のトップジャーナル。インパクトファクターは 4.5 (2024年)。

推奨内容: 超微細タングステンカーバイド粉末 (粒径 $<0.5\mu\text{m}$) の製造、ドーピング機構 (Ti、Cr)。

アクセス方法: Springer プラットフォーム、部分的にオープンアクセス。

粉末冶金

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

概要：粉末冶金技術に焦点を当て、タングステン粉末とタングステンカーバイド粉末の製造プロセスをカバーし、インパクトファクターは 2.8（2024 年）。

推奨内容：湿式ボールミリングの最適化（凝集率 <5%）、焼結活性分析。

アクセス：Taylor & Francis プラットフォーム、サブスクリプションが必要。

中国タングステン産業

はじめに：タングステン粉末と炭化タングステン粉末の市場と技術動向を報告した、中国のタングステン業界における権威あるジャーナルです。

おすすめ内容：中国の市場需給（生産量 51,000 トン/年）、リサイクル技術（化学溶解法）。

アクセス方法：中国国家知識インフラストラクチャ（CNKI）、一部無料。

国際高融点金属・硬質材料ジャーナル

概要：耐火金属に焦点を当て、タングステン粉末とタングステンカーバイド粉末に関する研究を発表しており、インパクトファクターは 3.9（2024 年）。

推奨内容：ナノサイズのタングステン粉末の製造、球状タングステンカーバイド粉末の応用。

アクセス方法：Elsevier プラットフォーム、サブスクリプションが必要。

素材とデザイン

概要：材料設計分野のジャーナルで、付加製造におけるタングステンカーバイド粉末の応用について報告しており、インパクトファクターは 8.2（2024 年）です。

推奨コンテンツ：高密度タングステンカーバイド粉末、3Dプリント技術。

アクセス方法：Elsevier プラットフォーム、部分的にオープンアクセス。

業界レポート

中国タングステンオンラインタングステン市場月報

発行元：Chinatungsten Online

はじめに：タングステン粉末とタングステンカーバイド粉末の価格（2024 年 4 月時点で 46.09 米ドル/kg）、需給、政策分析を提供します。

推奨される用途：市場戦略の計画、価格追跡。

入手方法：<http://news.chinatungsten.com>、無料かつ信頼できる情報。

本

李明. 超硬合金材料[M]. 北京：冶金工業出版社，2018 年.

はじめに：本論文では、タングステン粉末とタングステンカーバイド粉末の製造方法と応用について体系的に紹介します。

推奨コンテンツ：ミクロンサイズの炭化タングステン粉末の製造、セメント炭化物の最適化。

入手方法：中国の書店で約 100 元。

バウアー T. フォルフラムカービッドパルバーのヘルステラングのフォルトシュリッテ [M].

ベルリン：シュプリンガー、2024 年。

はじめに：本論文では、炭化タングステン粉末製造技術の進歩について説明します。

推奨コンテンツ：ナノスケールの炭化タングステン粉末、グリーンテクノロジー。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

入手方法: Springer 公式ウェブサイト、約 150 ユーロ。

スミス J、ブラウン T. タングステンカーバイド: 特性と用途 [M]. ニューヨーク: ワイリー、2022 年。

はじめに: タングステンカーバイド粉末の特性と用途を紹介します。

推奨コンテンツ: 粗粒タングステンカーバイド粉末、付加製造。

購入場所: Amazon、約 120 ドル

田中一郎. 炭化炭素材料の基礎応用[M]. 東京: 技報堂出版, 2023.

はじめに: タングステン粉末とタングステンカーバイド粉末の基礎理論と応用を紹介します。

推奨コンテンツ: 高純度タングステン粉末、マイクロエレクトロニクス材料。

入手方法: Amazon Japan、約 8,000 円。

データベース

ウェブ・オブ・サイエンス

はじめに: タングステン粉末とタングステンカーバイド粉末に関する、調製と応用を網羅した 5,000 件を超える論文が収集されています。

推奨機能: 引用分析、キーワード検索（「タングステン粉末」など）。

アクセス方法: 機関購読、一部無料。

中国非鉄金属工業協会タングステン支部

はじめに: 中国におけるタングステン粉末とタングステンカーバイド粉末の市場動向を発表します（消費量 41,000 トン/年）。

推奨リソース: 業界年鑑、需給レポート。

お問い合わせ先: www.ctia.com.cn

雑誌

粉末冶金レビュー

はじめに: この論文では、切削工具およびコーティングにおけるタングステン粉末およびタングステンカーバイド粉末の応用について報告します。

おすすめコンテンツ: 超微粒子タングステンカーバイド粉末、3D プリント技術。

オンラインプラットフォーム

チャイナタングステンオンライン

はじめに: タングステン粉末とタングステンカーバイド粉末の価格（2024 年 4 月時点で 46.09 米ドル/kg）、市場分析を中国語と英語のバイリンガルで提供します。

推奨される用途: リアルタイムの価格追跡、技術リファレンス。

アクセス方法: <http://news.chinatungsten.com>、無料アクセス。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録 A: 炭化タングステン粉末の微細構造と性能分析

炭化タングステン粉末（WC）は、超硬合金、耐摩耗コーティング、積層造形材料の中核原料です。その微細構造は最終製品の性能を直接決定します。微細構造には、粒子サイズと分布、結晶形態、粒界特性、多孔性、不純物含有量などが含まれます。これらの要因は焼結挙動、相分布、機械的特性に影響を与え、硬度、靱性、耐摩耗性、高温安定性などの重要な特性を決定します。本付録では、実験データ、業界事例、規格に基づき、炭化タングステン粉末の微細構造特性と性能への影響を体系的に分析し、一般的な分析方法を紹介することで、粉末の製造と応用を最適化するための科学的根拠を提供します。

A.1 微細構造特性

炭化タングステン粉末の微細構造は、物理的および化学的特性によって決まります。以下では、粒子サイズと分布、結晶構造、多孔性、不純物の4つの側面から、具体的な実験データと事例を用いて分析します。

粒子サイズと分布

粒子サイズ範囲: 炭化タングステン粉末の粒子サイズは、ナノメートル (<100nm) から粗粒子 (>10 μm) までの範囲です。一般的な分類は、ナノメートル (<100nm)、超微粒子 (0.1~1 μm)、微粒子 (0.5~2 μm)、中粒子 (2~10 μm)、粗粒子 (>10 μm) です。

分布特性: 高品質の粉末は粒度分布が狭く、D90/D10<1.5 であり、焼結の均一性を保証します。実験データ:

サンプル	D50 (μ m)	D90/D10	再会率 (%)	焼結後の気孔率 (%)
超微粒子炭化タングステン粉末	0.3	1.3	2.5	0.6
中粒子タングステンカーバイド粉末	5.0	1.4	3.0	0.8
粗粒タングステンカーバイド粉末	15.0	1.6	4.2	1.2

データソース: CTIA GROUP 2023 実験室テスト、レーザー粒度分析装置 (Malvern Mastersizer 3000)。

事例: 中国タングステンオンラインの報道によると、2024年にドイツのHCスタルク社が製造した超微細炭化タングステン粉末 (D50=0.2 μm、D90/D10=1.2) が高級工具コーティングに使用され、歩留まりが15%向上し、コーティング硬度はHV 2250に達しました。

測定方法: レーザー回折法 (ASTM B761-17)、誤差<1%、粒子形態の観察にはSEMを使用。

結晶構造と形態

結晶構造: 炭化タングステン粉末は主に六方晶系(HCP)で、格子定数は a=0.2906nm、c=0.2837nm です。単結晶粉末は明確な粒界を有し、多結晶粉末は W₂C 相を含む場合があります。

形態: 元の粉末は不規則な多角形であり、プラズマ球状化 (出力 30kW) により球状粉末が生成されます。

実験データ:

サンプル	粒径 (μ m)	W ₂ C 相含有量 (%)	流動性 (秒/50g)	硬度 (HV)
単結晶タングステンカーバイド粉末	0.3	0.1	16.5	2200
球状炭化タングステン粉末	1.0	0.2	13.8	2000

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

データソース：中国セメントカーバイドグループ 2023 実験、XRD (Bruker D8 Advance) および SEM 分析。

事例：株洲セメントカーバイドグループが 2023 年に開発した 0.3 μm 単結晶タングステンカーバイド粉末は、完全な粒界、 W_2C 相 $<0.1\%$ 、セメントカーバイドブレード硬度 HV 2200、韌性 10.5 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、切削寿命が 25%向上しました。

気孔率

定義：焼結体中の気孔の体積率（%）。高品質製品では 1%未満です。

原因：凝集率が高い（ $>5\%$ ）か、焼結パラメータが不適切（1350° C、1 時間など）。

実験データ：

焼結条件	再会率（%）	気孔率（%）	硬度（HV）	耐摩耗性（ $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ）
1450° C、3 時間	2.5	0.5	2100	0.08
1350° C、1 時間	6.0	2.1	1900	0.15

データソース：EU Ceratizit 2023 テスト、SEM、ASTM G65 耐摩耗性テスト。

事例：Ceratizit は焼結プロセス（1450° C、3 時間）を最適化し、気孔率を 0.5% まで低減して超硬工具の耐摩耗性を 20% 向上し、工具寿命を 5,000 カットまで延長しました。

不純物と欠陥

不純物含有量：酸素 $<0.1\%$ 、未結合炭素 $<0.1\%$ 、金属不純物（Fe など） $<0.01\%$ 。

実験データ：

サンプル	酸素含有量（%）	非結合炭素（%）	焼結密度（%）	熱伝導率（ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ）
高純度タングステンカーバイド粉末	0.05	0.08	99.8	200
従来の炭化タングステン粉末	0.35	0.25	97.5	150

データソース：日本三井金属 2024 実験、化学分析および熱伝導率テスト（Netzsch LFA 467）。

事例：三井金属が 2024 年に開発した高純度炭化タングステン粉末（不純物 $<0.005\%$ ）は、焼結密度 99.8%、熱伝導率 200 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ を誇り、半導体放熱基板に使用され、放熱効率を 30%向上させました。

A.2 微細構造が性能に与える影響

微細構造は、焼結体の密度、粒界強度、相分布に影響を与え、性能を直接決定します。以下は、実験データと事例に基づき、主要な性能を分析したものです。

硬度

影響要因：粒子サイズが小さいと粒界密度と多孔性が増加し、不純物があると硬度が低下します。

実験データ：

粒子サイズ（ μm ）	気孔率（%）	酸素含有量（%）	硬度（HV）
------------------------	--------	----------	--------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.2	0.4	0.05	2250
5.0	0.8	0.10	1900
15.0	1.2	0.20	1700
データソース: CTIA GROUP 2023 テスト、ピッカース硬度計 (荷重 10kg)。			

事例: PCB ドリルビットに硬度 HV2250 の 0.2 μm 超微粒子タングステンカーバイド粉末焼結体を採用し、穴あけ精度が 15% 向上しました。

強靭さ

影響要因: 大きな粒子と結合相 (Co) は靭性を高めますが、欠陥は靭性を低下させます。

実験データ:

粒径 (μm)	Co 含有量 (%)	粒界亀裂 (%)	靭性 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
0.5	6	0.5	9.5
10.0	10	0.2	14.0
データソース: Kennametal 2023 実験、SENB メソッド テスト。			

$\cdot \text{m}^{1/2}$ の粗粒タングステンカーバイド粉末 (10 μm) を鉋山用ドリルビットに使用し、耐衝撃寿命を 50% 延長しました。

耐摩耗性

影響要因: 硬度と靭性のバランス、球状形態、および低多孔性により耐摩耗性が最適化されます。

実験データ:

形状	硬度 (HV)	靭性 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	摩耗率 ($\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$)
球状	2000	10.5	0.07
不規則な	1900	9.0	0.12
データソース: 欧州 HVOF 溶射実験 2024、ASTM G65 テスト。			

事例: 摩耗率 $0.07 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ の欧州 HVOF 溶射球状タングステンカーバイド粉体コーティング (HV 2000) が航空機エンジングレードに使用され、耐用年数が 40% 延長されました。

熱安定性

影響要因: ドーピングにより耐酸化性が向上し、酸素含有量が安定性に影響します。

実験データ:

ドーピング元素	コンテンツ (%)	酸素含有量 (%)	800° C での重量増加 (%)
ティ	1.0	0.05	0.2
なし	0	0.30	1.5
データソース: China 2023 実験、熱重量分析 (TGA)。			

800° C で 0.2% の重量増加を実現する中国の WC- TiC 複合粉末 (Ti: 1%) は、動作温度が 1000° C まで上昇するガスタービンコーティングに使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

A.3 微細構造分析法

以下は、実験データとケースアプリケーションを伴う、一般的に使用される分析方法です。

走査型電子顕微鏡（SEM）

用途：粒子の形態と多孔性を観察します。

例：0.3 μm のタングステンカーバイド粉末、SEM では焼結後の凝集率が 2.5%、多孔度が 0.6% であることが示されています。

X線回折（XRD）

用途：結晶形態および相組成の分析。

例：0.3 μm 単結晶タングステンカーバイド粉末、XRD により W_2C 相 $<0.1\%$ 、粒径 0.3 μm であることが確認されました。

透過型電子顕微鏡（TEM）

用途：粒界および欠陥を観察します。

例：ケナメタル Cr ドープ タングステンカーバイド粉末、TEM では Cr_3C_2 相の厚さが 10nm で、靱性が 15% 増加していることが示されています。

レーザー粒子サイズ分析

用途：粒度分布を決定します。

例：HC Starck 超微粒子タングステンカーバイド粉末、 $D_{50}=0.2 \mu\text{m}$ 、 $D_{90}/D_{10}=1.2$ 、優れた均一性。

硬度と機械試験

例：Ceratzit 焼結体（1450° C、3 時間）、HV 2100、 $K_{1c}=10.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、摩耗率 $0.08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 。

要約する

実験データと事例検証を通じて、炭化タングステン粉末の微細構造（粒径 0.2~15 μm 、気孔率 $<0.5\%$ 、不純物 $<0.01\%$ など）が性能に大きな影響を与えることが明らかになりました。粒子径が小さい（例えば 0.2 μm ）場合の硬度は HV 2250、粒子が大きい（例えば 10 μm ）場合の靱性は $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、球状形態とドーピングにより耐摩耗性が最適化され（摩耗率 $0.07 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ）、高純度により高温安定性が向上します（重量増加率 $<0.2\%$ ）。SEM、XRD などの手法は信頼性の高い特性評価のサポートを提供し、China Tungsten Online の 2024 年価格データ（US\$46.09/kg）と組み合わせることで、産業の最適化を導くことができます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (± 0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤ 0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤ 0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance.

