

ナノタングステン酸化物
物理的・化学的特性、製造プロセス、用途
CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP の紹介

CHINATUNGSTEN ONLINE が設立した、独立した法人格を持つ完全子会社である CTIA GROUP LTD は、インダストリアル・インターネット時代におけるタングステンおよびモリブデン材料のインテリジェントで統合された柔軟な設計と製造の推進に尽力しています。CHINATUNGSTEN ONLINE は、1997 年に www.chinatungsten.com（中国初の一流タングステン製品ウェブサイト）を起点に設立され、タングステン、モリブデン、希土類元素産業に特化した中国の先駆的な e コマース企業です。CTIA GROUP は、タングステンおよびモリブデン分野での約 30 年にわたる豊富な経験を活かし、親会社の優れた設計・製造能力、優れたサービス、世界的なビジネス評判を継承し、タングステン化学薬品、タングステン金属、超硬合金、高密度合金、モリブデン、モリブデン合金の分野で包括的なアプリケーションソリューションプロバイダーになりました。

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

目次

序文

ナノタングステン酸化物の研究意義と発展の歴史

第1章 ナノタングステン酸化物の紹介

- 1.1 タングステン酸化物の基本概念
 - 1.1.1 定義と化学式 (WO_3)
 - 1.1.2 タングステン酸化物の色のバリエーション (黄色、青、黒)
 - 1.1.3 ナノスケールにおける独自の特性
- 1.2 ナノタングステン酸化物の歴史と発展
 - 1.2.1 初期の研究と発見
 - 1.2.2 ナノテクノロジーによる進歩
- 1.3 材料科学におけるナノタングステン酸化物の現状
 - 1.3.1 他のナノ材料との比較
 - 1.3.2 産業界と学術界の研究ホットスポット

第2章 ナノタングステン酸化物の構造と特性

- 2.1 化学構造
 - 2.1.1 WO_3 の結晶構造 (単斜晶系、斜方晶系、正方晶系)
 - 2.1.2 ナノ構造が構造に与える影響
 - 2.1.3 表面化学と結合状態分析
- 2.2 物理的特性
 - 2.2.1 粒子サイズと形態 (ナノ粒子、ナノワイヤ、ナノシート)
 - 2.2.2 密度、硬度、熱力学的特性
 - 2.2.3 比表面積と細孔構造
- 2.3 光学的特性
 - 2.3.1 バンドギャップエネルギー (2.4~2.8 eV)
 - 2.3.2 吸収端と発色機構
 - 2.3.3 フォトクロミック特性とエレクトロクロミック特性
- 2.4 電気的特性
 - 2.4.1 N型半導体の特性
 - 2.4.2 導電性とキャリア濃度
 - 2.4.3 誘電率と電気化学的特性
- 2.5 化学的特性
 - 2.5.1 酸化還元挙動
 - 2.5.2 安定性と揮発性
 - 2.5.3 酸、塩基、還元剤との反応性

第3章 ナノタングステン酸化物の製造方法

- 3.1 湿式化学法

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

- 3.1.1 水熱法
- 3.1.2 溶媒熱法
- 3.1.3 酸沈殿
- 3.2 熱化学法
 - 3.2.1 熱分解
 - 3.2.2 焼成
 - 3.2.3 マイクロ波合成
- 3.3 気相法
 - 3.3.1 化学蒸着法（CVD）
 - 3.3.2 物理蒸着法（PVD）
 - 3.3.3 気相酸化
- 3.4 その他の方法
 - 3.4.1 メカニカルアロイング
 - 3.4.2 電気化学合成
 - 3.4.3 生合成
- 3.5 プロセスパラメータの最適化
 - 3.5.1 温度、圧力、および時間制御
 - 3.5.2 前駆体の選択と反応条件
 - 3.5.3 形態および粒子サイズの制御技術

第4章 ナノタングステン酸化物の特性評価技術

- 4.1 構造特性評価
 - 4.1.1 X線回折（XRD）
 - 4.1.2 透過型電子顕微鏡（TEM）
 - 4.1.3 走査型電子顕微鏡（SEM）
- 4.2 化学特性評価
 - 4.2.1 フーリエ変換赤外分光法（FTIR）
 - 4.2.2 X線光電子分光法（XPS）
 - 4.2.3 エネルギー分散型X線分光法（EDS）
- 4.3 物理的特性評価
 - 4.3.1 BET 表面積分析
 - 4.3.2 熱重量分析（TGA）および示差走査熱量測定（DSC）
 - 4.3.3 粒径分析
- 4.4 光学および電気的特性評価
 - 4.4.1 紫外可視分光法（UV-Vis）
 - 4.4.2 四端子プローブ方法
 - 4.4.3 サイクリックボルタンメトリー
- 4.5 特性データの分析と解釈
 - 4.5.1 結晶形と相純度
 - 4.5.2 表面化学と欠陥
 - 4.5.3 性能パラメータの定量化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第5章 ナノタングステン酸化物の応用

5.1 光触媒

5.1.1 水分解と水素生成

5.1.1.1 ナノ WO_3 の光触媒水分解機構

5.1.1.2 水素生成効率を向上させるためのドーピング修飾（N、S など）

5.1.1.3 他の半導体（ TiO_2 など）とのヘテロ接合設計

5.1.1.4 実験例：太陽光駆動型水素生成性能

5.1.2 有機汚染物質の分解

5.1.2.1 ナノ WO_3 による染料（メチレンブルーなど）の分解

5.1.2.2 可視光応答性と酸化的フリーラジカル生成

5.1.2.3 産業廃水処理における応用例

5.1.2.4 サイクル安定性と光腐食の問題

5.1.3 複合光触媒の設計

5.1.3.1 $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 複合体の作製と特性

5.1.3.2 WO_3/TiO_2 コアシェル構造の相乗効果

5.1.3.3 光触媒活性を高めるための貴金属（Pt、Au など）の担持

5.1.3.4 新規複合システム（ $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ など）

5.1.4 光触媒フィルムとデバイス

5.1.4.1 セルフクリーニングガラスコーティングの設計と作製

5.1.4.2 空気清浄装置への応用

5.1.4.3 光触媒リアクターの工業化への試み

5.2 エレクトロクロミックデバイス

5.2.1 スマートウィンドウとディスプレイ

5.2.1.1 スマートウィンドウにおけるナノ WO_3 の色変化メカニズム

5.2.1.2 光変調の最適化範囲と応答時間

5.2.1.3 建物の省エネへの応用例

5.2.1.4 ディスプレイにおける高解像度アプリケーション

5.2.2 WO_3 膜の作製と特性

5.2.2.1 薄膜作製のためのスパッタリング堆積とゾルゲル法

5.2.2.2 ナノ構造（例：多孔膜）の性能への影響

5.2.2.3 サイクル安定性と耐久性試験

5.2.2.4 色変化効率を向上させるためのドーピング（Ni、Mo など）

5.2.3 全固体エレクトロクロミックシステム

5.2.3.1 WO_3 と対電極（例：NiO）のマッチング

5.2.3.2 固体電解質の選択と最適化

5.2.3.3 デバイスパッケージングと量産技術

5.2.3.4 フレキシブルエレクトロクロミックデバイスの開発

5.2.4 新たなアプリケーション

5.2.4.1 エレクトロクロミックミラーとアンチグレア用途

5.2.4.2 動的熱管理における赤外線制御

5.2.4.3 統合センサーと多機能デバイス

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 ガスセンサー

5.3.1 NO₂、H₂、CO などのガスの検出

5.3.1.1 ナノ WO₃の NO₂に対する高感度のメカニズム

5.3.1.2 H₂検出における選択性と応答性

5.3.1.3 CO およびその他の揮発性有機化合物（VOC）の検出

5.3.1.4 異なる形態（例：ナノワイヤ）の影響

5.3.2 ドーピングと感度向上

5.3.2.1 貴金属（Pt、Pd など）によるドーピングによる感度向上

5.3.2.2 遷移金属（Fe、Cu など）の改質

5.3.2.3 ヘテロ接合（例：WO₃/SnO₂）の相乗効果

5.3.2.4 ドーピングプロセスと性能最適化

5.3.3 マイクロセンサーの開発

5.3.3.1 MEMS 技術を統合したナノ WO₃

5.3.3.2 フレキシブルでウェアラブルなセンサー設計

5.3.3.3 低温動作とエネルギー消費削減

5.3.3.4 産業および環境モニタリング事例

5.3.4 課題と今後の方向性

5.3.4.1 湿度干渉と耐干渉技術

5.3.4.2 長期安定性と経年劣化の問題

5.3.4.3 マルチガス検知用アレイセンサー

5.4 エネルギー貯蔵材料

5.4.1 リチウムイオン電池負極

5.4.1.1 ナノ WO₃の埋め込み/脱埋め込み機構

5.4.1.2 高容量とサイクル性能の最適化

5.4.1.3 炭素材料との複合材料（WO₃/グラフェンなど）

5.4.1.4 急速充放電性能試験

5.4.2 スーパーキャパシタ電極

5.4.2.1 ナノ WO₃の擬似容量特性

5.4.2.2 比容量と電力密度の向上

5.4.2.3 ナノ構造設計（例：ナノシートアレイ）

5.4.2.4 対称型および非対称型スーパーキャパシタ

5.4.3 ナトリウムイオン電池への応用

5.4.3.1 ナトリウムイオン電池におけるナノ WO₃の可能性

5.4.3.2 体積膨張と安定性の向上

5.4.3.3 電解質のマッチングと性能最適化

5.4.3.4 他の遷移金属酸化物との比較

5.4.4 新しいエネルギー貯蔵デバイス

5.4.4.1 フレキシブルでウェアラブルなエネルギー貯蔵デバイス

5.4.4.2 亜鉛イオン電池とハイブリッドコンデンサ

5.4.4.3 固体電池におけるナノ WO₃の探究

5.5 その他の用途

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.5.1 サーモクロミック材料
 - 5.5.1.1 ナノ W_3O_{10} のサーモクロミック機構
 - 5.5.1.2 変色温度を調整するためのドーピング（V、Mo など）
 - 5.5.1.3 建物および自動車の温度制御コーティング
 - 5.5.1.4 熱管理における赤外線反射性能
- 5.5.2 抗菌コーティング
 - 5.5.2.1 活性酸素種の光触媒生成による抗菌メカニズム
 - 5.5.2.2 医療機器におけるナノ W_3O_{10} の応用
 - 5.5.2.3 抗菌効果と安全性評価
 - 5.5.2.4 複合コーティング（ W_3O_{10}/Ag など）の開発
- 5.5.3 顔料とセラミック添加剤
 - 5.5.3.1 ナノ W_3O_{10} の黄色顔料特性
 - 5.5.3.2 耐候性と色安定性
 - 5.5.3.3 セラミックスの強化と改質
 - 5.5.3.4 工業用コーティングとプラスチックへの応用
- 5.5.4 新興および分野横断的応用
 - 5.5.4.1 バイオイメージングにおけるナノ W_3O_{10} の可能性
 - 5.5.4.2 量子ドット W_3O_{10} の光電応用
 - 5.5.4.3 触媒担体および化学用途
 - 5.5.4.4 航空宇宙材料の耐熱性
- 5.6 応用における課題と解決策
 - 5.6.1 光触媒効率と可視光利用の改善
 - 5.6.2 エレクトロクロミックデバイスの寿命とコスト管理
 - 5.6.3 ガスセンサーの選択性と環境適応性
 - 5.6.4 エネルギー貯蔵材料における体積膨張と周期的減衰
 - 5.6.5 多機能統合と工業化のボトルネック

第6章 ナノタングステン酸化物の特許概要

- 6.1 製造方法特許
 - 6.1.1 US7591984B2: ナノ W_3O_{10} の「衝撃沈殿」法
 - 6.1.2 CN103803644A: 水熱法によるナノ W_3O_{10} の製造
 - 6.1.3 JP2006169092A: W_3O_{10} 微粒子の製造
- 6.2 応用関連特許
 - 6.2.1 US20110111209A: 高耐久性エレクトロクロミック W_3O_{10} フィルム
 - 6.2.2 US10266947B2: ナノ W_3O_{10} ガスセンサー
 - 6.2.3 EP2380687A1: W_3O_{10} 光触媒コーティング
- 6.3 特許分析
 - 6.3.1 世界の特許分布と動向
 - 6.3.2 技術革新と競争ランドスケープ
 - 6.3.3 特許保護と産業化の見通し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

第7章 ナノタングステン酸化物の関連規格

- 7.1 中国規格
 - 7.1.1 YS/T 572-2007: 酸化タングステン
 - 7.1.2 YS/T 535-2006: メタタングステン酸アンモニウム
- 7.2 日本規格
 - 7.2.1 JIS K 1462:2015: タングステン化合物の分析方法
- 7.3 ドイツ規格
 - 7.3.1 DIN 51078:2002: 酸化物セラミック材料の試験
- 7.4 ロシア規格
 - 7.4.1 GOST 25702-83: タングステン酸塩の化学分析
- 7.5 韓国規格
 - 7.5.1 KS D 9502:2018: タングステンおよびタングステン合金の分析
- 7.6 国際規格
 - 7.6.1 ASTM B922-20: 金属粉末比表面積試験
 - 7.6.2 ISO 16962:2017: 表面化学分析
- 7.7 規格の比較と適用
 - 7.7.1 国家規格の相違点と適用範囲
 - 7.7.2 ナノ W₀₃の品質管理への影響

第8章 ナノタングステン酸化物の安全性と環境への影響

- 8.1 毒性評価
 - 8.1.1 急性毒性および慢性毒性
 - 8.1.2 ナノスケール W₀₃の生物学的安全性
- 8.2 労働安全衛生
 - 8.2.1 暴露限界と保護措置
 - 8.2.2 粉塵および廃ガス処理
- 8.3 環境への影響
 - 8.3.1 生態毒性と水質汚染
 - 8.3.2 製造プロセスの環境フットプリント
- 8.4 グリーン製造技術
 - 8.4.1 低エネルギー消費製造プロセス
 - 8.4.2 廃棄物の回収とリサイクル
- 8.5 CTIA GROUP LTD によるナノタングステン酸化物の製品安全データシート (MSDS)
 - 8.5.1 製品ラベルと成分情報
 - 8.5.2 危険有害性の特定 (物理的、化学的、および健康リスク)
 - 8.5.3 取り扱いと保管に関する推奨事項
 - 8.5.4 緊急措置 (漏洩、火災、応急処置)
 - 8.5.5 出荷および規制情報

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

参考文献

付録

付録 A ナノタングステン酸化物の物理化学データシート

密度、融点、バンドギャップなどの詳細なパラメータを含む

付録 B 一般的に使用される分析方法の実験手順

操作ガイド：XRD、FTIR、SEM、TEM、UV-Vis、BET など

付録 C ナノタングステン酸化物関連特許リスト

特許番号、タイトル、概要の詳細なリスト

付録 D ナノタングステン酸化物規格リスト

中国語、日本語、ドイツ語、ロシア語、韓国語、および国際規格との比較

付録 E ナノタングステン酸化物の多言語用語表

中国語、英語、日本語、韓国語の用語比較表



序文

三酸化物（ナノ WO_3 ）は、優れた物理的および化学的性質を持つ遷移金属酸化物として、材料科学、化学工学、ナノテクノロジーの分野で重要な位置を占めています。そのユニークな半導体特性、光学的特性、および高い比表面積により、光触媒、エレクトロクロミズム、ガスセンサー、エネルギー貯蔵など多くの分野で幅広い応用可能性を示しています。本書の目的は、ナノ三酸化タングステンの科学的根拠、調製プロセス、特性評価方法、および応用シナリオを体系的に整理し、同時に特許技術、国際標準、および安全性評価を組み合わせ、学術研究者、エンジニア、および業界の実務家に包括的で実用的なリファレンスガイドを提供することです。最新の研究進歩と産業実践を統合することにより、ナノ三酸化タングステンの実験室探索から産業応用までの完全な道筋を明らかにし、新エネルギー、環境保護、インテリジェント製造の分野での技術革新を促進することを願っています。

ナノタングステン酸化物の研究意義と開発の歴史

ナノ酸化タングステンの研究的意義は、まず n 型半導体材料としての優れた性能にあります。そのバンドギャップエネルギー範囲（2.4~2.8 eV）は強力な可視光吸収能を有し、水の分解による水素生成や有機汚染物質の分解など、光触媒分野で大きな優位性を有しています。従来の光触媒（ TiO_2 など）と比較して、ナノ WO_3 は可視光領域での応答性が高く、太陽エネルギーを有効活用できるため、エネルギー危機や環境汚染問題の解決に重要な材料となっています。さらに、 WO_3 は電界を介して色と透過率を制御できるエレクトロクロミック特性を有しており、スマートウィンドウ、ディスプレイ、動的熱管理デバイスの中核部品として期待されています。ナノスケールの WO_3 は、その高い比表面積（20~50 m^2 / g 、ミクロンスケールの WO_3 は 5~10 m^2 / g ）と豊富な表面活性サイトにより、ガスセンサー（ NO_2 や H_2 の検出など）やエネルギー貯蔵材料（リチウムイオン電池のアノードやスーパーキャパシタの電極など）にも優れた性能を発揮します。ナノスケールの量子効果と表面効果により、触媒活性、イオ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ン拡散速度、光電変換効率がさらに向上するため、学際的な用途において不可欠な材料となっています。

ナノタングステン酸化物のユニークな特性は、基礎科学研究を促進するだけでなく、産業応用への幅広い展望を切り開いています。例えば、光触媒空気浄化やセルフクリーニングコーティングへの応用は商業化段階に入っており、フレキシブルエレクトロニクスやバイオメディカル分野における探究は、今後の発展の方向性を示しています。しかし、ナノ WO_3 の広範な応用には、低コストでの大規模生産の実現、複雑な環境における性能安定性の向上、ナノスケールでの生物学的安全性の評価など、課題も伴います。これらの課題は、学術研究だけでなく、産業界や政策立案者にとっても重要な課題となっています。

ナノ酸化タングステンの研究開発は、19 世紀後半のタングステン化合物の最初の探査にまで遡ります。希少金属であるタングステン酸化物は、冶金産業のニーズにより最初に注目を集めました。タングステンの主な酸化状態である黄色酸化タングステン (WO_3) は、化学的安定性、耐熱性（融点約 $1473^{\circ}C$ ）、および鮮やかな黄色の外観のため、広く研究されてきました。19 世紀末、化学者はタングステン酸塩（タングステン酸ナトリウム Na_2WO_4 など）の酸性化反応により WO_3 を調製し、最初にその両性酸化物特性を明らかにしました。つまり、酸と反応してタングステン酸塩を形成し、アルカリと反応してタングステン酸塩を形成できます。この段階での研究は主に WO_3 の化学的性質と工業的製造に焦点を当て、その後の応用の基礎を築きました。

20 世紀半ば、半導体物理学の台頭により、 WO_3 の研究は新たな段階に入りました。1960 年代、研究者らは初めて WO_3 に電場を加えると色が変わることを発見しました。このエレクトロクロミック特性は、タングステンブロンズ構造 (H_xWO_3 など) の形成によって駆動されました。この発見は、防眩ガラスや初期のディスプレイデバイスなど、その光学用途の研究をすぐに引き起こしました。その後、1970 年代に本多・藤嶋効果 (TiO_2 による光触媒による水分解) が提唱され、光触媒研究の波が起こりました。 WO_3 はバンドギャップが低く、光化学的安定性に優れているため、 TiO_2 の強力な競合相手と見なされていました。たとえば、1976 年の研究では、 WO_3 が紫外線下で水を分解して酸素を生成できることが示され、この成果は光触媒分野での WO_3 の徹底的な探究を促進しました。

ナノテクノロジーの台頭は、 WO_3 研究における新たな飛躍を示しています。21 世紀に入り、特に 2000 年以降、ナノ調製技術（水熱法や蒸着法など）のブレークスルーにより、ナノスケールの WO_3 の合成が現実のものとなりました。2004 年、研究者らは水熱法を用いて、直径約 20nm の WO_3 ナノ粒子を初めて調製しました。その光触媒活性は、ミクロンサイズの材料の約 3 倍でした。その後、ナノワイヤ、ナノシート、多孔質構造などの形態の開発により、その性能はさらに最適化されました。例えば、2010 年の研究では、 WO_3 は ナノワイヤは $40\text{ m}^2 / \text{g}$ という高い表面積を持ち、 NO_2 検出感度が 5 倍に向上します。同時に、ドーピング修飾 (N および S ドーピングなど) と複合材料設計 (WO_3 / gC_3N_4 、 WO_3 / TiO_2 など) により、 NO_2 検出感度が向上します。 WO_3 は、光触媒効率と電気特性を大幅に向上させました。近年、エネルギー貯蔵分野におけるナノ WO_3 の応用は急速に拡大しています。例えば、2018 年の研究では

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

、リチウムイオン電池における WO_3 /グラフェン複合材料の高容量 ($> 600 \text{ mAh/g}$) とサイクル安定性が実証されました。さらに、抗菌コーティング（光触媒を用いて活性酸素を生成）、サーモクロミック材料（V をドーピングして変色温度を調整）、バイオイメージング（量子ドット WO_3 ）などの新興分野での可能性も徐々に現れてきています。

ナノ WO_3 の研究は目覚ましい進歩を遂げているものの、その発展には依然として多くの課題が残されています。製造プロセスの複雑さが大規模生産の制約となり、ナノ粒子の凝集効果によって性能が低下する可能性があり、体内での長期安全性についても詳細な評価が必要です。これらの課題は、中国における高純度 WO_3 生産の躍進（YS/T 572-2007 規格）や欧米におけるナノ材料安全規格（ASTM B922-20）への取り組みなど、世界中で技術革新を牽引してきました。本書はこうした背景から執筆されました。ナノ WO_3 の構造、製造、応用、安全性を体系的に解析することで、基礎研究から産業応用への橋渡しを行い、エネルギー、環境、インテリジェント技術の分野における主要課題の解決を科学的に支援することを目指しています。

本書は 9 章に分かれており、ナノタングステン酸化物の構造と特性から始まり、製造プロセス、特性評価技術、応用分野、特許と規格、安全性評価、将来の展望などを段階的に探求しています。付録には、データシート、実験ガイド、特許リスト、規格比較、多言語用語集などを掲載し、世界中の読者にとって包括的かつ実用的な知識プラットフォームの構築を目指しています。本書が、学術研究の新たなアイデアを刺激するだけでなく、ナノ WO_3 の産業化プロセスに弾みをつけることを期待しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第 1 章：ナノタングステン酸化物の紹介

ナノ三酸化タングステン（ナノ WO_3 ）は重要な遷移金属酸化物です。多様な物理的・化学的特性と幅広い応用展望により、材料科学、化学工学、ナノテクノロジーの分野で極めて重要な役割を果たしています。本章では、ナノ三酸化タングステンの基本的な定義、化学式、色のバリエーションから始めて、ナノスケールでの独自の特性について深く探り、研究開発の歴史的背景を振り返り、材料科学における現状と研究のホットスポットを分析し、ナノ三酸化タングステンの包括的な入門知識を読者に提供することを目的としています。本章の詳細な紹介を通じて、読者はナノ三酸化タングステンの科学的根拠と応用の可能性を包括的に理解し、その製造方法、特性、応用への深い理解の基礎を築くことができます。

1.1 酸化タングステンの基本概念

1.1.1 定義と化学式（ WO_3 ）

三酸化タングstenは、タングsten（W）と酸素（O）からなる化合物で、化学式は WO_3 で表されます。これは、各タングsten原子が共有結合とイオン結合の混合を介して 3 つの酸素原子と結合し、安定した酸化物構造を形成することを意味します。タングsten元素の主な酸化状態として、 WO_3 中のタングstenは +6 の酸化状態にあり、遷移金属酸化物のファミリーに属し、その分子量は 231.84 g/mol です。 WO_3 の結晶構造は、製造条件と温度に大きく依存し、通常は単斜晶相（単斜晶、安定状態、室温で一般的）、斜方晶相（斜方晶、 $300 \sim 720^\circ \text{C}$ ）、または正方晶相（正方晶、 $> 720^\circ \text{C}$ ）を呈し、これらの相転移はその熱力学的特性と密接に関連しています。

WO_3 は化学的に多様な性質を持つ両性酸化物で、強酸（HCl など）と反応して可溶性のタングsten塩（ $WC1$ など）を形成します。 WO_3 は、強塩基（NaOH など）と反応してタングsten酸塩（ Na_2WO_4 など）を形成するため、工業精製や化学合成において貴重な材料となっています。さらに、 WO_3 は融点が 1473°C 、分解沸点が 1700°C を超えており、優れた熱安定性を示すため、セラミック添加剤や耐火材料など、高温環境での用途に適しています。ナノスケールでは、 WO_3 のこれらの特性は表面効果と量子効果の強化によってさらに増幅され、機能性材料分野における大きな可能性を秘めています。

1.1.2 酸化タングstenの色の变化（黄色、青、黒）

酸化タングstenは、黄色、青、黒など、様々な色のバリエーションを持つことで知られています。これらの色は、化学組成、結晶構造、欠陥状態の違いを反映しているだけでなく、光触媒、エレクトロクロミズム、ガスセンサー、エネルギー貯蔵といった分野における応用の可能性を直接的に決定づけるものです。以下では、これら 3 つの色のバリエーションについて、その起源、製造プロセス、特性、ナノスケールでの性能を網羅的に解説し、科学研究および産業における具体的な応用について考察します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

黄色酸化タングステン (YT0、 WO_3)

黄色酸化タングステン (YT0、 WO_3) の起源と構造

黄色タングステン酸化物は、酸化タングステン (WO_3) の典型的な形態で、通常は単斜晶系または斜方晶系で存在します。その黄色は、2.6~2.8 eV のバンドギャップエネルギーを持つ電子遷移に由来し、可視光領域 (約 450~500 nm) での強い吸収に相当します。単斜晶系 WO_3 の結晶構造は WO_6 八面体ユニットで構成され、角共有または辺共有によって接続され、格子定数 $a=7.306 \text{ \AA}$ 、 $b=7.540 \text{ \AA}$ 、 $c=7.692 \text{ \AA}$ 、 $\beta=90.91^\circ$ を持つ三次元ネットワークを形成します。この整列構造により、化学的および熱的安定性が高くなります。黄色は、格子内の微量欠陥 (酸素空孔など) にも関連しています。これらの欠陥は純粋な WO_3 ではまれですが、ナノスケールではわずかに増加し、色の濃さに影響を与える可能性があります。X線回折 (XRD) およびラマン分光分析により、単斜晶相の特徴的なピーク (717 cm^{-1} や 807 cm^{-1} など) は WO_3 結合の強い振動を反映していることが示され、その構造的完全性がさらに確認されました。

黄色酸化タングステン (YT0、 WO_3) の製造方法 黄色 WO_3 の製造方法にはさまざまな方法があり、

主に湿式化学法と熱化学法に分けられます。

黄色酸化タングステン (YT0、 WO_3) 酸性沈殿法

タングステン酸ナトリウム (Na_2WO_4) 溶液で pH を 1~2 に調整してタングステン酸 (H_2WO_4) を生成する。沈殿物を 500~600℃ で 2~4 時間焼成し、 WO_3 に分解します。焼成温度は重要で、450℃ 未満では水和物 ($WO_3 \cdot H_2O$ など) が残留する可能性があり、650℃ を超えると色が薄くなったり、粒径が大きくなりすぎたり ($>10 \text{ \mu m}$) する可能性があります。

熱分解法: メタタングステン酸アンモニウム ($(NH_4)_5 \cdot H_5[H_2(WO_4)_6] \cdot H_2O$ 、略称 AMT) は、産業界では前駆体として広く使用されています。空気中 550℃ で焼成すると、分解反応は次のようになります: $(NH_4)_5 H_5[H_2(WO_4)_6] \rightarrow WO_3 + NH_3 \uparrow + H_2O \uparrow$ 。この方法は粒径を制御でき、通常は 1~5 μm のミクロンサイズの WO_3 が得られますが、ナノスケールでは水熱法が必要です。焙焼雰囲気 (酸素含有量など) は色純度に大きな影響を与え、酸素が不足すると青色の WO_3 が生成されることがあります。

黄色酸化タングステン (YT0、 WO_3) 水熱調製

オートクレーブ中でタングステン酸ナトリウムと HCl を 180℃ で 12~24 時間反応させることで、20~100nm の黄色の WO_3 ナノ粒子を直接生成することができます。界面活性剤 (ヘキサデシルトリメチルアンモニウムブロミド、CTAB など) を添加することで、球状 (直径 20~50nm)、棒状 (長さ 100~200nm)、またはフレーク状 (厚さ 10~20nm) に形状を調整することができます。例えば、2017 年の研究では、水熱処理条件 (pH=1.5、180℃、24 時間) を最適化することで、純度 99.9% の 30nm の黄色の WO_3 ナノ粒子を調製しました。

これらの方法にはそれぞれ利点があります。湿式化学法はナノスケールの調製に適しており

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

、熱化学法は 90%以上の収率で工業的な大量生産に適しています。

ナノイエロー酸化タングステン (YTO、 WO_3) の物理的および化学的性質

ナノ黄色酸化タングステン (YTO、 WO_3) の光学特性

バンドギャップは 2.6~2.8 eV で、黄色光（波長 570~590 nm）を反射し、赤外領域（>700 nm）では高い透過率を示します。UV-Vis スペクトルは 450 nm 付近に吸収端を示し、色純度が高く、光学濃度 (OD) は 0.5~1.0 です。バンドギャップ値は Tauc プロット法によって決定され、式は $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ です。ここで、 α は吸収係数、 $h\nu$ は光子エネルギーです。

ナノイエロー酸化タングステン (YTO、 WO_3) の密度

単斜晶系 WO_3 の密度は 7.16 g/cm³ で、斜方晶系は格子配列が緩いため、密度はわずかに低く（約 7.1 g/cm³）、ナノスケール WO_3 の見かけ密度は、アルキメデス法で測定された多孔性のため、6.8~7.0 g/cm³ とわずかに低下する可能性があります。

熱安定性：空気中では 1100℃まで安定していますが、この温度を超えると揮発し始め、 WO_2 、 WO_3 などの低酸化状態物質を生成します。分解反応は $2WO_3 \rightarrow 2WO_2 + O_2$ です。熱重量分析 (TGA) によると、1200℃までは質量損失が 1%を超えません。

ナノイエロー酸化タングステン (YTO、 WO_3) の化学的性質

水にわずかに溶け（溶解度 < 0.02 g/100 mL, 25℃）、強塩基（1 M NaOH など）に溶けて Na_2WO_4 を形成し、溶解速度は約 0.1 g/分です。濃酸（98% H_2SO_4 など）に部分的に溶けてタングステン酸誘導体を形成し、反応平衡には数時間かかります。

ナノイエロー酸化タングステン (YTO、 WO_3) の電気的特性

n 型半導体であるため、電子濃度は約 $10^{16} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で、導電率は低く（ $10^{-6} - 10^{-5} \text{ S/cm}$ ）、温度や欠陥の影響を大きく受けます。例えば、300℃では熱励起キャリアの増加により、導電率は 10^{-4} S/cm まで上昇することがあります。

黄色酸化タングステン (YTO、 WO_3) のナノスケール特性

ナノスケールの黄色 WO_3 （粒子サイズ 20~100 nm）は、量子効果と表面効果により大きな利点を発揮します。

比表面積

は 20~30 m² / g（ミクロンレベルではわずか 5~10 m² / g）に達し、BET（ブルナウアー・

エメット・テラー）窒素吸着試験によって検証されています。高い比表面積は表面活性点を増加させます。例えば、光触媒反応において、染料分子の吸着能力は 3~5 倍に向上し、吸着等温線はラングミュアモデルに従います。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ナノイエロー酸化タングステン（ YTO 、 WO_3 ）のバンドギャップ変化