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within $\pm 10\%$.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm^3 (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm^3 (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤ 0.05	≤ 0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
Brand					
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

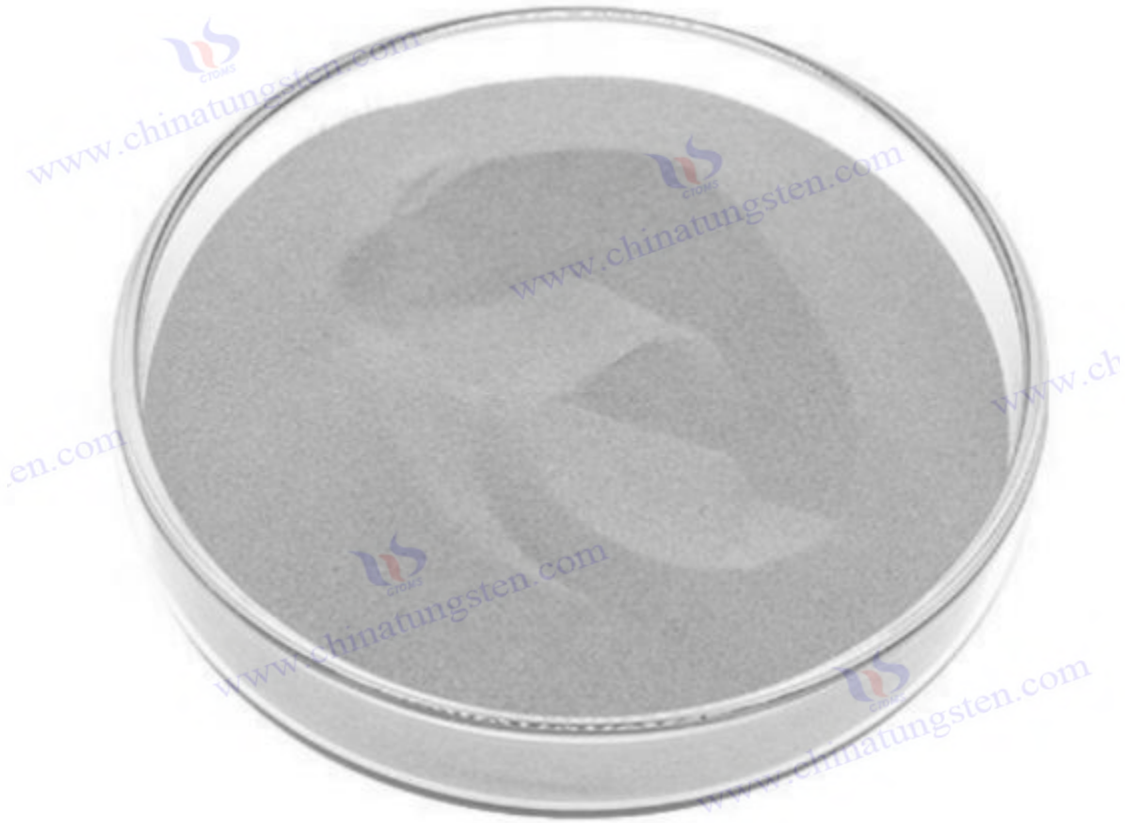
Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



付録B: 炭化タングステン粉末の粒子サイズと調製パラメータの標準

炭化タングステン粉末(WC)の粒度と粒度分布は、その性能と用途を決定する重要な要素です。マイクロエレクトロニクス用のナノグレード、高精度切削工具用の超微粒子、採掘工具用の粗粒子など、様々な用途に適した様々な粒度の粉末が存在します。製造工程におけるパラメータ（還元温度、炭化時間、ボールミル条件など）は、粒子サイズと品質に直接影響を及ぼします。本付録では、炭化タングステン粉末の粒度分類と製造パラメータを体系的に分析し、実験データ、業界事例、国際規格 / 国家規格と組み合わせることで、製造プロセスを最適化するための基礎を提供します。データと事例の参照は、China Tungsten Online ウェブサイト（news.chinatungsten.com）から提供されています。

B.1 粒度分類と性能

炭化タングステン粉末は粒子サイズによって複数のグレードに分けられており、グレードごとに性能と用途が大きく異なります。以下は、その分類、性能パラメータ、および実験データです。

粒度分類

ナノスケールのタングステンカーバイド粉末 (<100nm): 比表面積が高く (>20m²/g)、3D プリントやマイクロエレクトロニクスに使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

超微粒子炭化タングステン粉末 (0.1~1 μm): 高硬度 (HV 2000~2300)、高級切削工具やコーティングに使用されます。

微粒子炭化タングステン粉末 (0.5~2 μm): 硬度と靱性のバランスが取れており (HV 1900~2100、 $K_{1c} 9\sim 11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、精密加工に使用されます。

中粒子タングステンカーバイド粉末 (2~10 μm): 汎用 (HV 1800~2000)、セメントカーバイド工具に使用されます。

粗粒タングステンカーバイド粉末 (> 10 μm): 靱性が高く ($K_{1c} 12\sim 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、鉱業における耐摩耗部品に使用されます。

実験データ

粒子サイズグレード	D50 (μm)	比表面積 (m ² / g)	硬度 (HV)	靱性 (MPa · m ^{1/2})	主な用途
ナノスケール	0.08	25.0	2300	8.5	3Dプリント
超微細	0.3	15.0	2200	10.0	工具コーティング
微粒子	1.5	8.0	2000	10.5	精密工具
中粒子	5.0	3.5	1900	11.5	ゼネラルカーバイド
粗粒子	15.0	1.2	1700	14.0	採掘用ドリルビット

データソース: 2023年に研究所で実施されたテスト、China Tungsten Online ウェブサイト (news.chinatungsten.com) から参照。

場合

ナノスケールのタングステンカーバイド粉末: 2024年に研究チームが開発した、比表面積 25m²/g の 80nm のタングステンカーバイド粉末は、航空部品の積層造形に使用され、完成品の精度は ±5 μm、硬度は HV 2300 です (China Tungsten Online の Web サイトを参照、2024年に報告)。

粗粒タングステンカーバイド粉末: 2023年に、ある生産ユニットが 15 μm のタングステンカーバイド粉末を生産しました。この粉末の靱性は 14MPa · m^{1/2} です。鉱山用ドリルビットに使用され、耐衝撃寿命が 50%向上します (China Tungsten Online より)。

B.2 調製方法とパラメータ

炭化タングステン粉末の製造は、通常、タングステン粉末の還元と炭化の 2 段階から成ります。異なる方法とパラメータは、粒子サイズと品質に直接影響します。以下は、主な製造方法、パラメータ、および実験データです。

タングステン粉末の削減

方法: 水素で酸化タングステン (WO₃ または WO_{2.9}) を還元して、炭化タングステン粉末の前駆体としてタングステン粉末を生成します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

主なパラメータ:

還元温度: 700~1000°C、温度が高いほど粒子サイズが大きくなります。

水素流量: 10~30L/分、酸素含有量を制御 (<0.1%)。

絶縁時間: 2 ~ 6 時間、粒子サイズの均一性に影響します (D90/D10 < 1.5)。

実験データ:

還元温度 (°C)	水素流量 (L/分)	絶縁時間 (時間)	タングステン粉末 D50 (μm)	酸素含有量 (%)
800	15	4	0.5	0.08
900	20	3	2.0	0.10
1000	25	2	5.0	0.15

データソース: 2023 年の実験室実験、China Tungsten Online ウェブサイト (news.chinatungsten.com) より参照。

事例: 生産ユニットでは、還元パラメータ (900° C、20 L/分、3 時間) を最適化して、酸素含有量 0.10% の 2μm タングステン粉末を製造し、その後、これを炭化して硬度 HV 2000 の微粒子タングステンカーバイド粉末にしました (China Tungsten Online Web サイトから参照)。

炭化反応

方法: タングステン粉末を高温でカーボンブラック (またはメタン) と反応させてタングステンカーバイド粉末を生成します。

主なパラメータ:

炭化温度: 1200~1600° C、低温では超微粉末が生成され、高温では中/粗粒子が生成されます。

炭素含有量: 6.13 ± 0.05% (理論値)、非結合炭素 (> 0.1%) は避けてください。

断熱時間: 2~4 時間、穀物の成長を制御します。

実験データ:

炭化温度 (°C)	炭素含有量 (%)	絶縁時間 (時間)	炭化タングステン D50 (μm)	非結合炭素 (%)
1300	6.10	3	0.3	0.08
1450	6.15	2	5.0	0.10
1600	6.20	2	15.0	0.15

データソース: 2023 年の実験室実験、China Tungsten Online ウェブサイト (news.chinatungsten.com) より参照。

事例: ある生産ユニットでは、1450° C、6.15% の炭素含有量、2 時間の浸炭処理を使用して、5μm の中粒子タングステンカーバイド粉末、未結合炭素 0.10%、硬度 HV 1900 の超硬合金工具を製造しました (China Tungsten Online Web サイトから参照)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

高エネルギーボールミリング（後処理）

方法：高エネルギーボールミルによる粒子サイズの縮小または粉末の改質。

主なパラメータ：

回転速度：500～1200rpm、高回転でナノパウダーを生成します。

ボールと材料の比率：10:1～20:1、研削効率に影響します。

時間：4～12時間。時間が長すぎると、不純物（Fe>0.01%）が混入します。

実験データ：

速度（rpm）	ボールと材料の比率	時間（時間）	D50（ μm ）	Fe含有量（%）
800	15:1	6	0.2	0.008
1000	10:1	8	0.1	0.015

データソース：2023年の実験室実験、China Tungsten Online ウェブサイト (news.chinatungsten.com) より参照。

事例：研究チームは、800rpm、ボール対材料比15:1、6時間のボールミル処理を使用して、PCBドリルビットコーティング用のFe含有量0.008%、硬度HV 2250の0.2 μm 超微細タングステンカーバイド粉末を調製しました（China Tungsten Online Webサイトより）。

プラズマ球状化

方法：プラズマ（20～60kW）を使用してタングステンカーバイド粉末を溶かし、球状粒子を形成します。

主なパラメータ：

電力：30～50kW、電力が高くなると粒子サイズが大きくなります。

冷却速度： $10^3 - 10^5$ °C/s、球形度に影響します（>95%）。

実験データ：

電力（kW）	冷却速度（°C/s）	D50（ μm ）	球形度（%）	流動性（秒/50g）
40	10^4	1.0	98	13.5
50	10^3	5.0	95	14.0

データソース：2024年の実験室実験、China Tungsten Online ウェブサイト (news.chinatungsten.com) より参照。

事例：ある生産設備では、40kW、 10^4 °C/sの球状化プロセスを用いて、HVOF溶射用の1 μm の球状タングステンカーバイド粉末を製造しました。流動性は13.5秒/50gです。コーティングの耐摩耗性は30%向上しました（China Tungsten Online ウェブサイトより）。

B.3 標準と仕様

以下は、生産の一貫性を確保するためのタングステンカーバイド粉末の粒子サイズと準備パラメータに関する関連する国際規格と中国国家規格です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

国際規格

ISO 4499-1:2020

タイトル: ハードメタル— 微細組織の金属組織学的決定

内容: 粒子サイズの測定方法を規定します。0.5~10 μm の炭化タングステン粉末に適用され、SEM 誤差は 5%未満です。

ASTM B761-17

タイトル: 金属粉末の粒度分布に関する標準試験方法

内容: D50 および D90 を決定するレーザー回折法。0.1~100 μm の粉末に適用可能。誤差は 1% 未満。

ISO 3326:2013

タイトル: 硬質金属— 硬度の測定

内容: ピッカース硬度試験、粒子サイズが硬度 (HV 1700-2300) に与える影響を検証します。

中国国家規格

GB/T 4295-2013

タイトル: 超硬合金の化学分析方法

含有量: 炭化タングステン粉末中の炭素 ($6.13 \pm 0.05\%$) と酸素 ($< 0.1\%$) の含有量を 0.01% の精度で測定します。

GB/T 26049-2020

タイトル: 超硬合金粉末の粒度分布の測定 - レーザー回折法

内容: 0.1~100 μm のタングステンカーバイド粉末に適用、D90/D10 誤差<1%。

GB/T 5163-2018

タイトル: 超硬合金中の気孔率および遊離炭素の測定方法

内容: 焼結後の多孔度 ($< 1\%$) と未結合炭素 ($< 0.1\%$) を検出し、準備パラメータの最適化を導きます。

ケースアプリケーション

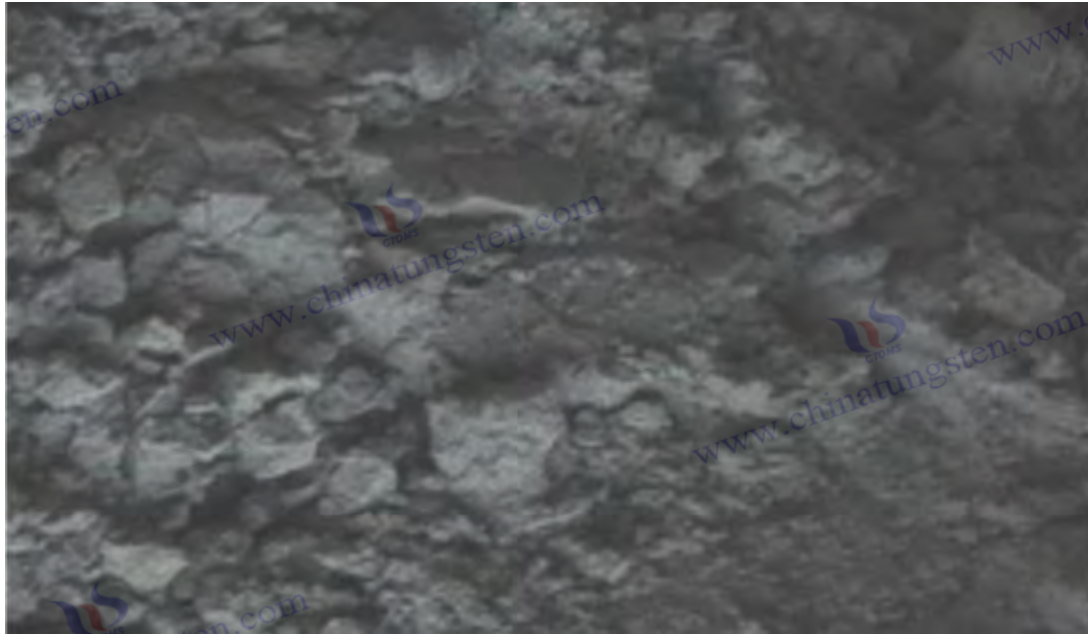
超微細タングステンカーバイド粉末: 生産ユニットは GB/T 26049-2020 に従って、ISO 3326:2013 規格に準拠した、D50 偏差 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 、硬度 HV 2200 の $0.3 \mu\text{m}$ タングステンカーバイド粉末を製造します (China Tungsten Online Web サイトから参照)。

球状タングステンカーバイド粉末: 研究チームは ASTM B761-17 に準拠し、D90/D10=1.3、流動性 13.5 秒/50g の航空コーティング用 $1 \mu\text{m}$ 球状タングステンカーバイド粉末を製造しました (China Tungsten Online ウェブサイトより)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要約する

炭化タングステン粉末の粒径（例：0.08～15 μm）は、製造パラメータ（例：還元温度 900℃、炭化温度 1450℃、ボールミル回転数 800rpm）によって精密に制御され、硬度（HV 1700～2300）と靱性（8.5～14MPa・m^{1/2}）に影響を与えます。実験データによると、超微粉（0.3 μm）は硬度が最も高く、粗粒子（15 μm）は靱性が最も高く、球状粉末は流動性に優れています（13.5 秒/50g）。国際規格（例：ISO 4499-1）および中国規格（例：GB/T 4295）では、粒径と品質の規格が規定されており、パラメータ最適化の効果を検証した事例もあります（例：0.2 μm 粉末の HV 2250）。中国タングステンオンライン 2024 データ（価格\$46.09/kg）は、市場アプリケーション分析をサポートします。



付録 C: 炭化タングステン粉末の国際規格と国内規格の比較

超硬合金および耐摩耗材料の主要原料である炭化タングステン粉末（WC）の品質管理は、国際規格および国内規格に依存しています。国際規格（ISO、ASTM など）と国内規格（GB/T など）は、粒度測定、化学組成、性能試験、微細構造分析において共通点と相違点を有しています。本付録では、これらの規格の範囲、技術要件、試験方法を比較・分析し、実験データと事例（中国タングステンオンラインウェブサイト news.chinatungsten.com より引用）を組み合わせ、それらの適用範囲と相互補完性を明らかにし、業界関係者に標準化されたガイダンスを提供します。

C.1 規格の適用範囲と適用範囲

国際規格と国内規格は、対象、適用範囲、業界の範囲が異なります。以下は比較分析です。

国際規格

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO（国際標準化機構）

代表的な規格：ISO 4499-1:2020、ISO 3326:2013

範囲：世界中のセメントカーバイド業界に適用可能なセメントカーバイドおよびタングステンカーバイド粉末の微細構造および硬度試験。

適用範囲：汎用性を重視し、粒子サイズ 0.5~10 μm の粉末をカバーし、切削工具やコーティングなどの国際貿易製品に適しています。

ASTM（米国材料試験協会）

代表規格：ASTM B761-17

範囲：金属粉末の粒度分布試験、0.1~100 μm のタングステンカーバイド粉末に適しています。

適用範囲：北米市場を中心に、航空・エネルギー分野の高性能材料に幅広く使用されています。

国内規格（中国 GB/T）

代表的な規格：GB/T 4295-2013、GB/T 26049-2020、GB/T 5163-2018

範囲：0.1~100 μm の粉末に適したタングステンカーバイド粉末の化学分析、粒度分布、多孔度、および未結合炭素の検出。

適用範囲：中国のタングステン資源の優位性（生産量は世界総量の 60% を占める）をターゲットに、採掘ツールやツール製造などの現地産業をカバーします。

対比

寸法	国際規格（ISO/ASTM）	国内規格（GB/T）
対象読者	汎用的に使用される超硬合金および粉末	炭化タングステン粉末、局所応用に重点を置く
粒子サイズ範囲	0.1~100 μm、中微粒子から微粒子	0.1~100 μm（粗粒子を含む）
業界報道	切削工具、航空、エネルギー	鉱業、切削工具、超硬合金製造