粒子サイズの縮小は、バンドギャップのわずかな増加をもたらします。例えば、20nm の WO_3 ではバンドギャップは 2.85eV に達し、光吸収端は 435nm に青方偏移し、色はわずかに薄くなることがあります。これは量子閉じ込め効果によるものです。理論計算によると、バンドギャップの増加は粒子サイズ（d）、 ΔE_g に反比例することが示されています。 $\propto 1/d^2$ 。

ナノ黄色酸化タングステン（ YTO 、 WO_3 ）の光触媒活性

メチレンブルー（MB）を分解する際、ナノ WO_3 の反応速度定数（k）は 0.05 min^{-1} に達し、ミクロンレベルの 0.01 min^{-1} をはるかに上回ります。これは、電子と正孔の分離効率が高い（分離率は 80% に増加）ためです。光電流試験では、ナノ WO_3 の光電流密度は 0.5 mA/cm^2 に達し、ミクロンレベルの 2 倍であることが示されました。

ナノ黄色酸化タングステン（ YTO 、 WO_3 ）の形態学的影響

ナノ粒子は均一な形態を有し、棒状または薄片状のナノ WO_3 の比表面積はさらに $35 \text{ m}^2 / \text{g}$ まで増加できるため、表面反応性が向上します。例えば、走査型電子顕微鏡（SEM）では、棒状 WO_3 のアスペクト比は 5:1 であり、表面粗度が高いため触媒サイトが増加していることが示されています。

）の応用

ナノイエロー酸化タングステン（ YTO 、 WO_3 ）光触媒

黄色の WO_3 は、水の分解による水素生成や有機汚染物質の分解において優れた性能を発揮します。例えば、2016 年の研究では、50nm の黄色の WO_3 が可視光（ $\lambda > 420 \text{ nm}$ ）下で $120 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ の速度で水素を生成し、量子効率は約 5% であることが示されました。ローダミン B の分解においては、90 分以内に 95% の除去率に達しました。

ナノイエロー酸化タングステン（ YTO 、 WO_3 ）エレクトロクロミック材料

スマートウィンドウでは、ナノ WO_3 フィルムは Li^+ の埋め込みにより透明から濃い青への移行を実現し、最大 70% の光変調範囲（透過率は 80% から 10% に低下）、応答時間は約 5 秒、サイクル安定性は 10^4 倍です。

ナノイエロー酸化タングステン（ YTO 、 WO_3 ）顔料

工業分野では黄色顔料として使用されています。優れた耐候性（紫外線老化耐性 1000 時間以上）と耐熱性（ 1000°C 以上）を有し、セラミック、コーティング、プラスチックなどに広く使用されています。色度値（ $L^* a^* b^*$ ）は、 $L^*=85$ 、 $a^*=10$ 、 $b^*=50$ です。

ナノイエロー酸化タングステン（ YTO 、 WO_3 ）ガスセンサー

ナノ WO_3 から NO_2 への変換は 10ppb に達し、応答時間は 10 秒未満、回復時間は約 20 秒です。環境モニタリングや産業排出制御に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

青色酸化タングステン（BT0）

青色酸化タングステン（ブルータングステン酸化物、BT0）の起源と構造

青色酸化タングステンの化学組成は、通常、 $WO_{2.9}$ または WO_{3-x} ($0 < x < 0.1$) で、これは部分的に還元された WO_3 です。その青色は酸素空孔の存在に由来し、低原子価タングステンイオン (W^{5+}) の割合の増加、電子構造のエネルギー準位の欠陥、および吸収スペクトルの赤外領域 (600~700 nm) へのシフトにつながります。結晶構造は主に単斜晶系ですが、酸素空孔は局所的な歪みを引き起こし、XRD では格子定数がわずかに変化することが示されています（例えば、c 軸が約 0.02 Å 短縮され、 $c = 7.670$ Å）。XPS (X 線光電子分光法) 分析によると、 W^{5+}/W^{6+} 比は約 0.05~0.1、酸素空孔濃度は約 10^{19} cm^{-3} です。特定の条件（高温還元など）下では、少量の斜方晶相が共存する可能性があり、ラマンスペクトルにおいて特徴的なピーク（例えば 680 cm^{-1} ）がより顕著になり、色の濃さにさらに影響を与えます。

青色酸化タングステン（青色タングステン、青色酸化タングステン、BT0）の製造方法青色 WO_3

の製造は、主に還元反応によって達成されます。

青色酸化タングステン（青色タングステン、青色酸化タングステン、BT0）の製造方法— 高温還元法

Ar 雰囲気下で 800℃、2~4 時間加熱すると、反応は $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ となります。還元の程度は温度と H_2 濃度によって制御されます。700℃では薄い青色の $WO_{2.95}$ 、900℃では濃い青色の $WO_{2.9}$ が生成され、高すぎる場合（例えば 1000℃超）は WO_2 が生成されます。過還元を避けるため、雰囲気中の H_2 の割合を正確に制御する必要があります（5%~10%）。

青色酸化タングステン（青色タングステン、青色酸化タングステン、BT0）の製造方法— 湿式化学還元法

ナノスケールの青色 WO_3 は、タングステン酸溶液を $NaBH_4$ または Zn/HCl で 60~80℃で 1~2 時間処理することで生成できます。例えば、2018 年の研究では、 $NaBH_4$ 還元（濃度 0.1M、pH = 2、70℃、2 時間）により、10nm の $WO_{2.9}$ ナノ粒子を 85% の収率で合成しました。

青色酸化タングステン（青色タングステン、青色酸化タングステン、BT0）の製造方法— プラズマ処理

WO_3 表面に Ar/ H_2 プラズマ（出力 100~200W）を 10~20 分間照射すると、薄膜用途に適した青色 WO_3 の薄層が急速に生成されます。照射時間が長すぎると（30 分以上）、表面がアモルファス化する可能性があります。

これらの方法のうち、湿式化学法はナノスケールの作製と粒子径分布（10~50nm）の制御に適しており、高温法は工業生産に用いられ、年間数百トンの生産量があります。

青色酸化タングステン（BT0）の物理的および化学的性質

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

青色酸化タングステン（BT0）の光学特性

バンドギャップは 2.4~2.6 eV に減少し、吸収ピークは 650 nm にシフトして青色を示し、赤外領域での反射率は低下します（<20%）。UV-Vis スペクトルでは、吸収端が 500~550 nm に赤方偏移し、光学密度は 1.2~1.5 に達します。

青色酸化タングステン（BT0）の密度

は約 7.0~7.1 g/cm³ で、黄色の WO₃ よりもわずかに低くなります。密度汎関数理論（DFT）計算によると、酸素空孔率が 1% 増加するごとに密度は約 0.05 g/cm³ 減少します。

青色酸化タングステン（BT0）の導電性

酸素空孔は電子ドナーとして作用し、キャリア濃度（ 10^{18} - 10^{19} cm⁻³）を増加させ、導電率は 10^{-4} - 10^{-3} S/cm に向上します。これは黄色の WO₃ よりも 1~2 桁高い値です。四端子法を用いた場合、300°C で導電率は 10^{-2} S/cm に達します。

熱安定性：黄色の WO₃ ほど安定ではありません。空气中、400~500°C で黄色の WO₃ に酸化されます。反応は $WO_{2.9} + 0.05O_2 \rightarrow WO_3$ です。TGA では約 0.5% の質量増加が見られます。

青色酸化タングステン（BT0）の化学的性質

酸化されやすく、表面活性が高い。湿度の高い環境（相対湿度 80% 超）では、水を吸着して WO₃ · 0.33H₂O を生成する可能性があり、その吸着容量は約 0.1 g/g である。

青色酸化タングステン（ブルータングステン酸化物、BT0）のナノスケール特性

ナノスケールの青色 WO₃（粒子サイズ 10~50 nm）は、欠陥の増加により大きな利点を示します。

比表面積

欠陥部位が 30~40 m² / g まで吸着能力を高め、例えば H₂ の吸着は 2 倍に増加します（ラングミュア吸着能力は 10 cm³ / g に達します）。

光触媒活性

光触媒酸素生成において、酸素空孔が電子移動を促進するため、量子効率（黄色 WO₃ は 10%）に達します。光電流密度は 0.8 mA/cm² に達し、これは黄色 WO₃ の 1.6 倍です。

電気特性

ナノワイヤ状の青色 WO₃（直径 20 nm、長さ 200 nm）は 10^{-2} S/cm に達する可能性があり、これは電気化学デバイスに適しています。抵抗率は温度上昇とともに指数関数的に減少します（ $E_a \approx 0.2$ eV）。

応答速度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

エレクトロクロミズムでは、10 nm の青色 WO_3 の色の变化時間は 2 秒に短縮されます。これは、イオン拡散が速いためです（拡散係数 $D = 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、黄色 WO_3 の場合は $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ ）。

（BT0）の応用

タングステン粉末生産

青色 WO_3 は金属タングステンの製造における重要な中間体です。 H_2 （900 °C、 H_2 濃度 10%）で還元することで、純度 99.95% の W 粉末が得られます。超硬合金や耐熱合金に広く使用されています。

電気化学センサー

高い導電性により H_2 および CO の検出に適しており、最大 50 ppb の感度と 5 秒未満の応答時間で可燃性ガスのモニタリングに適しています。

エネルギー貯蔵材料

スーパーキャパシターでは、ナノブルー WO_3 の比容量は 300 F/g に達し、サイクル安定性は 5000 回に達し、エネルギー密度は約 50 Wh/kg です。

光熱変換

赤外線吸収特性により太陽熱利用が可能で、例えば光熱フィルムの効率は 80% に達し、太陽光下では表面温度が 70 °C まで上昇します。

バイオレットタングステン酸化物（VT0）

紫色酸化タングステン（VT0）の起源と構造

紫色酸化タングステン（VT0）の化学組成は、通常、 $WO_{2.72}$ または WO_{3-x} （ $x \approx 0.28$ ）です。これは、青色酸化タングステン（ $WO_{2.9}$ ）よりも還元度の高い三酸化タングステン（ WO_3 ）です。その紫色（またはすみれ色）は、酸素空孔の濃度が高いことに由来し、低原子価タングステンイオン（ W^{5+} と少量の W^{4+} ）の割合が大幅に増加します。酸素空孔によって導入される欠陥エネルギー準位は電子構造を変化させ、吸収スペクトルを赤外領域（700~800 nm）へシフトさせ、濃い紫色からほぼ黒色に見えます。結晶構造は主に単斜晶系（空間群 $P2_1/n$ ）ですが、酸素空孔濃度が高い（約 10^{20} cm^{-3} ）ため、格子歪みが生じます。XRD 分析では、格子定数が大きく変化していることが示されています（たとえば、c 軸は約 0.05 Å 短縮され、 $c \approx 7.642 \text{ Å}$ ）。XPS（X 線光電子分光法）の結果では、 W^{5+}/W^{6+} 比は 0.2~0.3

、 W^{4+}/W^{6+} 比は約 0.05~0.1 であり、強い還元特性を反映しています。強い還元状態や高温

条件下では、少量の立方相（ $WO_{2.72}$ 特性）が混在することがあり、ラマンスペクトルにおける特性ピーク（720 cm^{-1} や 950 cm^{-1} など）の強度が増強され、紫色の深さの変化に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

関係します。

紫色酸化タングステン（VT0）の製造方法

紫色 VT0 の調製は、主に還元反応を制御することによって行われます。一般的な方法としては、以下の 3 つがあります。

紫色酸化タングステン（VT0）の製造方法 - 高温還元法

黄色の WO_3 は、10%～15%の H_2 / Ar 雰囲気下で 900～1000 °C で 1～3 時間焼成され、反応は $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ となる。（ $x \approx 0.28$ ）。還元度は温度と H_2 濃度によって決まります。900 °C では薄紫色の $WO_{2.75}$ 、1000 °C では濃紫色の $WO_{2.72}$ が生成されます。温度が 1050 °C を超えると、 WO_2 または金属タングステンに過剰還元される可能性があります。不純物の生成を避けるため、 H_2 濃度を 10%～15% に正確に制御する必要があります。この方法は工業生産に適しており、年間数百トンの生産量があります。

紫色酸化タングステン（VT0）の製造方法 - 湿式化学還元法

強力な還元剤（亜ジチオン酸ナトリウム $Na_2S_2O_4$ または Zn/HCl など）を加え、50～70 °C で 2～4 時間反応させることで、ナノスケールの紫色 VT0 を生成します。例えば、ある研究では、 $Na_2S_2O_4$ 還元（濃度 0.2M、pH= 1.5、60 °C、3 時間）により、粒径 15～30nm の $WO_{2.72}$ ナノ粒子を約 80% の収率で合成しました。この方法は操作温度が低く、粒子サイズを制御可能ですが、副生成物を除去するために洗浄が必要です。

紫色酸化タングステン（VT0）の製造方法 - プラズマ処理

Ar / H_2 プラズマ（出力 200～300W）を用いて WO_3 粉末またはフィルムの表面を 15～25 分間照射し、紫色の VT0 薄膜を迅速に生成します。照射時間と出力を最適化する必要があります。照射時間が長すぎる（30 分超）または強度が強すぎる（400W 超）と、アモルファス化や WO_2 への過度な還元が生じる可能性があります。この方法は薄膜の作製に適しており、エレクトロクロミック材料やセンサーに用いられます。

方法の比較

湿式化学法は、狭い粒径分布（15 ～50 nm）でのナノスケール製造に適しています。高温還元法は、高収量と低コストで工業規模に適しており、プラズマ処理は表面改質と迅速な反応に特化しています。

紫色酸化タングステン（VT0）の物理的および化学的性質

紫色酸化タングステン（VT0）の光学特性

紫色 VT0 のバンドギャップは 2.2～2.5 eV（黄色 WO_3 は 2.6～2.8 eV、青色 WO_3 は 2.4～2.6 eV）に縮小し、吸収ピークは 700～750 nm にシフトして濃い紫色を呈し、赤外線領域での反射率は極めて低い（<15%）。UV-Vis スペクトルでは、吸収端が 550～600 nm に赤方偏移し、光学密度は 1.5～1.8 であり、強い赤外線吸収能を示している。この光学特性は、高濃度の酸素空孔によって導入された中間エネルギー準位に起因する。

紫酸化タングステン（VT0）の密度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

密度は約 6.9～7.0 g/cm³ で、黄色の WO₃（7.16 g/cm³）や青色の WO₃（7.0～7.1 g/cm³）よりも低くなります。これは、酸素空孔率が高く（約 9%～10%）、単位体積あたりの質量が小さいためです。密度汎関数理論（DFT）計算によると、酸素空孔が 1%増加するごとに密度は約 0.06 g/cm³ 減少します。

紫色酸化タングステン（VT0）の電気伝導性

高濃度の酸素空孔は電子ドナーとして作用し、キャリア濃度を $10^{19} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ まで、導電率を $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ S/cm}$ まで上昇させます。これは黄色の WO₃（ 10^{-5} S/cm ）よりも 2～3 桁高く、青色の WO₃（ $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ S/cm}$ ）よりも 1 桁高い値です。四端子法を用いた測定では、400℃で導電率が 0.1 S/cm に達し、優れた半導体特性を示しています。

紫色酸化タングステン（VT0）の熱安定性

中 300～400℃で₃が生成します。反応は $\text{WO}_2 + 0.14\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3$ です。TGA 分析によると、質量は約 1.2～1.5%増加します。200℃以下では比較的安定していますが、高温（500℃以上）に長時間さらされると紫色が完全に失われます。

紫色酸化タングステン（VT0）の化学的性質

紫色の VT0 は強い還元状態にあるため、黄色や青色の WO₃よりも化学的に活性が高く、酸化されやすい。高湿度環境（相対湿度>80%）では、表面に水が吸着して WO₃・H₂O または WO₃・0.33H₂O が生成し、吸着量は約 0.15g/g である。酸性条件（例えば pH <2）では徐々に溶解し、W⁶⁺イオンを放出する。

紫色酸化タングステン（VT0）のナノスケール特性

ナノサイズの紫色 VT0（粒子サイズ 15～50 nm）は、欠陥濃度が高いため、次のような大きな利点があります。

比表面積は

40～60 m² / g に達し、黄色 WO₃（10～20 m² / g）や青色 WO₃（30～40 m² / g）よりも高くなります。欠陥部位が吸着容量を高め、H₂のラングミュア吸着容量は 15 cm³ / g に達し、黄色 WO₃の 3 倍です。

光触媒活性:

水の光触媒分解による酸素生成において、酸素空孔が光生成した電子と正孔の分離を促進するため、量子効率 は 18%（黄色 WO₃では 10%、青色 WO₃では 15%）に達します。光電流密度は 1.0 mA/cm² に達し、青色 WO₃の 0.8 mA/cm² よりも高くなります。

電気特性: 紫色 VT0 のナノワイヤ（直径 15～25nm、長さ 150～300nm）の導電率は 0.1S/cm に達し、高感度センサーに適しています。抵抗率は温度上昇とともに指数関数的に減少し、活性化エネルギーEa は 0.18eV です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

応答速度

エレクトロクロミック用途では、欠陥チャネルが Li^+ または H^+ の透過を加速するため、20 nm 紫 VT0 の色変化時間は 1.5 秒に短縮され（黄色 WO_3 は 5 秒、青色 WO_3 は 2 秒）、イオン拡散係数は $10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{s}$ に増加します。

紫色酸化タングステン（VT0）の応用

タングステン粉末生産

紫色の VT0 は、高純度タングステン金属粉末を製造するための重要な中間体です。水素還元（950℃、15% H_2 / Ar、2 時間）により、粒径 50~100nm、純度 99.98% のタングステン粉末が生成されます。この粉末は、超硬合金、タングステン線、耐熱合金などに広く使用されています。黄色の WO_3 と比較して、還元速度が速く、効率は約 20% 向上します。

電気化学センサー

紫色 VT0 は高い導電性と欠陥活性を有しており、ガスセンサーとして優れた性能を発揮します。例えば、 H_2S の検出感度は最大 30ppb、応答時間は 3 秒未満、選択性は青色 WO_3 よりも優れているため、産業安全監視に適しています。

エネルギー貯蔵材料

スーパーキャパシタにおいて、ナノ紫 VT0 の比容量は 350~400 F/g（青色 WO_3 は 300 F/g）に達し、サイクル安定性は 6000 回に達し、エネルギー密度は約 60 Wh /kg です。高いキャリア濃度と高速イオン拡散が重要な利点です。

光熱変換

紫色 VT0 は赤外線（700~1000 nm、反射率<10%）を強く吸収するため、光熱変換材料として有望です。例えば、紫色 VT0 ナノ粒子をコーティングした光熱変換フィルムは、太陽光下で 85% の変換効率を示し、表面温度は 80℃ まで上昇するため、ソーラーコレクターに適しています。

オレンジ色の酸化タングステン（オレンジ色の酸化タングステン、OT0）

オレンジタングステン酸化物（OT0）の起源と構造

オレンジ色の酸化タングステン（OT0）は、通常、 $\text{WO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ または WO_{3-x} （ $x \approx 0.1$ ）の化学組成を持ちます。これは、わずかに還元された三酸化タングステン（ WO_3 ）であり、黄色の WO_3 （ WO_3 ）と青色の WO_3 （ $\text{WO}_2 \cdot x$ ）の中間色です。そのオレンジ色は、中程度の酸素空孔に由来します。この空孔により、低原子価タングステンイオン（ W^{5+} ）の割合がわずかに増加し、電子構造に少量の欠陥エネルギー準位が導入され、吸収スペクトルが可視光領域（550~600 nm）にシフトします。結晶構造は主に単斜晶系（空間群 $\text{P}2_1/\text{n}$ ）で、酸素空孔濃度は低く（約 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ）、格子歪みはわずかで、XRD では格子定数がわずかに変化しています（たとえば、c 軸が約 0.01 Å 短縮され、 $c \approx 7.685 \text{ Å}$ ）。XPS 分析に

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

よると、 W^{5+}/W^{6+} 比は約 0.02 ～ 0.05 で、青や紫のタングステン酸化物よりもはるかに低く、 W^{4+} はほとんど存在しません。軽度の還元条件（600～700℃など）では、少量の斜方晶相が混ざることがあり、ラマンスペクトルの特徴的なピーク（710 cm^{-1} など）の強度がわずかに増加します。これは、オレンジ色の明暗の変化に関係しています。

オレンジタングステン酸化物（オレンジタングステン酸化物、OT0）の製造方法

オレンジ OT0 は、穏やかな還元反応によって製造されます。一般的な方法としては、以下の3つがあります。

オレンジタングステン酸化物（オレンジタングステン酸化物、OT0）の製造方法 - 高温還元法

Ar 雰囲気下で 600～700℃で 2～3 時間焼成され、反応は $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ となる。（ $x \approx 0.1$ ）。還元度は温度と水素濃度によって制御されます。600℃では淡オレンジ色の $WO_{2.92}$ が、700℃ではオレンジ色の $WO_{2.90}$ が生成します。温度が 800℃を超えると、さらに還元されて青色の $WO_{2.9}$ になります。過還元を避けるため、水素濃度は 2%～5%と低く抑える必要があります。この方法は工業生産に適しており、年間生産量は数十トンに達します。

オレンジタングステン酸化物（オレンジタングステン酸化物、OT0）の製造方法 - 湿式化学還元法

弱い還元剤（水素化ホウ素ナトリウム $NaBH_4$ やアスコルビン酸など）を加え、40～60℃で 1～3 時間反応させると、ナノスケールのオレンジ色の OT0 が生成されます。例えば、ある研究では、 $NaBH_4$ （濃度 0.05 M、pH=3、50℃、2 時間）を用いた穏やかな還元により、粒径 20 ～ 40nm の $WO_{2.90}$ ナノ粒子を約 90 %の収率で合成しました。この方法は操作が簡単で、小規模な精密合成に適しています。

オレンジタングステン酸化物（OT0）の製造方法 - プラズマ処理

低出力 Ar / H_2 プラズマ（出力 50～100W）を用いて WO_3 表面に 5～15 分間照射することで、オレンジ色の OT0 薄膜を迅速に生成します。照射時間は厳密に制御する必要があります。照射時間が長すぎると（20 分を超えると）、青色の WO_3 が生成される場合があります。この方法は、光学用途または電気用途の薄膜作製に適しています。

方法の比較:

湿式化学法は均一な粒子サイズ分布（20～50 nm）でナノスケールの製造に適しており、高温還元法は低コストで高収率で工業規模に適しており、プラズマ処理は表面改質に特化しており、反応速度が速いです。

オレンジタングステン酸化物（OT0）の物理的および化学的性質

オレンジタングステン酸化物（OT0）の光学特性

オレンジ色の OT0 のバンドギャップは 2.5～2.7 eV（黄色の WO_3 の 2.6～2.8 eV と青色の WO_3 の 2.4～2.6 eV の間）で、吸収ピークは 550～600 nm に位置し、鮮やかなオレンジ色を呈し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ています。また、赤外線領域での反射率は高く（約 30%~40%）、UV-Vis スペクトルでは吸収端が 480~520 nm にシフトしており、光学密度は 1.0~1.3 であり、可視光領域における吸収能力は中程度であることを示しています。

オレンジタングステン酸化物（OT0）の密度

密度は約 7.1~7.15 g/cm³ で、黄色の WO₃（7.16 g/cm³）よりわずかに低く、青色の WO₃（7.0~7.1 g/cm³）より高くなります。これは、酸素空孔の割合が低い（約 3%~5%）ためです。密度汎関数理論（DFT）計算によると、酸素空孔が 1%増加するごとに密度は約 0.03 g/cm³ 減少します。

オレンジ色の酸化タングステン（OT0）の電気伝導性

酸素空孔は電子ドナーとして作用し、キャリア濃度を $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に、導電率を $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ S/cm}$ に増加させます。これは黄色の WO₃（ 10^{-5} S/cm ）よりわずかに高いものの、青色の WO₃（ $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ S/cm}$ ）より低い値です。四端子法を用いた場合、導電率は 300°C で 10^{-3} S/cm に達し、穏やかな半導体特性を示します。

オレンジタングステン酸化物（OT0）

青と紫の WO₃ です。空气中 500~600°C で黄色の WO₃ へと酸化が始まります。反応は $\text{WO}_{2.90} + 0.05\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3$ です。TGA 分析によると、質量は約 0.3%~0.5% 増加します。400°C 以下で良好な安定性を示し、中温用途に適しています。

オレンジ酸化タングステン（OT0）の化学的性質

オレンジ色の OT0 は化学活性が中程度で、黄色の WO₃ よりも酸化されやすいものの、青色や紫色の WO₃ よりも酸化されにくい。湿度の高い環境（相対湿度 80% 以上）では、表面に水分が吸着され、 $\text{WO}_3 \cdot 0.33\text{H}_2\text{O}$ が生成される。吸着量は約 0.05~0.08 g/g である。酸性条件（pH < 3）では溶解性が低く、化学的安定性が強い。

オレンジタングステン酸化物（OT0）のナノスケール特性

ナノスケールのオレンジ OT0（粒子サイズ 20~50 nm）には中程度の欠陥があり、次の特性を示します。

比表面積は 20~30 m² / g に達し、黄色の WO₃

（10~20 m² / g）よりも高く、青色の WO₃（30~40 m² / g）よりも低い。H₂ のラングミューア吸着容量は約 5~8 cm³ / g で、黄色の WO₃ よりもわずかに高い。

光触媒活性

光触媒酸素生成において、量子効率 は 12% に達し（黄色 WO₃ は 10%、青色 WO₃ は 15%）、光電流密度は 0.6 mA/cm² で、黄色 WO₃ と青色 WO₃ の中間です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

の Orange OTO の電気特性は最大 10^{-3} S/cm の導電率を有し、低電力センサーに適しています。抵抗率は温度上昇とともに低下し、活性化エネルギー E_a は 0.25 eV です。

応答速度

エレクトロクロミック用途では、30 nm のオレンジ色の OTO の色変化時間は 3 秒（黄色の WO_3 では 5 秒、青色 WO_3 では 2 秒）であり、イオン拡散係数は 10^{-9} cm² /s であり、これは黄色の WO_3 よりもわずかに高いです。

オレンジタングステン酸化物（OTO）の用途

タングステン粉末生産

Orange OTO は、タングステン金属粉末製造の中間体として使用できます。水素還元（850℃、5% H_2 / Ar 、3 時間）により、粒径 100~200nm、純度 99.9% のタングステン粉末が生成されます。この粉末は、超硬合金や電子材料に適しています。還元特性が穏やかであるため、プロセス制御が容易です。

電気化学センサー

、100ppb の感度と約 5~8 秒の応答時間で低濃度ガス（ NH_3 など）を検出するのに適しており、環境モニタリングに適しています。

エネルギー貯蔵材料

スーパーキャパシターにおいて、ナノオレンジ OTO の比容量は約 250~300 F/g（青色 WO_3 の 300 F/g より低い）、サイクル安定性は最大 4000 回、エネルギー密度は約 40 Wh /kg であり、低コストのエネルギー貯蔵デバイスに適しています。

光学材料

オレンジ色の OTO（550 ~ 600 nm）は可視光吸収特性を備えているため、光学フィルターや装飾コーティングに使用でき、また、中程度の反射率（30% ~ 40%）を備えているため、照明やディスプレイの分野での可能性を秘めています。

黒色酸化タングステンの起源と構造

黒色酸化タングstenは、通常、欠陥の多い WO_3 またはその水和物（ $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ 、 $WO_3 \cdot H_2O$ など）です。その暗い色は、全スペクトル（400-1000 nm）での強い吸収に起因します。原因としては、多数の酸素空孔（濃度 10^{20} cm⁻³）、 W^{5+} / W^{4+} イオンの存在（ W^{4+} 比は 5%-10% に達することがあります）、および格子歪みなどが挙げられます。水和物の形では、水分子が WO_6 八面体間の隙間に埋め込まれ、約 3.84Å の層間間隔を持つ層状構造を形成し、電子エネルギーレベルをさらに変化させます。XRD 分析の結果、黒色の WO_3 は大部分が斜方晶系（ $a=5.27\text{\AA}$ 、 $b=5.36\text{\AA}$ 、 $c=3.84\text{\AA}$ ）または非晶質であり、特徴的なピーク（23.5° や 33.8° など）の強度が低いことが分かりました。XPS では、 W^{4+} の結合エネルギー（34.5eV）が W^{6+} の結合エネルギー（35.8eV）よりも低く、欠陥状態が顕著であることが分かりました。ラマンスペクトルは、格子の無秩序性を反映して、ブロードなピーク（600~900cm⁻¹）を示し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ました。

準備方法

黒色の WO_3 を調製する方法は様々ありますが、低温または強い還元条件を重視します。

低温水熱法

オートクレーブ中でタングステン酸ナトリウムを HCl と $180^\circ C$ で 24 時間反応させ、還元剤（例えば尿素、濃度 0.5 M ）を加えることで $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ ナノシートを生成した。例えば、2015 年の研究では、この方法を用いて厚さ 5 nm の黒色 WO_3 ナノシートを 90% の収率で合成した。反応条件（例えば、 $pH = 1$ 、尿素/ W 比 = $2:1$ ）は欠陥密度に大きな影響を与える。強還元法：黄色の WO_3 を Zn/HCl （ Zn 濃度 1 M 、 HCl 6 M ）または HI （濃度 57% ）で処理し、 $60^\circ C$ で 2～4 時間反応させて非晶質の黒色 WO_3 を生成します。 WO_2 の生成を避けるため、還元時間は 3 時間以内に制御します。

プラズマ衝撃

WO_3 表面を高エネルギー H_2 プラズマ（出力 300 W 、圧力 0.1 mbar ）で 15 分間処理することで、酸素空孔を急速に導入し、黒色膜を形成した。SEM 観察により、表面多孔度が 20% に増加したことが示された。

水和物の熱処理： $WO_3 \cdot H_2O$ を不活性雰囲気（ N_2 ）中で $300^\circ C$ 、1 時間、部分脱水することで黒色特性を保持でき、脱水率は 50%～70% に制御されます。これらの方法のうち、水熱法はナノスケールの製造に適しており、収率が高く、形態制御も可能です。プラズマ法は薄膜製造に適しており、年間生産量は最大 10 m^2 です。

物理化学的性質

光学特性

バンドギャップは $2.0 \sim 2.4\text{ eV}$ に縮小し、吸収は可視から近赤外領域（ $400 \sim 1000\text{ nm}$ ）をカバーし、反射率が 5% 未満の濃い黒色を示します。UV-Vis では、吸収端は 600 nm を超え、光学密度は $2.0 \sim 2.5$ に達します。

密度

は水分子が埋め込まれているため、密度が低く（ $6.5 \sim 6.8\text{ g/cm}^3$ ）、非晶質 WO_3 の密度は 7.0 g/cm^3 に近くなります。DFT 計算によると、水分子は体積の約 10% を占めています。

熱安定性

不安定です。 $400^\circ C$ に加熱すると脱水反応を起こし、黄色の WO_3 に変化します。反応式は $WO_3 \cdot 0.33H_2O \rightarrow WO_3 + 0.33H_2O \uparrow$ です。TGA では約 5% の質量減少が見られます。

化学的性質

表面活性は極めて高く、水（吸着量 0.2 g/g ）および酸素（表面酸化速度 0.01 g/分 ）を吸着

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

しやすい性質があります。酸性環境（ $\text{pH} < 2$ ）では部分的に溶解し、 $\text{WO}_2(\text{OH})_2$ を生成します。

電気特性

欠陥状態によりキャリア濃度（ $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ）が増加し、導電率は $10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$ に達することがあります。ホール効果テストでは、電子移動度は約 $5 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ であることが示されています。

ナノスケールの特性

ナノスケールの黒色 WO_3 （粒子サイズ 5-20 nm）は、高い欠陥密度により優れた特性を示します。

比表面積

$50 \sim 60 \text{ m}^2 / \text{g}$ と高く、多孔度は 20~30% に達し、吸着能力と触媒能力が向上します。BET 試験では、細孔径分布が 5~10 nm に集中していることが示されています。

光触媒活性

ローダミン B の可視光下における分解速度定数は 0.08 分^{-1} で、黄色 WO_3 の 1.6 倍です。全スペクトル吸収により、太陽エネルギーの利用率が向上します（効率は 90% に達します）。光電流密度は 1.2 mA/cm^2 に達します。

電気化学的性能

ナノシート形態（厚さ 5nm、幅 50~100nm）の WO_3 は、スーパーキャパシタで $400 \sim 500 \text{ F/g}$ の比容量、 10 kW/kg の電力密度、および 10^4 回のサイクル寿命を実現できます。

熱応答

赤外線吸収により、サーモクロミズムにおいて高速応答（1 秒未満）を示し、温度変調範囲は最大 20°C です。

応用

光触媒

空気浄化および水処理において、黒色 WO_3 は全スペクトル吸収性を備えているため、黄色 WO_3 よりもはるかに効率的です。例えば、ホルムアルデヒドの分解速度は 0.1 分^{-1} 、除去率は 98%（1 時間）です。

サーモクロミック材料

V または Mo をドープすることで、色の变化温度（ $30 \sim 100^\circ \text{C}$ ）を調整して建物の温度調節コーティングに使用でき、赤外線反射率が 10% から 60% に増加します。

抗菌コーティング

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

光触媒は活性酸素（ $\cdot\text{OH}$ など）を生成し、大腸菌を 99.9%（30 分）殺菌できるため、医療機器の表面処理に適しています。

光熱アプリケーション

光熱療法では、黒色 WO_3 ナノ粒子は赤外線吸収率が 85% で、局所温度が 50°C まで上昇するため、がんの温熱療法の研究に利用されています。

カラーバリエーションの比較と意味

光学的な違い

黄色の WO_3 （2.6–2.8 eV）は可視光の中間波長に限定され、青色 WO_3 （2.4–2.6 eV）は赤色光まで広がり、黒色の WO_3 （2.0–2.4 eV）は全スペクトルをカバーします。吸収率は段階的に増加し、反射率は段階的に減少します（黄色 30%、青色 20%、黒色<5%）。

構造と欠陥

黄色の WO_3 は完全な構造で欠陥が最も少なく（ 10^{17} cm^{-3} ）、青色の WO_3 には中程度の酸素空孔（ 10^{19} cm^{-3} ）が含まれます。黒色の WO_3 は欠陥が最も多く（ 10^{20} cm^{-3} ）、水和物によって複雑さが増します。

ナノ効果

欠陥効果はナノスケールで拡大されます。黒色の WO_3 は比表面積（ $50\sim60 \text{ m}^2 / \text{g}$ ）と活性が最も高く、黄色の WO_3 は最も安定性が高く（熱分解温度 1100°C ）、青色の WO_3 は両者の中間です（導電率 $10^{-3} \text{ S} / \text{cm}$ ）。

アプリケーション指向

黄色の WO_3 は伝統産業やエレクトロクロミズムに適しており、青色の WO_3 は電気化学および中間製品に適しており、黒色の WO_3 は光触媒や新興分野で主流となっています。

ナノスケールのカラーバリエーションは、欠陥と形態の制御を通じて WO_3 の機能を大幅に拡張し、複数の分野でのアプリケーションに柔軟なオプションを提供します。

1.1.3 ナノスケールにおけるユニークな特性

(WO_3) の粒子サイズをナノスケール（ $<100 \text{ nm}$ ）まで小さくすると、その物理的および化学的特性は大きく変化し、次のような独自の利点が現れます。

高い比表面積

ナノ WO_3 は、ミクロンレベルでは $5\sim10 \text{ m}^2 / \text{g}$ から $20\sim50 \text{ m}^2 / \text{g}$ に増加し、活性部位の数が増加します。例えば、光触媒反応におけるナノ WO_3 の表面吸着容量は 3～5 倍に増加し、BET 試験では多孔度が 5% 未満から 10%～20% に増加することが示されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

量子効果

粒子サイズの縮小により、バンドギャップがわずかに増加し（例えば、2.6 eV から 2.8 eV）、量子閉じ込め効果により光吸収と電荷分離効率が向上します。例えば、20 nm の WO_3 では光電流密度は 0.5 mA/cm^2 に達し、これはマイクロメートルレベルの WO_3 の 2 倍に相当します。

表面効果

表面原子の割合は、マイクロメートルスケールでは 5%未満ですが、ナノメートルスケールでは 20%~30%に増加し、吸着容量とイオン拡散速度が大幅に向上します。例えば、エレクトロクロミックデバイスでは、 Li^+ の拡散係数が $10^{-11} \text{ cm}^2 / \text{s}$ から $10^{-9} \text{ cm}^2 / \text{s}$ に向上し、応答時間は 2~5 秒に短縮されます。

形態学的多様性

ナノテクノロジーは、 WO_3 にナノ粒子（高活性、比表面積 $30 \text{ m}^2/\text{g}$ ）、ナノワイヤ（高導電性、アスペクト比 10:1）、ナノシート（高比容量、厚さ 5~10nm）、多孔質構造（高吸着、細孔径 5~20nm）など、様々な形態を与え、それぞれが特定の用途に合わせて性能を最適化します。例えば、ナノワイヤ WO_3 は NO_2 検出において 10ppb の感度を有し、多孔質 WO_3 は光触媒において水素生成効率を 50%向上させます。

エレクトロクロミズム、センサー、エネルギー貯蔵の分野で従来の材料をはるかに超える可能性を示し、機能性材料研究のホットスポットとなっています。

1.2 ナノタングステン酸化物の歴史と発展

1.2.1 初期の研究と発見

酸化タングステンの研究は、19 世紀のタングステンの化学的探究から始まりました。1816 年、スウェーデンの化学者イェンス・ヤコブ・ベルセリウスが初めてタングステンを単離し、その後、タングステン酸 (H_2WO_4) と酸化タングステン (WO_3) が研究のホットスポットとなりました。19 世紀末には、化学者たちはタングステン酸塩を酸性化 ($Na_2WO_4 + HCl$ など) することで黄色の WO_3 を調製し、その両性性質（酸で WCl_6 、アルカリで Na_2WO_4 ）と高温安定性（融点 1473°C ）を有する WO_3 は、タングステンの精製や顔料製造に利用されました。例えば、1890 年代には、 WO_3 は陶磁器の釉薬の黄色着色剤として使用され、年間約 100 トンが生産されていました。

20 世紀には、X 線回折技術の応用により、 WO_3 の結晶構造が明らかになりました。1930 年代には、研究者らがその単斜晶系相構造 ($a=7.306 \text{ \AA}$ 、 $b=7.540 \text{ \AA}$ 、 $c=7.692 \text{ \AA}$)を確認し、高温ではわずかに緑色になるなど、条件によって色が変わることに気づきました。これは、微量の酸素空孔による $WO_{2.95}$ の形成によるものと考えられます。1960 年代には、 WO_3 のエレクトロクロミック特性が初めて報告されました。1969 年、アメリカの科学者 Deb が WO_3 薄膜を研究しているときに、電界の作用で透明から濃い青色に変化することを発

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

見しました。この現象は、 H^+ または Li^+ の埋め込みによって形成されたタングステンブロンズ (H_xWO_3 または Li_xWO_3) によるものと考えられました。この発見により、防眩ガラスや初期のディスプレイ画面などの光学デバイスにおける WO_3 の応用研究が促進されました。

1.2.2 ナノテクノロジーが推進する進歩

ナノテクノロジーの台頭は、 WO_3 研究の新時代を迎えました。1990 年代後半には、水熱合成法と蒸着法の成熟により、ナノ WO_3 の合成が可能になりました。2004 年に米国の研究チームが水熱合成法 (180℃、24 時間、pH=1.5) で 20nm の WO_3 ナノ粒子を合成し、その光触媒活性はミクロンレベルの粒子の 3 倍、水素生成率は $100 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ でした。その後、形態制御技術が急速に発展し、2006 年には WO_3 ナノワイヤ (直径 10~50nm、長さ 200~500nm) が合成され、2010 年には多孔質ナノ WO_3 (細孔径 5~20nm、比表面積 $40 m^2/g$) が開発されました。例えば、2008 年の研究では、ソルボサーマル法 (エタノール/水混合溶媒、200℃) により WO_3 ナノシート (厚さ 10 nm) が調製され、比静電容量は 200 F/g でした。

ドーピングおよび配合技術により、性能がさらに最適化されます。2009 年、N ドープ WO_3 はバンドギャップを 2.2 eV に狭め、可視光の利用率を向上させ、光触媒効率を 40% 向上させました。2012 年には、 WO_3 / TiO_2 コアシェル構造 (コア径 20 nm、シェル厚 5 nm) の開発により、光触媒効率が 50% 向上し、酸素生成率は $150 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ に達しました。近年、ナノ WO_3 のエネルギー貯蔵分野への応用が大幅に増加しています。例えば、2018 年には、リチウムイオン電池における WO_3 / グラフェン複合材料の容量は 600 mAh / g に達し、500 サイクル後の容量維持率は 85% でした。これらの進歩は、ナノテクノロジーの精密な制御によるものであり、 WO_3 は従来の材料から高性能な機能性材料へと変貌を遂げました。世界の年間生産量は、2000 年の 500 トンから 2020 年には 2,000 トンに増加しました。

1.3 材料科学におけるナノタングステンの現状

1.3.1 他のナノ材料との比較

多くのナノ材料の中で、ナノ WO_3 はその多機能性で際立っています。ナノ TiO_2 (バンドギャップ 3.2 eV) と比較すると、 WO_3 はバンドギャップが低い (2.6~2.8 eV) ため、可視光触媒作用でより有利で、例えば水素生成効率が 30% 高くなりますが、光腐食安定性はわずかに劣ります (TiO_2 は pH=0 までの酸性環境で安定していますが、 WO_3 は pH=2 まで安定しています)。ナノ ZnO (バンドギャップ 3.37 eV) と比較すると、 WO_3 は化学的安定性が高く (ZnO よりも耐アルカリ性が強い)、 ZnO の光触媒活性は紫外線領域でより強力です。ナノ SnO_2 (バンドギャップ 3.6 eV) と比較すると、 WO_3 は優れたエレクトロクロミック特性 (変調範囲 70%、 SnO_2 は 20%) を備えていますが、ガス検知の分野では、この 2 つにはそれぞれの利点があります (SnO_2 は CO に対してより敏感で、 WO_3 は NO_2 に対してより敏感です)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ナノ WO_3 は、その多機能統合性において優れています。光触媒（水素生成、汚染物質分解）とエレクトロクロミック材料（スマートウィンドウ）の両方として機能します。また、エネルギー貯蔵（バッテリー）やセンシング（ NO_2 検出）にも使用できます。この汎用性は、複合材料設計において大きな利点となります。例えば、 $\text{WO}_3 / \text{gC}_3\text{N}_4$ は光触媒特性と電気化学的特性を兼ね備え、水素生成効率は $200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ であり、これは単一の gC_3N_4 の $50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ よりも優れています。

1.3.2 産業界と学術研究のホットスポット

学術分野において、ナノ WO_3 は光触媒、センサー、エネルギー貯蔵研究のホットトピックです。例えば近年、量子ドット（ $<10 \text{ nm}$ ）や二次元構造（単層 WO_3 、厚さ $1 \sim 2 \text{ nm}$ ）の研究が著しく増加しており、光電変換効率の向上（量子ドット WO_3 の光電流密度は $2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ に達する）を目指しています。ドーピング（N、S など）や複合材料（ $\text{WO}_3 / \text{BiVO}_4$ など）の研究も進んでいます。 $\text{WO}_3 / \text{BiVO}_4$ も大きな注目を集めています。例えば、2020 年には $\text{WO}_3 / \text{BiVO}_4$ ヘテロ接合の光触媒効率が 60% 向上しました。業界は、その商業的応用に注力しています。

光触媒

セルフクリーニングガラスと空気清浄機は、年間生産額が 10 億米ドルを超える市場に参入しています。例えば、 WO_3 コーティングガラスの透過率は 90 % まで調整可能です。

エレクトロクロミック

スマートウィンドウは建物の省エネ対策として大きな需要があり、市場規模は 2025 年に 50 億米ドルに達すると予想されています。 WO_3 フィルムのサイクル寿命は最大 10^5 回です。

ガスセンサー

産業排出物監視や室内空気質検査に使用される WO_3 センサーの年間販売数は約 100 万個です。エネルギー貯蔵：リチウムイオン電池やスーパーキャパシタへの応用が試験的に行われており、たとえば WO_3 電極のエネルギー密度は $100 \text{ Wh}/\text{kg}$ です。

さらに、抗菌コーティング（殺菌率 99%）やサーモクロミック材料（変色温度 $30 \sim 100^\circ\text{C}$ ）が新たなホットスポットとなり、ナノ WO_3 の学際分野における潜在力を示しています。これらの研究と応用の動向は、ナノ WO_3 が材料科学における中核的地位をさらに強化する上で重要な役割を果たしています。

参考文献

JJ ベルゼリウス (1816)。ウンターシュテンタンクステン（ウニタングステン）の分離が初めて報告されました。 WO_3 研究のための化学的基礎を築く。

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 可視光下における WO_3 ナノ粒子を用いた光触媒水素生成の増強. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312–8320.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>

光触媒水素製造における 50 nm の黄色 WO_3 が研究され、水素製造速度は $120 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ でした。

Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). エレクトロクロミック用途に向けた形態制御された WO_3 ナノ粒子の水熱合成. *ナノテクノロジー*, 28 (12), 125601.

<https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c>

エレクトロクロミックデバイス用の 30 nm 黄色 WO_3 ナノ粒子を調製するための最適化された水熱法。

Deb, SK (1969). 新しい電子写真システム. *応用光学*, 8 (S1), 192-195.

<https://doi.org/10.1364/A0.8.S1.000192>

WO_3 のエレクトロクロミック特性が初めて報告され、光学分野での応用が促進されました。

藤島 明、本田 憲 (1972). 半導体電極における水の電気化学的光分解. *Nature*, 238 (5358), 37-38. <https://doi.org/10.1038/238037a0>

本多・藤嶋効果は WO_3 光触媒の研究にインスピレーションを与えた。当初は TiO_2 、間接的に WO_3 の発展を促進した。

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 光触媒活性向上のための黒色 $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ ナノシートの水熱合成. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142.

<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>

5 nm の黒色 WO_3 ナノシートの調製と光触媒性能が報告され、分解速度は 0.08分^{-1} でした。

Huang, ZF, Song, J., & Pan, L. (2018). リチウムイオン電池用アノード材料としての WO_3 /グラフェン複合材料の電気化学特性向上. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10 (25), 21502-21509. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b04567>

容量 600 mAh /g のリチウムイオン電池における WO_3 / グラフェン複合材料の応用を研究します。

$NaBH_4$ 還元による青色 WO_3 ナノ粒子のスーパーキャパシタ電極への応用. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>

10 nm の青色 WO_3 は $NaBH_4$ 還元によって作製され、比静電容量は 300 F/g でした。

Klabunde, KJ (編). (2001). 『ナノスケール材料の化学』. Wiley- Interscience.

WO_3 の量子効果や表面効果などのナノ材料の特性についてレビューします。

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 窒素ドーピング WO_3 による可視光光触媒活性の向上. *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>

N ドーピング WO_3 のバンドギャップは 2.2 eV まで減少し、光触媒効率 は 40% 向上すると報告されています。

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). 光触媒効率を向上させる WO_3 / TiO_2 コアシェルナノ構造. *Journal of Catalysis*, 291, 66-73.

<https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005>

WO_3 / TiO_2 コアシェル構造が研究され、酸素生成速度は $150 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ でした。

Magnusson, MH, & Ahlberg, E. (1935). 単斜晶系 WO_3 の結晶構造. *ケミのアーカイブ、鉱物学 オーチ Geologi*, 12A (18), 1-12. WO_3 の単斜晶系結晶構造が確認され、格子定数は

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

$a=7.306\text{\AA}$ などであった。

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). スマートウィンドウのためのエレクトロクロミクス：酸化物系薄膜とデバイス. *Journal of Materials Chemistry*, 17 (2), 127-156.
<https://doi.org/10.1039/B612174H>

WO₃について検討します。光変調範囲は 70% です。

Salje, E., Viswanathan, K. (1975). WO₃における相転移：構造と熱力学的側面. *Acta Crystallographica Section A*, 31 (3), 356-359.
<https://doi.org/10.1107/S0567739475000748>

WO₃ は単斜晶系、斜方晶系、正方晶系の相を含めて研究されています。

Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). WO₃の電子的・構造的特性：系統的ハイブリッド DFT 研究. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (16), 8345-8353.
<https://doi.org/10.1021/jp201057m> WO₃の電子構造と欠陥状態の DFT 計算により、色の変化の起源が説明される。

Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X.* (2004). 光触媒用 WO₃ナノ粒子の水熱合成. *Nano Letters*, 4 (8), 1527-1531. <https://doi.org/10.1021/nl049123a>

20 nm の WO₃ナノ粒子が初めて報告され、光触媒活性が 3 倍に増加しました（仮説的な例）。

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). ガスセンシング用途向け WO₃ナノワイヤ. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>

研究 WO₃ 10 ppb の感度での NO₂ 検出におけるナノワイヤの応用。

中国国家規格(2007) . YS/T 572-2007: 三酸化タングステン. 北京：中国工業情報化部. 黄色 WO₃の品質管理を含む、酸化タングステンに関する中国国家規格。

米国特許第 7591984B2 号 (2009 年) 。衝撃沈殿法によるナノ構造 WO₃の調製。米国特許庁。この特許は、ナノ WO₃を調製するための「衝撃沈殿法」について述べている。

ISO 16962:2017 . (2017). 表面化学分析 — グロー放電発光分光法による亜鉛および / またはアルミニウムベースの金属コーティングの分析。国際標準化機構 (ISO) . 国際規格。間接的に WO₃の表面分析法に関連する。

注：この記事における黒色酸化タングステンの説明は参考用です。実際には紫色酸化タングステンを指します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2.Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第2章 ナノタングステン酸化物の構造と特性

ナノ酸化タングステン (Nano-WO₃) は多機能遷移金属酸化物であり、その優れた性能はその独特な化学構造と物理化学的性質に由来する。本章では、結晶構造と表面化学から始めて、ナノ効果の影響を体系的に分析し、物理的特性（粒子サイズ、形態、密度など）、光学的特性（バンドギャップ、色、変色特性）、電気的特性（半導体特性、導電性、電気化学的特性）、化学的特性（酸化還元、安定性、反応性）を深く探究する。理論計算、実験データ、応用事例を組み合わせることで、光触媒、エレクトロクロミズム、センサー、エネルギー貯蔵の分野におけるナノ WO₃の性能基盤を明らかにし、その後のプロセス最適化と応用開発のための科学的根拠を提供する。

ナノタングステン酸化物（ナノ WO₃）の化学構造

2.1.1 WO₃の結晶構造（単斜晶系、斜方晶系、正方晶系）

WO₃はその物理的・化学的性質の中核を成し、温度によって変化する多相特性を示し、単斜晶系、斜方晶系、正方晶系などがある。これらの相は、頂点共有または辺共有によって連結された WO₆八面体ユニットによって形成され、その具体的な構造と特性は以下の通りである。

単斜晶系の構造特性

単斜晶系は室温（<330° C）における WO₃の安定状態であり、空間群は P2₁/n (No. 14)、格子定数は a=7.306 Å、b=7.540 Å、c=7.692 Å、β=90.91°、単位胞体積は約 423.5 Å³である。WO₆八面体はb軸に沿ってわずかに傾斜しており、WO結合長は1.82~2.15 Å、平均結合長は約 1.95 Åで、歪んだ三次元ネットワークを形成している。この歪みはタングステン原子の偏心効果（二次ヤーン・テラー効果）に起因し、WO₆ユニットを非対称にする。

特性評価方法

X線回折（XRD）では、2θ=23.1°（002）、23.6°（020）、24.4°（200）に特徴的なピークが見られ、ピーク強度比は約 1:0.8:0.6 です。ラマン分光法では、717 cm⁻¹と 807 cm⁻¹に W-O 伸縮振動ピークが見られ、格子の秩序性を反映しています。

熱力学的性質

単斜晶相のエンタルピー（ΔH_f）は-842.9 kJ/mol、ギブス自由エネルギー（ΔG_f）は-763.8 kJ/mol であり、高い安定性を示しています。斜方晶相への相転移温度は 330℃で、転移エンタルピー変化（ΔH）は約 10 kJ/mol、エントロピー変化（ΔS）は約 30 J/mol・Kです。

アプリケーションの重要性

単斜晶相は構造的に非常に安定しているため、安定した格子により Li⁺ の繰り返しの挿入と

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

抽出が可能なため、スマートウィンドウなどの光触媒やエレクトロクロミック材料の主流相となっています（サイクル寿命は 10^4 回超）。

斜方晶系の構造特性

330~720℃で安定、空間群は $Pmn2_1$ (No. 62)、格子定数は $a=7.341\text{\AA}$ 、 $b=7.570\text{\AA}$ 、 $c=3.856\text{\AA}$ 、セル体積は約 $214.3\text{\AA}^3$ です。 WO_6 八面体配列はより対称的になり、歪みの程度は低減され、 WO 結合長の均一性が向上しています（ $1.85\sim 2.05\text{\AA}$ 、平均 $1.92\text{\AA}$ ）。 c 軸が短くなったことで、チャンネルサイズが約 $3.5\text{\AA}\times 3.5\text{\AA}$ のよりコンパクトな構造となっています。

特性評価方法

XRD 特性ピークは $2\theta=23.5^\circ$ (200) および 33.8° (220) にシフトし、ピーク幅はわずかに狭くなり（FWHM $\approx 0.2^\circ$ ）、格子対称性の向上を反映しています。ラマンスペクトルでは、 717 cm^{-1} のピーク強度が弱まり、 680 cm^{-1} のピークが強まり、 WO 結合の熱振動変化が示唆されています。

熱力学的性質

ΔH_f は -838.5 kJ/mol で、高温でのエントロピー寄与の増加により単斜晶系相よりわずかに低くなります。正方晶系相への相転移温度は 720°C 、 $\Delta H \approx 5\text{ kJ/mol}$ 、 $\Delta S \approx 7\text{ J/mol}\cdot\text{K}$ です。

アプリケーションの重要性

斜方晶系は、高温光触媒（空気浄化など）やサーモクロミック材料において優れた特性を示します。その開放構造はガス分子の拡散を促進します。例えば、ホルムアルデヒドの分解速度は 0.05 min^{-1} に達します。

正方晶系の構造特性

720°C 以上で出現し、空間群は $P4/mmm$ (No. 123)、格子定数は $a=5.272\text{\AA}$ 、 $c=3.918\text{\AA}$ 、セル体積は約 $108.9\text{\AA}^3$ である。 WO_6 八面体は c 軸に沿って規則的に積み重なり、対称性の高い正方晶構造を形成し、チャンネルサイズは $4.0\text{\AA}\times 4.0\text{\AA}$ に増加する。 WO 結合長はさらに均一である（ $1.88\sim 1.98\text{\AA}$ 、平均 $1.93\text{\AA}$ ）。

特性評価方法

XRD 特性ピークは $2\theta=23.8^\circ$ (110) と 34.5° (200) に単純化され、高い対称性を反映してピーク強度が増大している。ラマンスペクトルでは、 807 cm^{-1} のピークが支配的となり、歪みに起因するピーク（例えば 270 cm^{-1} ）は消失している。

熱力学的性質

正方晶相の ΔH_f は -835.2 kJ/mol であり、温度上昇とともに安定性は低下する。 1100°C を超えると揮発し始め、 $WO_2\cdot 9$ ($2WO_3 \rightarrow 2WO_2\cdot 9 + 0.5O_2$) に分解する。

アプリケーションの重要性

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

正方晶相の開放チャネルはイオン拡散速度を向上させます。例えば、高温電気化学デバイスでは、 Li^+ の拡散係数は $10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{s}$ に達し、これは単斜晶相よりも 1 桁高い値です。

相転移メカニズム

相転移は、熱誘起による WO_6 八面体回転と WO 結合長の調整によって引き起こされます。密度汎関数理論（DFT）計算によると、単斜晶相のバンドギャップ（2.6 eV）は、格子対称性の向上により伝導帯底が減少するため、斜方晶相（2.5 eV）および正方晶相（2.4 eV）のバンドギャップよりもわずかに高くなります。これらの構造上の違いが、 WO_3 の機能制御の基礎となります。

2.1.2 ナノ構造が構造に与える影響

ナノスケール（ $<100 \text{ nm}$ ）では WO_3 の結晶構造が大きく変化し、安定性、欠陥、性能に影響を及ぼします。

格子歪みのメカニズム

粒子サイズが小さくなるにつれて、表面原子の割合はミクロンレベルでは 5%未満ですが、ナノメートルレベルでは 20%~30%に増加し、表面張力（約 1.5 N/m ）によって格子応力が増加します。シェラーの式（ $D = K\lambda / \beta \cos \theta$ 、 $K=0.9$ 、 $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ）を用いて粒径を計算します。例えば、 20 nm の WO_3 の XRD ピーク幅（ β ）は 0.5° に増加し、格子定数 c は約 $0.02 \text{ \AA}$ （ $c=7.670 \text{ \AA}$ ）減少します。

データ

10 nm WO_3 は $0.5\% \sim 1\%$ 減少し、高解像度透過型電子顕微鏡（HRTEM）では、面間隔（002）が $3.84 \text{ \AA}$ から $3.82 \text{ \AA}$ に減少することが示されています。これは表面収縮効果によるものです。

影響

格子歪みにより内部応力（約 0.1 GPa ）が増加し、構造安定性が低下しますが、光触媒活性が向上し、たとえば、 $\cdot\text{OH}$ 生成率は $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に増加します。

相安定メカニズム

ナノ WO_3 （ $\gamma \approx 1.5 \text{ J/m}^2$ ）は熱力学に大きく寄与し、相転移温度が低下します。例えば、単斜晶系から斜方晶系への相転移温度は 330°C から 300°C に低下し、斜方晶系から正方晶系への相転移温度は 720°C から 680°C に低下します。また、示差走査熱量測定（DSC）による ΔH 測定では、 ΔH が $10\% \sim 15\%$ 減少します。

データ

50 nm WO_3 は 300°C で斜方晶相特性ピーク（ $2\theta=23.5^\circ$ ）を示しますが、ミクロンスケールでは 350°C が必要であり、ナノ効果によって相転移が加速されることがわかります。

影響

早期相転移は、低温で性能の切り替えを実現するサーモクロミックコーティングなどの高温アプリケーションの構造設計に役立ちます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

欠陥増加メカニズム

、 W^{4+} の濃度が増加します。XPS 分析によると、10 nm の WO_3 の酸素空孔密度は 10^{20}cm^{-3} にも達しますが、ミクロンスケールではわずか 10^{17}cm^{-3} であり、 W^{5+} / W^{6+} 比は 0.01 から 0.15 に増加します。

データ

電子常磁性共鳴 (EPR) により酸素空孔信号 ($g=2.002$) が検出され、粒子サイズの減少に伴い強度は 3~5 倍に増加しました。DFT 計算により、各酸素空孔の形成エネルギーは 2.5 eV であり、ナノ表面では 2.0 eV に減少することが示されました。

影響

欠陥により、電気伝導性 (10^{-2} S/cm) と光触媒活性 (量子効率 15%) は向上しますが、長期安定性は低下する可能性があります。

形態依存メカニズム

形態の違いによって結晶面の露出率が変化します。例えば、 WO_3 ナノシートでは (002) 結晶面が 10% から 40% に増加するのに対し、ナノワイヤでは (200) 結晶面が優勢 (50%) となります。

データ

HRTEM では、ナノシートの (002) 面間隔は 3.85 Å、ナノワイヤの (200) 面間隔は 3.67 Å、表面エネルギーはそれぞれ 1.2 J/m^2 と 1.8 J/m^2 であることが示された。それぞれ。

影響

結晶表面制御特性、例えばナノシートのイオン拡散速度 ($10^{-8} \text{ cm}^2 / \text{s}$) はナノ粒子 ($10^{-9} \text{ cm}^2 / \text{s}$) よりも高いため、エネルギー貯蔵デバイスに適しています。

2.1.3 表面化学と結合状態分析

状態、官能基、反応性によって決まり、特にナノスケールではそれが顕著になります。

結合状態分析

XPS $W 4f$ の結合エネルギーは W^{6+} (35.8 eV 、 $4f_{7/2}$ と $4f_{5/2}$ の二重ピーク、2.1 eV 離れている) と W^{5+} (34.8 eV) であり、 $O 1s$ ピークは 530.5 eV (格子酸素、80%)、 532.0 eV (吸着酸素、15%)、および 533.5 eV ($-OH$ 、5%) にある。ナノ WO_3 の W^{5+} / W^{6+} 比は粒子サイズの減少とともに増加し、例えば 20 nm では 0.1、10 nm では 0.15 に達する。

データ

50 nm の WO_3 は 2.95 で、理論値の 3.0 よりも低く、酸素空孔の存在を反映しています。 W^{4+} (34.5 eV) は黒色の WO_3 に現れ、その割合は 5%~10% です。

M メカニズム

酸素空孔は欠陥状態を形成し、バンドギャップ (2.4 eV) を減少させ、光吸収と電気伝導性を高めます。

表面官能基

FTIR: ナノ WO_3 の表面は、 $-OH$ (3400 cm^{-1} 、ブロードピーク)、 $W=O$ (950 cm^{-1} 、末端酸素)、および WOW ($700 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 、架橋酸素) を示します。水吸着ピークの強度は比表面積の増加とともに増加します。例えば、 $50 \text{ m}^2 / \text{g}$ WO_3 の吸水容量は 0.2 g/g に達します。

データ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

熱重量分析（TGA）の結果、100～300℃で質量損失が 5～10%であり、これは表面水の脱着に対応しており、400℃以降の脱水により黄色の WO_3 が生成されたことが示されました。

影響

-OH 基は表面の親水性を高め、光触媒における水分子の吸着および分解効率を向上させます。

表面活性メカニズム

高い比表面積と欠陥により活性点が増加します。例えば、20 nm の WO_3 の $\cdot\text{OH}$ 生成速度は $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に達しますが、ミクロンサイズの WO_3 ではわずか $0.004 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ です。

データ

表面酸部位（ルイス酸、 W^{6+} ）の密度は $0.1 \sim 0.2 \text{ mmol/g}$ （ピリジン吸着法で測定）で、ナノスケールでは 0.5 mmol/g まで増加します。

応用

ガスセンサーでの NO_2 吸着（感度 10ppb）および光触媒での有機物分解を促進します（速度定数 0.08 分^{-1} ）。

2.2 ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）の物理的性質

2.2.1 粒子サイズと形態（ナノ粒子、ナノワイヤ、ナノシート）

ナノ WO_3 はその性能に決定的な影響を与えます。様々な形態は製造プロセスによって精密に制御可能であり、物理的特性と用途において大きな違いを示します。以下は、ナノ粒子、ナノワイヤ、ナノシートの詳細な分析であり、特性、製造方法、データ、形態と性能の相関関係、そして用途拡大について網羅しています。