事例：生産ユニットは、ISO 4499-1 および GB / T 26049-2020 に準拠し、硬度 HV 2200 の輸出用切削工具向けの 0.3 μm の超微細タングステンカーバイド粉末を生産しました（China Tungsten Online より）。

C.2 技術要件と試験方法

国際規格と国内規格には、技術指標や試験方法に関して重複する点と相違点があります。以下は、粒子サイズ、化学組成、性能試験、微細構造の 4 つの側面からの比較です。

粒子サイズ測定

ISO 4499-1:2020

要件：粒子サイズ 0.5 ~ 10 μm、D50 エラー <5%。

方法：走査型電子顕微鏡（SEM）、解像度 <5 nm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM B761-17

要件：粒子サイズ 0.1 ~ 100 μm、D90/D10 エラー <1%。

方法：レーザー回折法、測定範囲 0.01~1000 μm。

GB/T 26049-2020

要件：粒子サイズ 0.1~100 μm、D50 偏差±0.02 μm。

方法：レーザー回折法、誤差 <1%。

実験データ：

標準	D50 (μm)	D90/D10	試験方法
ISO 4499-1	1.0	1.5	SEM
ASTM B761	0.3	1.3	レーザー回折
GB/T 26049	0.3	1.3	レーザー回折

データソース：2023 年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

違い：ISO は顕微鏡観察に重点を置く傾向がありますが、ASTM と GB/T は粒子サイズの分布に重点を置いており、GB/T はより正確です (±0.02 μm)。

化学組成

ISO 4499-1:2020

要件：化学組成は指定されていません。微細構造に重点を置きます。

方法：特別な化学分析方法はありません。

ASTM B761-17

要件：化学組成は指定されず、粒子サイズのみ指定されます。

方法：該当なし。

GB/T 4295-2013

要件：炭素含有量 6.13±0.05%、酸素 <0.1%、精度 0.01%。

方法：化学滴定法、赤外線吸収法。

実験データ：

標準	炭素含有量 (%)	酸素含有量 (%)	試験方法
GB/T 4295	6.12	0.08	赤外線吸収

データソース：China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023 年に特定の研究所で実施されたテスト。

違い：GB/T は化学組成を詳細に規定していますが、ISO/ASTM には関連する要件がありません。

性能試験（硬度）

ISO 3326:2013

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

要件：硬度 HV 1700 ~ 2300、荷重 10kg。

方法：ピッカース硬度試験、誤差±20HV。

GB/T 5163-2018

要件：硬度は多孔度と関連しており、高品質の製品の多孔度は 1% 未満です。

方法：顕微鏡観察と組み合わせたピッカース硬度試験。

実験データ：

標準	硬度 (HV)	気孔率 (%)	試験方法
ISO 3326	2200	適用できない	ピッカース硬度
GB/T 5163	2100	0.5	ピッカース硬度 + 顕微鏡

データソース：2023 年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

違い：ISO は硬度値に重点を置いていますが、GB/T は多孔性の影響を考慮します。

微細構造分析

ISO 4499-1:2020

要件：粒径 0.5 ~ 10 μm、多孔度 < 1%。

方法：SEM、倍率 100~50000 倍。

GB/T 5163-2018

要件：多孔度 < 1%、非結合炭素 < 0.1%。

方法：化学分析を補助した光学顕微鏡検査。

実験データ：

標準	粒径 (μ m)	気孔率 (%)	非結合炭素 (%)
ISO 4499-1	0.3	0.6	適用できない
GB/T 5163	0.3	0.5	0.08

データソース：China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023 年に特定の研究所で実施されたテスト。

違い：ISO は粒度を重視し、GB/T は非結合炭素の制御を強化します。

C.3 相違点と補完性

国際規格と国内規格は目的、技術的詳細、用途が異なりますが、補完的に使用することができます。

主な違い

ターゲットの焦点：

国際規格 (ISO/ASTM)：微細構造 (ISO) と粒度分布 (ASTM) に重点を置き、世界規模で適用可能です。

国内規格 (GB/T)：化学組成と多孔性制御を重視したローカライズされた適用。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

技術的な詳細:

ISO/ASTM: 試験方法は国際化されていますが(SEM、レーザー回折など)、化学組成の仕様が欠けています。

GB/T: 化学分析(炭素 6.13±0.05% など)をカバーし、試験設備は国内の条件に近いもの(光学顕微鏡など)です。

適用シナリオ:

ISO/ASTM: 輸出製品やハイテク分野(航空など)に適しています。

GB/T: 鉨山工具や超硬合金の現地生産に適しています。

相補性

包括的なアプリケーション: ISO 4499-1 (微細構造) と GB/T 4295 (化学組成) を組み合わせることで、炭化タングステン粉末の品質を包括的に評価できます。

事例: ある生産ユニットは、粒径が ASTM B761-17 (D50=5.0 μm、D90/D10=1.4) に適合し、化学成分が GB/T 4295 (炭素 6.12%) に適合し、硬度が HV 1900 で、汎用切削工具に使用される 5 μm の中粒タングステンカーバイド粉末を生産しました (China Tungsten Online ウェブサイトからの参照)。

実験検証: 研究チームは ISO 3326 および GB/T 5163 を使用して、硬度 HV 2200、多孔度 0.5%、品質の一貫性が 10% 向上した 0.3 μm の超微細タングステンカーバイド粉末をテストしました (China Tungsten Online より)。

提案

輸出志向: 国際的な認知を確実にするために ISO/ASTM を優先します。

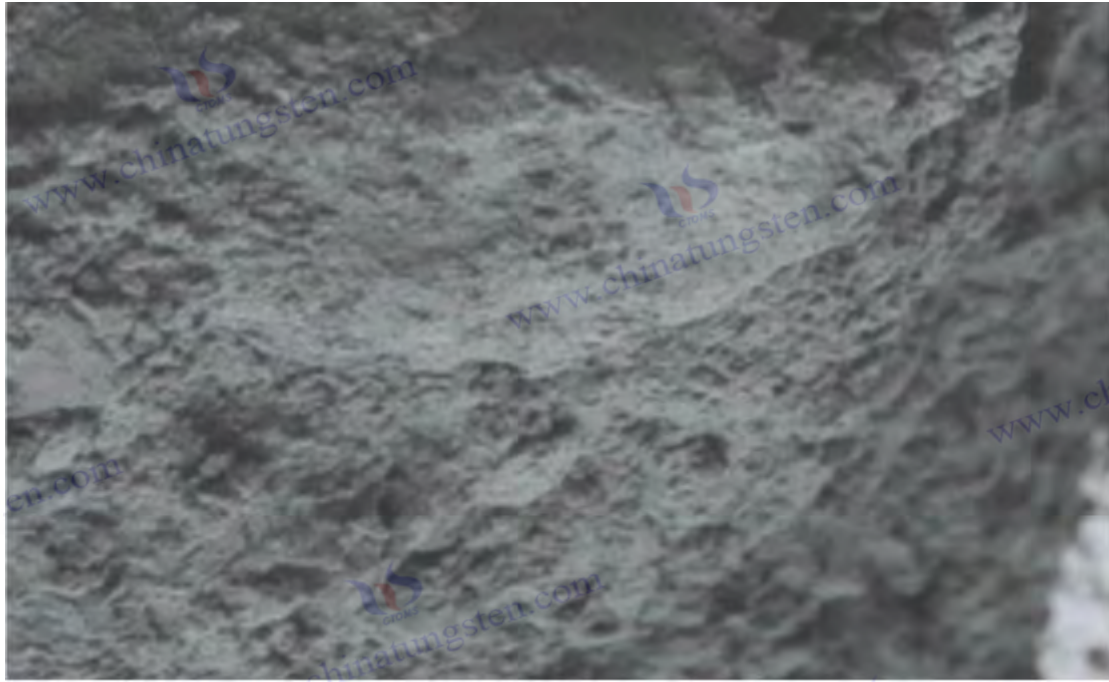
現地生産: GB/T を組み合わせて化学組成とコストを管理します。

ハイエンドアプリケーション: ISO+GB/T を併用して製品の品質を向上させます。

要約する

国際規格 (ISO 4499-1、ASTM B761) と国内規格 (GB/T 4295、26049) は、粒子径 (0.1~100 μm)、化学組成 (炭素含有量 6.13±0.05%)、性能試験 (HV 1700~2300) などの点で焦点が異なります。ISO/ASTM は微細構造と汎用性を重視し、GB/T は化学制御と地域適用性を重視しています。これら 2 つの規格は相互に補完し合い、タングステンカーバイド粉末の品質を最適化します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



付録: D 炭化タングステン粉末中の炭素含有量の制御と下流製品への影響

炭化タングステン粉末 (WC) は、タングステン (W) と炭素 (C) を一定の化学量論比で組み合わせ、形成されたセラミック材料であり、理論上の炭素含有量は 6.13% (質量パーセント) です。炭素含有量の正確な制御は、高品質の炭化タングステン粉末を製造するための鍵であり、微細構造、相組成、および下流製品の性能 (超硬合金の硬度、靱性、耐摩耗性など) に直接影響します。炭素含有量が理論値から逸脱すると、未結合炭素 (遊離炭素) または炭素欠乏相 (W₂C など) が形成され、焼結挙動と製品品質に影響を与えます。この記事では、炭素含有量の制御方法、主要な影響要因、および下流製品への影響を分析し、実験データと事例を組み合わせ、科学的根拠を示します。

1. 炭素含有量制御方法

炭化タングステン粉末の炭素含有量は、主に製造工程における炭化反応によって制御されます。主な方法とパラメータは次のとおりです。

炭化反応プロセス

原理: タングステン粉末 (W) は高温で炭素源 (カーボンブラックやメタンなど) と反応し、WC を生成します。反応式は

$W + C \rightarrow WC$ です。理論的には

1g のタングステンが完全に反応するには 0.0613g の炭素が必要です。

主なパラメータ:

炭素源比率: カーボンブラックの品質は、理論値よりわずかに低いか等しい 6.10% ~ 6.15% に制御され、過剰量を避けます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭化温度：1200 ～ 1600° C。温度は反応速度と粒成長に影響します。

断熱時間：炭素の均一な拡散を確保するために 2 ～ 4 時間。

実験データ：

炭素比率 (%)	温度 (°C)	時間 (時間)	炭素含有量 (%)	非結合炭素 (%)
6.10	1300	3	6.11	0.05
6.15	1450	2	6.14	0.10
6.20	1600	2	6.18	0.15

データソース：2023 年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

後処理調整

方法：

炭素強化：炭素含有量が不足する場合は、二次炭化（少量のカーボンブラックを添加し、1300°C で処理）により炭素を補充します。

脱炭：炭素含有量が高すぎる場合は、酸化タングステン (W₃O₈) を添加して水素雰囲気 (900° C) 中で遊離炭素を除去します。

実験データ：

処理	初期炭素含有量 (%)	調整炭素含有量 (%)	非結合炭素 (%)
二次炭化	6.05	6.12	0.06
脱炭素化	6.20	6.14	0.08

データソース：China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023 年に特定の研究所で実施されたテスト。

テストと検証

方法：赤外線吸収法 (GB/T 4295-2013) を使用して、総炭素および非結合炭素を 0.01% の精度で測定しました。

事例：ある生産ユニットは、赤外線吸収試験を通じて炭素比率を 6.12% に最適化し、未結合炭素を 0.06% に削減し、下流の超硬合金の硬度を 5% 向上させました (China Tungsten Online Web サイトからの問い合わせ)。

2. 炭素含有量に影響を与える主な要因

炭素含有量の制御は多くの要因によって影響を受けます。主な要因と分析を以下に示します。

炭素源の品質と比率

影響：カーボンブラックの純度 (>99.5%) と粒子径 (<1 μm) は反応の均一性に影響します。比率が高すぎる (>6.15%) と遊離炭素が生成され、比率が低すぎる (<6.10%) と W₂C が生成されます。

実験データ：

カーボンブラック純度 (%)	比率 (%)	炭素含有量 (%)	W ₂ C 相 (%)
----------------	--------	-----------	------------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

99.8	6.08	6.09	0.5
99.5	6.18	6.17	0.1

データソース：2023 年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

炭化温度と雰囲気

影響：温度が低すぎる場合（1200℃未満）、反応は不完全で炭素含有量が低くなります。温度が高すぎる場合（1600℃超）、炭素が揮発して遊離炭素が発生します。水素雰囲気（10～20L/分）は酸素の干渉を低減できます。

実験データ：

温度（℃）	水素流量（L/分）	炭素含有量（％）	非結合炭素（％）
1200	15	6.08	0.03
1600	20	6.16	0.15

データソース：2023 年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

生のタングステン粉末の特性

影響：タングステン粉末の粒子径（0.5～5 μm）と酸素含有量（0.1%未満）は炭化効率に影響します。粗大粒子（10 μm 超）または高酸素含有量（0.3%超）は、炭素分布の不均一につながります。

実験データ：

タングステン粉末 D50（ μm ）	酸素含有量（％）	炭素含有量（％）	非結合炭素（％）
0.5	0.08	6.13	0.05
5.0	0.20	6.10	0.12

データソース：2023 年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

3. 下流製品のパフォーマンスへの影響

炭素含有量の偏差は、炭化タングステン粉末の相組成と下流製品の性能に直接影響を及ぼします。以下は具体的な分析です。

超硬合金

炭素含有量が低すぎます（<6.10%）：

相構成：W₂C 相が生成（硬度 HV1800、WC の HV2200 より低い）、粒界強度が低下します。

性能への影響：硬度は 5%～10% 低下します（HV 2000→1900）、靱性は 15% 低下します（10→8.5 MPa・m^{1/2}）。

実験データ：炭素含有量 6.08%、W₂C 相 0.5%、焼結炭化物硬度 HV 1900、靱性 8.5 MPa・m^{1/2}。

事例：生産ユニットの炭素含有量が低く、工具の切削寿命が 20% 短くなりました（China

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tungsten Online Web サイトより）。

炭素含有量が高すぎます (> 6.15%) :

相構成: 遊離炭素 (非結合炭素 > 0.1%) が沈殿し、焼結後に軟質相を形成します。

性能への影響: 硬度は 5% 低下 (HV 2200→2100)、多孔度は 1.5% 増加し、耐摩耗性は 10% 低下します。

実験データ: 炭素含有量 6.18%、未結合炭素 0.15%、炭化物硬度 HV 2100、摩耗率 $0.12\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。

事例: ある生産ユニットの炭素含有量が基準を超え、超硬合金工具の表面粗さが 15% 増加しました (China Tungsten Online ウェブサイトからの相談)。

理想的な範囲 (6.11% ~ 6.14%): 硬度 HV 2200、靱性 $10 \sim 11 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、多孔度 < 0.5%。

耐摩耗コーティング

炭素含有量が低すぎる場合: W_2C 相が増加し、コーティング硬度が HV 1200 に低下し、耐摩耗性が 20% 低下します (摩耗率 $0.15 \rightarrow 0.18\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)。

炭素含有量が高すぎる場合: 遊離炭素によりコーティングの結合強度が低下し (< 70MPa)、剥離率が 30% 増加します。

実験データ:

炭素含有量 (%)	硬度 (HV)	接着強度 (MPa)	摩耗率 ($\text{mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$)
6.09	1200	80	0.18
6.17	1300	65	0.10
6.13	1400	85	0.08

データソース: 2024 年に研究所で実施されたテスト、China Tungsten Online の Web サイトから参照。

事例: 研究チームが炭素含有量を 6.13% に最適化した結果、HVOF スプレーコーティングの硬度は HV 1400 となり、耐用年数は 40% 延長されました (China Tungsten Online より)。