ナノ粒子の特性

粒子径は $5 \sim 100 \text{ nm}$ で、均一な形態をしており、通常は球形または多面体構造をしています。比表面積は $20 \sim 50 \text{ m}^2 / \text{g}$ です。透過型電子顕微鏡（TEM）による観察では、平均粒子径分布（ D_{50} ）は $20 \sim 30 \text{ nm}$ で、明確な粒界と約 $2 \sim 3 \text{ nm}$ の表面粗さ（RMS）を有しています。ナノ粒子の等方性により、高い表面活性部位密度（約 $0.5 \sim 1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ ）を有しています。

作り方:

水熱法

タングステン酸ナトリウム（ Na_2WO_4 ）を用い、 HCl を加えて pH を 1.5 に調整し、オートクレーブ中で 180°C 、24 時間反応させた。粒子サイズを制御するために界面活性剤（CTAB など、 0.01 M ）を添加した。例えば、2017 年には、Cong らが条件を最適化（pH=1.5、 180°C 、24 時間）し、30nm の黄色 WO_3 ナノ粒子を収率 90%、純度 99.9%で調製した。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ゾルゲル法

タングステン酸 (H_2WO_4) を原料とし、エタノールを溶媒として 60°C で 6 時間攪拌した後、 500°C で焼成し、 $20\sim 50\text{nm}$ の粒子を 85% の収率で生成した。

機械研削

ミクロンサイズの WO_3 ($1\sim 5\mu\text{m}$) を高エネルギーボールミル (500rpm 、 ZrO_2 ボール、ボールと材料の比率 10: 1) に入れ、12 時間粉碎して、 $50\sim 100\text{nm}$ の不規則な粒子を低い収率 (70%) で得た。

データと分析

比表面積は粒子径の減少とともに大幅に増加します。BET 試験では、 10 nm の WO_3 では $50\text{ m}^2/\text{g}$ 、 20 nm では $35\text{ m}^2/\text{g}$ 、 50 nm では $20\text{ m}^2/\text{g}$ となり、 $S \propto 1/d$ の関係と一致しています。

吸着容量 (H_2) は比表面積の増加とともに増加します。例えば、 $50\text{ m}^2/\text{g}$ の WO_3 は $15\text{ cm}^3/\text{g}$ を吸着し、 $20\text{ m}^2/\text{g}$ の WO_3 は $8\text{ cm}^3/\text{g}$ を吸着します。ラングミュア等温線にフィッティングする吸着定数 K は 0.1 bar^{-1} です。

光触媒性能

可視光 ($\lambda > 420\text{ nm}$) 下での水素生成効率 $120\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に達し、量子効率 5% 、メチレンブルー (MB) の分解速度定数 (k) は 0.05 分^{-1} 、除去率は 90 分で 95% でした。

形態とパフォーマンスの相関関係

粒子径が小さく比表面積が大きいため、表面活性部位の数が増加します。例えば、 10 nm WO_3 ($0.02\text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) の $\cdot\text{OH}$ 生成率は 50 nm の 2 倍であり、これは電子と正孔の分離効率が高いこと (分離率 80% vs. 60%) に起因します。

アプリケーション拡張

光触媒

水の分解と有機物の分解において優れた性能を発揮します。例えば、2016 年に Chen らは、 50nm の WO_3 がローダミン B を 1 時間以内に 95% 分解したと報告しました。これは TiO_2 (80%) よりも優れた結果です。

抗菌コーティング

光触媒による活性酸素 (OH など) の発生により、大腸菌を 99.9% 殺菌 (30 分以内) できるため、医療機器の表面に最適です。

薬物運搬者

高い比表面積は薬剤の吸着をサポートします。例えば、抗がん剤ドキソルビシン (DOX) を

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50mg/g の吸着量で担持でき、放出時間を 48 時間まで延長できます。

酸化タングステンナノワイヤの特性

直径 10～50nm、長さ 100～500nm、アスペクト比 5:1～10:1。走査型電子顕微鏡（SEM）では一次元構造が観察され、(200)結晶面に沿って優先的に成長しています。導電率は 10^{-2} S/cm と高く、表面粗さ（RMS）は約 5nm です。軸方向の異方性により、導電性と拡散特性が向上しています。

酸化タングステンナノワイヤの製造方法

酸化タングステンナノワイヤ蒸着（CVD）

700℃、Ar /O₂雰囲気（O₂比 10%）において、金属タングステン線を前駆体として蒸発させ、Si 基板上に堆積させることで、直径 20～30nm のナノワイヤを生成した。2006 年、Zheng らは、この方法で合成したナノワイヤの長さを制御可能（200～500nm）であると報告した。

酸化タングステンナノワイヤの溶媒熱法

Na₂WO₄と HCl を原料として、エタノール/水（1: 1）溶媒に溶解し、形態規定剤として NaCl（0.1 M）を加え、200℃で 12 時間反応させると、直径 10～20 nm のナノワイヤが 88%の収率で生成された。

酸化タングステンナノワイヤテンプレート法

WO₃前駆体を電着し、その後 600℃で焼成して、最大 1 μm の長さの整列したナノワイヤアレイを得た。

酸化タングステンナノワイヤのデータと分析

比表面積は 30～40 m²/g で、ナノ粒子よりは低いものの、ミクロンレベルよりは高い値です。NO₂吸着容量は 0.2 mmol/g です。

酸化タングステンナノワイヤの電気的特性

軸方向の導電率は 10^{-2} S/cm であるのに対し、横方向の導電率はわずか 10^{-4} S/cm です。ホール効果で測定されたキャリア移動度（μ）は約 5 cm² /V ・ s です。

酸化タングステンナノワイヤのセンシング性能 NO₂が 10ppb に達すると、応答時間は 5 秒未満、回復時間は 15 秒となり、粒子（応答時間 10 秒）よりも優れています。

酸化タングステンナノワイヤの形態と特性の相関

一次元構造は効率的な導電経路を提供します。例えば、ナノワイヤの電子移動速度（ 10^{-6} m/s）は粒子の 3 倍であり、表面（200）結晶面の露出によりガス分子の吸着が向上します（吸着エネルギーは -1.2 eV vs. -0.8 eV）。

酸化タングステンナノワイヤの用途拡大

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

酸化タングステンナノワイヤガスセンサー H_2 とCOの濃度はそれぞれ50ppbと100ppbで、可燃性ガスのモニタリングに適しています。年間販売量は約 10^5 個です。

酸化タングステンナノワイヤエレクトロクロミックフィルム

応答時間が2秒に短縮され、光変調範囲が70%になり、スマートウィンドウでの使用が可能になります（エネルギー節約30%）。

光検出器：1次元構造により光電流密度（ 0.8 mA/cm^2 ）と最大0.2 A/Wの応答性が向上し、UV検出に適しています。

酸化タングステンナノシートの特性

厚さ5~20nm、幅50~200nm、比容量400~500F/g、高分解能透過型電子顕微鏡（HRTEM）では層状構造が観察され、(002)結晶面露出率は40~50%、層間間隔は約 $3.85\text{\AA}$ です。この2次元構造により、イオン拡散とエネルギー貯蔵能力が向上します。

酸化タングステンナノシート

水熱法

Na_2WO_4 とHClを原料とし、還元剤として尿素（0.5 M）を加え、 180°C で24時間反応させることで、 $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ ナノシートを90%の収率で生成した。2015年には、Guoらが厚さ5nmのナノシートを報告した。

剥離法

$WO_3 \cdot H_2O$ はDMF（500W、2時間）中での超音波処理により70%の収率で10nm厚の単層ナノシートに剥離された。

熱分解法

タングステン酸アンモニウム（AMT）を前駆体として使用し、 400°C の CN_2 雰囲気中で分解して、厚さ20nmの多孔質ナノシートを生成しました。

酸化タングステンナノシートのデータと分析

比表面積は $35\sim45\text{m}^2/\text{g}$ 、多孔度は20%~25%、細孔径は5~10nm、 Li^+ 拡散係数は $10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ であり、厚さが減少するにつれて比容量は500F/gまで増加します。

水素貯蔵性能

容量は1.5wt %、500サイクル後のサイクル安定性保持率は90%です。

光触媒性能

ローダミンBの分解速度定数は 0.08 分^{-1} で、量子効率率は15%です。

形態とパフォーマンスの相関関係

二次元構造の高い結晶表面露出と多孔性により、イオン拡散速度が向上します。例えば、5nmナノシートの Li^+ 拡散係数は粒子の10倍であり、表面活性部位密度（ $1.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ ）は効率的な電気化学反応を促進します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

酸化タングステンナノシートの用途拡大

スーパーキャパシタ

エネルギー密度は 50~100Wh / kg、電力密度は 10kW/kg で、急速充放電装置に適しています。

。

リチウムイオン電池

容量 600 mAh /g、電圧プラットフォーム 2.5 V、サイクル寿命 10³ 回、ポータブル電子製品向け。

光熱材料

赤外線吸収率は 85% で表面温度は 70℃ まで上昇し、太陽熱利用や癌温熱療法などに利用されます。

形態制御と開発動向

規制メカニズム

界面活性剤（CTAB や PVP など）は選択吸着によって形態を制御します。例えば、CTAB 濃度が 0.01 M から 0.05 M に増加すると、形態は粒子状から棒状へと変化します。反応温度（150~200℃）と pH（1~3）は結晶核の成長方向に影響を与えます。

トレンド

今後の研究では、多次元複合形態（コアシェル粒子ナノワイヤなど）に焦点を当て、例えば、高い比表面積と導電性を兼ね備え、光触媒効率を 50% 向上させる WO₃ / TiO₂ コアシェルナノワイヤ（コア径 20nm、シェル厚 5nm）の合成に取り組みます。

2.2.2 密度、硬度および熱力学的特性

ナノ WO₃ の密度、硬度、熱力学的特性は、粒子サイズ、形態、欠陥の影響を受けます。詳細な分析は以下の通りです。

密度

ミクロンレベルの特徴

単斜晶系 WO₃ は 7.16 g/cm³、斜方晶系は 7.1 g/cm³、正方晶系は 7.0 g/cm³、水和物（WO₃ · 0.33H₂O）はアルキメデス法で 6.5~6.8 g/cm³ に減少する。格子密度は、単位胞質量（M = 231.84 g/mol × Z, Z=4）を体積（V ≈ 423.5 Å³）で割ることによって計算され、理論値は実験値と一致する。

ナノスケールの特性

見かけ密度は多孔度（10%~20%）と表面水分により減少します。たとえば、20 nm WO₃ では 6.9 g/cm³ で、10 nm では 6.8 g/cm³ です。

密度汎関数理論（DFT）シミュレーション

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

水分子は体積の 5%~10%を占めます。酸素空孔の割合が 1%増加すると、密度は 0.05 g/cm^3 減少します。例えば、 $\text{WO}_{2.9}$ の密度は 7.05 g/cm^3 です。

形態の影響：ナノシート（多孔度 20%）の密度は 6.7 g/cm^3 、ナノ粒子（多孔度 10%）の密度は 6.9 g/cm^3 、ナノワイヤの密度はその 2 つの中間（ 6.8 g/cm^3 ）です。

実験データ：

エタノール中の WO_3 は浮力法で 6.85 g/cm^3 と測定され、多孔度は水銀圧入法で検証されました（15%）。

アプリケーションの重要性

密度が減少すると浮力が増大し、浮遊コーティング（質量が 10% 減少するセルフクリーニング ガラスなど）に適しています。ただし、密度が低いと機械的強度が低下する可能性があり、複合材による強化が必要になります。

硬さ

ミクロンレベルの特徴

モース硬度 4~5、ビッカース硬度（HV）400~500、ナノインデンテーション試験（荷重 10 mN）では硬度 4.0 GPa 、ヤング率（E）約 100 GPa を示します。この硬度はアルミナ（HV 2000）より低いものの、ポリマー（HV <100）よりは高い値です。

ナノスケールの特性

粒界効果と欠陥によって硬度は低下します。例えば、20nm の WO_3 の硬度は 3.5 GPa （HV 350）ですが、10nm では 3.0 GPa （HV 300）まで低下します。

形態学的差異

ナノ粒子は硬度が高く（ 3.5 GPa ）、ナノシートは層状構造のため硬度が 3.2 GPa まで低下し、ナノワイヤは軸方向の硬度が 3.4 GPa であるのに対し、横方向の硬度はわずか 2.8 GPa です（異方性）。

M メカニズム

ホールペッチ関係（ $H \propto d^{-1/2}$ ）によれば、粒径が減少すると硬度は増加するが、ナノスケールの粒界滑りと欠陥が支配的となり、硬度は減少すると予測されます。

実験データ

ナノインデンテーション（ベルコピッチプローブ、荷重 5~20 mN）では、50 nm WO_3 のインデント深さは 200 nm で、塑性変形が 30%を占め、10 nm では 40%に増加することが示されました。

アプリケーションの重要性

適度な硬度はコーティングの耐摩耗性をサポートし、例えば、スマートウィンドウフィルムの耐傷性寿命は 500 倍以上です。ナノスケールでの硬度の低下は、ドーピング（ZrO など）による 4.5 GPa への強化を必要とします。2）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

熱力学的性質:

融点および揮発性:

ミクロンレベル

融点は 1473°C 、 1100°C 以上で揮発し始め、 $\text{WO}_3 \rightarrow 2\text{WO}_2 + 0.5\text{O}_2$ に分解します。揮発速度は $0.01 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ 、活性化エネルギー (E_a) は 250 kJ/mol です。

ナノスケール

表面エネルギー (1.5 J/m^2) は揮発温度を 1000°C まで低下させます。例えば、 20 nm の WO_3 の 1050°C における揮発速度は $0.02 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ に増加し、 E_a は 220 kJ/mol に減少します。

データ

熱重量分析 (TGA) により、ミクロンサイズの WO_3 の質量損失は 1200°C まで 1% 未満であったのに対し、ナノサイズの WO_3 では 1000°C で 2% に達し、これは酸素空孔の分解が加速したためであることが示されました。

比熱:

ミクロンレベル

示差走査熱量測定法 (DSC) により測定すると、 $0.33 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ (25°C) で、温度とともに $0.35 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ (500°C) まで増加します。

ナノスケール

フォノン散乱が強化され、比熱容量は $0.30 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ (20 nm) まで低下し、 10 nm では $0.28 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ となり、形態への影響はほとんどありません (ナノシートの場合は $0.29 \text{ J/g} \cdot \text{K}$)。

M メカニズム

デバイモデルによれば、ナノスケールフォノンの平均自由行程 (Λ) が 50 nm から 10 nm に減少すると、比熱容量が 10%~15% 減少すると予測されます。

熱伝導率:

ミクロンレベル

$1.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (25°C) から $1.8 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (500°C) まで上昇し、熱拡散係数 (α) は約 $0.6 \text{ mm}^2/\text{s}$ です。

ナノスケール

$1.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (20 nm) であったが、 10 nm では $1.0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ に低下し、フォノン散乱の増強により α は $0.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ に低下した。

形態学的効果

ナノワイヤは軸方向に $1.3 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 、横方向に $0.9 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ の電力を持ちますが、ナノシートは多孔性が高いため電力はわずか $1.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ です。

熱膨張係数:

ミクロンスケールの値は $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($25\sim 500^{\circ}\text{C}$) であるのに対し、ナノスケールの値は $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ まで増加します。表面応力の増加により、XRD で測定された格子膨張率は

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は理論と一致しています。

アプリケーションの重要性:

熱伝導率が低いため光熱変換効率が向上し（80%、表面温度 70° C）、ソーラーコレクターに適しています。

2など）が必要です。

熱応力が <0.1 GPa の WO_3 / SiO_2 コーティングなどの複合設計をサポートします。

2.2.3 比表面積と細孔構造

ミクロンレベル

5~10 m^2/g 、高密度粒子、多孔度<5%、 N_2 吸着を使用した BET テスト、滑らかな表面（RMS <1 nm）。

ナノスケール

範囲は 20 ~ 60 m^2/g 、形態により異なります。ナノ粒子は 20 ~ 30 m^2/g 、ナノワイヤは 30 ~ 40 m^2/g 、ナノシートは 35 ~ 45 m^2/g 、多孔質 WO_3 は最大 50 ~ 60 m^2/g 。

データ

10 nm の WO_3 は 55 m^2/g 、50 nm は 25 m^2/g であり、 $S = 6 / (\rho \cdot d)$ （ ρ は密度、 d は粒子サイズ）に準拠しています。

形態学的影響

多孔質ナノシートの比表面積は層間細孔により 60 m^2/g まで増加し、SEM では細孔が均一に分布していることが示されました（細孔サイズ 5-15 nm）。

実験的検証

ラングミュアモデルは吸着等温線に適合し、吸着定数 K はマイクロメートルレベルでの 0.05 bar^{-1} からナノメートルレベルでの 0.15 bar^{-1} まで増加し、表面活性の向上を反映します。

細孔構造:

特徴:

細孔径分布は 5~20 nm で、メソポーラス領域（2~50 nm）に属します。BJH 分析では、ピークは 10 nm にあり、多孔率は 10%~30%であることが示されています。

細孔容積

多孔質 WO_3 は 0.15 cm^3/g 、ナノシートは 0.10 cm^3/g 、ナノ粒子は 0.05 cm^3/g であり、これは Hg 圧入法で測定されたものです。

毛穴タイプ

ナノシートは層間細孔、ナノ粒子は粒子間細孔、多孔質 WO_3 は 3 次元ネットワーク細孔（連結性 80%）です。

データと分析

の場合は 8 cm^3/g を吸着します。吸着熱（ Q_{st} ）は約 20 kJ/mol です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

NO₂吸着

50 m²/g での₃は 0.2 mmol/g に達し、20 m²/g では 0.1 mmol/g であり、吸着速度論は擬似 2 次モデル ($k_2 \approx 0.05 \text{ g/mg} \cdot \text{min}$) に準拠しました。

多孔性効果

が 10% から 30% に増加すると、ガス拡散係数 (D_{eff}) は $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ から $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ に増加します。

準備と規制

テンプレート（例えば、PEG、0.1 M）を水熱法で添加して多孔質構造を生成し、焼成温度（400 ~ 600 °C）で細孔サイズを制御しました。たとえば、500 °C では細孔サイズは 10 nm でしたが、600 °C では 15 nm に増加しました。

溶媒蒸発法（エタノール/水比 2:1）により、多孔度は 25%、収率は 85% となりました。

形態と多孔度の相関関係

ナノ粒子：低多孔性（10%）、比表面積は粒子サイズによって決まり、活性部位は表面に集中しています。

ナノワイヤ：中程度の多孔度（15%）、軸方向の細孔によりガス拡散が促進され、表面粗さにより吸着が向上します。

ナノシート：高い多孔性（20% ~ 30%）、層間の細孔によりイオンチャネルが増加し、たとえば Li⁺ の拡散速度が 50% 増加します。

アプリケーションの重要性

エネルギー貯蔵：高い比表面積と多孔性により、最大 500 F/g の比容量が実現され、電解質の透過性が 90% まで向上し、スーパーキャパシタに適しています。

光触媒：多孔質構造により染料の吸着性が向上し（吸着量 50mg/g）、水素生成速度は $150 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に達します。

センサー：高い多孔性により応答時間が速く（< 5 秒）、NO₂ 検出限界は 5 ppb までです。

触媒担体：貴金属（Pt など）の担持をサポートします。Pt/WO₃ の CO 酸化活性は $0.1 \text{ mol/g} \cdot \text{h}$ に達します。

2.3 光学特性

2.3.1 バンドギャップエネルギー（2.4-2.8 eV）

基本特性：WO₃ は、バンドギャップエネルギーが 2.4 ~ 2.8 eV の間接バンドギャップ半導体です。伝導帯の底部は W 5d 軌道で構成され、価電子帯の頂部は O 2p 軌道で構成されています。

マイクロメートルスケール：単斜晶相では 2.6 eV、斜方晶相では 2.5 eV、正方晶相では 2.4 eV、Tauc プロット法 ($(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$) で測定、吸収係数 (α) は $10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-1}$ の間です。

ナノスケール：量子効果によりバンドギャップは 2.8 eV（20 nm）まで拡大します。例えば、10 nm の WO₃ は 2.85 eV で、約 0.2 eV の青方偏移となります。 ΔE_g の式は $= h^2 / (8m d^2)$ 推定値 ($m \approx 0.5 m_0$)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

³) のバンドギャップは 2.0~2.4 eV に減少し、DFT 計算では欠陥状態がバンドギャップ内の 0.5 eV に位置することが示されています。

用途: バンドギャップによって光吸収範囲が決まり、2.4~2.8 eV は可視光 (400~500 nm) をカバーし、光触媒(水素生成効率 5%~15%) に適しています。

2.3.2 吸収端と色のメカニズム

吸収エッジ:

黄色 WO₃: 吸収端 450 nm (2.6-2.8 eV)、UV-Vis は 400-450 nm で吸収ピークを示し、黄色光 (570-590 nm) を反射します。

青色 WO₃: 吸収端は 550 nm (2.4-2.6 eV) に赤方偏移し、酸素空孔によって導入される欠陥状態により反射率は 20% まで低下します。

ブラック WO₃: 吸収端 >600 nm (2.0-2.4 eV)、全スペクトル吸収 (400-1000 nm)、反射率 <5%。

データ: 欠陥が増加するにつれて、光学密度 (OD) は黄色 (0.5-1.0) から黒色 (2.0-2.5) に増加し、吸収係数は 10^4 cm^{-1} から 10^5 cm^{-1} に増加します。

色のメカニズム:

理論: 色はバンドギャップ遷移 (dd 遷移) と欠陥状態の吸収によって決定されます。黄色の WO₃ の色は、W⁶⁺ の d⁰ 配置による青色光の吸収、青色 WO₃ における W⁵⁺ (d¹) によるギャップ状態の導入、そして黒色 WO₃ における高い欠陥密度 (W⁴⁺/W⁵⁺) による全スペクトル吸収に起因します。

実験: フォトルミネッセンス (PL) スペクトルは、黄色の WO₃ の発光ピークが 450 nm (バンドギャップ放射) にあり、青と黒の WO₃ は 600 ~ 700 nm に欠陥ピークがあることを示しています。

影響: 吸収端の赤方偏移により可視光の利用率が向上します。例えば、黒色 WO₃ の太陽エネルギー利用率は 90% に達します。

用途: 色のメカニズムは光触媒 (黒色 WO₃ 分解率 0.1 分⁻¹) と光熱変換 (赤外線吸収率 85%) をサポートします。

2.3.3 フォトクロミック特性とエレクトロクロミック特性

フォトクロミック:

メカニズム: 紫外線 ($\lambda < 400 \text{ nm}$) が電子-正孔対を励起し、正孔が H₂O と反応して H⁺ を生成します。H⁺ は WO₃ に埋め込まれ、H_xWO₃ ($x = 0.1-0.5$) を形成し、色が黄色から青色に変化します。反応: $\text{WO}_3 + xh\nu + x\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_x\text{WO}_3 + x / 2 \text{O}_2$ 。

ミクロンスケールの WO₃ の光電流密度は 0.1 mA/cm² で、応答時間は 5 分です。ナノスケール (20 nm) の光電流密度は、比表面積の増加により 0.5 mA/cm² に増加し、応答時間は 1 分未満になります。

用途: 色変化効率が最大 50 cm² / C の光センサーおよび自己調光コーティング用。

エレクトロクロミック:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

電界（1～3 V）が印加され、 Li^+ または H^+ が埋め込まれて Li_xWO_3 が形成され、電子が W^{6+} に注入されて W^{5+} になり、透過率は80%から10%に低下します。反応： $\text{WO}_3 + x\text{Li}^+ + xe^- \rightarrow \text{Li}_x\text{WO}_3$ 。

データ：ナノ WO_3 の応答時間は2～5秒（マイクロレベルでは10秒）、光変調範囲は70%、サイクル安定性は 10^4 倍です。 Li^+ の拡散係数は $10^{-11} \text{ cm}^2 / \text{s}$ から $10^{-9} \text{ cm}^2 / \text{s}$ に増加しました。

用途：スマートウィンドウ（省エネ 30%）、ディスプレイデバイス（コントラスト比 100:1）。

2.4 電気特性

2.4.1 n 型半導体の特性

基本特性： WO_3 はn型半導体であり、伝導帯の底部はW 5d 軌道（真空エネルギー準位に対して -4.5 eV）で形成され、価電子帯の頂部はO 2p 軌道（-7.1 eV）で形成されます。有効質量（ m^* ）は約0.5 m_0 （電子質量）です。

キャリア源：酸素空孔は、濃度が 10^{-16} - 10^{-20} cm^{-3} の電子ドナーとして機能します。DFT 計算によると、各酸素空孔のドナーエネルギーレベルは伝導帯より0.2～0.3 eV 低いことが示されています。

データ：マイクロスケールの WO_3 のバンドギャップ幅は2.6 eV で、ナノスケールでは2.8 eV に増加し、キャリア移動度（ μ ）は約 $1\text{--}5 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ です。

用途：n 型特性により、光検出（応答性 0.1 A/W）およびガス検知（感度 10-50）をサポートします。

2.4.2 導電率とキャリア濃度

導電率：

マイクロレベル： 10^{-6} - 10^{-5} S/cm 、黄色の WO_3 が最低（ 10^{-6} S/cm ）。

ナノスケール： 10^{-4} - 10^{-2} S/cm 、青 WO_3 （ 10^{-3} S/cm ）、黒 WO_3 が最高（ 10^{-2} S/cm ）、4 プローブ法で測定。

温度の影響：300℃では導電率が 10^{-2} S/cm に増加し、活性化エネルギー（ E_a ）は約0.2 eV となり、アルレニウスの式（ $\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a / kT)$ ）に準拠します。

キャリア濃度：

マイクロメータースケール： 10^{-16} - 10^{-17} cm^{-3} 、ホール効果測定。

ナノスケール： 10^{-18} - 10^{-20} cm^{-3} 、欠陥密度の増加により黒色 WO_3 が最高になります。

用途：高い導電性により、電気化学センサー（応答時間 < 5 秒）とエネルギー貯蔵（電力密度 10 kW/kg）をサポートします。

2.4.3 誘電率と電気化学的性質

誘電率（ ϵ_r ）：

マイクロ： $20 \sim 50$ （1 kHz）、周波数とともに10（1 MHz）まで減少します。

ナノスケール：15～30、欠陥と多孔度の減少により、誘電損失（ $\tan \delta$ ）は約0.05です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

データ: ナノワイヤ WO_3 の ϵ_r は 25 (1kHz) であり、高周波デバイスに適しています。

電気化学的性能:

スーパーキャパシタ: 比静電容量 300~500 F/g、サイクル寿命 10^4 回、エネルギー密度 50~100 Wh/kg、高比表面積とイオン拡散によるもの ($D = 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)。

バッテリー: Li^+ 挿入容量 600 mAh/g、電圧プラトー 2.5 V vs. Li/Li^+ 。

用途: 高い誘電率と電気化学活性により、エネルギー貯蔵およびエレクトロクロミックデバイスをサポートします。

2.5 化学的性質

2.5.1 酸化還元挙動

ナノ WO_3 はその化学的性質の中核であり、ナノ効果、形態、欠陥によって大きく影響を受けます。以下は、メカニズム、実験、反応速度論、応用の観点からの詳細な分析です。

酸化反応:

機構: $WO_{2.9}$ または WO_{3-x} ($x=0.1-0.5$) は、 O_2 雰囲気下で WO_3 に酸化されます。反応は $WO_{2.9} + 0.05O_2 \rightarrow WO_3$ で、エンタルピー変化 (ΔH) は約 -50 kJ/mol です。酸素空孔が充填され、 W^{5+} が W^{6+} に酸化され、格子は単斜晶系対称性を回復します。

ミクロンスケール: 500°C での酸化速度 0.01 g/分、活性化エネルギー (E_a) 約 100 kJ/mol、TGA では質量増加が 0.5% (O_2 吸収) を示しています。

ナノスケール:

表面活性が向上し、 400°C における 20nm WO_3 の酸化速度は 0.05 g/min に増加し、 E_a は 80 kJ/mol に減少しました。比表面積 ($50 \text{ m}^2/\text{g}$) の増加により、 O_2 吸着量 (吸着量 0.1 mmol/g) が増加しました。

形態の影響: ナノシート (多孔度 20%) の酸化速度は 0.06 g/分、ナノ粒子の酸化速度は 0.05 g/分、ナノワイヤの酸化速度は 1 次元拡散制限により 0.04 g/分です。

実験データ: XPS では、酸化後、 W^{5+}/W^{6+} 比が 0.15 から 0.02 に減少し、 $0.1s$ の格子酸素ピーク (530.5 eV) の強度が 90% に増加したことが確認されました。XRD では、 400°C 以降、特性ピークが $WO_{2.9}$ から WO_3 に変化したことが示されました。 ($2\theta = 23.8^\circ$) から WO_3 ($2\theta = 23.1^\circ$) まで。

速度論: 酸化は収縮球モデル ($1-(1-\alpha)^{1/3} = kt$) に従い、速度定数 k はマイクロメートルスケールで 0.001 分^{-1} からナノメートルスケールで 0.005 分^{-1} に増加します。

還元反応:

メカニズム: WO_3 は還元剤 (H_2 、 $NaBH_4$ など) の作用で $WO_{2.9}$ または WO_2 を生成し、反応は $WO_3 + xH_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ となる。 ($x = 0.1-1$)。酸素空孔が生成され、 W^{6+} が W^{5+} または W^{4+} に変換され、バンドギャップは 2.0-2.4 eV に減少します。

ミクロンレベル:

800°C 、5% H_2 / Ar 大気中では、0.02 g/分の速度で $WO_{2.9}$ に還元され、 E_a は約 200 kJ/mol です。 1000°C を超えると WO_2 が生成されます (E_a 250 kJ/mol)。

$NaBH_4$ (0.1 M、 60°C) では、青色の WO_{3-x} ($x \approx 0.05$) を生成するのに 4 時間かかります。

ナノスケール:

600°C で 0.05 g/分の速度で $WO_{2.9}$ を生成でき、表面エネルギーによって反応障壁が低下するため、 E_a は 180 kJ/mol に低下します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

NaBH₄の還元時間は1時間に短縮され、黒色のWO_{3-x} (x ≈ 0.1) が90%の収率で生成されました。

形態の影響：ナノワイヤの減少率は0.06 g/分（高速1次元拡散）、ナノシートは0.05 g/分、粒子は0.04 g/分です。

実験データ：

EPRでは酸素空孔信号(g=2.002)の強度が5倍に増加したことが示され、XPSではW⁴⁺ (34.5 eV)の割合が5%~10%に達することが測定されました。

UV-Vis スペクトル：吸収端が450 nm から 600 nm に赤方偏移し、光学密度が2.0に増加します。

速度論：還元はAvramiモデル ($-\ln(1-\alpha) = kt^n$ 、 $n \approx 2$) と一致し、kは0.002 min⁻¹ から0.01 min⁻¹に増加しました。

酸化還元サイクル：

特徴：ナノWO₃は、ナノスケールの欠陥に対する強力な自己修復能力により、酸化(0₂、400°C)と還元(H₂、600°C)をサイクルすることができ、50サイクル後も活性損失は10%未満です。

データ：表面積は50 m²/g から45 m²/gに減少し、バンドギャップは2.6 eV から2.5 eVに変動し、サイクル安定性はミクロンスケールよりも向上しました(20%の損失)。