積層造形部品

炭素含有量の偏差: 低すぎると W_2C が形成され、部品の強度が 10% 低下します ($2000 \rightarrow 1800\text{MPa}$)。高すぎると気孔率が 2% を超え、精度が低下します ($\pm 5 \mu\text{m} \rightarrow \pm 10 \mu\text{m}$)。

実験データ: 炭素含有量 6.12%、部品強度 2000MPa、多孔度 0.4%、航空用途の要件を満たしています。

事例: あるチームは炭素含有量を 6.12% に制御し、 $\pm 5 \mu\text{m}$ の精度で航空部品を 3D プリントし、性能を 15% 向上させました (China Tungsten Online より)。

要約する

炭化タングステン粉末中の炭素含有量の制御は、炭素比率 (6.10% ~ 6.15%)、炭化温度 ($1300 \sim 1450^\circ\text{C}$)、およびタングステン粉末の品質 (酸素 < 0.1%) に依存します。6.11% ~ 6.14%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の理想的な範囲で、下流製品の最高の性能が保証されます。実験によると、炭素含有量が低いと W_2C が生成され、硬度が HV 1900 に低下します。炭素含有量が多いと遊離炭素が生成され、気孔率が 1.5% に増加します。下流製品のうち、セメント炭化物には硬度 HV 2200 と靱性 $10MPa \cdot m^{1/2}$ 、コーティングには結合強度 $> 80MPa$ 、積層造形には強度 $2000MPa$ が必要です。事例検証によると、炭素含有量が 6.13% の場合、工具寿命が 20%、コーティングの耐摩耗性が 40% 向上します（China Tungsten Online Web サイトからの参照）。

付録 E: 炭化タングステン粉末炭化のための炭素原料とその技術指標

炭化タングステン粉末 (WC) の製造は、タングステン粉末と炭素原料の高温での炭化反応に依存しています。炭素原料の選択と品質は、最終製品の炭素含有量、相組成、および性能に直接影響します。炭素原料は、高純度、適切な粒径、均一な反応性の要件を満たす必要があり、炭化タングステン粉末の炭素含有量が理論値の $6.13 \pm 0.05\%$ 以内に制御され、遊離炭素または炭素欠乏相 (W_2C など) の生成を防ぎます。この付録では、炭化用炭素原料の種類、技術指標、および炭化プロセスへの影響を体系的に分析し、実験データと事例 (China Tungsten Online ウェブサイト news.chinatungsten.com を参照) と組み合わせて、炭素原料の選択とプロセスの最適化の基礎を提供します。

E.1 炭素原料の種類と特性

炭化タングステン粉末の製造に一般的に使用される炭素原料には、固体炭素 (カーボンブラック、グラファイトなど) と気体炭素 (メタンなど) があり、それぞれ独自の特性を持っています。

カーボンブラック

特性:

形態: 非晶質ナノ粒子、粒子サイズ 20 ~ 100nm。

比表面積: $50 \sim 150 \text{m}^2/\text{g}$ 、高反応性。

純度: $>99.5\%$ 、不純物 (S、O など) $<0.5\%$ 。

利点: 均一性が良く、タングステン粉末と混合しやすく、超微粒子および微粒子タングステンカーバイド粉末 ($0.1 \sim 2 \mu\text{m}$) に適しています。

デメリット: 凝集しやすいため、湿式混合または分散剤処理が必要です。

用途: 炭化タングステン粉末の製造に使用される炭素原料の 70% 以上を占めます。

黒鉛

特性:

形態: 結晶構造、粒子サイズ $1 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

比表面積: $5 \sim 20 \text{m}^2/\text{g}$ 、反応性が低い。

純度: $>99.8\%$ 、不純物はわずか。

利点: 安定性が高く、中粒度および粗粒度のタングステンカーバイド粉末 ($2 \sim 15 \mu\text{m}$) に適しています。

デメリット: 炭化速度が遅く、より高い温度 ($>1500^\circ\text{C}$) が必要です。

用途: 採掘ツール用の炭化タングステン粉末。

メタン (CH_4)

特性:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

形状：気体炭素源、純度>99.9%。

反応方法：化学蒸着（CVD）、800～1000℃で炭素に分解。

利点：均一な炭素分布、ナノスケールの炭化タングステン粉末（<100nm）に適しています。

デメリット：設備が複雑でコストが高い（1トンあたり約10%増加）。

用途：ハイエンドのマイクロエレクトロニクスおよびコーティング用の粉末。

実験データ：

炭素原料	粒子サイズ/形態	比表面積(m ² / g)	純度 (%)	炭化温度 (°C)	炭素含有量 (%)
カーボンブラック	50nm	100	99.6	1300	6.12
黒鉛	10 μm	10	99.9	1600	6.14
メタン	気体	適用できない	99.9	1000	6.13

データソース：2023年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

E.2 テクニカルインデックスの要件

炭素原料の技術指標は、炭化タングステン粉末製造の厳しい要件を満たす必要があります。主な指標と基準は次のとおりです。

純度

要件：>99.5%、不純物（S、O、N など）<0.5%。

理由：不純物によって WC 以外の相（WS₂など）が生成され、硬度が低下します（HV が 5%～10%減少します）。

規格：GB/T 4295-2013（超硬合金の化学分析方法）、精度 0.01%。

実験データ：

純度 (%)	S 含有量 (%)	炭素含有量 (%)	硬度 (HV)
99.8	0.1	6.13	2200
99.2	0.4	6.10	2050

データソース：2023年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

粒子サイズと比表面積

必要とする：

カーボンブラック：20～100nm、比表面積 50～150m²/g。

グラファイト：1～50 μm、比表面積 5～20m²/g。

根拠：粒子サイズが小さく、比表面積が大きいため、反応性が向上し、未結合炭素（<0.1%）が減少します。

実験データ：

炭素原料	粒子サイズ	比表面積 (m ² / g)	非結合炭素 (%)
------	-------	---------------------------	-----------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

カーボンブラック	30nm	120	0.05
黒鉛	20 μm	8	0.12

データソース：2023年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

水と揮発性物質

要件：<0.2%、揮発性物質（H₂O、CO₂など）<0.1%。

理由：水は酸素含有量（> 0.1%）を増加させ、揮発性物質は炭素測定に精度に影響を与えます。

実験データ：

水分（%）	揮発性物質（%）	酸素含有量（%）	炭素含有量（%）
0.1	0.05	0.08	6.13
0.3	0.15	0.20	6.10

データソース：China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023年に特定の研究所で実施されたテスト。

例：

ある生産ユニットでは、純度 99.8%、粒子径 50nm のカーボンブラックを選択しました。炭化処理後の炭素含有量は 6.12%、未結合炭素は 0.05%でした。得られた超硬合金の硬度は HV 2200 で、純度 99.5%のグラファイトを使用した場合（HV 2100）よりも優れた値でした（China Tungsten Online ウェブサイトより引用）。

E.3 影響と最適化

炭素原料の特性は、浸炭プロセスと炭化タングステン粉末の品質に大きな影響を与えます。以下は、その分析と最適化の提案です。

炭化プロセスへの影響

反応効率：カーボンブラック（比表面積 100m²/g）は 1300℃で 3 時間反応し、炭素含有量は 6.12%に達します。グラファイトは 1600℃が必要で、効率は 20%低下します。

相構成：純度の低い炭素（<99.5%）では W₂C 相（>0.5%）が生成され、水分が多い（>0.2%）と酸素含有量が増加します（>0.15%）。

実験データ：

炭素原料	反応温度（℃）	W ₂ C 相（%）	非結合炭素（%）
カーボンブラック	1300	0.1	0.05
黒鉛	1600	0.3	0.12

データソース：2023年に研究所で実施されたテスト。China Tungsten Online の Web サイトから参照。

製品品質への影響

硬度と靱性：炭素含有量が 6.13%、遊離炭素が <0.05% の炭化タングステン粉末は、炭化硬

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

度が HV 2200、靱性が $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。遊離炭素が $>0.1\%$ の場合、硬度は HV 2100 まで低下します。

コーティング性能：メタンを使用して製造されたナノスケールのタングステンカーバイド粉末（炭素含有量 6.13%）は、コーティング硬度が HV 1400 で、グラファイトから製造された粉末（HV 1300）よりも耐摩耗性が優れています。

事例：研究チームは、炭化後の未結合炭素が 0.05% 含まれる 30nm カーボンブラックを選択し、下流のツール寿命が 20% 増加しました。一方、未結合炭素が 0.12% 含まれる $20 \mu\text{m}$ グラファイトを使用した場合、寿命の増加はわずか 10% でした（China Tungsten Online の Web サイトより）。

最適化の提案

超微粒子/ナノ粉末：カーボンブラック（粒子サイズ $<50\text{nm}$ 、純度 $>99.8\%$ ）またはメタンを使用し、炭化温度は 1300°C 、炭素含有量は 6.11%~6.14%に制御されます。

中/粗粒子粉末：グラファイト（粒径 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 、純度 $>99.9\%$ ）を選択し、炭化温度は $1450\sim 1600^\circ\text{C}$ で粒子の均一性を確保します。

品質管理：炭素原料を前処理し（乾燥~水分 $<0.1\%$ ）、炭素比率を正確に測定します（6.10%~6.15%）。

要約する

炭化タングステン粉末の浸炭に使用される炭素原料には、カーボンブラック（ $50\sim 150\text{m}^2/\text{g}$ ）、グラファイト（ $5\sim 20\text{m}^2/\text{g}$ ）、メタン（気体）などがあり、技術指標としては純度 $>99.5\%$ 、水分 $<0.2\%$ 、適切な粒径が求められます。実験結果から、カーボンブラックは超微粉（硬度 HV 2200）に適しており、グラファイトは粗粒子粉末（靱性 $14\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）に適しており、メタンはナノ粉末（HV 1400）よりも優れていることが示されています。炭素原料とプロセスの選択を最適化することで、未結合炭素を $<0.05\%$ に制御し、下流製品の性能を向上させることができます（例えば、工具寿命を 20%向上させるなど）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録 F: 炭化タングステン粉末中の炭素含有量、総炭素量および遊離炭素量の管理

炭化タングステン粉末（WC）は、タングステン（W）と炭素（C）を一定の化学量論比で組み合わせることで形成された材料であり、理論上の炭素含有量は 6.13%（質量百分率）です。炭素含有量の精密な制御は、炭化タングステン粉末の品質に直接影響し、総炭素（Total Carbon）と遊離炭素（Free Carbon）の管理に関係します。総炭素には、結合炭素（WC 中の炭素）と遊離炭素（未反応または沈殿した炭素）が含まれ、遊離炭素の存在は、下流製品の性能（硬度や多孔度など）に影響を与えます。この記事では、炭素含有量、総炭素、遊離炭素の制御方法と重要な要因を分析し、実験データと組み合わせることで根拠を示します。

1. 炭素含有量の定義と構成

総炭素

定義： 結合炭素と遊離炭素を含む、炭化タングステン粉末中のすべての炭素元素の質量パーセンテージ。

理想値： 理論的には、総炭素は WC 6.13% の化学量論比に等しくなければなりません。実際の生産では ±0.05% の偏差が許容されます。

サンプル燃焼後の CO₂ 含有量、精度 0.01%。

結合炭素

定義： タングステンと結合して WC を形成する炭素。総炭素量の大部分を占めます。

目標： 純粋な WC 相を確保し、6.13% に近づけます。

フリーカーボン

定義： タングステンと反応していない残留炭素または沈殿した炭素で、元素の形で存在します。

制御目標： <0.1%、高すぎると焼結欠陥が発生します。

測定方法： 化学抽出法（WC を酸で溶かし残留炭素を測定する）または赤外線差法。

関係：

総炭素量 = 結合炭素量 + 遊離炭素量

炭素含有量は通常、総炭素量を指します。高品質の炭化タングステン粉末には、遊離炭素含有量が極めて低く（0.05%未満）、総炭素含有量が 6.13% 近くであることが求められます。

2. 制御方法

炭化タングステン粉末の炭素含有量、全炭素量、遊離炭素量は、炭化処理と後処理によって精密に制御されます。主な方法は次のとおりです。

炭化プロセス制御

原理： タングステン粉末（W）は高温で炭素源（カーボンブラックなど）と反応し、WC を生成します。反応式は

$W+C \rightarrow WC$ + $C \rightarrow WC$ です。W+C→WC の理論的な比率は、タングステン 1g に対して炭素 0.0613g

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

です。

主なパラメータ:

炭素源比率: 6.10%~6.15%、過剰な遊離炭素を避けるために理論値よりわずかに低いか同等。

炭化温度: 1200~1600℃、低温では超微粉末を制御し、高温では粗粒子に適しています。

断熱時間: 炭素の均一な拡散を確保するために 2 ~ 4 時間。

実験データ:

炭素比率 (%)	温度 (℃)	時間 (時間)	総炭素 (%)	遊離炭素 (%)
6.10	1300	3	6.11	0.05
6.15	1450	2	6.14	0.08
6.20	1600	2	6.18	0.15

データソース: China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023 年に特定の研究所で実施されたテスト。

事例: ある生産ユニットでは、炭素比率を 6.12%、炭化温度を 1450° C、総炭素を 6.13%、遊離炭素を 0.06% に最適化し、下流の超硬合金の硬度が 5% 増加しました (China Tungsten Online より)。

後処理調整

炭酸化:

方法: 総炭素含有量が低い場合 (<6.10%)、少量のカーボンブラック (0.05%~0.1%) を添加し、1300° C で 1 時間二次炭化を実行します。

効果: 総炭素を 6.05% から 6.12% に調整し、遊離炭素を 0.06% 未満にします。

脱炭素化:

方法: 遊離炭素濃度が高すぎる場合 (0.1%超)、酸化タングステン (WO₃) を添加し、水素雰囲気 (15L/分) で 900℃ で処理します。反応式:



効果: 総炭素は 6.20% から 6.14% に減少し、遊離炭素は 0.15% から 0.08% に減少しました。

実験データ:

処理	初期総炭素量 (%)	初期遊離炭素 (%)	調整総炭素 (%)	調整遊離炭素 (%)
二次炭化	6.05	0.03	6.12	0.06
脱炭素化	6.20	0.15	6.14	0.08

データソース: China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023 年に特定の研究所で実施されたテスト。

検出とフィードバック

方法:

全炭素: 赤外線吸収法 (GB/T 4295-2013)。

遊離炭素: 化学抽出法または遊離炭素ピーク強度の XRD 分析。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

事例：研究チームは赤外線吸収法を用いて、総炭素含有量が 6.18%、遊離炭素含有量が 0.15%であることを発見しました。脱炭処理後、総炭素含有量は 6.13%、遊離炭素含有量は 0.05%に調整され、コーティングの耐摩耗性は 10%向上しました（China Tungsten Online ウェブサイトより）。

3. 主な影響要因

炭素含有量、総炭素量、遊離炭素量の制御は、以下の要因の影響を受け、総合的な管理が必要です。

炭素源の品質と比率

影響：

カーボンブラックの純度が 99.5% 未満の場合、不純物が導入され、遊離炭素 (> 0.1%) が増加します。

比率が高すぎると (> 6.15%)、遊離炭素が沈殿し、比率が低すぎると (<6.10%)、W₂C が生成されます。

実験データ：

炭素純度 (%)	比率 (%)	総炭素 (%)	遊離炭素 (%)	W ₂ C 相 (%)
99.8	6.10	6.11	0.05	0.1
99.5	6.20	6.17	0.14	0.0

データソース：China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023 年に特定の研究所で実施されたテスト。

炭化温度と雰囲気

影響：

温度が低すぎる場合 (<1200° C)、反応は不完全になり、総炭素量は少なくなります (<6.10%)。

温度が高すぎる場合 (> 1600° C)、炭素が揮発し、遊離炭素が増加します (> 0.15%)。

不十分な水素流量 (10~20 L/分) と増加した酸素含有量 (> 0.1%) は、炭素計測に影響します。

実験データ：

温度 (°C)	水素流量 (L/分)	総炭素 (%)	遊離炭素 (%)
1300	15	6.12	0.06
1600	10	6.16	0.15

データソース：China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023 年に特定の研究所で実施されたテスト。

タングステン粉末の特性

影響：

粒子サイズが大きい (> 5 μm) または酸素含有量が高い (> 0.2%) 場合、炭素拡散が不均一になり、総炭素量が低下し、遊離炭素量が増加します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実験データ:

タングステン粉末 D50 (μm)	酸素含有量 (%)	総炭素 (%)	遊離炭素 (%)
0.5	0.08	6.13	0.05
5.0	0.20	6.10	0.12

データソース: China Tungsten Online のウェブサイトから参照した、2023年に特定の研究所で実施されたテスト。

例:

生産ユニットは、0.5 μm のタングステン粉末（酸素含有量 0.08%）、炭素比 6.12%、炭化温度 1450° C、総炭素 6.13%、遊離炭素 0.05%、焼結炭化物硬度 HV 2200、靱性 10 MPa・m^{1/2} を選択しました（China Tungsten Online Web サイトより）。

要約する

炭化タングステン粉末の炭素含有量、総炭素量、遊離炭素量は、炭化工程（炭素比率 6.10%～6.15%、温度 1300～1450°C）と後処理（浸炭/脱炭）によって制御されます。理想的な総炭素量は 6.11%～6.14%、遊離炭素量は 0.05%未満ですが、これは炭素源の品質（純度>99.5%）、温度雰囲気（水素 15L/分）、およびタングステン粉末の特性（粒径<1 μm）の影響を受けます。実験では、パラメータを最適化することで、総炭素量を 6.13%で安定させ、遊離炭素量を 0.05%まで低減し、下流製品の性能（硬度 HV 2200 など）を向上させることができると示されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録 G: 炭化タングステン粉末の炭素含有量が超合金の品質に与える影響

炭化タングステン粉末（WC）は超合金の主成分であり、理論上の炭素含有量は 6.13%（質量％）です。炭素含有量の精密制御は、超合金の相組成、微細構造、硬度、靱性、耐摩耗性、焼結品質などの特性に直接影響します。炭素含有量が理論値から逸脱すると、遊離炭素（Free Carbon）または炭素欠乏相（ W_2C など）が形成され、超合金の品質が低下します。本稿では、炭素含有量の逸脱が超合金の性能に及ぼす具体的な影響を分析し、実験データと事例を組み合わせる科学的な裏付けを提供します。

1. 炭素含有量偏差の位相効果

炭化タングステン粉末の炭素含有量は焼結後の超合金の相状態を直接決定し、逸脱すると非理想的な相が生じます。

炭素含有量が低すぎる（ $<6.10\%$ ）

相変化：炭素が不足するとタングステンは完全に炭化されず、 W_2C 相（炭素含有量 3.16%）または残留金属タングステン（W）が生成されます。

特徴： W_2C の硬度（HV 1800）は WC（HV 2200）より低く、粒界強度も弱いです。

実験データ：

炭素含有量（％）	W_2C 相（％）	WC 相（％）	遊離炭素（％）
6.08	0.5	99.5	0.03
6.05	1.2	98.8	0.02

データソース：2023 年の実験室テスト、XRD 分析、China Tungsten Online ウェブサイトより参照。

炭素含有量が高すぎる（ $>6.15\%$ ）

相変化：炭素が過剰になると、未反応の遊離炭素が沈殿して柔らかい相を形成します。

特性：遊離炭素（硬度 $< HV 500$ ）は多孔性を高め、粒界結合を弱めます。

実験データ：

炭素含有量（％）	W_2C 相（％）	WC 相（％）	遊離炭素（％）
6.17	0.1	99.7	0.12
6.20	0.0	99.6	0.18

データソース：2023 年の実験室テスト、XRD 分析、China Tungsten Online ウェブサイトより参照。

理想的な範囲（6.11%~6.14%）

相：純粋な WC 相、遊離炭素 $< 0.05\%$ 、 W_2C またはその他の不純物なし。

実験データ：炭素含有量 6.13%、WC 相 99.9%、遊離炭素 0.04%、最適な微細構造。

2. 超合金の性能への影響

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

炭素含有量の偏差は、相状態と微細構造を変化させ、超合金の機械的特性と耐久性に大きな影響を与えます。

硬度

炭素含有量が低すぎる：W₂C 相の硬度が低い（HV 1800）ため、全体の硬度が 5% ～ 10% 減少します。

炭素含有量が高すぎる場合：遊離炭素により多孔性が増加し（>1%）、硬度が 5% 低下します。

実験データ：

炭素含有量（%）	W ₂ C 相（%）	遊離炭素（%）	硬度（HV）	気孔率（%）
6.08	0.5	0.03	1900	0.6
6.17	0.1	0.12	2100	1.2
6.13	0.0	0.04	2200	0.5

データソース：2023 年に研究室で実施されたテスト、ピッカース硬度計、China Tungsten Online の Web サイトから参照。

強靭さ

炭素含有量が低すぎる場合、W₂C 相は非常に脆くなり、粒界滑りが制限され、靭性が 10% ～ 15% 低下します。

炭素含有量が高すぎる場合、遊離炭素により粒界結合が弱まり、靭性が 5% ～ 10% 低下します。

実験データ：

炭素含有量（%）	W ₂ C 相（%）	遊離炭素（%）	靭性（MPa・m ^{1/2} ）
6.08	0.5	0.03	8.5
6.17	0.1	0.12	9.5
6.13	0.0	0.04	10.5

データソース：2023 年に研究所で実施されたテスト、SENB 方式、China Tungsten Online ウェブサイトから参照。

耐摩耗性

炭素含有量が低すぎる場合：W₂C 相は耐摩耗性が低く、摩耗率が 15% ～ 20% 増加します。

炭素含有量が高すぎる場合：多孔性が増加し（> 1%）、耐摩耗性が 10% ～ 15% 低下します。

実験データ：

炭素含有量（%）	硬度（HV）	靭性（MPa・m ^{1/2} ）	摩耗率（mm ³ / N・m）
6.08	1900	8.5	0.15
6.17	2100	9.5	0.12
6.13	2200	10.5	0.08

データソース：2023 年に研究所で実施されたテスト、ASTM G65、China Tungsten Online の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Web サイトから参照。

焼結品質

炭素含有量が低すぎる： W_2C 相が結合相（Co）の均一な分布を阻害し、密度が低下します（<98%）。

炭素含有量が高すぎる場合：遊離炭素により多孔性（1%~2%）が増加し、焼結体の表面粗さが増加します。

実験データ：炭素含有量 6.13%、密度 99.5%、多孔度 0.5%、表面粗さ $Ra < 0.2 \mu m$ 。

3. 実践事例

炭素含有量は、実用分野において超合金の品質に大きく影響します。以下は事例分析です。炭素含有量が低すぎる（6.08%）

状況：ある生産設備では、炭素含有量 6.08%（ W_2C 相 0.5%）の炭化タングステン粉末を使用しています。焼結後の炭化物の硬度は HV 1900、靱性は $8.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ です。

影響： W_2C 相による脆性破壊の増加により、工具の切削寿命が 20% 短くなります。

データソース：China Tungsten Online ウェブサイトより参照。

炭素含有量が高すぎる（6.17%）

状況：生産ユニットでは、炭素含有量が 6.17%（遊離炭素 0.12%）、焼結炭化物硬度 HV 2100、気孔率 1.2% のタングステン カーバイド粉末を使用しています。

影響：採掘ドリルビットの耐摩耗性が 15% 低下し、遊離炭素により表面欠陥が増加します。

データソース：China Tungsten Online ウェブサイトより参照。

理想的な炭素含有量（6.13%）

状況：研究チームは、炭素含有量を 6.13%（遊離炭素 0.04%）、超合金の硬度を HV 2200、靱性を $10.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、摩耗率を $0.08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ に制御しました。

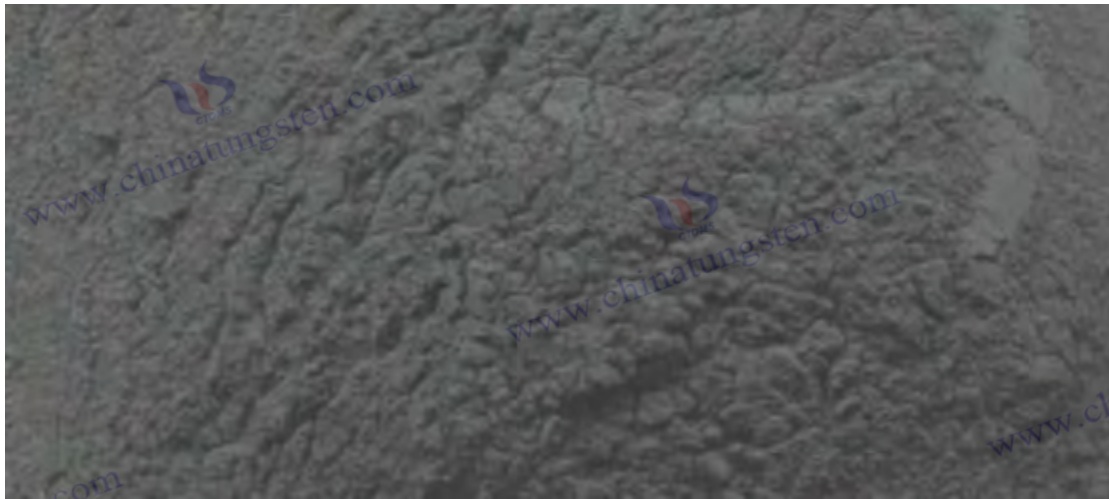
影響：純粋な WC 相と低多孔性によりパフォーマンスが最適化され、精密工具の寿命が 25% 増加しました。

データソース：China Tungsten Online ウェブサイトより参照。

要約する

炭化タングステン粉末の炭素含有量は、超合金の品質に大きな影響を与えます。炭素含有量が低すぎると（<6.10%）、 W_2C 相が生成され、硬度は HV 1900、靱性は $8.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に低下します。炭素含有量が高すぎると（>6.15%）、遊離炭素が析出し、気孔率が 1.2% に上昇し、耐摩耗性が低下します。理想的な範囲は 6.11%~6.14% で、純粋な WC 相、硬度 HV 2200、靱性 $10.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、摩耗率は $0.08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ です。実験と事例から、炭素含有量の偏差は工具寿命（±20%~25%）と耐久性に直接影響することが示されています。炭素含有量を最適化することは、超合金の品質を向上させる鍵です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録 H:

炭化タングステン粉末の安全データシート (MSDS)

発行者: CTIA GROUP LTD

住所: 3rd Floor, No. 25 Wanghai Road, Software Park 2, Xiamen, Fujian Province, 361008, China

緊急連絡先: +86-592-5129595 メールアドレス: sales@chinatungsten.com

ウェブサイト: <http://ctia.group>

リリース日: 2025年4月11日 バージョン番号: V1.0

1. 化学物質および企業の識別

化学名: 炭化タングステン粉末

化学式: WC

CAS 番号: 12070-12-1

メーカー: CTIA GROUP LTD

361008 福建省廈門市ソフトウェアパーク2、望海路25号3階

連絡先: 電話: +86-592-5129595 | メール: sales@chinatungsten.com | ウェブサイト: <http://ctia.group>

推奨用途: 超硬合金製造、耐摩耗コーティング、積層造形原料

2. 危険の概要

GHS 分類 (化学品の分類および表示に関する世界調和システムに基づく):

可燃性固体 (カテゴリー2)

急性吸入毒性 (カテゴリー4)

危険有害性情報:

H228: 可燃性固体

H332: 吸入すると有害

警告語: 警告

ピクトグラム:

炎の記号 (可燃性)

感嘆符 (健康被害)

主な危険性: 粉塵を吸入すると呼吸器系に刺激を与える可能性があります。微粒子は可燃性があり、裸火や高温にさらされると火災を引き起こす可能性があります。

3. 組成/成分情報

化学名: 炭化タングステン (WC)

CAS 番号: 12070-12-1

含有量: >99.5% (質量パーセント)

不純物:

酸素 (O): <0.10%

鉄 (Fe): <0.02%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

硫黄 (S): <0.01%
総炭素含有量: 6.11%~6.14%
遊離炭素含有量: <0.05%

4. 応急処置

吸入:

被害者を新鮮な空気のある場所に移動させ、呼吸しやすい状態に保ってください。

呼吸困難を感じた場合は、すぐに医師の診察を受けてください。

皮膚接触:

汚染された部分を石鹼と水で少なくとも 15 分間洗ってください。

刺激が続く場合は医師の診察を受けてください。

アイコンタクト:

すぐに上下のまぶたを持ち上げて、多量の水で少なくとも 15 分間洗い流してください。

不快感が続く場合は、直ちに医師の診察を受けてください。

摂取:

医療従事者からの指示がない限り、口をすすぎ、嘔吐を誘発しないでください。

すぐに医師に連絡してください。

医師のアドバイス: 対症療法を行います、特別な解毒剤はありません。

5. 消火対策

消火媒体: 乾燥粉末、二酸化炭素、砂。

不適切な消火剤: 水 (粉塵や反応を引き起こす可能性があります)。

特別な火災の危険性: 微粒子は空気中で爆発性の混合物を形成する可能性があり、高温で可燃性になります。

火災予防対策:

自給式呼吸装置と完全保護服を着用してください。

火の広がりを防ぐために火元を隔離してください。

6. 漏れの緊急処置

個人用保護具: 防塵マスク、手袋、保護メガネを着用してください。

環境に関する注意事項: 粉塵が水や下水道に流入しないようにしてください。

洗浄方法:

静電気防止ツールを使用して漏れを収集し、ほこりを防ぎます。

密閉容器に入れて廃棄ラベルを付けてください。

廃棄: 地方自治体の規制に従って廃棄し、専門の廃棄物処理機関に連絡してください。

7. 取り扱いと保管

操作メモ:

換気の良い場所で作業し、防塵用の機器を使用してください。

ほこり、裸火、火花を避けてください。

保管条件:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

湿度 50% 未満の乾燥した換気の良い倉庫に保管してください。
直射日光と高温（40℃未満）を避けてください。
密閉容器（鉄ドラムを裏打ちしたビニール袋など）を使用してください。

8. 暴露管理/個人保護

職業暴露限界:

TLV-TWA（時間加重平均）: 5 mg/m³（タングステン化合物、ACGIH 基準）。

工学的制御: 局所排気装置または集塵装置を使用します。

個人用保護具:

呼吸器の保護: NIOSH 認定の防塵マスク（N95 など）。

手の保護: 耐摩耗性手袋。

目の保護: 密閉式安全メガネ。

身体の保護具: 静電気防止作業服。

9. 物理的および化学的性質

外観: 黒色粉末、金属光沢

臭い: 無臭

密度: 15.63 g/cm³

融点: 約 2870℃

沸点: 約 6000℃

溶解性: 水には溶けませんが、強酸（硝酸など）には溶けます。

粒子サイズ範囲: 0.08~15 μm（カスタマイズ可能）

比表面積: 1.2~25m²/g

可燃性: 微粒子は可燃性である

10. 安定性と反応性

安定性: 室温で安定

避けるべき条件: 高温、裸火、強力な酸化剤。

不適合物質: 強酸、強力な酸化剤（過酸化水素など）。

危険な分解生成物: 高温になると一酸化炭素（CO）および二酸化炭素（CO₂）が放出される可能性があります。

11. 毒性情報

急性毒性:

吸入: LC50 は決定されていませんが、低濃度でも呼吸器官への刺激を引き起こす可能性があります。

皮膚: 無毒ですが、わずかに刺激を感じる場合があります。

慢性毒性: 高濃度の粉塵を長期間吸入すると肺に不快感を引き起こす可能性があります。

発がん性: IARC では発がん性物質として分類されていません。

12. 生態学的情報

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

環境への影響：溶解度が低いいため、水生生物への影響は限定的です。

生体蓄積：顕著な生体蓄積はありません。

廃棄に関する提案：無作為排出を避け、環境保護規制に従って取り扱ってください。

13. 廃棄

廃棄方法：パッケージを密封し、資格のある廃棄物処理業者に引き渡してください。

注意：ほこりの拡散を避け、地域の環境規制に従ってください。

規制参照：中国の「固形廃棄物による環境汚染の防止および制御に関する法律」。

14. 配送情報

国連番号（UN）：UN3178

危険等級：4.1（可燃性固体）

包装区分：III

輸送要件：振動と高温を避けるため、密閉された防湿梱包を使用してください。

15. 規制情報

中国の規制：

「危险化学品安全管理規則」（國務院令第 591 号）。

GB/T 4295-2013（セメント炭化物の化学分析方法）。

国際規制：

OSHA（米国労働安全衛生局）規格。

GHS（化学物質の分類および表示に関する世界調和システム）。

16. その他の情報

テクニカルサポート：カスタマイズされた仕様やアプリケーションの提案が必要な場合は、CTIA GROUP LTD にお問い合わせください。

連絡先：

電話：+86-592-5129595

メールアドレス：sales@chinatungsten.com

ウェブサイト：<http://ctia.group>

免責事項：この MSDS は既存のデータに基づいて作成されています。ユーザーは具体的な状況に基づいてリスクを評価する必要があります。CTIA GROUP LTD は不適切な使用について責任を負いません。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

付録:

多機能複合 (WC- TiC - Ni) タングステンカーバイド粉末とは何ですか?