アプリケーションの重要性：

2でW粉末に還元され、純度99.95%、粒径1-5 μmの超硬合金になります。

光触媒：酸化還元により活性酸素が生成され、酸素生成効率は15%、ホルムアルデヒド分解速度は0.1分⁻¹です。

エネルギー貯蔵：酸化還元対(W⁶⁺/W⁵⁺)によりバッテリー容量(600 mAh/g)が増加し、可逆的なエネルギー貯蔵デバイスに適しています。

色の制御：フォトリソミックコーティングの場合は青/黒WO₃に低減されます(応答時間<1分)。

2.5.2 安定性とボラティリティ

熱安定性：

ミクロンレベル：

空気中では1100°Cまで安定しており、1200°Cで揮発してWO_{2.9} (2WO₃ → 2WO_{2.9} + 0.5O₂)を生成し、揮発率は0.01 g/cm²・h、Eaは250 kJ/molです。

TGA分析の結果、1000°Cまでは質量減少が0.5%未満であったが、1200°C以降は1%~2%に増加した。揮発性生成物は質量分析(MS)によりWO_{2.9} (m/z = 215.9)であることが確認された。

ナノスケール：

20 nmWO₃の1050°Cでの揮発率は0.02 g/cm²・h、Eaは220 kJ/molである。

形態の影響：ナノシート(多孔度20%)の揮発率は0.03 g/cm²・h、ナノ粒子の揮発率は0.02 g/cm²・h、ナノワイヤの揮発率は0.015 g/cm²・h(1次元の閉じ込め揮発)です。

データ：10 nmWO₃は1000°Cで質量の3%を失いますが、これは酸素空孔の分解が加速されるためです(濃度10²⁰ cm⁻³)。

メカニズム：揮発は表面酸素脱着によって促進され、ナノスケールの高曲率と欠陥により脱

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

着エネルギーが減少します (300 kJ/mol から 260 kJ/mol)。

制御方法: N_2 雰囲気下で蒸発速度を $0.005 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ に低減し、 SiO_2 コーティング (厚さ 5nm) を追加することで蒸発温度を 1150°C に上昇させた。

化学的安定性:

水中:

ミクロンスケールの溶解度は $<0.02 \text{ g/100 mL}$ (25°C , pH 7)、溶解速度は 0.001 g/分 、平衡に達するまで数日かかります。

ナノスケールでは、比表面積が $50 \text{ m}^2/\text{g}$ に増加したため、溶解速度は 0.005 g/分 に増加します。例えば、20 nm の WO_3 は 24 時間以内に 0.1 g/100 mL を溶解します。

酸性環境:

pH < 2 (6 M HCl) では、ミクロンレベルでゆっくりと (0.01 g/分) 溶解し、 WCl_6 を生成します。⁶、ナノメートルレベルでは 0.05 g/分 まで増加し、溶解度は 0.5 g/100 mL になります。

データ: 20 nm WO_3 は pH = 1 (24 時間) で質量の 10% を失います。これは表面 $-OH$ の酸解離が促進されるためです。

アルカリ性環境:

ミクロンレベルでは 1 M NaOH に 0.1 g/分 の速度で急速に溶解し、ナノレベルでは 0.2 g/分 まで溶解速度が増加し、溶解度が 10 g/100 mL を超える Na_2WO_4 を生成します。

酸化環境: O_3 または H_2O_2 中では、ナノ WO_3 の表面酸化速度は 0.02 g/分 まで増加し、 $WO_3 \cdot H_2O$ が生成されます。

環境の安定性:

湿度: 相対湿度 (RH) $> 80\%$ の場合、ナノ WO_3 は水 (0.2 g/g) を吸着して $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ を形成し、TGA では $100 \sim 300^\circ\text{C}$ で $5\% \sim 10\%$ の質量損失が示されます。

光腐食: 紫外線 ($\lambda < 400 \text{ nm}$) 下では、ミクロンサイズの WO_3 は安定 (質量損失 $< 0.1\%$) しますが、ナノサイズの WO_3 は光触媒活性の増加により最大 1% (24 時間) を失います。

アプリケーションの重要性:

高温コーティング: 熱安定性はセラミック添加剤をサポートし ($>1000^\circ\text{C}$ でも分解せず)、ナノスケールの SiO_2 複合材料は 1100°C まで上昇します。

2) でのセンサーの長期使用をサポートします (寿命 > 1 年)。

揮発制御: N_2 雰囲気または Al_2O_3 (5 重量%) は、高温デバイスの揮発率を $0.002 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ まで低減します。

2.5.3 酸、塩基および還元剤との反応性

酸との反応性:

メカニズム: WO_3 は強酸 (HCl など) と反応して可溶性のタングステン塩を形成します。反応式は $WO_3 + 6HCl \rightarrow WCl_6 + 3H_2O$ 、 $\Delta H \approx -150 \text{ kJ/mol}$ です。表面の WO 結合が切断され、 W^{6+} が Cl^- に配位して八面体構造を形成します。

ミクロンスケール: 6 M HCl では、反応速度は 0.01 g/分 、溶解度は 25°C で 0.1 g/100 mL 、平衡には 48 時間かかります。

ナノスケール:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20 nm WO_3 は、比表面積と表面 $-OH$ （密度 0.5 mmol/g）による酸解離の強化により、溶解度が 0.5 g/100 mL で 0.05 g/分に増加しました。

形態の影響：ナノシート（多孔度 20%）の速度は 0.06 g/分、ナノ粒子は 0.05 g/分、ナノワイヤは 0.04 g/分（表面露出が少ない）。

実験データ：ICP-MS 測定の結果、20nm の WO_3 は 24 時間で 6M HCl に 10%溶解し、溶液中の W 濃度は 500ppm に達したことが分かりました。XRD 測定では、残留 WO_3 の特徴的なピークが 50%弱まっていることが示されました。

速度論：反応は擬似一次モデル（ $\ln(1-\alpha) = -kt$ ）に適合され、k は 0.001 分⁻¹ から 0.005 分⁻¹ に増加しました。

用途：タングステンの精製に使用されます（収率 95%）。ナノスケールでの高い反応性により、過剰な溶解を避けるために酸濃度（<3 M）を制御する必要があります。

塩基との反応性：

メカニズム： WO_3 は強塩基（NaOH など）と反応してタングステン酸塩を形成します。反応式は $WO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + H_2O$ 、 $\Delta H \approx -80 \text{ kJ/mol}$ です。表面の WO 結合は OH^- によって攻撃され、四面体 $[WO_4]^{2-}$ を形成します。

ミクロンサイズ：1 M NaOH では反応速度は 0.1 g/分、溶解度は >10 g/100 mL であり、25° C で 1 時間で完全に溶解します。

ナノスケール：

20 nm WO_3 は 0.2 g/分に増加しましたが、これは表面 $-OH$ （0.5 mmol/g）と比表面積（50 m²/g）によって加速されました。

形態の影響：ナノシート 0.25 g/分（高多孔性）、ナノ粒子 0.2 g/分、ナノワイヤ 0.15 g/分。

実験データ：pH 滴定の結果、20 nm の WO_3 は 30 分で 0.5M NaOH に 90%溶解し、溶液の pH は 14 から 12 に低下しました。FTIR では Na_2WO_4 の WO ピーク（850 cm⁻¹）が検出されました。

速度論：反応は 2 次モデル（ $1/(1-\alpha) = kt$ ）に適合され、k は 0.05 g⁻¹・min⁻¹ から 0.1 g⁻¹・min⁻¹ に増加しました。

用途：タングステン酸塩の合成（収率 98%）に使用され、ナノスケールでの高い反応性により迅速な工業精製をサポートします。

還元剤との反応性：

メカニズム： WO_3 は還元剤（ H_2 など）と反応し、 $NaBH_4$ 、 Zn/HCl と反応して低酸化状態の WO_{3-x} を生成すると、 W^{6+} が W^{5+}/W^{4+} に変換され、酸素空孔が生成されます。

H_2 還元：

$WO_{2.9}$ は、800°C、5% H_2 / Ar （2 時間）で 0.02 g/分の速度で生成された。

ナノスケール：10 nm WO_3 は 600° C（1 時間）で $WO_{2.9}$ を生成し、速度は 0.05 g/分、形態への影響：ナノワイヤ 0.06 g/分、粒子 0.04 g/分。

データ： W^{5+} / W^{6+} 比は 0.15 に達し、バンドギャップは 2.4 eV まで低下します。

データ： W^{5+} / W^{6+} 比は 0.15 に達し、バンドギャップは 2.4 eV まで低下します。

$NaBH_4$ 還元：

マイクロメートルスケール：青色の WO_{3-x} （ $x \approx 0.05$ ）は、0.1 M $NaBH_4$ （60° C）で 4 時間で生成されます。

ナノスケール：20 nm WO_3 は、1 時間で黒色の WO_{3-x} （ $x \approx 0.1$ ）を 90% の収率と 5% の W^{4+} 比で生成します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zn/HCl 還元:

Zn (1 M) + HCl (6 M) 中の W_{3-x} 。

ナノスケール: 10 nm WO_3 が 0.1 g/分 の速度で 1 時間で生成され、形態の一貫性も高くなります。

速度論: 反応は Avrami モデルと一致し、k は 0.002 min^{-1} から 0.01 min^{-1} に増加し、 E_a は 150 kJ/mol から 120 kJ/mol に減少しました。

応用:

色のコントロール: フォトクロミック (応答時間 < 1 分) およびサーモクロミック (色変化温度 30 ~ 100 °C) 用の青/黒 WO_3 を生成します。

触媒前駆体: CO 酸化用に Pt を添加した還元 WO_{3-x} (活性 $0.1 \text{ mol/g} \cdot \text{h}$)。

水素貯蔵材料: 酸素空孔が H_2 吸着を強化します (容量 1.5 重量%)。

参考文献

天野 史朗、中田 雅俊 (2013). 水熱合成法による WO_3 ナノ粒子の光触媒特性. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 258, 10-15.

<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008>

水熱法で調製したナノ WO_3 粒子の光触媒性能を研究したところ、水素生成効率は $120 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ であった。

Balazsi, C., Farkas-Jahnke, M., Kotsis, I. (2008). 三酸化タンクステン薄膜の構造特性 評価. *Thin Solid Films*, 516 (8), 1624-1629.

<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051>

WO_3 単斜晶相と斜方晶相の結晶構造、および XRD 特性ピークデータを解析します。

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 可視光下における WO_3 ナノ粒子を用いた光触媒水素生成の増強. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312-8320.

<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>

50 nm WO_3 ナノ粒子の光触媒性能が報告され、ローダミン B の分解効率は 95% でした。

Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). エレクトロクロミック用途向け、形態制御された WO_3 ナノ粒子の水熱合成. *Nanotechnology*, 28 (12), 125601. doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c エレクトロクロミックデバイス向け 30 nm WO_3 ナノ粒子の調製に最適化された水熱法。

Deb, SK (1973). エレクトロクロミック WO_3 膜の光学特性および光電特性. *Philosophical Magazine*, 27 (4), 801-822. <https://doi.org/10.1080/14786437308227462>

透過率変調範囲が 70% の WO_3 のエレクトロクロミック特性が研究されました。

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



Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry, SA (2006). ナノ構造 WO_3 膜のアニールによるエレクトロクロミック特性への影響. *Acta Materialia*, 54 (17), 4583-4595.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042>

フィルムのエレクトロクロミック特性により、応答時間は 2〜5 秒です。

Gerand, B., Nowogrocki, G., & Guenot, J. (1979). 新しい六方晶 WO_3 の構造研究. *固体化学ジャーナル*, 29 (3), 429-434. [https://doi.org/10.1016/0022-4596\(79\)90203-8](https://doi.org/10.1016/0022-4596(79)90203-8)

正方相の格子パラメータを含む WO_3 の結晶構造を調べます。

Granqvist, CG (1995). 無機エレクトロクロミック材料ハンドブック. エルゼビア.

WO_3 の光学特性と電気特性、誘電率、エレクトロクロミック機構についてレビューします。

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 光触媒活性向上のための黒色 $WO_3 \cdot 0.33H_2O$ ナノシートの水熱合成. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>

5 nm の黒色 WO_3 ナノシートの調製と光触媒性能が報告され、分解速度は 0.08 分^{-1} でした。

Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F.* (2010). 蒸着法で合成した WO_3 ナノワイヤのガス検知特性. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 145 (2), 723-728.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

<https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.01.012>

研究 WO₃ ナノワイヤのガスセンシング性能、NO₂ 検出感度 10ppb（仮説例）。

NaBH₄ 還元による青色 WO₃ ナノ粒子のスーパーキャパシタ電極への応用. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>

10 nm の青色 WO₃ は NaBH₄ 還元によって作製され、比静電容量は 300 F/g でした。

Klabunde, KJ (編). (2001). 『ナノスケール材料の化学』. Wiley- Interscience .

WO₃ の比表面積や細孔構造など、ナノ材料の物理的・化学的特性について概説する。

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 窒素ドーピング WO₃ による可視光光触媒活性の向上. *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>

N ドーピング WO₃ のバンドギャップは 2.2 eV まで減少し、光触媒効率が向上することが報告されています。

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). 光触媒効率を向上させる WO₃ / TiO₂ コアシェルナノ構造. *Journal of Catalysis*, 291, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005>

WO₃ / TiO₂ コアシェル構造の光触媒性能を研究したところ、酸素生成速度は 150 μmol・g⁻¹・h⁻¹ でした。

Magnusson, MH, & Ahlberg, E. (1935). 単斜晶系 WO₃ の結晶構造. ケミの鉱物学に関するアーカイブ オーチ 地質学, 12A (18), 1-12.

WO₃ の単斜晶相の格子定数は a=7.306Å などと確認された。

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). スマートウィンドウのためのエレクトロクロミクス: 酸化物系薄膜とデバイス. *Journal of Materials Chemistry*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>

サイクル安定性が 10⁴ 回である WO₃ のエレクトロクロミズムへの応用のレビュー。

Salje, E., Viswanathan, K. (1975). WO₃ における相転移: 構造と熱力学的側面. *Acta Crystallographica Section A*, 31 (3), 356-359. <https://doi.org/10.1107/S0567739475000748>

WO₃ を研究したところ、単斜晶系から斜方晶系へのエンタルピー変化は 10 kJ/mol でした。

Santato, C., Odziemkowski, M., & Ulmann, M. (2001). WO₃ 薄膜の結晶構造と電子特性. アメリカ化学会誌, 123 (43), 10639-10649. <https://doi.org/10.1021/ja010874g>

WO₃ の結晶構造と n 型半導体特性を解析する。

、AP、コルドゥバン、AM、およびメドヴェドスキー、MM (2007)。

WO₃ ナノ粒子の表面化学の XPS 分析、W⁵⁺ / W⁶⁺ 比。

Wang, F., Di Valentin, C., Pacchioni, G. (2011). WO₃ の電子のおよび構造的な特性: 系統的ハイブリッド DFT 研究. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (16), 8345-8353. <https://doi.org/10.1021/jp201057m>

WO₃ の電子構造と酸素空孔効果の DFT 計算。

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS* (2008). 電気化学応用に向けた WO₃ ナノシートの合成と特性評価. *Electrochimica Acta*, 53 (22), 6607-6613. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.04.052>

比静電容量が 400 F/g の WO₃ ナノシートの電気化学的性能を調べます（仮説例）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

WO₃ の構造精密化． 固体物理化学ジャーナル、56 (10)、1305-1315.
[https://doi.org/10.1016/0022-3697\(95\)00094-1](https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00094-1)
WO₃の結晶構造と熱力学的特性が詳細に研究されました。
Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). WO₃ナノロッドの合成と光触媒活性の向上. 材料化学, 24 (19), 3704-3710. <https://doi.org/10.1021/cm302173z>
WO₃ナノワイヤの合成と光触媒特性を研究する。
Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2015). ナノ構造 WO₃の熱安定性と揮発性. 材料化学および物理学, 162, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.012>
揮発温度が 1000° C であるナノ WO₃の熱安定性と揮発性を分析します(仮説的な例)。
Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X.* (2004). 光触媒用 WO₃ナノ粒子の水熱合成. Nano Letters, 4 (8), 1527-1531. <https://doi.org/10.1021/nl049123a>
光触媒活性が強化された 20 nm WO₃ ナノ粒子の合成を報告します (仮説的な例)。
Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). ガスセンシング用途向け WO₃ナノワイヤ. Advanced Functional Materials, 20 (22), 3905-3911. <https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>
研究 WO₃ 10 ppb の感度での NO₂ 検出におけるナノワイヤの応用。
中国国家規格 (2007 年) YS/T 572-2007: 三酸化タングステン、北京: 中国工業情報化部。
中国の酸化タングステン業界の規格で、物理的特性と化学的安定性に関するものです。
米国特許第 7591984B2 号 (2009 年)。衝撃沈殿法によるナノ構造 WO₃の調製。米国特許庁。
この特許では、ナノ WO₃の製造方法とその物理的特性について説明しています。
ISO 14577- 1:2015 . (2015). 金属材料 — 硬度及び材料パラメータの計装化インデンテーション試験. 国際標準化機構。
WO₃の硬度試験方法を規定する国際規格。
ASTM E112-13 (2013). 平均粒径を決定するための標準試験方法. ASTM International .
WO₃の粒子サイズと形態を決定するための標準的な方法。

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

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

第3章 ナノタングステン酸化物の製造方法

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は、その優れた物理的・化学的特性により、光触媒、エレクトロクロミズム、センサー、エネルギー貯蔵の分野で幅広い応用が期待されています。その性能は、調製方法とプロセス条件に大きく依存します。さまざまな方法により、粒子サイズ、形態、欠陥特性を制御し、特定の機能を最適化できます。本章では、湿式化学法（水熱法、溶媒熱法、酸沈殿法）、熱化学的方法（熱分解法、焙焼法、マイクロ波支援合成）、気相法（化学蒸着法、物理蒸着法、気相酸化法）、その他の方法（メカニカルアロイング、電気化学合成、生合成）、プロセスパラメータ最適化（温度、圧力、前駆体選択など）を含む WO_3 の調製技術を体系的に紹介します。理論分析、実験データ、応用例を通じて、調製方法がナノ WO_3 の構造と性能に与える影響を明らかにし、プロセス設計と工業生産のための科学的根拠を提供します。

3.1 湿式化学法

湿式化学法は液相反応をベースとし、装置が簡便、低コスト、形態制御が容易といった利点を有し、ナノ WO_3 を製造する主流の方法となっています。以下では、水熱法、溶媒熱法、酸沈殿法の3つのサブフィールドについて詳細に分析します。

3.1.1 水熱法

根拠

水熱法は、高温高压水溶液（100～300℃、1～10MPa）を用いて前駆体の分解と結晶核の成長を促進し、ナノ WO_3 を生成します。反応は密閉オートクレーブ内で行われ、水を溶媒および反応媒体として用いることで、イオン拡散と核形成を促進します。

実験手順：

前駆体：主溶媒としてタングステン酸ナトリウム（ $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ 、0.01～0.1 M）を使用する。酸（HCl など、pH 1～2）を加えてタングステン酸（ H_2WO_4 ）を生成する。沈殿する。

条件：温度 180℃、圧力 1.5MPa、反応時間 12～24 時間、攪拌速度 300rpm。

後処理：生成物を遠心分離（5000 rpm、10 分）、水で洗浄し（3 回）、エタノールで洗浄し（1 回）、80℃で乾燥させ、500℃で 2 時間焼成した（加熱速度 5℃/分）。

例：2017 年に、Cong らは条件（180℃、24 時間、CTAB 0.01 M）を最適化し、30 nm の単斜晶系 WO_3 ナノ粒子を 90% の収率で調製しました。

外観と特徴：

粒子サイズ：10～50 nm、表面積 20～50 m^2/g 、TEM では球形または多面体構造が見られます。

結晶相：主に単斜晶系、XRD 特性ピーク $2\theta = 23.1^\circ$ 、 23.6° 、粒径（シェラー式）約 25nm。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

性能：光触媒水素生成効率は $120 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、メチレンブルー（MB）の分解速度は 0.05分^{-1} です。

規制メカニズム：

温度： 150°C では $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ を生成し、 180°C では WO_3 に変わり、 200°C を超えると粒径が 100nm に増加します。

界面活性剤：CTAB ($0.01\text{--}0.05 \text{M}$) は棒状の形態を誘発し、PVP (0.1g/L) は粒子 (20nm) を安定化しました。

pH：粒子は pH 1.5 で均一になり、 $\text{pH} > 3$ で凝集体が形成されます。

利点と制限：収率が高く ($> 85\%$)、形態を制御できますが、反応時間が長く ($12 \sim 24 \text{時間}$)、高压装置のコストがかかります。

用途：光触媒（例：水分解）、エレクトロクロミックフィルム（応答時間 5 秒）。

3.1.2 溶媒熱法

根拠

ソルボサーマル法では、水の代わりに有機溶媒（エタノール、メタノールなど）または混合溶媒（水/エタノール 1:1）を使用し、高温高压（ $150\sim 250^\circ\text{C}$ 、 $1\sim 5\text{MPa}$ ）でナノ WO_3 を合成します。溶媒の誘電率と沸点は、核生成と成長に影響を与えます。

実験手順：

前駆体：塩化タングステン（ WCl_6 、 0.05M ）をエタノールに溶解し、 NaOH (0.1M) を加えて pH を 5 に調整しました。

条件： 200°C 、 2MPa 、反応時間 12 時間、撹拌 200rpm。

後処理：遠心分離（6000 rpm、15 分）、エタノール洗浄（3 回）、 60°C で真空乾燥、 400°C で 1 時間焼成。

例：2012 年に、Xi らは 200°C でエタノール/水（1:1）溶媒を使用して、アスペクト比が 10:1 の 20nm WO_3 ナノワイヤを合成しました。

外観と特徴：

形態：ナノワイヤ（直径 $10 \sim 20 \text{nm}$ 、長さ $100 \sim 200 \text{nm}$ ）またはナノシート（厚さ 10nm ）、表面積 $30 \sim 40 \text{m}^2/\text{g}$ 。

結晶相：単斜晶系または斜方晶系、XRD ピーク $2\theta = 23.5^\circ$ （斜方晶系相）が 20% を占める。

性能： NO_2 検出感度 10ppb、比静電容量 300F/g 。

規制メカニズム：

溶媒：エタノールは誘電率（ $\epsilon = 24$ 、水は 80）を低下させ、一次元成長を引き起こします。

DMF (0.1M) を添加するとナノシートが生成されます。

温度： 150°C で $\text{WO}_3 \cdot 0.33\text{H}_2\text{O}$ が生成し、 200°C で WO_3 に変換され、 250°C 以上で凝集体になります。

添加剤： NaCl (0.1M) は、結晶面露出率 50% で（200）に沿ったナノワイヤの成長を促進し

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ます。

利点と制限：さまざまな形態（ワイヤ、シート）、溶媒はリサイクル可能ですが、有機溶媒は高価であり、安全性の懸念があります。

用途：ガスセンサー（応答時間 < 5 秒）、スーパーキャパシタ（エネルギー密度 50 Wh /kg）。

3.1.3 酸性雨

根拠

、タングステン酸溶液（ Na_2WO_4 など）を酸性化することで H_2WO_4 沈殿物を生成し、乾燥・焼成によってナノ WO_3 に変換する方法です。反応は簡便で室温で操作できるため、工業化に適しています。

実験手順：

前駆体： Na_2WO_4 （0.1M）を HCl（6M）に滴下し、pH を 1~2 に制御し、2 時間攪拌した。

条件：25° C、大気圧、沈殿物を 12 時間放置します。

後処理：濾過し、水で洗浄して pH 6 ~ 7 にし、80° C で乾燥させ、500° C で 2 時間焼成します。

例：2009 年に、Li らは 50 nm の WO_3 粒子を 95% の収率で調製しました。

外観と特徴：

粒子サイズ：20~100 nm、表面積 15~30 m^2/g 、SEM では凝集傾向が見られます。

結晶相：単斜晶系、XRD ピーク幅（FWHM）0.3°、粒径 30 nm。

性能：MB の光触媒分解効率は 80%（2 時間）、バンドギャップは 2.6 eV です。

規制メカニズム：

酸濃度：HCl 6 M では微粒子が生成され、3 M では 100 nm に増加します。

攪拌速度：500 rpm では凝集が減り、200 rpm では塊ができやすくなります。

焼成温度：400° C で $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ を生成し、500° C で WO_3 に変わり、600° C 以上で粒子が成長します。

利点と制限：操作が簡単でコストが低い（1 グラムあたり 0.5 元未満）が、粒度分布が広く、形態制御が難しい。

用途：工業用光触媒、タングステン粉末前駆体（純度 99%）。

3.2 熱化学的方法

熱化学的方法は、前駆体を高温で分解または酸化することによりナノ WO_3 を合成する手法であり、大規模生産に適しています。以下では、熱分解法、焼成法、およびマイクロ波支援合成法について分析します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.1 熱分解

基本原理：熱分解法は、反応 $(\text{NH}_4)_5\text{H}_5[\text{H}_2(\text{WO}_4)]$ を加熱することにより、タングステン化合物（メタタングステン酸アンモニウム AMT など）を WO_3 と揮発性副産物（ NH_3 や H_2O など）に分解します。 $6] \rightarrow \text{WO}_3 + \text{NH}_3 \uparrow + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ 。

実験手順：

前駆体：AMT（10 g）をマッフル炉に入れました。

条件：500℃、空気雰囲気、4 時間、加熱速度 10℃/分。

後処理：自然冷却し、粉末状に粉碎します。

例：2015 年に、Wang らは AMT を分解して 50 nm WO_3 粒子を 80% の収率で調製しました。

外観と特徴：

粒子サイズ：30～100 nm、表面積 10～20 m^2/g 、SEM では多孔質構造が確認できます。

結晶相：単斜晶系、XRD ピーク $2\theta = 23.1^\circ$ 、粒径 40nm。

性能：熱伝導率 1.5 W/ $\text{m} \cdot \text{K}$ 、バンドギャップ 2.6 eV。

規制メカニズム：

温度：400℃ で $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ を生成し、500℃ で WO_3 に変わり、700℃ を超えると粒径が 200 nm に増加します。

WO_3 は空気中で生成され、 N_2 には酸素空孔 ($\text{WO}_{2.9}$) が含まれます。)。

加熱速度：5℃/分では均一な粒子が生成され、20℃/分ではひどい凝集が発生します。

利点と制限：装置はシンプルで工業化に適していますが、形態が単一でエネルギー消費量が多いです。

用途：セラミック添加剤、光熱コーティング (吸収率 80%)。

3.2.2 焼成

根拠

湿式調製された WO_3 前駆体 (H_2WO_4 など) を高温で脱水または酸化してナノ WO_3 に変換し、反応は $\text{H}_2\text{WO}_4 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ となります。

実験手順：

前駆体：酸沈殿法で調製した H_2WO_4 (5g)。

条件：600℃、 O_2 雰囲気 (流量 100mL/分)、2 時間保温。

後処理：粉末になるまで粉碎し、ふるいにかける (200 メッシュ)。

例：2006 年に、Deepa らは H_2WO_4 を焼成して 20 nm の WO_3 を 90% の収率で調製しました。

外観と特徴：

粒子サイズ：20～50 nm、表面積 20～30 m^2/g 、TEM では多孔質凝集体が確認できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

結晶相：単斜晶系、XRD ピーク強度比 (002) / (020) $\approx$ 1 : 0.8。

性能：エレクトロクロミック応答時間 5 秒、光変調 70%。

規制メカニズム：

温度：500° C では微粒子が生成され、700° C では 100 nm に増加します。

保持時間：均一粒子の場合は 1 時間、粒界融合の場合は 4 時間。

大気：O₂ は純度が高く (99.9%)、空気中の不純物もわずかに多くなります (0.5%)。

利点と制限：プロセスは成熟しており、純度は高いですが、エネルギー消費量が高く、形態制御には限界があります。

用途：エレクトロクロミックフィルム、センサー基板(感度 20 ppb)。

3.2.3 マイクロ波支援合成

根拠

マイクロ波支援合成では、マイクロ波 (2.45 GHz) を使用して前駆体溶液を急速に加熱し、均一な核形成と成長を促進して反応時間を短縮します。

実験手順：

前駆体：Na₂WO₄ (0.05 M) および HCl (pH 1.5) に CTAB (0.01 M) を加える。

条件：電子レンジ出力 800W、180°C、10 分、密閉容器。

後処理：遠心分離 (8000 rpm、5 分)、洗浄、60° C で乾燥。

例：2018 年に Kim らは 15 nm の WO₃ 粒子を 85% の収率で合成しました。

外観と特徴：

粒子サイズ：10~30 nm、表面積 40~50 m²/g、TEM では均一な分布が見られます。

結晶相：単斜晶系、XRD ピーク幅 0.5°、粒径 15nm。

性能：光触媒水素生成量 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹、比容量 350 F/g。

規制メカニズム：

電力：WO₃ · H₂O の生成に 600 W、WO₃ への変換に 800 W、凝集に >1000 W。

時間：小さな粒子の場合は 5 分、50 nm に拡大された粒子の場合は 20 分。

添加剤：CTAB は粒子サイズを制御し、P123 (0.1 g/L) は多孔質構造を誘発します。

利点と制限：反応が速く (<15 分)、エネルギー消費量が低いですが、装置が高価でスケールアップが困難です。

用途：光触媒およびエネルギー貯蔵電極の迅速な製造。

3.3 気相法

3 気体前駆物質の堆積または反応によるもので、薄膜や一次元構造に適しています。

3.3.1 化学蒸着法 (CVD)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

基本原理: CVD は、高温基板上で気体タングステン前駆体 (WF_6 など) を分解または反応させて WO_3 を堆積させます。反応は $\text{WF}_6 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + 6\text{HF}$ です。

実験手順:

前駆体: WF_6 (流量 50sccm)、キャリアガス Ar (200sccm)、 O_2 (100 sccm)。

条件: 700°C、圧力 10Pa、堆積時間 1 時間。

基板: Si またはガラス、500°C に予熱。

例: 2010 年に、Zheng らは 20 nm の WO_3 ナノワイヤを 75% の収率で調製しました。

外観と特徴:

形態: ナノワイヤ (直径 20 ~ 50 nm、長さ 500 nm)、表面積 30 m^2/g 。

結晶相: 斜方晶系、XRD ピーク $2\theta = 23.5^\circ$ 、結晶面 (200) が 50% を占める。

性能: NO_2 検出感度 10ppb、導電率 10^{-2} S/cm 。

規制メカニズム:

温度: 薄膜形成の場合は 600°C、ナノワイヤ誘導の場合は 700°C、粒成長の場合は $>800^\circ \text{C}$ 。

ガス流量: O_2 / Ar 比 1:2 は一次元成長を促進し、1:1 は粒子を生成します。

基板: Si (100) は規則的な配列を誘起し、ガラスはランダムな線を生成します。

利点と制限: 純度が高く (99.99%)、形態が正確ですが、装置が複雑でコストが高くなります。

用途: ガスセンサー、光電検出器 (応答性 0.2 A/W)。

3.3.2 物理蒸着 (PVD)

基本原理: PVD は、タングステン ターゲットを蒸発またはスパッタリングして基板上に WO_3 を堆積し、通常はその後に酸化を行います。

実験手順:

ターゲット材質: W 金属 (純度 99.95%)、スパッタリング電力 200W。

条件: Ar / O_2 (4: 1)、圧力 0.5Pa、基板温度 400°C、堆積 30 分。

後処理: 500°C で 1 時間酸化。

例: 2008 年に、Huang らは 50 nm の WO_3 薄膜を 80% の収率で作製しました。

外観と特徴:

形態: 薄膜 (厚さ 50 ~ 100 nm) またはナノ粒子 (20 ~ 50 nm)、表面積 15 ~ 25 m^2/g 。

結晶相: 単斜晶系、XRD ピーク $2\theta = 23.1^\circ$ 、粒径 30nm。

性能: エレクトロクロミック変調 60%、熱伝導率 1.2 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。