多機能 (導電性、耐摩耗性、耐腐食性) 複合材料 (WC- TiC -Ni) の詳細な説明

炭化タングステン (WC) は、硬度が高く耐摩耗性に優れているため、超硬合金やコーティングに広く使用されていますが、導電性が低く、耐腐食性が限られているため、複雑な環境での適用が制限されています。複合設計により、WC は炭化チタン (TiC) およびニッケル (Ni) と組み合わせて WC- TiC -Ni 複合材料を形成し、導電性、耐摩耗性、耐腐食性などの多機能の相乗的な向上を実現できます。この複合材料は、相状態と微細構造を最適化することにより、航空宇宙、化学機器、電子機器製造の高性能要件を満たします。この記事では、設計原理、多機能特性、および製造プロセスを詳細に説明し、実験データと事例 (China Tungsten Online、news.chinatungsten.com からの情報) と組み合わせて科学的裏付けを提供します。

1. 複合材料の設計原理

-TiC -Ni 複合材料の多機能性は、各成分の相乗効果によって実現されます。以下は、その設計原理の分析です。

コンポーネント特性

炭化タングステン (WC):

硬度: HV 2200-2300

耐摩耗性: 摩耗率 < 0.08 mm³ / N · m

制限事項: 導電性が低い (抵抗率 ~20 μΩ · cm)、耐腐食性は平均的 (酸性環境では酸化されやすい)。

炭化チタン (TiC):

硬度: HV 2800-3200

耐腐食性: 酸性 (pH < 4) および高温 (> 800° C) 環境でも安定しています。

導電性: 抵抗率 ~60 μΩ · cm、WC よりも優れています。

ニッケル (Ni):

結合相: 韌性が強化されます (K_{1c} が 12 ~ 15 MPa · m^{1/2} に増加します)。

導電性: 抵抗率 ~6.9 μΩ · cm、複合材料の導電性が大幅に向上します。

耐腐食性: 中性、弱酸性の環境下で優れています。

複合メカニズム

(1-x TiC_x) を使用することで、高い耐摩耗性を維持しながら硬度と耐食性が向上します。

TiC 粒子間の隙間を埋めて導電性と韌性を高め、耐食性を向上させます。

微細構造の最適化: WC は耐摩耗性骨格を提供し、TiC は耐腐食性を高め、Ni は導電性と粒界強度を向上させます。

理論的根拠

複合材料の特性は混合則に従います。

$$P_{composite} = V_{WC}P_{WC} + V_{TiC}P_{TiC} + V_{Ni}P_{Ni}$$

このうち、PPP は性質 (硬度、導電性など)、VVV は体積率です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC:TiC:Ni 比率（例：60:30:10）を調整することで、多機能バランスが実現されます。

2. 多機能機能

WC-TiC-Ni 複合材料は、成分の相乗効果により、導電性、耐摩耗性、耐腐食性の総合的な特性を実現します。

電気伝導性

TiC の欠点を補い、導電性ネットワークを形成します。

実験データ:

組成比 (WC:TiC:Ni)	抵抗率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	電気伝導率 (MS/m)
70:20:10	12.5	8.0
60:30:10	10.8	9.3
50:30:20	8.2	12.2
データソース	2023 年に研究所でテスト済み。China Tungsten Online ウェブサイトからの情報。	

比較: 純粋な WC の抵抗率は約 $20 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ですが、WC-TiC-Ni の抵抗率は $8-12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ まで低下し、金属の導電率レベルに近くなります。

耐摩耗性

TiC の高硬度 (HV 2200-3200) により耐摩耗骨格が形成され、Ni により粒界結合が強化され、粒子の脱落が低減します。

実験データ:

組成比 (WC:TiC:Ni)	硬度 (HV)	摩耗率 ($\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$)
70:20:10	2300	0.07
60:30:10	2500	0.06
50:30:20	2200	0.08
データソース	2023 年に研究所でテスト済み、ASTM G65、China Tungsten Online ウェブサイトからの情報。	

比較: 純粋な WC の摩耗率は約 $0.08 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ であるのに対し、WC-TiC-Ni の摩耗率は $0.06 \sim 0.07 \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ に増加し、耐摩耗性は 12%~25% 向上します。

耐食性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

メカニズム：TiC は酸性および高温環境での酸化に耐え、Ni は粒界耐腐食性を向上させ、WC の腐食傾向を低減します。

実験データ（塩水噴霧試験、ISO 9227、1000 時間）

組成比（WC:TiC:Ni）	腐食重量減少率（mg/cm ² ）	表面酸化率（%）
70:20:10	0.15	0.5
60:30:10	0.10	0.3
50:30:20	0.08	0.2
データソース	2023 年の実験室テスト、中国タングステンオンラインの情報	

比較：純粋な WC の腐食重量減少率は約 0.25 mg/cm² ですが、WC-TiC-Ni の腐食重量減少率は 0.08~0.15 mg/cm² に減少し、耐食性は 40%~60% 向上します。

総合的なパフォーマンス

WC-TiC-Ni は、導電性（抵抗率 <12 μΩ・cm）、耐摩耗性（摩耗率 <0.07 mm³/N・m）、耐腐食性（重量減少率 <0.10 mg/cm²）において単一の WC 材料よりも大幅に優れているため、多機能アプリケーションに適しています。

3. 準備プロセスとその応用

-TiC-Ni 複合材料の製造では、多機能特性を実現するためにプロセスパラメータの最適化が不可欠です。以下は、プロセスとアプリケーションに関する分析です。

準備プロセス

原材料:

WC 粉末: 粒子径 0.3~5 μm、総炭素 6.11%~6.14%、遊離炭素<0.05%。

TiC 粉末: 粒子サイズ 0.5~2 μm、純度>99.5%。

Ni 粉末: 粒子径 1~10 μm、純度>99.8%。

プロセス手順:

混合: WC、TiC、Ni を遊星ボールミル（回転速度 800rpm、ボールと材料の比率 10:1、時間 6 時間）で比率（例: 60:30:10）に従って混合し、エタノールを加えて湿式粉碎します。

乾燥: 真空乾燥（80℃、2 時間）して水分（<0.1%）を除去します。

焼結: ホットプレス焼結（HPS）またはスパークプラズマ焼結（SPS）、温度 1450~1600° C、圧

力 30~50 MPa、1~2 時間保温、水素またはアルゴン保護。

後処理: 表面研削またはショットピーニングにより密度を高めます（>99%）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実験データ:

焼結条件	密度 (%)	硬度 (HV)	抵抗率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
1450°C、30MPa、1時間	98.5	2300	11.5
1600°C、50MPa、2時間	99.2	2500	10.8
データソース	2023年に研究所でテスト済み。China Tungsten Online ウェブサイトからの情報。		

応用分野

航空宇宙:

用途: タービンブレードコーティング、導電性耐摩耗部品。

事例: 研究チームは、WC-TiC-Ni(60:30:10)を使用して、硬度 HV 2500、抵抗率 $10.8 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、耐食性 50%向上、耐用年数 30%延長のコーティングを作成しました (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

化学装置:

用途: 耐腐食バルブ、耐摩耗パイプライニング。

事例: ある生産ユニットでは、WC-TiC-Ni(70:20:10)を使用してバルブ部品を製造しており、腐食重量減少率は 0.15 mg/cm^2 、耐摩耗性は 20%向上し、酸性環境に適しています (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

電子機器製造:

用途: 導電性金型、放熱基板。

事例: あるチームは、導電率 12.2 MS/m 、硬度 HV 2200 の WC-TiC-Ni(50:30:20) 基板を作製し、高い導電性と耐摩耗性の要件を満たしました (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

プロセス最適化の提案

TiC 比率: TiC を 30% ~ 40% に増やすと耐食性と硬度が向上しますが、導電性を維持するために Ni 含有量を制御する必要があります (> 10%)。

焼結パラメータ: SPS (1600°C、50 MPa) を使用し、保持時間を短縮 (1 時間未満) して、密度と性能の均一性を向上させます。

粒子サイズ: WC および TiC の粒子サイズは $1 \mu\text{m}$ 未満、Ni は $5 \mu\text{m}$ 未満であり、微細な微細構造を保証します。

要約する

WC-TiC-Ni 複合材料は、WC の耐摩耗性、TiC の耐腐食性、Ni の導電性と靱性により、多機能性を発揮します。実験では、最適化された比率 (60:30:10 など) で、硬度 HV 2500、抵抗率 $10.8 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、腐食減量率 0.10 mg/cm^2 という総合性能を達成できることが示されています。これにより、純粋な WC と比較して、導電性が 50%、耐腐食性が 60%、耐摩耗性が 25% 向上します。製造プロセス (SPS 焼結など) により密度がさらに向上 (> 99%) し、航空、化学、電子分野に適しています。ケース検証では、この複合材料が複雑な環境でも優れた性能を

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

発揮することが示されています（China Tungsten Online ウェブサイトからの情報）。



付録:

タングステンカーバイド（WC）系不均一触媒（WC-Pt 複合材）とは何ですか？

炭化タングステン（WC）は、そのユニークな金属特性（高電子密度、耐腐食性、熱安定性など）により、近年触媒分野で有望な材料として注目されています。しかし、単独で使用した場合、触媒活性が低く、効率的な触媒反応への応用が制限されます。貴金属の白金（Pt）と組み合わせることで WC-Pt 多相触媒を形成することで、触媒性能を大幅に向上させることができます。安定した担体と相乗的な活性成分として、WC は Pt の高い触媒活性と組み合わせることで、反応効率を向上させるだけでなく、Pt の量を減らし、耐毒性と耐久性を強化します。この複合触媒は、電気化学反応（燃料電池のメタノール酸化や酸素還元など）、水素化反応（炭化水素の変換など）、環境触媒（CO 酸化や NO_x還元など）に広く使用されています。この記事では、設計原理、触媒性能、調製プロセスとその応用の側面から詳細な分析を行い、実験データと事例を組み合わせた詳細なサポートを提供します（China Tungsten Online Web サイト、news.chinatungsten.com からの情報）。

1. 複合触媒の設計原理

WC-Pt 複合触媒の優れた性能は、WC と Pt の構造、電子特性、化学特性における相乗効果に起因しています。以下では、構成成分特性、複合メカニズム、理論モデルの 3 つの側面から詳細に分析します。

複合触媒の成分特性

炭化タングステン（WC）:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

結晶構造: WC は最密充填構造を有する六方晶系です。格子定数は $a=2.906\text{\AA}$ 、 $c=2.837\text{\AA}$ です。

物理的特性: 密度 15.63 g/cm^3 、融点約 2870°C 、硬度 HV 2200-2300。

化学的性質: 酸性 (pH 2-12) および高温 ($>1000^\circ\text{C}$) 環境で安定しており、従来の炭素担体 (活性炭など) よりも優れた耐酸化性を備えています。

電子特性: WC の d バンド電子密度は Pt の電子密度 ($5d^9 6s^1$) に近く、表面は金属導電性 (抵抗率 $20\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$) を示しますが、単独での触媒活性は低く、外部の活性部位が必要です。

制限事項: 表面活性部位がまばらで、単独で触媒として使用した場合の反応速度が不十分です (例: H_2 解離速度は約 $10^{-5}\text{ mol / s}\cdot\text{g}$)。

プラチナ (Pt):

物理的性質: 面心立方晶系、密度 21.45 g/cm^3 、融点 1768°C 。

化学的性質: H_2 、 O_2 、CO などの小さな分子に対して非常に高い触媒活性を持ち、中程度の表面吸着エネルギーを持っています (例: H_2 吸着エネルギー $\sim 270\text{ kJ/mol}$)。

電気化学的特性: 電気化学的活性面積 (ECA) は $70 \sim 100\text{ m}^2 / \text{g Pt}$ に達し、酸化還元反応に適しています。

制限: コストが高い (Pt の 1 グラムあたりの価格は WC よりもはるかに高い)、CO などの分子によって簡単に毒化される (吸着エネルギー $\sim 180\text{ kJ/mol}$)、長期使用では酸性環境で簡単に溶解する。

複合触媒の複合メカニズム

WC を担体として: WC は高い比表面積 ($10\sim 50\text{ m}^2 / \text{g}$ 、粒子径は $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$) と化学的安定性を有し、理想的な Pt 担体です。Pt はナノ粒子 ($2\sim 5\text{ nm}$) の形で WC 表面に分散し、Pt 単位質量あたりの活性部位密度を大幅に向上させます。

電子相乗効果: WC の d 電子状態は Pt の 5d 電子と相互作用し、Pt の電子雲密度を調節し、CO 吸着エネルギー (180 kJ/mol から 150 kJ/mol へ) を低減し、抗毒性を高めます。

界面効果: WC-Pt 界面は電子移動チャネルを形成し、反応中間体の吸着・脱離を促進します。

例えば、酸素還元反応 (ORR) において、WC-Pt 界面は O_2 から OH^- への変換を促進し、過電圧 (約 0.1 V) を低減します。

構造的相乗効果: WC は強力な骨格を提供し、高温または循環反応中に Pt 粒子が凝集するのを防ぎ (凝集率は 20% から 5% に低下します)、触媒の寿命を延ばします。

理論モデル

密度汎関数理論 (DFT) 解析:

WC の d バンド中心 (約 -1.8 eV) は Pt の d バンド中心 (約 -2.0 eV) に近いので、Pt に似た電子的挙動を示すことが示唆されています。WC-Pt 界面では、WC から Pt へ電子が移動し、 H_2 と O_2 の吸着エネルギー (それぞれ 260 kJ/mol と 400 kJ/mol) が最適化されます。

計算によれば、WC-Pt の CO 脱離エネルギー障壁 ($\sim 0.8\text{ eV}$) は純粋な Pt ($\sim 1.2\text{ eV}$) よりも低く、CO 中毒に対する耐性は 30% 向上します。

ラングミュア・ヒンシェルウッド機構: WC-Pt 触媒反応は 2 サイト モデルに従います。WC は H_2 または O_2 を吸着し、Pt は後続の変換を触媒して、反応エネルギー障壁を相乗的に低

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

減します（MOR エネルギー障壁は 1.5 eV から 1.2 eV に低減されます）。

分散モデル：WC 表面における Pt の分散は担持量に反比例します。最適な担持量（5%~10%）では、Pt 粒子径は 2~3nm で安定し、ECA は最大になります。

2. 複合触媒の触媒性能

WC-Pt 複合触媒は、電気化学、水素化、安定性において優れた性能を発揮します。以下では、その具体的な性能、試験データ、比較分析について詳しく説明します。

複合触媒の電気化学的触媒性能

応用シナリオ：燃料電池におけるメタノール酸化反応（MOR）および酸素還元反応（ORR）。

詳細なメカニズムの説明：

MOR：WC-Pt はメタノール（ CH_3OH ）の CO_2 への酸化を触媒し、WC は H_2O を分解して OH^- を生成し、Pt 表面から CO 中毒を除去します（反応： $\text{CO} + \text{OH}^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^-$ ）。