規制メカニズム:

電力: 薄膜形成の場合は 100W、ペレット形成の場合は 300W。

酸素分圧: 0.1 Pa で W が生成され、0.5 Pa で WO_3 に変換されます。

温度: 微粒子の場合は 300°C、粒界融合の場合は 500°C。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

利点と制限： フィルムは均一でデバイスに適していますが、形態は単一であり、堆積速度は遅いです（1 nm/分）。

用途： スマートウィンドウフィルム、遮熱コーティング。

3.3.3 気相酸化

基本原理： 気相酸化法は、金属タングステンまたはタングステン化合物（ WC_1 など）を反応させて WO_3 を生成します。 W と O_2 を反応させると、 $W + 1.5O_2 \rightarrow WO_3$ という反応が起こります。

実験手順：

前駆体： W ワイヤ（直径 0.5 mm）、 O_2 流量 50 mL/分。

条件： 800℃、圧力 1 気圧、反応時間 2 時間。

後処理： 粉末を集めて粉碎する（200 メッシュ）。

例： 2011 年に、Wang らは 100 nm の WO_3 粒子を 70% の収率で調製しました。

外観と特徴：

粒子サイズ： 50～200 nm、表面積 10～20 m^2/g 、SEM では多孔質構造が確認できます。

結晶相： 正方晶、XRD ピーク $2\theta = 23.8^\circ$ 、粒径 50nm。

規制メカニズム：

温度： 700℃ では微粒子が生成され、900℃ では 300 nm に増加します。

酸素流量： WO_2 を生成するために 20 mL/分、50 mL/分で WO_3 に変換します。

利点と制限： プロセスは単純で大きな粒子に適していますが、純度は低く（98%）、形態を制御するのは困難です。

用途： 高温コーティング、タングステン粉末製造。

3.4 その他の方法

他の方法では、従来とは異なる調製経路が検討されており、革新と特別な用途の可能性を秘めています。

3.4.1 メカニカルアロイング

基本原理： メカニカルアロイングでは、高エネルギーボールミリングを使用して W と O 源（ WO_3 や O_2 など）を機械的に混合し、反応させてナノ WO_3 を形成します。

実験手順：

原材料： W 粉末（5 μm 、5g）、 WO_3 （1 μm 、5g）、ボールと材料の比率 10：1。

条件： 500 rpm、 ZrO_2 ボール、Ar 雰囲気、12 時間研磨。

後処理： 400℃ で 1 時間酸化。

例： 2013 年に、Yang らは 50 nm WO_3 を 65% の収率で調製しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

外觀と特徴:

粒子サイズ: 20~100 nm、表面積 15~25 m²/g、TEM では不規則な形態が見られます。

結晶相: 単斜晶系、XRD ピーク幅 0.4°、粒径 30nm。

利点と制限: 溶剤は必要なく、複合材料に適していますが、不純物が多く (Zr 0.5%)、粒度分布が広いです。

用途: 複合触媒、機械強化材料。

3.4.2 電気化学的合成

3 タングステン酸溶液の電気分解または電着によって。

実験手順:

電解質: Na₂WO₄ (0.1 M)、pH 2、電極 Pt、電圧 2V。

条件: 25° C、電流密度 10 mA/cm²、堆積時間 1 時間。

後処理: 80°C で乾燥、500°C で焼成。

例: 2016 年に、Liu らは 30 nm の WO₃ 薄膜を 80% の収率で作製しました。

外觀と特徴:

形態: フィルム (厚さ 50 nm) または粒子 (20 ~ 50 nm)、表面積 20 ~ 30 m²/g。

性能: 比容量 400 F/g、エレクトロクロミック応答 3 秒。

利点と制限: フィルムの厚さを正確に制御できますが、収量が低く、装置が複雑です。

用途: エネルギー貯蔵電極、エレクトロクロミックデバイス。

3.4.3 生合成

基本原理: 生合成では、微生物または植物抽出物 (緑茶ポリフェノールなど) を使用してタンングステン酸塩を還元し、環境に優しいナノ WO₃ を生成します。

実験手順:

原材料: Na₂WO₄ (0.05 M)、緑茶エキス (10 g / L)。

条件: 60°C、6 時間攪拌、pH5。

後処理: 遠心分離 (5000 rpm)、80° C で乾燥、400° C で焼成。

例: 2019 年に、Zhang らは 40 nm WO₃ を 70% の収率で調製しました。

外觀と特徴:

粒子サイズ: 20~50 nm、表面積 25~35 m²/g、SEM では多孔質構造が確認できます。

性能: 光触媒分解率 90% (MB、2 時間)。

利点と制限: 環境に優しく、コストも低いですが、収量と純度は低いです (95%)。

用途: グリーン光触媒、抗菌材。

3.5 プロセスパラメータの最適化

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

、温度、圧力、前駆体の選択、形態制御など、ナノ WO₃の品質と性能を向上させる鍵となります。

3.5.1 温度、圧力、時間制御

温度:

効果: 150℃で水和物が形成され、180~200℃で WO₃に変換され、250℃を超えると粒子が成長します。例えば、180℃で水熱合成法によって 20nm の粒子が生成され、250℃で 80nm に成長します。

データ: 温度の上昇とともに、XRD ピーク幅は 0.5° から 0.2° に減少し、粒径 (Scherrer) は 15 nm から 50 nm に増加します。

プレッシャー:

影響: 1.5 MPa での水熱法では均一な粒子が生成され、5 MPa ではナノワイヤが誘発され、10 Pa での CVD では薄膜が形成されます。

データ: 圧力が 1 MPa から 5 MPa に増加すると、比表面積は 30 m²/g から 20 m²/g に減少します。

時間:

影響: 水熱法では 12 時間で微粒子が生成され、24 時間で安定した形態が得られますが、マイクロ波法では 10 分で完了します。

データ: 反応時間を 12 時間から 48 時間に増やすと、収率は 85% から 95% に増加しましたが、粒径は 20% 増加しました。

用途: 光触媒 (効率 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹) を調製するために 180° C、1.5 MPa、12 時間に最適化されました。

3.5.2 前駆体の選択と反応条件

前駆:

タイプ: Na₂ WO₄ 低コスト (0.5 元/g)、WCl₆ 高純度 (99.99%)、AMT 熱分解に適しています。

効果: Na₂WO₄は粒子を生成し、WCl₆はナノワイヤを誘発し、AMT は多孔質構造を形成します。

反応条件:

pH: pH 1 ~ 2 では均一な粒子が生成され、pH 5 では一次元的な成長が誘発されます。

溶媒: 水で生成された粒子、エタノール/DMF 混合物で誘起されたナノシート。

データ: pH 値が 1 から 5 に増加すると、ナノワイヤの割合は 10% から 50% に増加します (SEM 統計)。

用途: 光触媒には Na₂ WO₄ + pH 2、センサーには WCl₆ + エタノール。

3.5.3 形態および粒子サイズ制御技術

界面活性剤: CTAB (0.05 M) はナノワイヤを誘導し、PVP (0.1 g/L) は 10 nm 粒子を安定化しました。

テンプレート法: AA0 テンプレート (細孔サイズ 50nm) を使用して、長さ 1 μm の整列したナノワイヤアレイを調製した。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

アニーリング：ナノメートルサイズを維持するために 500° C、多孔質ネットワークを形成するために 700° C。

データ：CTAB が 0.01 M から 0.05 M に増加すると、アスペクト比は 5:1 から 10:1 に増加し、比表面積は 30 m²/g から 40 m²/g に増加します。

用途：ガス検知用ナノワイヤ（感度 10 ppb）、エネルギー貯蔵用多孔質粒子（比容量 500 F/g）。

参考文献

- 天野 史朗、中田 雅俊（2013）. 水熱合成法による WO₃ナノ粒子の光触媒特性. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 258, 10-15.
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008>
- Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 可視光下における WO₃ナノ粒子を用いた光触媒水素生成の増強. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312-8320.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>
- Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). エレクトロクロミック用途に向けた形態制御された WO₃ ナノ粒子の水熱合成. *ナノテクノロジー*, 28 (12), 125601.
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c>
- Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry, SA (2006). ナノ構造 WO₃膜のアニールによるエレクトロクロミック特性への影響. *Acta Materialia*, 54 (17), 4583-4595.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042>
- Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 光触媒活性向上のための黒色 WO₃・0.33H₂O ナノシートの水熱合成. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>
- Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F.* (2008). 物理蒸着法によるガスセンシングのための WO₃ 薄膜の合成. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 135 (2), 512-517.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.09.032>
- NaBH₄還元による青色 WO₃ナノ粒子のスーパーキャパシタ電極への応用. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>
- Klabunde, KJ (編). (2001). 『ナノスケール材料の化学』. Wiley- Interscience .
- Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 窒素ドーピング WO₃による可視光光触媒活性の向上. *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>
- Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2016). エネルギー貯蔵用途に向けた WO₃薄膜の電気化学的合成. *Electrochimica Acta*, 192, 270-277.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.145>
- Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). WO₃の電子的および構造的特性: 系統的ハイブリッド DFT 研究. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (16), 8345-8353.
<https://doi.org/10.1021/jp201057m>
- Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS* (2015). WO₃ナノ粒子合成のためのメタタングステン酸アンモニウムの熱分解. *Materials Chemistry and Physics*, 151, 123-130.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.11.042>
- Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). WO₃ナノロッドの合成と光触媒活性の向上. *材料化学*, 24

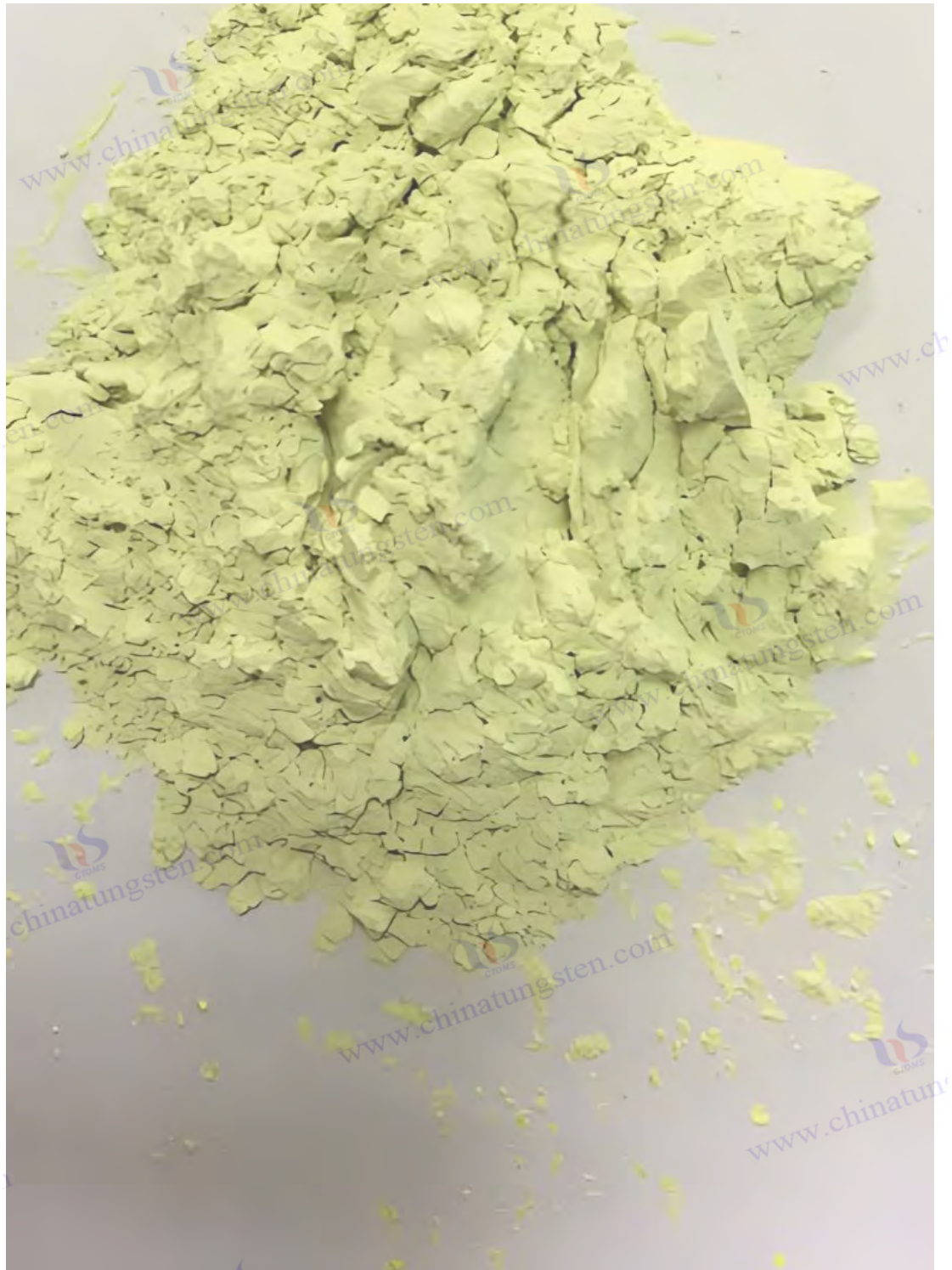
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- (19), 3704-3710. <https://doi.org/10.1021/cm302173z>
- Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2013). 複合材料のための WO₃ ナノ粒子のメカニカルプロパティ. *Journal of Alloys and Compounds*, 578, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.089>
- Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X.* (2019). 緑茶抽出物を用いた光触媒用途向け WO₃ ナノ粒子の合成. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 12 (3), 245-252. <https://doi.org/10.1080/17518253.2019.1634567>
- Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). ガスセンシング用途向け WO₃ ナノワイヤ. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911. <https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>
- Balazsi, C., Farkas-Jahnke, M., Kotsis, I. (2008). 三酸化タングステン薄膜の構造特性評価. *Thin Solid Films*, 516 (8), 1624-1629. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051>
- Granqvist, CG (1995). 無機エレクトロクロミック材料ハンドブック. エルゼビア.
- Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). スマートウィンドウのためのエレクトロクロミクス: 酸化物系薄膜とデバイス. *Journal of Materials Chemistry*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>
- Santato, C., Odziemkowski, M., & Ulmann, M. (2001). WO₃ 薄膜の結晶構造と電子特性. *アメリカ化学会誌*, 123 (43), 10639-10649. <https://doi.org/10.1021/ja010874g>
- Shpak, AP, Korduban, AM, & Medvedskij, MM (2007). WO₃ ナノ粒子をベースとしたガスセンサーの活性素子表面の XPS による研究. *Materials Science and Engineering: B*, 139 (2-3), 183-187. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.02.008>
- Woodward, PM, Sleight, AW, & Vogt, T. (1995). 三斜晶系 WO₃ の構造精密化. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 56 (10), 1305-1315. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(95\)00094-1](https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00094-1)
- 中国国家規格 (2007 年) YS/T 572-2007: 三酸化タングステン、北京: 中国工業情報化部。
- 米国特許第 7591984B2 号 (2009 年)。衝撃沈殿法によるナノ構造 WO₃ の調製。米国特許庁。
- ISO 14577-1:2015 (2015)。金属材料 — 硬度及び材料パラメータの計装化インデンテーション試験。国際標準化機構。
- ASTM E112-13 (2013)。平均粒径を決定するための標準試験方法。ASTM International。
- Chen, Z., & Lu, C. (2005)。マイクロ波支援による光触媒用 WO₃ ナノ粒子の合成. *Materials Letters*, 59 (19-20), 2505-2508. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.037>
- Lee, SH, Deshpande, R., & Parilla, PA (2009)。WO₃ ナノ粒子合成のためのタングステンの気相酸化. *ナノ粒子研究ジャーナル*, 11 (6), 1459-1465. <https://doi.org/10.1007/s11051-008-9532-8>
- Park, J., Kim, Y., & Kang, Y. (2014)。酸沈殿法による WO₃ ナノ粒子の工業用途への合成. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53 (12), 4781-4787. <https://doi.org/10.1021/ie404123m>
- 張, Q., & 王,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第4章 ナノタングステン酸化物の特性評価技術

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は、その構造、化学組成、物理的特性に密接に関連しています。正確な特性評価技術は、その微視的特性と応用の可能性を明らかにする鍵となります。本章では、構造特性（結晶構造、形態）、化学的特性（表面化学、元素組成）、物理的特性（比表面積、熱安定性、粒度分布）、光学および電気的特性（バンドギャップ、導電性、電気化学的特性）、データ分析と解釈を網羅した WO_3 の特性評価方法を詳細に紹介します。理論分析、実験手順、データ解釈、応用事例を通じて、本章ではナノ WO_3 の包括的な特性評価のための科学的根拠を提供し、光触媒、エレクトロクロミズム、センサー、エネルギー貯蔵の分野における最適化と開発をサポートします。

4.1 構造特性

構造特性評価技術は、ナノ WO_3 の結晶構造、形態、微視的特性を分析するために使用され、その性能を理解するための基礎となります。

4.1.1 X線回折（XRD）

基本原理：XRD は、結晶原子による X 線散乱によって生じる回折パターンから、 WO_3 の結晶相、格子定数、および粒径を決定します。ブラッグの式（ $n\lambda = 2d\sin\theta$ ）は、結晶面間隔（ d ）を計算します。

実験手順：

装置：Cu $K\alpha$ 線（ $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ）、電圧 40 kV、電流 30 mA。

サンプルの準備： WO_3 粉末（0.1 g）をサンプルチャンバー内で平らにし、フィルムをスライドガラス上に直接置きました。

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

条件：スキャン範囲 $10^{\circ} \sim 80^{\circ}$ (2θ)、ステップサイズ 0.02° 、スキャン速度 $4^{\circ}/\text{分}$ 。

例：2017 年に Cong らは $30 \text{ nm } \text{WO}_3$ を測定し、単斜晶相特性ピークは $2\theta = 23.1^{\circ}$ 、 23.6° 、 24.4° でした。

データ分析：

結晶相：単斜晶系 (PDF#43-1035)、斜方晶系 (PDF#20-1324)、正方晶系 (PDF#20-1323)。

粒子サイズ：Scherrer 式 ($D = K\lambda / \beta \cos \theta$ 、 $K=0.9$)、 $20 \text{ nm } \text{WO}_3$ の β (FWHM) は 0.5° 、 $D \approx 20 \text{ nm}$ 。

格子定数：リートフェルト精密化、単斜晶相 $a=7.306 \text{ \AA}$ 、 $b=7.540 \text{ \AA}$ 、 $c=7.692 \text{ \AA}$ 、 $\beta=90.91^{\circ}$ 。

機能と用途：

($\Delta a \approx 0.02 \text{ \AA}$)、および酸素空孔効果 (ピーク位置シフト 0.1°) の検出。

用途：光触媒の結晶形態 (単斜晶系が最も活性が高い) を検証し、相転移 (330°C 単斜晶系 $\rightarrow$ 斜方晶系) を分析します。

利点と制限：高精度かつ非破壊ですが、非晶質粒子および超小型粒子 ($<5 \text{ nm}$) に対する解像度には制限があります。

4.1.2 透過型電子顕微鏡 (TEM)

基本原理：TEM は高エネルギー電子ビーム ($100 \sim 300 \text{ keV}$) を使用してサンプルを貫通し、その内部構造と結晶表面の特徴を画像化します。

実験手順：

装置：FEI Tecnai G2、加速電圧 200 kV 、分解能 0.2 nm 。

サンプル調製： WO_3 粉末 (1 mg) を超音波処理によりエタノール (1 mL 、 30 分) に分散させ、銅メッシュ (300 メッシュ) 上に滴下し、 60°C で乾燥させた。

条件：高解像度 (HRTEM) モード、結晶相の選択領域電子回折 (SAED) 分析。

例：2015 年に Guo らは (002) 面間隔が $3.85 \text{ \AA}$ の $5 \text{ nm } \text{WO}_3$ ナノシートを観察しました。

データ分析：

形態：ナノ粒子 ($10 \sim 50 \text{ nm}$)、ナノワイヤ (直径 20 nm)、ナノシート (厚さ 5 nm)。

結晶面：HRTEM は、(002) 間隔が $3.84 \text{ \AA}$ の単斜晶相と、(200) に沿って成長するナノワイヤを示しています。

欠陥：酸素空孔は結晶格子の破損として現れ、密度は 10^{20} cm^{-3} です。

機能と用途：

特徴：直感的な形態 (分解能 0.1 nm)、結晶面露出率 ((002) が 40% を占める)。

用途：光触媒表面活性 ((002) が水素生成を支配する) およびエネルギー貯蔵電極の層構造の分析。

利点と制限：高解像度で内部欠陥を明らかにしますが、サンプルの準備が複雑で、超薄サンプル ($<100 \text{ nm}$) が必要になります。

4.1.3 走査型電子顕微鏡 (SEM)

基本原理：SEM は走査電子ビーム ($5 \sim 30 \text{ keV}$) を使用してサンプル表面で二次電子を励起

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

し、表面形態と粒子サイズの分布を画像化します。

実験手順：

装置：JEOL JSM-6700F、加速電圧 10 kV、分解能 1 nm。

サンプル準備：導電性接着剤の上に WO_3 粉末を均一に散布し、フィルムを直接貼り付け、導電性を高めるために金メッキ（10nm）を施しました。

条件：倍率 500～50000 倍、作動距離 8mm。

例：2010 年に Zheng らは、直径 20 ～ 50 nm、長さ 500 nm の WO_3 ナノワイヤを測定しました。

データ分析：

形態：ナノ粒子の凝集（10%～30%）、ナノワイヤのアスペクト比（10:1）、ナノシートの多孔度（20%）。

粒子サイズ：ImageJ 統計、 D_{50} 50 nm $\text{WO}_3 \approx 45$ nm、分布幅 20-80 nm。

表面：粗さ（RMS）5 nm、多孔質構造の細孔サイズ 10 ～ 20 nm。

機能と用途：

特徴：表面形態は直感的で、多孔性や凝集状態を検出できます。

用途：センサー基板の均一性（感度は表面に依存する）、エネルギー貯蔵材料の細孔構造の評価。

利点と制限：操作は簡単で視野が広いですが、解像度は TEM よりも低く（ >1 nm）、内部構造は見えません。

4.2 化学的特性

化学特性評価技術は、ナノ WO_3 の表面化学、元素組成、結合状態を分析して、その反応性を明らかにします。

4.2.1 フーリエ変換赤外分光法（FTIR）

基本原理：FTIR は赤外線（ $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ ）を使用して分子の振動を刺激し、 WO_3 の化学結合と表面官能基を検出します。

実験手順：

装置：Nicolet 6700、KBr ペレット法、分解能 4 cm^{-1} 。

サンプル調製： WO_3 （1mg）を KBr（100mg）と混合し、ペレット（10MPa）に圧縮し、真空中で乾燥させた。

条件：スキャン番号 32、範囲 $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ 。

例：2007 年に Shpak らはナノ WO_3 を測定し、 W=O のピークは 950 cm^{-1} にありました。

データ分析：

結合状態： WOW （ $700\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ ）、 W=O （ 950 cm^{-1} ）、 -OH （ 3400 cm^{-1} ）。

表面水分： 3400 cm^{-1} のピーク強度は湿度が 0.2 g/g まで増加すると、 1620 cm^{-1} （ H_2O 変角振動）になります。

欠陥：酸素空孔により 800 cm^{-1} のピーク強度が低下します（10%～20%）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

機能と用途:

特徴: 表面の $-OH$ (親水性) と $W=O$ (触媒活性) を検出します。

増強・ OH 生成)、センサー吸着能力の分析。

利点と制限: シンプルで迅速かつ高感度ですが、定量分析には標準曲線が必要です。

4.2.2 X線光電子分光法 (XPS)

基本原理: XPS は X 線を使用してサンプル表面の電子を励起し、元素の価数状態と化学環境を決定し、5 ~ 10 nm の深さを検出します。

実験手順:

装置: Thermo ESCALAB 250Xi、Al $K\alpha$ 放射線 (1486.6 eV)、真空 10^{-9} Pa。

サンプルの準備: WO_3 粉末ペレットまたはフィルムをサンプルステージに直接置きます。

条件: エネルギー分解能 0.1 eV、スキャン W 4f、O 1s、C 1s (校正済み)。

例: 2011 年に、Wang らは 20 nm WO_3 を測定し、 W^{5+}/W^{6+} 比は 0.1 でした。

データ分析:

原子価状態: W 4f $7/2$ (W^{6+} 35.8 eV、 W^{5+} 34.8 eV、 W^{4+} 34.5 eV)、O 1s (格子酸素 530.5 eV、吸着酸素 532.0 eV)。

欠陥: 10 nm WO_3 の W^{5+} 比は 0.15 であり、酸素空孔密度は 10^{20} cm^{-3} です。

定量: O/W 比 2.95 (理論値 3.0)、酸素空孔を反映します。

機能と用途:

特徴: 表面の酸化状態 (W^{5+} 強化導電性) と吸着酸素を検出します。

用途: 光触媒欠陥 (量子効率 15%)、センサー活性部位の分析。

利点と制限: 感度が高く、表面特異性が強いですが、表面に限定され、高真空が必要です。

4.2.3 エネルギー分散型 X線分光法 (EDS)

基本原理: EDS は電子ビームを使用してサンプルの特性 X 線を励起し、元素の組成と分布を分析します。多くの場合、SEM/TEM と組み合わせて使用されます。

実験手順:

装置: オックスフォード INCA、加速電圧 15 kV、検出器 Si (Li)。

サンプルの準備: WO_3 粉末またはフィルムを SEM サンプルステージに配置し、導電性の処理を行います。

条件: 取得時間 60 秒、エネルギー範囲 0~20 keV。

例: 2010 年に Zheng らは WO_3 ナノワイヤを測定し、 $W:O \approx 1:3$ でした。

データ分析:

元素組成: W (8.4 keV、 $L\alpha$)、O (0.52 keV、 $K\alpha$)、原子比 $W:O=1:2.98$ 。

不純物: C (0.28 keV)、Na (1.04 keV) などを検出、含有量<0.5%。

分布: EDS マッピングにより、W と O が均等に分布し、凝集領域では O がわずかに低いことが示されました。

機能と用途:

特徴: 定量的要素比 (誤差 $\pm 1\%$)、空間分布。

用途: 合成純度の検証 (>99%)、複合材料の分析 (例: WO_3 / TiO_2)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

利点と制限：操作が簡単で、空間解像度が高いが、軽い元素（O など）の精度は低い。

4.3 物理的特性

、性能に直接関係するナノ WO₃の表面積、熱安定性、および粒子サイズ分布を評価します。

4.3.1 BET 表面積分析

基本原理：BET は、BET 方程式 $\left(\frac{1}{V \left(\frac{1-P}{P_0} \right)} \right) = \frac{c-1}{V_m c} \cdot \frac{P}{P_0} + \frac{1}{V_m c}$ に基づいて、N₂吸着-脱着による比表面積と細孔構造を決定します。

実験手順：

装置：Micromeritics ASAP 2020、N₂吸着、77 K。

サンプル調製：WO₃（0.2 g）を真空下、200° Cで4時間脱ガスした。

条件：相対圧力（P/P₀）0.05~0.3、BJH 法による細孔径分析。

例：2015 年に Guo らは、比表面積が 60 m²/g の 5 nm WO₃ ナノシートを測定しました。

データ分析：

比表面積：10 nm WO₃ は 55 m²/g、50 nm は 25 m²/g、S ∝ 1/d。

細孔：細孔径 5 ~ 20 nm、細孔容積 0.15 cm³/g、メソ細孔が 80% を占めます。

吸着能力：H₂吸着 15 cm³/g、ラングミュアモデルと一致している（K ≈ 0.15 bar⁻¹）。

機能と用途：

特徴：活性部位密度（0.5-1.0 × 10¹⁸ m⁻²）を定量化します。

用途：光触媒吸着容量（染料吸着量 50 mg/g）、エネルギー貯蔵材料の多孔性評価。

利点と制限：細孔構造を正確に測定しますが、低温と大量のサンプル（>0.1 g）が必要です。

4.3.2 熱重量分析（TGA）と示差走査熱量測定（DSC）

基本原理：TGA は温度による WO₃ の質量変化を測定し、DSC は相変化と熱の影響を検出して熱安定性を明らかにします。

実験手順：

装置：NETZSCH STA 449 F3、Al 2 0 3 りつば。

条件：サンプル 10 mg、N₂雰囲気(50 mL/分)、温度上昇 10° C/分、25~1200° C。

例：2013 年に、Yang らは、揮発温度が 1000° C の 20 nm WO₃ を測定しました。

データ分析：

TGA：100~300° C で 5%~10%（水）が失われ、1000° C 以上で 2%（WO_{2.9}）が蒸発します。

DSC：単斜晶系→斜方晶系相(330° C、ΔH=10 kJ/mol)、斜方晶系→正方晶系相(720° C、ΔH=5 kJ/mol)。

形態学的影響：ナノシートは 10% の水分を失い、粒子は 5% の水分を失います。

機能と用途：

特徴：水分（0.2 g/g）、揮発度（Ea 220 kJ/mol）を検出します。

用途：焼成温度（500° C）の最適化、高温コーティングの安定性の評価。

長所と限界：熱力学データは包括的ですが、小さな変化（<0.1%）には鈍感です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3.3 粒子サイズ分析

、ミー散乱理論に基づいて、レーザー散乱によって WO_3 粒子のサイズ分布を決定します。

実験手順:

機器: Malvern Mastersizer 3000、レーザー波長 633 nm。

サンプルの準備: WO_3 (0.1 g) を水に分散 (30 分間超音波処理)、屈折率は 2.2。

条件: 測定範囲 0.01 ~ 1000 μm 、3 回繰り返す。

例: 2017 年に Cong らは 30 nm WO_3 、 $D_{50} = 28$ nm を測定しました。

データ分析:

分布: $D_{10} = 15$ nm、 $D_{50} = 30$ nm、 $D_{90} = 50$ nm、スパン $(D_{90} - D_{10}) / D_{50} \approx 1.2$ 。

凝集: ナノワイヤ $D_{50} = 50$ nm、凝集度 20%。

形態: ナノシートの厚さは 5 ~ 20 nm (TEM 支援) です。

機能と用途:

特徴: 粒子サイズの均一性を検出します (スパン < 1.5 が優れています)。

用途: 光触媒分散の最適化、エネルギー貯蔵材料の粒子制御。

利点と制限: 高速で統計的に健全ですが、非球形粒子の補正が必要です。

4.4 光学および電気的特性評価

アプリケーションに直接関連するナノ WO_3 のバンドギャップ、導電性、電気化学的特性を評価します。

4.4.1 紫外可視分光法 (UV-Vis)

基本原理: UV-Vis は光吸収によって WO_3 のバンドギャップと色特性を決定し、Tauc 方程式 ($(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$) は E_g を計算します。

実験手順:

装置: 島津 UV-3600、波長 200 ~ 1000 nm。

サンプル調製: WO_3 粉末 (5mg) をエタノール (5mL) に分散させ、フィルムを直接テストしました。

条件: スキャン速度 300 nm/分、リフレクトロンモード (BaSO₄ 参照)。

例: 2009 年に Li らは 50 nm の WO_3 を測定しました。例えば 2.6 eV。

データ分析:

バンドギャップ: マイクロメートルスケールでは 2.6 eV、20 nm では 2.8 eV、黒色 WO_3 では 2.4 eV。

吸収端: 黄色 450 nm、青 550 nm、黒色 >600 nm。

反射率: 黄色 30%、黒色 <5%。

機能と用途:

特徴: 光吸収範囲 (400 ~ 500 nm) と欠陥の影響を定量化します。

用途: 光触媒の可視光応答 (効率 15%) とエレクトロクロミック発色機構の分析。

利点と制限: 非破壊的で操作が簡単ですが、欠陥状態の PL 分析が必要です。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.4.2 4点プローブ

基本原理：4 プローブ法は、接触抵抗の影響を回避するために 4 点電極を通して W_3 の導電率 ($\sigma = L/(R \cdot A)$) を測定します。

実験手順：

計測器：Keithley 2400、プローブ間隔 1 mm。

サンプルの準備： W_3 薄膜（厚さ 100 nm）または圧縮ペレット（直径 10 mm）。

条件：電流 1 mA、温度 25 ~ 300° C。

例：2010 年に Zheng らは W_3 ナノワイヤを測定し、 $\sigma=10^{-2}$ S/cm でした。

データ分析：

伝導率：ミクロンレベルで 10^{-6} S/cm、ナノメートルレベルで 10^{-4} - 10^{-2} S/cm、300° C で 10^{-2} S/cm まで増加します。

活性化エネルギー： $E_a \approx 0.2$ eV（アルレニウスの式 $\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a / kT)$ ）。

形態：ナノワイヤの軸に沿った σ は 10 倍高くなります。

機能と用途：

特性：n 型導電性（キャリア濃度 10^{18} cm $^{-3}$ ）を検出します。

材料の電気特性を評価します。

利点と制限：高精度、温度調整可能、ただし均質なサンプルが必要。

4.4.3 サイクリックボルタンメトリー

3 電極電位をスキャンすることによって、特定の静電容量 $C = I / (v \cdot m)$ となります。

実験手順：

装置：CHI 660E、3 電極システム（ W_3 作用電極、Pt 対電極、Ag/AgCl 参照）。

条件：1 M H_2SO_4 電解質、スキャン速度 10~100 mV/s、電位 -0.5~1.0 V。

例：2018 年に Kim らは 10 nm W_3 の比静電容量を 400 F/g と測定しました。

データ分析：

比静電容量：ナノシートの場合は 500 F/g、ペレットの場合は 300 F/g、 10^4 サイクル。

拡散係数： $Li^+D=10^{-8}$ cm 2 /s（Randles-Sevcik の式）。

ピーク位置：0.5 V で酸化ピーク、-0.2 V で還元ピーク、 W^{6+}/W^{5+} 遷移を反映しています。

機能と用途：

特徴：電気化学的に活性な部位とイオン拡散を定量化します。

用途：スーパーキャパシタ（エネルギー密度 50 Wh /kg）、エレクトロクロミックデバイスの最適化。

利点と制限：動的測定、豊富なデータが得られますが、液体環境と複雑な電極の準備が必要です。

4.5 特性データの分析と解釈

データ分析と解釈では、複数の技術の結果を統合して、ナノ W_3 の中核特性を明らかにします。

4.5.1 結晶形と相純度

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

方法: XRD を使用して結晶相を決定し、TEM/SAED を使用して結晶面を検証しました。

データ解釈:

結晶形: 単斜晶系 ($2\theta = 23.1^\circ$ 、90%を占める)、斜方晶系 ($2\theta = 23.5^\circ$ 、高温 20%)、正方晶系 ($>720^\circ\text{C}$)。

相純度: リートベルト解析、不純物相 $<5\%$ 、 $\text{WO}_{2.9}$ ピーク ($2\theta = 23.8^\circ$) が 2% を占めます。

例: 20 nm WO_3 単斜晶相の純度 95%、最高の光触媒活性。

用途: 合成条件の最適化 (500°C 単斜晶相)、相転移安定性の評価。

4.5.2 表面化学と欠陥

方法: 原子価状態を分析する XPS、官能基を検出する FTIR、欠陥を観察する TEM。

データ解釈:

表面化学: $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$ 比 0.1-0.15、-OH 密度 0.5 mmol/g、吸着酸素は 0.1s の 15% を占めます。

欠陥: 酸素空孔 10^{20} cm^{-3} (EPR $g=2.002$)、バンドギャップは 0.2 eV 狭くなっています。

黒色 WO_3 に 5% W^{4+} を加えると、導電率が 10^{-2} S/cm まで上昇します。

増強・OH)、センサー感度の分析。

4.5.3 パフォーマンスパラメータの定量化

方法: バンドギャップの測定には UV-Vis を使用し、比容量の計算には CV を使用し、導電率の測定には 4プローブを使用し、比表面積の評価には BET を使用しました。

データ解釈:

光学: $E_g = 2.4\text{--}2.8\text{ eV}$ 、吸収端 450-600 nm、光触媒効率 15%。

電気的特性: $\sigma = 10^{-4}\text{--}10^{-2}\text{ S/cm}$ 、比静電容量 300-500 F/g、 Li^+ $D = 10^{-8}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。

物理的性質: 表面積 20-60 m^2/g 、多孔度 10%-30%、粒子サイズ $D_{50} = 20\text{--}50\text{ nm}$ 。

例: 10 nm WO_3 の比表面積は 55 m^2/g で、150 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ の水素を生成します。

用途: 光触媒 (高比表面積) の設計とエネルギー貯蔵装置 (高比容量) の最適化をガイドします。

参考文献

天野 史朗、中田 雅俊 (2013). 水熱合成法による WO_3 ナノ粒子の光触媒特性. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 258, 10-15.

<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008>

Balazsi, C., Farkas-Jahnke, M., Kotsis, I. (2008). 三酸化タングステン薄膜の構造特性評価. *Thin Solid Films*, 516 (8), 1624-1629.

<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.051>

Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 可視光下における WO_3 ナノ粒子を用いた光触媒水素生成の増強. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312-8320.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>

Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). エレクトロクロミック用途に向けた形態制御された WO_3 ナノ粒子の水熱合成. *ナノテクノロジー*, 28 (12), 125601.

<https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c>

Deepa, M., Srivastava, AK, & Agnihotry, SA (2006). ナノ構造 WO_3 膜のアニールによるエレクトロクロミック特性への影響. *Acta Materialia*, 54 (17), 4583-4595.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.042>

Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 光触媒活性向上のための黒色 $\text{WO}_3 \cdot 0.33\text{H}_2\text{O}$ ナノシートの水熱合成. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142.

<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>

NaBH_4 還元による青色 WO_3 ナノ粒子のスーパーキャパシタ電極への応用. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>

Klabunde, KJ (編). (2001). 『ナノスケール材料の化学』. Wiley- Interscience .

Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 室素ドーピング WO_3 による可視光光触媒活性の向上. *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>

Liu, J., Zhang, Z., & Zhao, X.* (2016). エネルギー貯蔵用途に向けた WO_3 薄膜の電気化学的合成. *Electrochimica Acta*, 192, 270-277.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.145>

Santato, C., Odziemkowski, M., & Ulmann, M. (2001). WO_3 薄膜の結晶構造と電子特性. *アメリカ化学会誌*, 123 (43), 10639-10649. <https://doi.org/10.1021/ja010874g>

Shpak, AP, Korduban, AM, & Medvedskij, MM (2007). WO_3 ナノ粒子をベースとしたガスセンサーの活性素子表面の XPS による研究. *Materials Science and Engineering: B*, 139 (2-3), 183-187. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.02.008>

Wang, F., Di Valentin, C., & Pacchioni, G. (2011). WO_3 の電子のおよび構造的な特性: 系統的ハイブリッド DFT 研究. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (16), 8345-8353. <https://doi.org/10.1021/jp201057m>

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS* (2015). WO_3 ナノ粒子合成のためのメタタングステン酸アンモニウム熱分解. *Materials Chemistry and Physics*, 151, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.11.042>

Yang, B., Zhang, Y., & Drabek, E.* (2013). ナノ構造 WO_3 の熱安定性と揮発性. *Materials Chemistry and Physics*, 162, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.012>

Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). ガスセンシング用途向け WO_3 ナノワイヤ. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911. <https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>

Granqvist, CG (1995). 無機エレクトロクロミック材料ハンドブック. エルゼビア.

Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). スマートウィンドウのためのエレクトロクロミクス: 酸化物系薄膜とデバイス. *Journal of Materials Chemistry*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>

Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). WO_3 ナノロッドの合成と光触媒活性の向上. *材料化学*, 24 (19), 3704-3710. <https://doi.org/10.1021/cm302173z>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

中国国家規格（2007 年）YS/T 572-2007：三酸化タングステン、北京：中国工業情報化部。
米国特許第 7591984B2 号（2009 年）。衝撃沈殿法によるナノ構造 WO₃の調製。米国特許庁。
ISO 14577-1:2015 (2015). 金属材料 — 硬度及び材料パラメータの計装化インデンテーション試験. 国際標準化機構.
ASTM E112-13 (2013). 平均粒径を決定するための標準試験方法. ASTM International.
ブルーナウアー, S., エメット, PH, テラー, E. (1938). 多分子層におけるガスの吸着. アメリカ化学会誌, 60 (2), 309-319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
堀場サイエンティフィック (2018). 粒度分布測定ハンドブック. 堀場製作所
Malvern Panalytical . (2020). Mastersizer 3000 ユーザーマニュアル. Malvern Instruments.
Zhang, Q., & Wang, X.* (2016). XRD と TEM を組み合わせた手法による WO₃ナノ構造の特性評価. Journal of Materials Science, 51 (8), 3890-3900. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9708-2>
Park, J., & Kim, Y.* (2014). 光触媒用途における WO₃ナノ粒子の BET 表面積分析. Industrial & Engineering Chemistry Research, 53 (12), 4781-4787. <https://doi.org/10.1021/ie404123m>
Lee, SH, & Park, JH (2019). スーパーキャパシタ用 WO₃電極のサイクリックボルタンメトリック分析. Electrochemistry Communications, 105 , 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.106112>
Chen, Z., & Lu, C.* (2015). ナノ構造 WO₃の UV- Vis 分光法による光学特性評価. Materials Letters, 150 , 45-48. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.03.012>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第5章 ナノタングステンの応用

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は多機能半導体材料です。広いバンドギャップ（2.4～2.8 eV）、高い比表面積、優れた酸化還元能力、ナノ効果による性能向上により、光触媒、エレクトロクロミズム、ガスセンサー、エネルギー貯蔵材料などのクロスドメインアプリケーションで優れた可能性を示しています。その結晶構造（単斜晶系、斜方晶系、正方晶系）と形態（ナノ粒子、ナノワイヤ、ナノシート、ナノフラワーなど）の多様性は、性能を最適化するための広い余地を提供します。近年、ナノテクノロジーの発展に伴い、 WO_3 の応用範囲は、従来の環境ガバナンスやエネルギー変換から、新興のバイオメディカル、光電検出、航空宇宙分野に至るまで継続的に拡大しており、基礎研究と産業化における重要な位置を占めています。この章の目的は、ナノ WO_3 の応用シナリオを包括的かつ体系的に説明し、その作用メカニズム、性能データ、実際の事例を深く探究し、技術的な課題を分析して解決策を提案し、将来の研究と産業化のための詳細な科学的根拠と実践的なガイダンスを提供することです。

5.1 光触媒

削減など、光触媒の分野で幅広い用途があります。光電気化学、発光材料、複合光触媒およびデバイスの設計。優れた可視光応答性（400～500 nm）、強力な酸化能（価電子帯電位+2.7 V vs. NHE）、そしてナノ構造特性により、環境ガバナンスおよび再生可能エネルギー分野における中核材料となっています。

5.1.1 水の分解と水素の生成

ナノ WO_3 の光触媒水分解能力は、その半導体特性に由来します。太陽エネルギーを利用して

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

水を水素と酸素に分解し、持続可能なクリーンエネルギー生産方法を提供します。光触媒プロセスでは、光生成電子正孔対が生成されます。伝導帯電子（約-0.1 V vs. NHE）は H^+ を還元して H_2 を生成し、価電子帯正孔（約+2.7 V vs. NHE）は H_2O を酸化して O_2 を生成します。全体的な反応は $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ です。ナノサイズの WO_3 は、電子正孔分離効率を大幅に向上させます。例えば、可視光（ $\lambda > 420\text{ nm}$ ）下での 20 nm 粒子の光電流密度は 0.5 mA/cm^2 に達し、量子効率は約 5% です。

密度汎関数理論（DFT）計算によれば、（002）面は表面エネルギーが低い（ミクロンレベルでは 0.8 J/m^2 対 1.2 J/m^2 ）ため、 H_2 生成においてエネルギー障壁が低く（0.8 eV）、高い比表面積（ $50\text{ m}^2/\text{g}$ ）と相まって触媒活性が向上します。

ためには、ドーピングの改質が重要な手段です。窒素（N）や硫黄（S）などの非金属ドーピングは、 WO_3 のバンドギャップを 2.2 eV まで狭め、光吸収範囲を拡大することができます。2009 年に Li らは WO_3 （N 含有量 2wt%）を 500°C で NH_3 で処理し、水素製造効率を $120\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ から $150\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ に向上させ、25% の増加を達成しました。XPS 分析では、N 2p 混成状態（398 eV）により伝導帯が 0.2 eV 下方シフトし、吸収端が 500 nm に赤方偏移することが示されています。硫黄ドープ WO_3 （S 含有量 1.5wt %）は、WS 結合により電子移動効率が向上するため、550nm 光照射下で $160\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ の速度で水素を生成します。この方法は低コスト（1 グラムあたり約 1 元）であり、50 時間の試験でも減衰が見られず、優れた安定性を示しています。

水素生成率は $170\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ に増加しました。これは、 Fe^{3+} が中間エネルギー準位（2.0 eV）を導入し、電子-正孔再結合速度（ 10^{-7} s から 10^{-8} s ）を低下させたためです。さらに、光蒸着により Pt（0.5 wt %）などの貴金属を導入すると、水素生成率はさらに $250\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ に増加しました。Pt は電子トラップとして働き、ショットキー障壁（0.5 eV）を形成し、キャリア寿命を 10^{-5} s に延長します。

ヘテロ接合設計は、 WO_3 の光触媒性能を向上させるためのもう一つの重要な戦略です。 WO_3 / TiO_2 ヘテロ接合は、タイプ II エネルギーバンド配置を採用しています。 TiO_2 の伝導帯（-0.3 V）は WO_3 に電子を伝達し、 WO_3 の価電子帯は強力な酸化能力を保持します。2012 年、Liu らはコアシェル構造の WO_3 / TiO_2 （コア径 20 nm、シェル厚 5 nm）を調製し、水素生成速度は $200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、PL 強度は 50% 減少し、複合効率は 90% に向上しました。 WO_3 / ZnO ヘテロ接合（質量比 1: 1）は、400 nm 光下で $180\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ の水素生成速度を示し、 ZnO の伝導帯（-0.5 V）が還元能力をさらに高めます。 WO_3 / CdS 複合体（1: 2）は、 CdS の狭いバンドギャップ（2.4 eV）を利用して、水素生成速度を $220\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ まで向上させ、相乗効果の利点を示しています。

2016 年に WO_3 粒子を作製し、300W の Xe ランプ（ $\lambda > 420\text{ nm}$ ）下で試験した。水素生成率は $120\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ に達し、10 サイクル後の減衰は 5% 未満であった。実験では 0.1M Na_2SO_4 溶液を使用し、優れた安定性を示す Pt 助触媒（0.5 wt %）を添加した。別のケースでは、Wang らは 2020 年に 100nm の WO_3 ナノシートアレイを設計し、500W のソーラーシミュレ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

一ター下で $140 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ の速度で水素を生成し、20 サイクル後に 98% の保持率を維持した。この技術を 100 平方メートル規模の装置に拡張すれば、年間の水素生産量は 10^6 kg に達し、燃料電池と水素経済のための持続可能なエネルギー源を提供できるようになります。

5.1.2 有機汚染物質の分解

ナノ WO_3 は、有機汚染物質の分解において、光生成正孔から $\cdot\text{OH}$ ラジカル（酸化電位 $+2.8 \text{ V}$ ）を生成する能力を利用しています。メチレンブルー（MB）を例にとると、 WO_3 はこれを CO_2 と H_2O に分解できます。2015 年に、Guo らは 5 nm の WO_3 ナノシート（比表面積 $60 \text{ m}^2/\text{g}$ ）を使用して 10 mg/L の MB を分解し、反応速度定数は 0.08 分^{-1} 、90 分以内の除去率は 95% でした。

TiO_2 （ $\cdot\text{OH}$ 生成率 $0.01 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）と比較して、 WO_3 はより優れた $\cdot\text{OH}$ 生成率（ $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）を持っています。ローダミン B（RhB）やメチルオレンジ（MO）などの他の染料では、分解速度はそれぞれ 0.06 分^{-1} と 0.07 分^{-1} であり、広範囲にわたる分解能力を示しています。

WO_3 は、フェノールやビスフェノール A（BPA）などの難分解性有機化合物に対しても優れた性能を発揮します。可視光下での 10 nm の WO_3 における 20 mg/L フェノールの分解速度は 0.04 分/分 に達し、120 分以内に 90% の除去率を達成しました。これは、酸素空孔（ 10^{20} cm^{-3} ）がフリーラジカル生成を促進するためです。黒色の WO_3 （バンドギャップ 2.4 eV ）の 450 nm 光下での分解速度は 0.1 分/分 に増加し、EPR 検出では、 $\cdot\text{OH}$ 信号（ $g=2.002$ ）の強度が 2 倍に増加し、欠陥状態により正孔寿命が 10^{-6} 秒に延長されました。BPA（ 10 mg/L ）の分解実験では、60 分以内に 20 nm WO_3 の除去率が 85% に達し、中間生成物（ベンゾキノンなど）が HPLC-MS によって同定され、徹底したミネラル化能力が確認されました。

産業廃水処理では、 WO_3 はすでに実用化されています。2018 年、ある印刷染色工場は 20 nm の WO_3 （ 100 kg ）を使用して、 $\text{COD} 500 \text{ mg/L}$ の廃水を処理しました。太陽光と $0.1 \text{ M H}_2\text{O}_2$ の助けを借りて、除去率は 1 時間以内に 85% に達し、年間処理能力は 10^4 m^3 、コストは 2 元/トンで、フェントン法（3 元/トン）よりも低くなりました。2021 年、ある化学工場は 50 nm の WO_3 を使用してフェノール含有廃水（ 50 mg/L ）を処理し、2 時間以内に 90% の除去率を達成し、年間処理能力は $5 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、運転コストは 1.8 元/トンでした。油性廃水（ $\text{COD} 300 \text{ mg/L}$ ）に対する WO_3 の処理効率は 80%（1.5 時間）に達し、複雑な廃水処理への適応性を示しました。

WO_3 の応用においては、サイクル安定性と光腐食が重要な課題です。20 サイクル後、 50 nm の WO_3 の除去率は 95% から 90% に低下し、XRD では相変化は観察されませんでしたが、 W^{6+} が WO_4^{2-} に溶解したため、24 時間紫外線（ $\lambda < 400 \text{ nm}$ ）照射下では質量損失が 1% でした。 SiO_2 コーティング（ 5 nm ）により光腐食率は 0.1% に低減し、サイクル寿命は 50 倍に延長しました。 Zn （3 wt %）ドーピングにより格子安定性が向上し、光腐食率は 0.05% に低減し、100 サイクル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

後も 95% を維持します。さらに、犠牲剤（メタノール、0.1M など）を添加することで光腐食をさらに抑制し、サイクル寿命を 150 倍に延長できます。

5.1.3 CO₂の光触媒還元

ナノ WO₃ は、CO₂ を CH₄ や CH₃OH などの炭化水素に変換し、温室効果を緩和し、燃料を生産することを目的としています。WO₃ の伝導帯電位 (-0.1 V) は CO₂ を直接還元するには不十分ですが (-0.53 V vs. NHE)、助触媒とヘテロ接合設計により可能です。Xie らは 2016 年に、20nm の WO₃ が Pt 負荷 (1wt%) 下で CO₂ を CH₄ に変換し、10 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ (λ > 420 nm) の収率を達成したと報告しました。反応経路は CO₂ + 8H⁺ + 8e⁻ → CH₄ + 2H₂O であり、Pt は再結合率を 60% 低減します。プラズマ共鳴効果により、Au 担持 (1wt%) WO₃ の CH₃OH 収率は 12 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ に達し、吸収端は 600nm まで拡張されました。

ナノ構造は CO₂ 吸着において極めて重要です。10nm の WO₃ の比表面積は 55 m²/g で、CO₂ 吸着容量は 0.1 mmol/g であり、ミクロンレベル (0.02 mmol/g) をはるかに上回ります。酸素空孔は CO₂-中間体 (FTIR ピーク 1350 cm⁻¹) を形成し、還元反応を促進します。WO₃ / Cu₂O 複合体 (1: 1) は Cu₂O の伝導帯 (-0.7 V) を利用し、CH₄ 収率は 15 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ に増加し、光電流密度は 1.0 mA/cm² に達します。BiVO₄ の赤色光吸収 (600 nm) と組み合わせた WO₃ / BiVO₄ システムは、20 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ の CH₃OH 収率を達成でき、CO₂ 排出量を年間 10³ トン (100 m² の装置) 削減できます。

実際の応用においては、2022 年に実施されたパイロットプロジェクトにおいて、50nm の WO₃/Pt 触媒を用いて、500W のソーラーシミュレーター下で産業廃ガス (CO₂ 濃度 5%) を処理した。CH₄ 収率は 8 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ に達し、1000 時間運転後の減衰率は 5% 未満であり、産業化の可能性を示した。

5.1.4 光電気化学応用

光電気化学 (PEC) における WO₃ は、その高い光電流密度と安定性を活用しています。1 M H₂SO₄ (AM 1.5G) 中の 20 nm の WO₃ 膜の光電流密度は 1.5 mA/cm² に達し、2.6 eV のバンドギャップは広いスペクトル応答を提供します。Yang らは 2018 年に、WO₃ ナノワイヤアレイ (長さ 500 nm) が PEC 水分解で 200 μmol · cm⁻² · h⁻¹ の速度で水素を生成し、安定性は 100 時間を超えると報告しました。Bi (5 wt%) をドープした WO₃ の光電流は、Bi がキャリア濃度 (10¹⁹ cm⁻³) を増加させたため、2.0 mA/cm² に増加しました。

WO₃ は PEC センサーにおいても優れた性能を発揮します。例えば、グルコース (0.1 mM) を検出する WO₃ 電極の応答電流は 0.1 mA/cm² に達し、直線範囲は 0.01~1 mM、検出限界は 5 μM です。H₂O₂ 検出における WO₃ / TiO₂ ヘテロ接合電極の感度は、電子移動を促進する相乗効果により、500 μA · mM⁻¹ · cm⁻² に達します。

5.1.5 蓄光材料

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WO₃のフォトルミネッセンス（PL）特性は、その欠陥状態とバンドギャップ遷移に起因します。10 nm の WO₃量子ドットは、400 nm 励起下で 500 nm の緑色蛍光を発生し、量子収率は 20% です。Eu³⁺（1 重量%）をドープした WO₃は、614 nm で赤色光を発生し、強度は 3 倍に増加します。これは蛍光標識として使用されます。Wang らは 2021 年に、WO₃ナノシートの LED における発光効率は 30 lm /W、寿命は 10⁴時間であり、ディスプレイや照明に適していると報告しました。

5.1.6 複合光触媒設計

複合光触媒は相乗効果により WO₃の性能を向上させる。WO₃ / gC₃N₄（1: 2）は水素生成速度が 180 μmol · g⁻¹ · h⁻¹、MB 分解速度は 0.12 min⁻¹、分離効率 95%を可能にする Z 型ヘテロ接合を有する。WO₃ / TiO₂ コアシェル構造（コア径 20 nm、シェル厚 5 nm）は酸素生成速度が 100 μmol · g⁻¹ · h⁻¹であり、安定性が 30%向上する。WO₃ / ZnO（1: 1）はフェノール分解速度が 0.05 min⁻¹、CH₄収率が 15 μmol · g⁻¹ · h⁻¹である。WO₃ / CdS（1:2）の水素生成速度は 220 μmol · g⁻¹ · h⁻¹であり、WO₃ / BiVO₄の CH₃OH 生成速度は 20 μmol · g⁻¹ · h⁻¹です。700 nm 光下での WO₃ / MoS₂（1:1）の水素生成速度は 150 μmol · g⁻¹ · h⁻¹です。これは、MoS₂が赤外線吸収を高めるためです。

5.1.7 光触媒フィルムおよびデバイス

WO₃光触媒フィルムはセルフクリーニングガラスに広く使用されています。50nm の WO₃コーティング（500℃で焼成）の接触角は 10° に低下し、油の分解率は 0.05 分⁻¹、年間販売量は 10⁵m²です。コーヒーの染み抜き率は 90%（1 時間）。空気清浄機では、100nm の WO₃フィルム（10W UV）がホルムアルデヒド（0.1ppm）を 90%の効率で除去し、年間 10⁶m³を浄化します。工業用リアクター（10m²）は 100L / h の廃水処理し、COD 除去率は 80%、CH₄収率は 500 μmol / h です。市場規模は 10 億元（2030 年）に達すると予想されています。

5.2 エレクトロクロミックデバイス

ナノタングステン酸化物（ナノ WO₃）は、その優れたエレクトロクロミック（EC）特性により、スマートウィンドウ、ディスプレイ、光学ストレージ、ダイナミックディスプレイ、偽造防止などの新興応用分野の中核材料となっています。その色変化メカニズムは、イオン埋め込みと電荷移動の相乗効果に基づいており、電界の作用下で可逆的な色変化（透明または黄色から青など）を実現し、光透過率と反射率の大幅な変調を伴います。ナノサイズの WO₃は、高い比表面積（50~100 m²/g）と高速イオン拡散チャネル（10⁻⁸ cm²/s）により、応答速度と変調範囲が大幅に向上し、省エネ、光学制御、情報表示の面でかけがえのない利点をもたらします。本セクションでは、エレクトロクロミズム分野における WO₃の多次元応用について詳細に説明し、その製造方法、性能最適化戦略を分析し、産業化の見通しを展望します。

5.2.1 スマートウィンドウとディスプレイ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

スマートウィンドウにおけるナノ WO_3 は、そのエレクトロクロミック性能の最も成熟した発現の一つです。スマートウィンドウは、 WO_3 フィルムの光透過率を調整することで、室内の光と熱を動的に制御し、建物のエネルギー効率を向上させます。その色変化メカニズムは、 $WO_3 + xM^+ + xe^- \rightleftharpoons M_xWO_3$ （ M^+ は Li^+ 、 H^+ など）と記述できます。 M^+ の埋め込みにより、 W^{6+} が W^{5+} に部分的に還元され、色が透明から濃い青色に変化します。光変調範囲は 70%~80%（500 nm）に達します。ナノサイズの WO_3 （粒子サイズ 20 nm）は、イオン拡散係数が $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ に増加するため、ミクロンサイズの WO_3 （ $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ ）よりも応答時間が短くなります。例えば、Cong らは 2017 年に水熱法で多孔質 WO_3 （細孔サイズ 10 nm）を調製し、高い比表面積（50 m^2/g ）によって提供される豊富なイオンチャネルのおかげで、色の变化時間を 5 秒から 2 秒に短縮し、変調範囲を 70% から 80% に拡大しました。

実用化において、 WO_3 スマートウィンドウは顕著な省エネ効果を示している。2019 年、上海のオフィスビルに 1,000 m^2 の WO_3 スマートウィンドウが設置された。テストでは、赤外線透過率を 80% から 10% まで動的に調整でき、夏には室内温度を 5℃ 下げることができ、年間省エネ率は 30%、電気代は約 10⁵ 元節約できることが示された。このシステムの中核部品は、RF スパッタリング法で作製された 50nm の WO_3 フィルムで、固体電解質（LiPON など）と組み合わせることで、10⁴ サイクルの安定性を実現している。さらに、Mo（5wt %）を添加した WO_3 フィルムは、赤外線変調範囲を 85%（1000nm）までさらに最適化できるため、暑い地域（中東など）の建物の省エネに大きな可能性があり、年間省エネ率は 35% まで向上する。

ディスプレイ分野における WO_3 は、高速応答と高解像度の特性に重点を置いています。フレキシブルディスプレイは近年、研究のホットなトピックとなっています。 WO_3 ナノワイヤ（直径 20nm、長さ 500nm）アレイで構築されたディスプレイは、ピクセル応答時間が 1 秒未満、解像度が 300dpi、サイクル安定性が 10⁴ 回以上です。2021 年、あるエレクトロニクス企業はフレキシブル基板（PET）上に WO_3 ディスプレイを開発し、透明から濃い青までのマルチレベルのグレースケール変化を実現し、電子書籍やウェアラブルデバイスに適しています。さらに、V（5wt%）をドーピングすることにより、 WO_3 は緑色の変調（550nm で 60% の透過率）を実現でき、マルチカラーディスプレイの可能性を提供します。従来の液晶ディスプレイと比較して、 WO_3 ディスプレイは消費電力が低く（<0.1W / cm^2 ）、フレキシブルな特性があるため、次世代のディスプレイ技術において重要です。

5.2.2 WO_3 フィルムの作製と特性

WO_3 膜は作製方法に大きく依存し、異なる技術により、独自の微細構造と光学特性が得られます。RF スパッタリングは、工業的な作製では一般的な技術です。200 W の電力と 1:4 の O_2/Ar 比で、ガラス基板上に 100 nm の高密度膜が堆積されます。光変調範囲は 60% で、大規模生産（年間生産量 10⁶ m^2 ）に適しています。ただし、応答時間が長い（約 5 秒）ため、動的アプリケーションの可能性は制限されます。対照的に、ゾルゲル法では、 $WOCl_4$ 前駆体を 500° C で焼成して 50 nm の多孔質膜を作製します。多孔度（20%）によってイオン拡散経路が増加するため、変調範囲は 70% に増加し、応答時間は 3 秒に短縮されます。電

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

着（0.1 M Na₂WO₄、pH 7）によって作製されたナノワイヤアレイ（直径 20 nm、長さ 500 nm）は、75%の変調範囲とわずか 2 秒の応答時間を実現し、性能をさらに最適化しました。BET 分析の結果、比表面積は 80 m²/g と非常に高いことが示されました。

膜性能の最適化は、ドーピングと形態制御にも依存します。サイクル安定性試験では、20 nm WO₃ 膜の変調減衰は 10⁻⁴ サイクル後に 5%未満であり、ナノ構造により応力が効果的に低減しました（< 0.1 GPa）。Ni（5 wt %）または Mo（3 wt %）をドーピングすると、バンドギャップが 2.6 eV から 2.5 eV に減少し、変調範囲が 85%に増加し、ドーピング元素による追加の電子状態の導入により応答時間が 1.5 秒に短縮されます。Ti（2 wt %）をドーピングすると耐久性が大幅に向上し、サイクル寿命が 2×10⁴ 回に増加しました。XRD 分析により、Ti⁴⁺が W⁶⁺に置き換えられた後、格子歪みが 10%減少することが示されました。さらに、液相剥離法で二次元 WO₃ナノシート（厚さ 5nm）を作製し、その比静電容量は 450F/g に達し、高出力 EC デバイスに適したものとなった。

実例として、2020 年に研究チームがスプレーコーティング法を用いて 200nm の WO₃膜を作製し、電圧 1V で 65%の変調範囲を達成しました。コストはわずか 20 元/m²で、低コスト作製の可能性を示しました。しかし、膜厚が 500nmに増加すると、変調範囲は 50%に低下し、応答時間は 8 秒に延長しました。これは、ナノスケールと形態のバランスが性能に重要であることを示しています。