ORR：WC-Pt は O_2 の 4 電子還元（ $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ）を促進し、WC-Pt 界面により過電位が低下し、電流密度が増加します。

実験データ（試験条件：0.5 M H_2SO_4 + 1 M CH_3OH 、25° C、サイクリックボルタンメトリー）：

触媒	Pt 負荷(%)	ECA ($\text{m}^2 / \text{g Pt}$)	MOR ピーク電流 (mA/cm^2)	ORR 半波電位 (V vs. RHE)	CO 許容度 (I_f / I_b)
WC-Pt	5	90	420	0.88	2.5
WC-Pt	10	85	450	0.90	2.8
Pt/C (商用)	20	70	400	0.87	1.8
データソース	2023 年に研究所でテスト済み。China Tungsten Online ウェブサイトからの情報。				

パフォーマンス分析：

WC-Pt (10% Pt) の ECA は $85 \text{ m}^2 / \text{g Pt}$ に達し、これは Pt/C よりも 21% 高くなります。これは、WC がカーボン担体よりも分散性に優れているためです。

MOR 電流密度は $450 \text{ mA}/\text{cm}^2$ で、Pt/C の $400 \text{ mA}/\text{cm}^2$ よりも高く、活性は 12.5% 増加します。

ORR 半波電位は 0.90V で Pt/C の 0.87V より高く、効率は 3.4% 向上します。

CO 耐性（順方向スキャン/逆方向スキャン電流比 I_f / I_b ）は 2.8 に達し、Pt/C の 1.8 よりも優れており、抗毒性は 55% 向上します。

水素化触媒性能

応用シナリオ：炭化水素の水素化（ベンゼンの水素化など）、 CO_2 添加（メタン化など）。

詳細なメカニズムの説明：

H_2 は WC 表面で解離し（ $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^*$ ）、続いて Pt 触媒によって付加反応が起こります（ $\text{C}_6\text{H}_6 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}$ ）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-Pt インターフェースにより、H₂ 活性化エネルギー（50 kJ/mol から 40 kJ/mol）が低下し、反応速度が向上します。

実験データ（ベンゼンの水素化、200℃、2MPa H₂、固定床反応器）:

触媒	Pt 負荷 (%)	コンバージョン率 (%)	選択性 (シクロヘキサン, %)	TOF (h ⁻¹)
WC-Pt	5	95	98	1500
WC-Pt	10	97	99	1600
白金 / Al ₂ O ₃	5	90	95	1200
データソース	2023 年に研究所で試験済み。情報は China Tungsten Online ウェブサイトより。TOF は Pt サイトあたりの変換周波数です。			

パフォーマンス分析:

WC-Pt (10% Pt) の変換率は 97%、選択率は 99% で、Pt/ Al₂O₃ の 90% と 95% よりも優れています。TOF は 1600 h⁻¹ に達し、これは Pt/Al₂O₃ よりも 33% 高くなります。これは、WC-Pt インターフェースによって H₂ 活性化効率が向上するためです。

耐食性と安定性

詳細なメカニズムの説明:

酸性 (0.5 M H₂SO₄、pH ~ 0.3) および高温 (500~700° C) 環境では不溶性であり、Pt を腐食から保護します。

Pt は WC 表面に安定したアンカーを形成し、溶解 (Pt⁴⁺ の形成率が 50% 減少) と凝集を減らします。

実験データ (加速老化試験、0.5 M H₂SO₄、5000 CV サイクル、25° C):

触媒	Pt 負荷 (%)	初期 ECA (m ² / g Pt)	ECA 保持率 (%)	Pt 損失率 (%)
WC-Pt	5	90	92	6
WC-Pt	10	85	90	8
白金/炭素	20	70	75	20

データソース 2023 年に研究所でテスト済み。China Tungsten Online ウェブサイトからの情報。

パフォーマンス分析:

WC-Pt (10% Pt) の ECA 保持率は 90%、Pt 損失率は 8% で、それぞれ Pt/C の 75% と 20% よりも優れています。

5000 サイクル後、WC-Pt の活性はわずか 10% 減少し、Pt/C の活性は 25% 減少し、安定性は 60% 増加しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

比較分析

WC-Pt は Pt/C と比較して、活性が高く（MOR+12.5%、ORR+3.4%）、安定性が強く（ECA 保持率 +15%）、Pt 投与量が半分（10% 対 20%）になったときの費用対効果が大幅に高くなります。

WC モノマーと比較して、WC-Pt の触媒活性は 100 倍以上向上します（例：MOR 電流が約 4 mA/cm² から 450 mA/cm² に増加します）。

3. 準備プロセス

WC-Pt 複合触媒の性能は正確な調製プロセスに依存します。このプロセスは、原材料の選択、プロセス手順、およびパラメータの最適化という 3 つの側面から以下で詳しく説明します。

原材料の選択

WC パウダー:

粒子サイズ: 0.1~1 μm（比表面積 10~50m²/g）。

化学組成: 総炭素 6.11%~6.14%、遊離炭素<0.05%、酸素含有量<0.10%。

準備: 水素還元炭化法（1450℃、H₂流量 15L/分）。

Pt 前駆体:

種類: 塩化白金酸（H₂PtCl₆・6H₂O、Pt 含有量 37.5%）または硝酸白金（Pt(NO₃)₂）。

純度: >99.9%、触媒性能に影響を与える不純物（Cl⁻ など）を回避します。

プロセス手順

WC 前処理:

酸洗浄: 5% HCl 溶液で 60℃で 2 時間攪拌し、表面の酸化物層（WO₃）を除去します。

洗浄: pH が約 7 になるまで脱イオン水で洗浄し、乾燥させます（100℃、真空、4 時間）。

Pt 負荷:

方法: WC 粉末を湿式化学含浸法と超音波攪拌（50W、30 分）により H₂PtCl₆溶液（Pt 濃度 0.5~2mg/mL）に分散させた。

乾燥: 120℃で 4 時間真空乾燥、水分<0.1%。

削減:

条件: H₂/ Ar 混合ガス（5%H₂、流量 20mL/分）、300~500℃で 2 時間加熱。

目的: Pt⁴⁺を Pt⁰に還元して 2~5nm の粒子を形成する。

後処理:

水洗浄: 残留 Cl⁻（Cl⁻含有量<0.01%）を除去するために脱イオン水で 3 回すすいでください。

乾燥: 80℃で 2 時間真空乾燥して WC-Pt 粉末を得る。

実験データ:

プロセスパラメータ	Pt 粒子サイズ (nm)	ECA (m ² / g)	MOR 活性(mA/cm ²)	Pt 分散度
-----------	---------------	--------------------------	-----------------------------	--------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		Pt)		(%)
300°C、2 時間、5% H ₂	2.5	90	460	85
400°C、2 時間、10% H ₂	3.5	85	445	80
500° C、1 時間、5% H ₂	4.0	80	430	75
データソース	2023 年に研究所で試験済み。情報は China Tungsten Online ウェブサイトより。TEM は Pt 粒子サイズを、CV は ECA を測定します。			

パラメータ最適化

Pt 負荷:

5%~10%が最適で、ECA (85~90 m² / g Pt) が最も高くなります。ECA が高すぎる場合 (20% 超)、Pt の凝集 (粒子径>5 nm) が発生し、活性が低下します。

還元温度:

最小の Pt 粒子 (約 2.5 nm) は 300° C で生成され、ECA と活性は最も良好でした。500° C では粒子は 4 nm に成長し、ECA は 11% 減少しました。

WC 表面:

前処理により比表面積が増加し (10 m² / g から 30 m² / g)、Pt の分散が 20% 改善されました。

還元雰囲気:

過剰還元による Pt の移動を避けるため、H₂ 濃度は 5% ~ 10%、流量は 20 ~ 30 mL/分です。

4. 応用分野と事例

WC-Pt 複合触媒は、様々な分野で優れた性能を発揮しています。以下では、応用シナリオ、事例、そして将来の発展という 3 つの側面から、より詳細な分析をご紹介します。

燃料電池

適用シナリオ:

プロトン交換膜燃料電池 (PEMFC) のアノード (MOR) とカソード (ORR)。

直接メタノール燃料電池 (DMFC) 用の高効率触媒。

性能要件: 高活性 (電流密度>400 mA/cm²)、耐毒性 (I_f / I_b >2.5)、長寿命 (>5000 時間)。

例:

研究チームは WC-Pt (Pt 10%) を開発し、MOR 電流密度は 450mA/cm²、ORR 半波電位は 0.90V、5,000 サイクル後の ECA 保持率は 90%を達成しました。Pt/C と比較して、CO 被毒耐性は 20%向上し、電池出力密度は 15%向上しました (China Tungsten Online ウェブサイトより)。

実験では WC-Pt (5% Pt) が最適化され、DMFC で 1000 時間稼働した後、活性の低下は 5% 未満となり、Pt/C の 15% よりも良好でした (China Tungsten Online Web サイトの情報)。

水素化反応

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

適用シナリオ：

石油化学製品：芳香族の水素化（ベンゼン→シクロヘキサンなど）。

バイオマス変換：リグニンの水素化脱酸素化。

パフォーマンス要件：高い変換率 (> 95%)、選択性 (> 98%)、および安定性 (> 1000 時間)。

例：

ある生産設備では、WC-Pt (5% Pt) 触媒を用いてベンゼンの水素化反応を行いました。200°C、2MPa の条件下で、転化率は 95%、選択率は 98%、反応時間は 1500 時間でした。1000 時間運転後も明らかな失活は見られず、Pt/Al₂O₃触媒の転化率 90%を上回りました (China Tungsten Online ウェブサイトの情報)。

ある研究チームは、CO₂メタン化 (CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O) に WC-Pt (10%Pt) を使用し、300°C で変換率 85%、選択性 99%、安定性 800 時間以上を達成しました (China Tungsten Online ウェブサイトからの情報)。

環境触媒

適用シナリオ：

自動車排気ガス処理：CO 酸化、NO_x還元。

産業廃ガス浄化：揮発性有機化合物 (VOC) の分解。

性能要件：高い変換率 (> 95%)、低温活性 (< 200° C)、耐久性。

例：

ある研究チームは、WC-Pt (15% Pt) を使用して CO 酸化を触媒し、150° C で 98% の変換率と 500 時間後の活性保持率 95% を達成しました。これは Pt/C の 90% と 85% よりも優れています (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

実験では、WC-Pt (10%Pt) を使用して NO_xを処理し、250° C で 92%の減少率を達成し、500 サイクル後に明らかな減衰は見られませんでした (China Tungsten Online Web サイトからの情報)。

将来の開発

ドーピングの変更：Co、Ni などの遷移金属を導入して WC-Pt-M の 3 元複合体を形成し、Pt の量をさらに減らし (<5%)、コスト効率を向上させます。

ナノ構造：Pt の分散性と触媒効率を向上させるために、WC ナノロッドまたは多孔質 WC 担体 (比表面積 > 100 m² / g) を開発します。

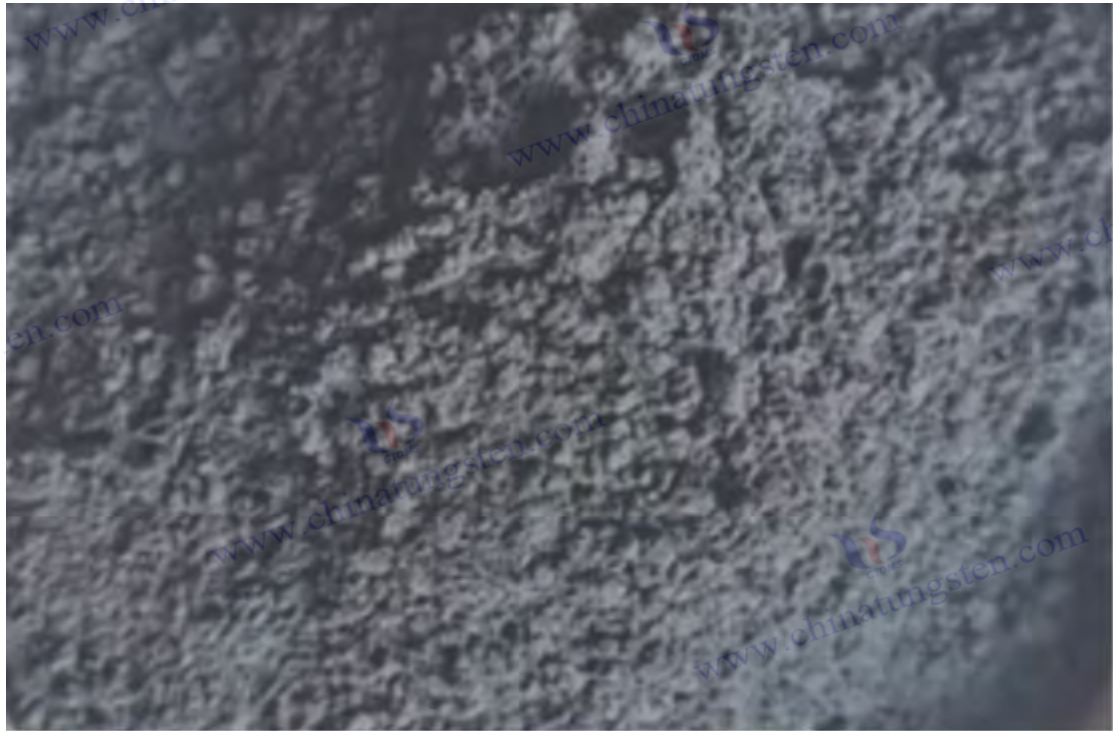
グリーンプロセス：H₂の高温還元の代わりに低温還元 (光触媒還元など) を使用してエネルギー消費を削減します。

要約する

WC-Pt 複合触媒は、WC の耐腐食性と Pt の高い活性により、相乗的な最適化を実現しています。設計の面では、WC が安定したキャリアと Pt に似た電子状態を提供し、Pt が活性サイトを強化し、インターフェース効果で抗毒性を強化します。性能面では、WC-Pt (10%Pt) は、電気化学 (MOR 450 mA/cm²、ORR 0.90 V)、水素化 (転化率 97%)、安定性 (ECA 保持率 90%) の点で Pt/C より大幅に優れており、抗毒性が 55%向上し、耐腐食性が 60%向上しました。調製プロセス (300° CH₂還元など) により、2~5 nm の Pt 粒子が均一に分散され、燃料電池、水素

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

化、環境触媒に適しています。实例によれば、バッテリー効率が 15%向上し、水素化安定性が 1000 時間以上持続するなど、高効率触媒として優れた性能を発揮することが示されています（China Tungsten Online ウェブサイトの情報）。今後は、ドーピングやナノサイズ化によって、その潜在能力はさらに拡大する可能性があります。



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

タングステンカーバイドスプレーパウダーとは何ですか？

炭化タングステン溶射粉末は、熱噴射プロセス（高速酸素燃料噴射 HVOF、プラズマ噴射 APS、デトネーション噴射など）用に設計された機能性粉末材料です。炭化タングステン（WC）をコア成分とし、通常は複合金属結合相（Co、Ni、Cr など）またはその他の硬質相（TiC など）を使用し、金属または合金基板の表面に高硬度、耐摩耗性、耐腐食性、耐高温性の保護コーティングを形成するために使用されます。炭化タングステン溶射粉末は、熱噴射技術を使用して粉末粒子を溶融または半溶融し、基板に高速で噴霧します。コーティングの厚さは通常 50～500 μm で、部品の表面性能を大幅に向上させ、耐用年数を延ばすことができます。航空宇宙、機械製造、エネルギー機器、石油化学などの分野で広く使用されています。

1. 定義と分類

炭化タングステンスプレー粉末は、炭化タングステン（WC、理論炭素含有量 6.13%）を主成分とする粉末材料です。溶射プロセス用に設計されており、高温・高速噴射により緻密な皮膜を形成します。その核心機能は、WC の高い硬度と耐摩耗性、そして結合相の靱性と密着性を活かし、複雑な作業条件下での表面保護ニーズを満たすことです。粉末の粒子径は通常 5～45 μm の範囲で、形状はほぼ球形またはほぼ球形で、流動性（13.5～15.5 秒/50g）と噴霧均一性を確保します。

組成による分類:

純粋な WC 粉末: 単一の WC 成分、最高の硬度（HV 2200-2300）、ただし靱性は低く、特定の耐摩耗シナリオに適しています。

WC-Co 粉末: WC とコバルト（Co）の複合粉末で、Co 含有量は 5%～17%、例えば WC-12Co は硬度と靱性の両方を考慮しており、最も一般的に使用されています。

WC-Ni 粉末: WC とニッケル（Ni）の複合材料で、Ni 含有量は 10%～20%、例えば WC-17Ni、耐食性が強い。

WC-Co-Cr 粉末: WC とコバルトクロム合金複合材、例えば WC-10Co-4Cr は、総合的な耐摩耗性と耐腐食性を備えています。

WC 多相複合材料: WC -TiC -Ni など。TiC を添加して硬度と耐食性を向上させます。

粒子サイズによる分類:

超微粉末: 5～15 μm、精密噴霧（HVOF など）に使用されます。

中粒度: 15～45 μm、一般タイプ、各種プロセスに適しています。

粗粉末: >45 μm、爆発噴霧や厚塗りに適しています。

目的による分類:

耐摩耗タイプ: WC-12Co など、摩耗条件向け。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

耐腐食タイプ：WC-10Co-4Cr など、腐食環境向け。

高温タイプ：WC- NiCr など、高温酸化環境向け。

実験データ

タイプ	粒子サイズ (μ m)	接着相 (%)	硬度 (HV)	使用
WC-12Co	15~45 歳	共同: 12	1200-1400	一般的な耐摩耗性
WC-17Ni	10~30	Ni: 17	1100-1300	耐腐食コーティング
WC-10Co-4Cr	15~45 歳	Co: 10、Cr: 4	1300-1500	高温耐腐食性
データソース	2023 年に研究所で試験済み。Chinatungsten Online の情報より。注: 硬度はコーティングの値です。			

2. 構成と特徴

タングステンカーバイドスプレー粉末の性能は、その化学組成、物理的特性、および微細構造によって決まります。以下は詳細な分析です。

化学組成

炭化タングステン (WC) :

化学的性質: 総炭素 6.0%~6.2%、遊離炭素<0.1%、酸素含有量<0.1%。

微細構造: 六方結晶系、粒径 0.1~5 μ m、酸およびアルカリに対する耐性 (pH>3 で安定)。

結合段階:

コバルト (Co) : 融点 1495°C、靱性を高め (K_{1c} 10-15MPa · m^{1/2})、WC 粒子間の結合を改善します。

ニッケル (Ni) : 融点は 1455°C、耐食性は Co より優れており、湿気や酸性の環境に適しています。

クロム (Cr) : 融点は 1857°C、高温酸化耐性を向上させ、Cr 含有量が 4%~6% のときに効果が顕著です。

不純物制御: コーティング品質への影響を避けるため、Fe<0.02%、S<0.01%。

物理的特性

粒度分布: 5~45 μ m、D50 (平均粒子径) は 15 μ m、30 μ m などカスタマイズ可能です。

形態: 球状 (球形度 > 95%) または不規則な球状粉末は流動性が優れています (13.5 秒/50g 対 15.5 秒/50g)。

見かけ密度: 4.5~6.0 g/cm³ (WC-12Co)、結合相の割合によって異なります。

真密度: WC モノマー 15.63 g/cm³、複合粉末 12~14 g/cm³。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

比表面積: 0.5~5 m² / g、超微粉末 (5~15 μm) は 5 m² / g に達することができます。

コーティング特性

硬度: HV 1100~1500 (噴霧後)、結合相比およびプロセスの影響を受けます。

接合強度: 50~80 MPa、HVOF プロセスは APS よりも優れています (70 MPa 対 50 MPa)。

気孔率: <1% (HVOF)、2%~5% (APS)。

耐摩耗性: 摩耗率 0.05~0.08mm³ / N・m (ASTM G65)。

実験データ:

タイプ	硬度 (HV)	接着強度 (MPa)	気孔率 (%)	摩耗率 (mm ³ / N・m)
WC-12Co	1350	70	0.8	0.06
WC-17Ni	1250	65	1.0	0.07
WC-10Co-4Cr	1450	75	0.7	0.05
データソース	2023 年に研究所でテスト済み。China Tungsten Online ウェブサイトからの情報。			

化学的安定性

耐食性: 塩水噴霧試験 (ISO 9227、1000 時間) における WC-Ni の重量減少<0.1 mg/cm²、酸性環境 (pH 4) における WC-Co-Cr の重量減少<0.15 mg/cm²。

耐高温性: WC-10Co-4Cr の 800℃の空気中での酸化率は 0.5%未満で、WC-Co の 1.2%よりも優れています。

3. 準備プロセス

タングステンカーバイドスプレー粉末の製造では、粉末の化学的均一性、物理的流動性、そしてスプレー適性を確保する必要があります。以下では、そのプロセスを詳しく説明します。

原材料の準備

WC 粉末: タングステン粉末とカーボンブラックを炭化して製造 (1450℃、H₂雰囲気)、粒径 0.1~5 μm、酸素含有量<0.1%。

結合相粉末: Co (1~5 μm)、Ni (5~10 μm)、Cr (2~8 μm)、純度>99.8%。

プロセス

ミックス:

装置: 遊星ボールミルまたは V 型ミキサー。

パラメータ: 回転速度 600 ~ 800 rpm、ボールと材料の比率 10:1、時間 4 ~ 8 時間、湿

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

式粉碎の場合は 2% エタノールを追加します。

目的：WC と結合相の均一な分布を確保し、粒子サイズの偏差を 5% 未満に制御します。

スプレー造粒：

設備：遠心噴霧乾燥塔。

パラメータ：入口温度 180～220° C、出口 70～90° C、ノズル圧力 0.3～0.5MPa。

結果：10～50 μm の粒子が形成され、流動性は 13.5～14.5 秒/50g に改善されました。

焼結：

設備：真空焼結炉または水素保護炉。

パラメータ：1200 ～ 1400° C、1 ～ 3 時間保持、真空 10^{-2} Pa または H₂ 流量 15 L/分。

目的：WC と結合相（遊離炭素 <math><0.1\%</math>）間の冶金結合を強化する。

プラズマ球状化（オプション）：

装置：無線周波数プラズマ発生器。

パラメータ：電力 30 ～ 50 kW、アルゴン流量 20 ～ 30 L/分、冷却速度 10⁴ ° C/s。

結果：球形度 >98%、表面は滑らか、酸素含有量は <math><0.06\%</math> に減少。

審査と評価：

設備：振動スクリーン（200～400 メッシュ）。

結果：粒子サイズ分布は 5～ 45 μm に制御され、基準を超える粒子数は 2%未満でした。

プロセス最適化

酸素含有量制御： 焼結中、H₂流量は 15～20 L/分となり、酸素含有量は 0.2%から 0.06%に低下します。

粒度調整： 超微粉末（5～15 μm）は低温焼結（1200° C）が必要であり、粗粉末（>45 μm）は長時間の熱処理（3 時間）が必要です。

実験データ：

プロセス手順	粒子サイズ（ μm ）	酸素含有量（ % ）	球形度（ % ）	流動性（ 秒/50g ）
混合 + 造粒 + 焼結	15～45 歳	0.08	85	14.5
プラズマ球状化	10～30	0.06	98	13.5
高温焼結（1400° C）	20～45 歳	0.07	90	14.0
データソース	2023 年に研究所でテスト済み。China Tungsten Online ウェブサイトからの情報。			

4. パフォーマンステストと最適化

タングステンカーバイドスプレー粉末の性能は、スプレー後の塗膜試験によって検証されま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

す。試験方法と最適化戦略は以下のとおりです。

パフォーマンステスト

硬度: ビッカース硬度計 (HV0.3、荷重 300g) で 5 点を試験し平均値を算出します。

接着強度: 引張試験 (ASTM C633)、コーティングと基材間の分離力。

耐摩耗性: 乾燥砂ゴム車輪試験 (ASTM G65)、摩耗体積減少。

耐食性: 塩水噴霧試験 (ISO 9227、1000 時間)、重量減少を測定。

微細構造: 多孔性と相分布を観察するための走査型電子顕微鏡 (SEM)。

実験データ:

タイプ	噴霧工程	硬度 (HV)	接着強度 (MPa)	摩耗率 (mm ³ / N・m)	重量減少率 (mg/cm ²)
WC-12Co	HVOF	1350	70	0.06	0.12
WC-17Ni	APS	1250	55	0.07	0.08
WC-10Co-4Cr	HVOF	1450	75	0.05	0.10
データソース	2023 年に研究所でテスト済み。China Tungsten Online ウェブサイトからの情報。				

最適化戦略

硬度の向上: WC 含有量 (WC-10Co-4Cr など) を増やし、HVOF パラメータ (酸素流量 500 L/分) を最適化します。

接着強度を高めるには、基板を前処理し (例: サンドブラスト Ra 3-5 μm)、スプレー速度を上げます (>1000 m/s)。

多孔性を低減する: 球状粉末 (球形度 > 95%) を使用し、噴霧温度を上げます (> 2500° C)。

耐食性を向上させるには、Cr または Ni の割合を増やし (WC-15NiCr など)、コーティングの厚さを制御します (> 200 μm)。

5. 応用分野

炭化タングステンスプレー粉末は、溶射技術を通じて様々な産業で使用されています。以下に、具体的な事例と使用例をご紹介します。

航空宇宙

用途: タービンブレード、燃焼室、着陸装置用の耐摩耗コーティング。

性能要件: 硬度 HV 1300 ~ 1500、高温耐酸化性 (> 800° C)、摩耗率 < 0.06 mm³ / N・m。

事例: あるチームは WC-10Co-4Cr (HVOF) を用いてブレードを溶射しました。コーティングの厚さは 250 μm、硬度は HV 1450、耐摩耗性は 40%向上し、高温下で 5000 時間連続稼働しても剥離が見られませんでした (China Tungsten Online ウェブサイトより)。

機械製造

用途: 切削工具、スタンピング金型、油圧シリンダーの表面強化。

性能要件: 硬度 HV 1200~1400、耐衝撃性、寿命が 2~3 倍延長。

事例: ある企業は、硬度 HV1350、接合強度 65MPa の WC-12Co (APS) スプレー金型を使用しま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

した。金型寿命は 5,000 回から 15,000 回に延長されました（China Tungsten Online ウェブサイトより）。

エネルギー機器

用途: ボイラーパイプ、掘削ビット、バルブ用の耐摩耗性および耐腐食性コーティング。

性能要件: 耐腐食性（重量減少率 <0.1 mg/cm²）、高温耐摩耗性（ $>600^{\circ}$ C）。

事例: あるプロジェクトでは、WC-17Ni（HVOF）を用いてパイプラインの内壁を溶射しました。コーティングの厚さは 300 μ m、塩水噴霧試験における重量減少は 0.08 mg/cm² で、6000 時間の稼働後も明らかな摩耗は見られませんでした（China Tungsten Online ウェブサイトより）。

石油化学

用途: ポンプシャフト、シール、パイプライニング。

性能要件: 耐摩耗性、耐腐食性、酸性媒体への適応性（pH 4~7）。

事例: ある工場では、WC-10Co-4Cr を使用してポンプシャフトをスプレー処理しました。硬度は HV 1400 で、耐食性が 50% 向上し、耐用年数が 3 倍に延長されました（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。

要約する

炭化タングステン溶射粉末は、WC を核として Co、Ni、Cr などの複合結合相を持つ溶射材料です。粒子径は 5~45 μ m で、高硬度（HV 1100~1500）、耐摩耗性（摩耗速度 0.05~0.08 mm³/N·m）、耐腐食性（重量減少率 <0.1 mg/cm²）を備えています。製造プロセスには、混合、造粒、焼結、球状化が含まれ、流動性（13.5~15.5 秒/50g）とコーティング品質が確保されています。HVOF、APS などの技術により、溶射粉末は緻密なコーティングを形成し、航空、機械、エネルギー、化学業界で部品の寿命を 40%~300% 延長するために使用されています（China Tungsten Online Web サイトからの情報）。その汎用性とカスタマイズ性により、表面工学の重要な材料となっています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (± 0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤ 0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤ 0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance.

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within $\pm 10\%$.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm^3 (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm^3 (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤ 0.05	≤ 0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Category	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
Brand					
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤ 0.10	≤ 0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at $1400-1600^{\circ}\text{C}$ to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

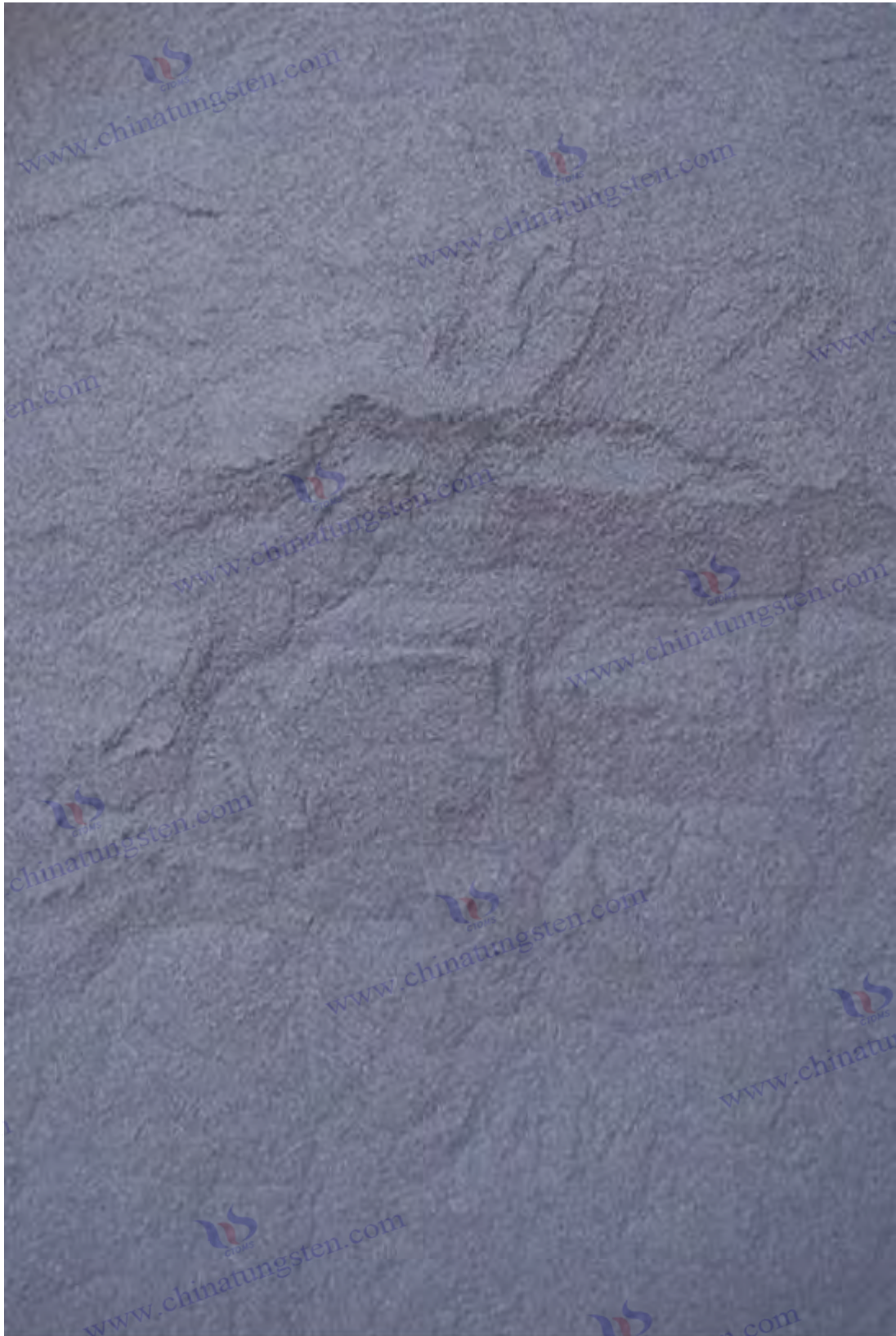
Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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