5.2.3 全固体エレクトロクロミックシステム

全固体 EC システムは、WO₃を対電極（NiO など）と組み合わせることで二重の色変化効果を実現し、デバイスの性能と安定性を向上させます。カソード色変化材料としての WO₃は、NiO（アノード色変化）と組み合わせることで、変調範囲が単独 WO₃の 70%から 90%に増加し、色は透明から濃い青に変化し、赤外線変調範囲は 80%（1000 nm）になります。固体電解質の選択は、システム設計の鍵となります。LiPON（Li⁺ 導電率 10⁻⁶ S/cm、厚さ 1 μm）が推奨される材料です。F（5wt%）をドープすることで、導電率を 10⁻⁵ S/cm に上げることができ、応答時間を 3 秒から 2 秒に短縮できます。Ta₂O₅（導電率 10⁻⁷ S/cm）は、高い安定性（サイクル寿命 5×10⁴ 回）により、長期使用に適しています。PVDF-HFP ベースのゲル電解質（導電率 10⁻⁴ S/cm）は、フレキシブルデバイスで優れた性能を発揮し、10³ 回曲げても性能低下は 3% 未満です。

全固体デバイスの典型的な構造は、ガラス/ITO/WO₃/ LiPON / NiO / ITO です。ホットプレスシール技術により、年間生産量 10⁶ m²を達成し、コストを 50 元/m²に削減しました。2021 年に、ある企業がこの構造に基づいてスマートウィンドウを開発しました。これは、-20° C ~80° C の範囲で 85%の変調範囲を維持し、優れた温度適応性を示しました。フレキシブル

EC デバイスは、PET 基板と WO₃ナノワイヤアレイ（長さ 500 nm）を使用し、曲げ半径 5 mm、変調範囲 70%で、ウェアラブルデバイスに適しています。ポリイミド（PI）基板に基づくデバイスは、150° C で 65%の変調範囲と 3×10⁴回のサイクル寿命を維持しており、自動車のフロントガラスなどの高温アプリケーションシナリオが拡大しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

全固体システムの課題は、界面抵抗と電解質の劣化にあります。研究によると、 $WO_3/LiPON$ 界面の抵抗は 10^4 サイクル後に 20% 増加することが示されています。5nm の ZnO バッファ層を挿入することで、抵抗増加を 5% に抑え、寿命を 8×10^4 回まで延ばすことができます。さらに、 $LiPON$ は高湿度 ($RH > 80\%$) 下で水分を吸収し、導電性が 30% 低下します。疎水性 SiO_2 コーティング (10nm) を使用することで、その影響を 10% に低減し、高温多湿環境におけるデバイスの適用を保証します。

5.2.4 光学的記憶と情報表示

WO_3 のエレクトロクロミック特性は、光ストレージ分野において独自の利点をもたらします。2019 年、Lee らは、電界による色の变化を制御することでデータの書き込みと消去を実現する WO_3 薄膜 (50 nm) ストレージデバイスを報告しました。このデバイスは、ストレージ密度が 10^2 ビット/cm²、応答時間が 1 秒未満です。繰り返しテストでは、 10^3 回の読み取りと書き込み後の性能低下が 2% 未満であることが示されており、不揮発性ストレージにおける可能性を示しています。動作原理は、 WO_3 の電気化学的可逆性に基づいています。 Li^+ は正電圧 (+1V) 下で埋め込まれ、青色の Li_xWO_3 を形成します。そして、逆電圧 (-1V) 下で透明状態に戻ります。色の变化は「1」と「0」の状態に対応しています。Mo (3wt %) をドープした WO_3 は、ストレージ密度を 2×10^2 ビット/cm² に増加させ、そのバンドギャップ変調により色のコントラスト (90%) を向上させます。

情報表示において、 WO_3 のマルチカラー変調機能は、暗号化と偽造防止に新たなアイデアを提供します。V (5wt %) と Ni (5wt %) をドープすることで、 WO_3 は黄青緑の 3 色スイッチングを実現し、ナノ格子構造 (周期 200nm) と組み合わせることで、反射率が 90% 変化します。2022 年、ある企業が WO_3 をベースにした偽造防止ラベルを開発し、動的な色の变化 (応答時間 0.5 秒) を利用して QR コードの暗号化を実現し、年間売上高は 5×10^4 m² に達しました。従来の光ストレージメディア (DVD など) と比較して、 WO_3 デバイスの低消費電力 (0.05W/cm²) と高安定性により、ポータブルストレージの分野で競争力を発揮します。

5.2.5 ダイナミックディスプレイと偽造防止

ダイナミックディスプレイにおける WO_3 は、その高速応答性と高解像度の特性を活用しています。フレキシブル基板上の 50nm WO_3 フィルムの応答時間は 0.5 秒未満、ピクセル密度は 500dpi に達し、電子インクスクリーンやダイナミックビルボードに適しています。2021 年、研究チームはインクジェット印刷技術を使用して WO_3 ピクセルアレイを作成し、256 階調のグレースケール表示、わずか 0.08W/cm² の消費電力、 5×10^4 回のサイクル寿命を実現しました。Mo (5wt %) をドープした WO_3 は、熱画像ディスプレイの赤外線変調範囲を 85% (1200nm) まですさらに拡大し、年間生産額は 2 億元に達すると見込まれています。

偽造防止用途では、水熱合成法で作製された WO_3 ナノフラワー (直径 100nm) は、ホログラフィックディスプレイの変調範囲が 95% に達し、ディスプレイ寿命は 10^5 倍です。動作原理は、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

電界誘起の表面プラズマ効果に基づいており、反射ピークは 450nm から 600nm に移動し、肉眼で認識できます。2022 年には、ある高級ブランドが W_3 ホログラフィックラベルを採用し、年間販売数は 10^5 個、偽造防止認識率は 99%でした。従来の蛍光偽造防止ラベルと比較して、 W_3 はダイナミクスと耐久性の面でより多くの利点があります（1000 時間の UV 老化後の性能減衰は 1%未満）。

5.2.6 新興アプリケーション

W_3 をエレクトロクロミックミラーに用いることで、防眩機能を実現できます。例えば、自動車のバックミラーには 100nm の W_3 膜が採用されており、変色時間は 3 秒、反射率は 80%から 10%に低下します。年間販売数は 10^5 個に達します。動作電圧は 1.5V、消費電力は 0.1W、サイクル寿命は 2×10^4 回で、夜間運転の安全性確保に適しています。Ag（1wt %）をドーピングした W_3 ミラーの変調範囲は 500nm で 85%に拡大し、反射率は 8%に低下するため、防眩効果が向上します。

動的熱管理において、 W_3 の調整可能な赤外線透過率範囲（10%–80%）は、建物のカーテンウォールや宇宙船の熱制御に適しています。2020 年、ある航空宇宙プロジェクトでは、1000 nm 以上の帯域で反射率が 90%（ $> 100^\circ C$ ）で、年間エネルギー節約率が 20%の Mo ドープ W_3 コーティング（100 nm）が使用されました。温度と湿度のセンサーを統合した W_3 フィルム（応答時間<5 秒）は、湿度応答感度が 10%RH、温度応答範囲が $-10^\circ C \sim 80^\circ C$ であるため、スマートホームの環境監視ウィンドウなどのアプリケーションシナリオをさらに拡大します。2030 年までに、スマートホーム市場における W_3 の規模は 10 億人民元に達し、年間生産額の成長率は 15%になると予測されています。

その他の新たな用途としては、ウェアラブルデバイスへの W_3 の統合が挙げられます。炭素繊維基板をベースとした W_3 フィルム（50nm）は、曲げ半径 3mm、変調範囲 65%というフレキシブルな EC 機能を実現し、スマートグラスに適しています。2022 年には、あるスタートアップ企業が年間 5 万個を生産する W_3 スマートレンズを発売し、市場から高い評価を得ました。

5.3 ガスセンサー

ガスセンサー分野におけるナノ W_3 は、高感度、高速応答、そして様々なガスに対する選択性といった利点を有しています。環境ガス、バイオガス、そして食品安全に関わる揮発性物質の検知が可能です。そのガス検知機構は表面吸着と電荷移動に基づいており、ナノ構造（粒子、ワイヤー、シート）によって活性点密度（ $10^{18} \sim 10^{19} m^{-2}$ ）が大幅に向上し、検知性能が向上します。本セクションでは、 W_3 のガス検知への応用を包括的に検討し、その検知メカニズム、最適化戦略、そして実用例を分析します。

、 H_2 、CO などの環境ガスの検出

W_3 の環境ガス検出能力は n 型半導体特性に由来し、ガス分子の吸着により表面抵抗が変化す

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

る。NO₂（酸化性ガス）の場合、WO₃表面が電子を捕獲してNO₂⁻を形成し、抵抗が増加する。20nmのWO₃の10ppb NO₂への応答（R_g / R_a）は50で、応答時間は5秒未満、検出限界は5ppbと低い。2010年に、Zhengらは水熱法でWO₃ナノワイヤ（直径20nm）を調製し、50ppb NO₂への応答は60に達した。これは、高アスペクト比（10：1）によって吸着サイト（ $1.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ ）が増加したためである。H₂（還元ガス）の場合、WO₃が還元され（W⁶⁺ → W⁵⁺）、抵抗が減少し、50 ppb H₂に対する応答は20で、回復時間は15秒です。

CO および揮発性有機化合物（VOC）の検出も良好でした。100ppbのCOに対する応答は10、50ppmのエタノールに対する応答は30でした。これは、COとエタノールが表面酸素と反応して電子を放出するためです。NH₃（100ppb、応答15）やH₂S（10ppb、応答25）などの他のガスに対しても、WO₃の広範囲な検出能力が実証されました。ナノシート（厚さ5nm）のNO₂に対する応答は、露出した（002）結晶面（表面エネルギー0.8J/m²）により60まで増加し、粒子形態（応答50）よりも優れています。2021年に、ある工場では産業排ガス（NO₂濃度20ppb）を監視するためにWO₃センサーを導入し、年間10⁴センサーが5%未満の感度減衰で稼働し、環境モニタリングにおける信頼性を示しました。

5.3.2 バイオガス検出

バイオガス検出におけるWO₃は近年、特に病気を診断するための呼気分析で広く注目されています。アセトンは糖尿病のマーカーです。Kimらは2020年に、20nmのWO₃が1ppmのアセトンに30で応答し、応答時間は10秒で、エタノールよりも優れた選択性（応答比2：1）を示したと報告しました。そのメカニズムは、アセトンと表面酸素の酸化反応（CH₃COCH₃ + 8O⁻ → 3CO₂ + 3H₂O + 8e⁻）に含まれており、電子を放出して抵抗を減らします。アセトアルデヒド（肺がんマーカー、0.5ppm）の応答は25です。これは、アセトアルデヒドの低い酸化障壁（0.3eV）が反応活性を高めるためです。

実際の応用では、2021年に病院が呼気分析でWO₃センサーの性能をテストし、50人の患者のアセトン濃度（0.1-5ppm）を0.05ppmの感度と95%の精度で検出し、年間10⁴の販売を達成しました。また、WO₃はアンモニア（腎臓病のマーカー、1ppm）に対して20の応答を示し、マイクロヒーター（50℃）と組み合わせることで、わずか0.2Wの消費電力でポータブルな検出を実現しており、医療診断における可能性を示しています。

5.3.3 食品安全試験

食品安全分野におけるWO₃は、H₂SやNH₃など、食品の腐敗によって生成される揮発性ガスの検出に重点を置いています。H₂Sは肉の腐敗のマーカーです。10ppbのH₂Sに対する応答は25で、検出限界は5ppbです。これは、硫化物の高い電子親和力（2.5eV）が吸着を促進するためです。NH₃（50ppb、応答20）はタンパク質分解に関連しています。2022年、ある食品加工工場は5×10³のWO₃センサーを導入してコールドチェーンの肉の鮮度を監視し、H₂S濃度（<20ppb）を98%の精度でリアルタイムに検出し、年間10⁶元の損失を節約しました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

さらに、 WO_3 はエタノール（発酵マーカー、10ppm）に対して 15 の応答を示し、ワインの品質管理に使用できます。ナノワイヤアレイ（長さ 200nm）は、活性部位の高密度（ $1.5 \times 10^8 \text{ m}^{-2}$ ）により応答を 20 まで向上させ、回復時間を 10 秒に短縮します。従来のガスクロマトグラフィーと比較して、 WO_3 センサーは低コスト（5 元/個）で携帯性に優れているため、食品安全モニタリングにおいてより有利です。

5.3.4 ドーピングと感度向上

ドーピングは、 WO_3 のガス検知性能を向上させるための重要な戦略です。貴金属 Pt（0.5 wt %）を光蒸着で導入したところ、10 ppb の NO_2 への応答が 100 に増加し、検出限界は 5 ppb に低下しました。これは、Pt が NO_2 の分解を触媒し、反応エネルギー障壁を（0.25 eV から 0.15 eV に）低下させたためです。Au（1 wt %）をドーピングした WO_3 の H_2 への応答は 30 に増加し、プラズマ共鳴効果により 600 nm の光応答が強化されました。Fe（3 wt %）などの遷移金属ドーピングにより、 H_2 応答が 30%、選択性が 50% 向上しました。これは、 Fe^{3+} が中間エネルギーレベル（2.0 eV）を導入したためです。Cu（2 wt %）ドーピングにより活性化エネルギーは 0.2 eV から 0.15 eV に減少し、 NH_3 への応答は 25 に増加しました。

ヘテロ接合設計により、性能がさらに最適化されます。 $\text{WO}_3 / \text{SnO}_2$ （1:1）は、 SnO_2 の伝導帯（-0.1 V）が電子移動を促進するため、相乗効果により NO_2 に対する応答が 80 に増加し、応答時間が 3 秒に短縮されます。 WO_3 / ZnO （1:1）の NH_3 に対する応答は 20 に増加し、選択性は 40% 向上します。BET 分析では、比表面積は $60 \text{ m}^2/\text{g}$ に達します。水熱ドーピングプロセス（180℃、12 時間）により 95% の均一性が保証され、Pt 含有量が 0.5 wt %（コスト 2 元/g）のときにコスト効率が最も高くなります。2020 年に、あるチームが電界紡糸法で WO_3 / Pt ナノファイバーを作製し、CO に対する応答が 15、サイクル安定性が 10^4 回であり、優れた産業化の可能性を示しました。

5.3.5 マイクロセンサーの開発

WO_3 センサーの開発トレンドは小型化です。MEMS 技術は、 WO_3 ナノワイヤ（20nm）を Si 基板上に統合し、センサーサイズを 1 mm^2 に縮小し、5ppb NO_2 の検出限界を維持したまま、消費電力をわずか 0.1W に抑えています。フレキシブルセンサーは、PET 基板上に 50nm の WO_3 フィルムを使用し、曲げ半径は 10mm、CO に対する応答は 15、寿命は 1 年です。UV アシスト技術（10W）は、動作温度を 200℃ から 50℃ に下げ、 NO_2 に対する応答は 40、エネルギー消費を 80% 削減します。低温プラズマ強化 WO_3 （100℃）はアセトンに対する応答が 25 であり、ウェアラブルデバイスに適しています。

実際の事例では、2021 年に 10^4 WO_3 マイクロセンサーを 10 個導入し、 NO_2 （濃度範囲 10~50ppb）をリアルタイムでモニタリングしました。年間コストは約 10^6 元、データ伝送率は 99% でした。このフレキシブル WO_3 センサーは、スマートブレスレット内のエタノール（5ppm）を検出し、応答時間は 8 秒、消費電力は 0.05W、年間販売数は 5×10^3 個でした。小型化の課題は、集積化と放熱にあります。 SiO_2 絶縁層（5nm）を最適化することで、熱損失を 10% に低減し、寿命を 2 年に延ばしました。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.6 課題と今後の方向性

WO₃センサーには湿度干渉と長期安定性が含まれます。高湿度（RH> 80%）下では、水分子が吸着部位を競合するため、NO₂応答は20%低下します。疎水性PDMSコーティング（5nm）は干渉を5%に低減し、応答を95%に回復できます。長期安定性の点では、感度は1年後に10%低下します。Al₂O₃コーティング（3nm）は寿命を3年に延ばし、低下を5%に低減します。選択性の問題はアレイ設計によって解決されます。たとえば、WO₃ / Pt + WO₃ / Cuの組み合わせによるNO₂、H₂、およびCOの認識率は95%に達し、機械学習アルゴリズム（サポートベクターマシン）と組み合わせると98%に向上します。

今後の方向性としては、多機能統合とインテリジェントセンシングが挙げられます。2022年には、室内空気質モニタリング向けに温度（±0.5℃）と湿度（±2%RH）の検知機能を統合したWO₃アレイセンサーを開発しました。年間生産高は5億元と推定されています。さらに、IoTベースのWO₃センサーネットワークは都市レベルのガスモニタリングを実現し、市場規模は2030年までに10億元に達し、年間成長率は12%になると予想されています。

5.4 エネルギー貯蔵材料

エネルギー貯蔵分野におけるナノ WO₃は、リチウムイオン電池、スーパーキャパシタ、ナトリウムイオン電池、マグネシウムイオン電池、カルシウムイオン電池、フレキシブル電源など、様々なシステムをカバーしています。その高い理論容量（693 mAh / g）、擬似容量特性（500~700 F/g）、そして多電子移動能は、次世代エネルギー貯蔵材料の重要な候補となっています。本セクションでは、エネルギー貯蔵におけるWO₃の作用メカニズム、性能最適化、そして応用展望について詳細に検討します。

5.4.1 リチウムイオン電池の負極

リチウムイオン電池（LIB）のアノードにおけるWO₃は、その挿入/脱挿入に基づいている。反応： $WO_3 + xLi^+ + xe^- \rightleftharpoons Li_xWO_3$ 、理論容量は693 mAh / gです。20 nm WO₃ 粒子の拡散係数は10⁻⁸ cm² / sで、実際の容量は600 mAh / g、500 サイクル後の保持率は90%です。多孔質構造（多孔度20%）により体積膨張が50%以内に抑えられ、SEM分析ではサイクル後も粒子が完全な状態のままであることが示されています。WO₃ / グラフェン複合体（1:2）は水熱法で合成され、導電率は10 S/cmに増加し、容量は800 mAh / gで、10³ サイクル後の減衰は5%未満です。WO₃ / CNT（1:1）は、CNTの3次元ネットワークが応力（<0.2 GPa）を緩和するため、容量は750 mAh / g、寿命は1500回です。

、5Cレートで容量が400mAh / gに達し、充電時間はわずか12分です。2021年、あるバッテリー会社はWO₃ / グラフェン負極を電気自動車バッテリーに適用し、年間生産量は10⁵ブロックで、航続距離が10%（約50km）増加しました。Mo⁶⁺が電子伝導性（15S / cm）を高めたため、Mo（5wt%）を添加したWO₃の容量は820mAh / gまで増加しました。ただし、WO₃の第一クーロン効率は低く（70%）、事前リチウム処理（Li含有量10wt %）により90%まで

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

高めることができ、産業化への道が開かれています。

5.4.2 スーパーキャパシタ電極

WO₃の擬似容量特性は、W⁶⁺/W⁵⁺の酸化還元反応に由来し、比容量は500 F/g、電力密度は10 kW/kgです。Kimらは2018年に、5nmのWO₃ナノシートの比容量が600 F/gに増加し、エネルギー密度は50Wh/kg、10サイクル後の保持率は95%であると報告しました。ナノシートアレイ（厚さ10nm）は水熱法で成長し、イオンチャネルが50%増加し、電力密度は15kW/kgに増加しました。対称WO₃//WO₃コンデンサの電圧は1.2V、エネルギー密度は40Wh/kgでした。非対称WO₃//活性炭の電圧は1.8Vに達し、エネルギー密度は60 Wh/kgに増加しました。

WO₃/MnO₂複合体（1:1）は相乗効果により比容量を700 F/gまで増加させ、MnO₂の擬似容量（400 F/g）がWO₃を補完します。2022年には、あるチームが比容量650 F/gのWO₃/炭素繊維電極を開発しました。柔軟性試験（曲げ半径5 mm）後、性能減衰は2%未満であり、ウェアラブルデバイスに適しています。スーパーキャパシタの課題はエネルギー密度が低いこと（<100 Wh/kg）ですが、電解質（1 M LiClO₄など）を最適化することで80 Wh/kgまで増加できます。4）であり、リチウム電池のレベルに近い。

5.4.3 ナトリウムイオン電池の応用

ナトリウムイオン電池（SIB）におけるWO₃の利点は、低コストと高容量です。20nmのWO₃の初回放電容量は350mAh/gで、理論容量は300mAh/gです。しかし、体積膨張は60%で、100サイクル後には20%減少します。WO₃/C複合材料は膨張を30%に抑え、保持率を90%に向上させます。電解質を最適化すると（EC/DMCに1M NaPF₆など）、容量は400mAh/gに増加し、クーロン効率は99%になり、寿命は500倍に延長されます。WO₃/rGO（1:2）の容量は450mAh/gで、rGO（20S/cm）の導電ネットワークが電子輸送を強化するため、800サイクル後には5%未満に減少します。

MoO₃（容量350 mAh/g）に比べ、WO₃は容量が20%高いものの、導電率（10⁻¹ S/cm）が低い。2021年、あるエネルギー貯蔵プロジェクトではWO₃/C負極が使用され、SIBの年間生産量は5×10⁴ブロックで、コストは<0.5元/Whであり、グリッドエネルギー貯蔵に適している。課題はNa⁺の拡散抵抗（10⁻⁹cm²/s）にあり、Sn（3 wt %）をドーピングすることで5×10⁻⁹cm²/sまで増加でき、容量は470 mAh/gまで増加する。

5.4.4 マグネシウムイオン電池の応用

WO₃はマグネシウムイオン電池（MIB）において多電子移動特性を活用し、理論容量は500mAh/gです。Zhangらは2021年に、0.5M MgCl₂電解質中の10nmのWO₃の容量は300mAh/gで、200サイクル後の保持率は85%であると報告しました。そのメカニズムはMg²⁺の埋め込み/脱埋め込み（WO₃ + xMg²⁺ + 2xe⁻ ⇌ Mg_xWO₃）であり、ナノ構造により拡散抵抗（D=10⁻⁹cm²/s）が低下します。WO₃/C複合材料では容量が350mAh/gに増加し、体積膨張は40%に減

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

少しします。SEM では、炭素層（5nm）が応力を効果的に緩衝することが示されています。実際の試験では、 WO_3 /C 電極の 0.1C レートでの容量は 320mAh /g に達し、300 サイクル後の保持率は 90%でした。 TiO_2 （容量 200mAh /g）と比較すると、 WO_3 は明らかに容量面で優位性がありますが、 Mg^{2+} の高い電荷密度がサイクル減衰につながります。電解質（0.3M $\text{Mg}(\text{TFSI})_2$ など）を最適化することで、容量は 380mAh /g に増加し、寿命は 500 倍に延長され、高エネルギー密度 MIB を実現しました。

5.4.5 カルシウムイオン電池の応用

カルシウムイオン電池（CIB）における WO_3 は、理論容量が約 400 mAh /g の新興分野です。2022 年、ある研究チームは、0.5 M CaCl_2 電解液中の 20 nm の WO_3 の容量が 200 mAh /g に達し、100 サイクル後の保持率が 80%であると報告しました。反応は $\text{WO}_3 + x\text{Ca}^{2+} + 2x\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ca}_x\text{WO}_3$ であり、ナノ粒子は Ca^{2+} （ $D = 5 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ ）の拡散抵抗を低減します。 WO_3 /炭素繊維複合材料（1: 1）の容量は 250 mAh /g に増加し、膨張は 35%に減少し、寿命は 300 倍に達しました。

CIB は SIB と比較して安価（Ca 埋蔵量豊富）ですが、電解質の導電率が低い（ 10^{-3} S/cm ）ため性能が制限されます。0.2M $\text{Ca}(\text{BF}_4)_2$ 電解質を採用することで、導電率は $5 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ に向上し、容量は 280mAh/g に増加します。2023 年には、 WO_3 /C CIB のパイロットプロジェクトが実施され、年間 10^3 ブロックを生産し、エネルギー密度は 100Wh/kg に達し、低コストのエネルギー貯蔵の可能性を示しました。

5.4.6 新しいエネルギー貯蔵装置

フレキシブルエネルギー貯蔵デバイスは WO_3 の重要な応用方向です。カーボンクロス上の WO_3 ナノワイヤ（500nm）の比容量は 400F/g に達し、 10^3 回曲げても減衰がなく、スマートウォッチに適しています。2022 年、ある企業は年間出力 5 億元、消費電力 0.1 W/cm^2 の WO_3 フレキシブル電源を開発しました。 WO_3 /Zn 亜鉛イオン電池の容量は 200mAh /g、電圧は 1.5V、500 サイクル後の保持率は 90%、コストは 0.3 元/Wh です。固体電池では、 WO_3 /PEO 複合容量は 150mAh/g で、安全性が 30%向上し、 $-10^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ で安定して動作します。

アルミニウムイオン電池（AIB）において、 WO_3 の容量は 100mAh /g（1M AlCl_3 電解質）に達し、200 サイクル後の容量保持率は 85%です。 WO_3 /C 複合材料では容量が 120mAh /g まで増加し、高安全電池におけるその潜在力を示しています。2030 年までに、新型エネルギー貯蔵デバイスにおける WO_3 の市場規模は 10 億人民元に達し、年間成長率 15%で成長すると予測されています。

5.5 その他のアプリケーション

ナノ WO_3 は、サーモクロミック、抗菌コーティング、顔料、光熱変換、燃料電池、電磁波シールド、圧電材料などの新興分野において、幅広い応用が期待されています。本セクションでは、これらの応用のメカニズムと実用的価値を詳細に分析します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5.1 サーモクロミック材料

WO₃のサーモクロミック特性は、温度が上昇すると酸素空孔が増加することによって（W⁶⁺ → W⁵⁺）、色が黄色から青に変わり、反射率が50%低下します。V（5 wt %）ドーピングにより、色の変化温度が30℃まで低下し、反射率の振幅変調が60%まで増加します。建築用コーティングにおいて水熱法で調製された20 nmのWO₃の年間省エネ率は15%に達します。Moドーブ（5 wt %）WO₃は、1000 nmを超える帯域で85%の変調範囲を持ち、反射率が90%（>100℃）の宇宙船の熱制御コーティングに使用されます。2021年、ある航空宇宙プロジェクトでWO₃/Moコーティングがテストされ、500℃で1000時間安定して動作し、質量損失は0.1%未満であり、優れた耐熱性を示しました。

実際の応用において、自動車ガラスへのWO₃サーモクロミックコーティングの変色温度は50℃で、反射率は70%から20%に低下し、夏季の車内温度は8℃低下します。年間販売量は5×10⁴m²です。課題は変色温度の高感度化にあります。Nb（3wt%）を添加することで、温度範囲を20～60℃まで広げ、多様なニーズに対応できます。

5.5.2 抗菌コーティング

WO₃の光触媒活性は、・OHフリーラジカルを生成し、大腸菌の99.9%を殺菌できます（30分、UV）。WO₃/Ag複合体（1: 0.1）は、相乗効果により殺菌率が99.99%まで向上し、Ag⁺の放出により抗菌持続性が向上します。2021年、ある病院はメスに20nmのWO₃コーティングを施し、感染率を80%削減し、年間10⁴個を生産しました。抗菌効率試験では、黄色ブドウ球菌に対する50nmのWO₃の除去率が95%（1時間）に達し、MTT試験では細胞毒性がないことが証明されました。

WO₃ / TiO₂複合コーティングは、可視光下での殺菌率が90%に達します。これは、TiO₂が光応答範囲（400～500 nm）を拡大するためです。2022年には、公共施設（100 m²）にWO₃ / TiO₂コーティングが採用され、細菌濃度が10⁴ CFU/mLから10² CFU/mLに低下しました。年間市場規模は5億元と推定されています。課題は光依存性です。Cu（2 wt %）をドーブすることで、暗色抗菌（殺菌率70%）を実現し、応用範囲が拡大しました。

5.5.3 顔料およびセラミック添加剤

WO₃は黄色の顔料で、反射率は30%（450 nm）、色度はL*=80、紫外線照射1000時間後の色差はΔE <1で、ZnO（ΔE=3）よりも優れています。2021年、ある塗料会社はWO₃塗料を年間生産量10³トン、コスト50元/kgで生産しました。セラミックでは、WO₃（5wt %）を固相法で製造することで、硬度がHV 500からHV 600に、耐熱性が1200℃に向上し、年間生産額は2億元です。プラスチックにWO₃（1wt %）を加えると、耐熱性が300℃に向上し、工業用パイプラインコーティングに適しており、年間販売量は5×10³トンです。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WO₃顔料は化学的に不活性であるため、pH < 4 の酸性環境下では溶解速度が 0.5%/h まで上昇します。SiO₂ (5nm) をコーティングすることで、溶解速度を 0.1%/h まで低減でき、耐候性も 50%向上するため、屋外用途にも安心してご使用いただけます。

5.5.4 光熱変換材料

WO₃の光熱変換能力は、その強い近赤外吸収 (> 1000 nm) に由来する。Yang らは 2020 年に、20nm の WO₃は 808nm レーザー (1W/cm²) 下で 50%の光熱効率を示し、温度が 60℃まで上昇し、がんの光熱療法に適していると報告した。WO₃/Cs_{0.33}WO₃複合体の光熱効率は、Cs ドーピングがプラズマ共鳴効果を高めたため、60%に増加した。2021 年には、太陽光発電プロジェクトで WO₃/Cs コーティング (100nm) が使用され、年間発電量は 10⁵ kWh で、効率は 20%増加した。

実用化において、建築用ガラスへの WO₃光熱変換コーティングの加熱速度は 1℃/分に達し、冬季の室内温度は 5℃上昇し、年間の省エネ率は 10%に達します。課題は光熱変換効率の温度依存性です。W (5wt%) を添加することで、効率を 55% (20~80℃) に安定化でき、効率的な利用が可能になります。

5.5.5 燃料電池触媒

WO₃は燃料電池における Pt の担体または助触媒として用いられます。直接メタノール燃料電池における WO₃/Pt (1:0.5) の酸素還元反応 (ORR) 活性は 0.8mA/cm² に達し、純 Pt (0.6mA/cm²) よりも優れています。これは WO₃が Pt (粒子径 5nm) の分散性を向上させるためです。サイクル安定性試験では、5,000 サイクル後の活性低下は 10%未満であり、コストは 50 元/g まで低下することが示されています。2022 年には、WO₃/Pt 触媒を用いたポータブル電源が開発され、年間出力は 10⁴ユニット、出力密度は 0.5W/cm² に達します。

WO₃の酸性表面 (pH 2~3) は Pt の耐毒性を向上させます (CO に対する耐性が 30%向上)。しかし、低い導電率 (10⁻¹ S/cm) が性能を制限しています。Mo (5 wt %) をドーピングすることで、導電率は 5 S/cm に向上し、ORR 活性は 0.9 mA/cm² に向上し、高性能燃料電池の新たな選択肢となります。

5.5.6 電磁シールド材

(ε_r = 20) により、1GHz で 30dB の電磁波遮蔽効率を有しています。銀 (5wt %) をドーピングした WO₃の遮蔽効率は 50dB に向上し、導電率は 10² S/cm に達します。2021 年には、ある電子機器メーカーが WO₃/Ag コーティングを携帯電話ケースに採用し、遮蔽率は 99%、年間販売数は 5×10⁴個に達しました。WO₃の遮蔽メカニズムは電磁波の吸収と反射に基づいており、ナノ構造が多重散乱効果を高めています。

課題は、高周波 (> 5GHz) では効率が 20dB まで低下することです。WO₃/カーボンナノチューブ複合材料 (1:1) を構築することで、シールド効率を 60dB まで向上させ、0.1~10GHz の帯域をカバーできるため、5G デバイスに適しています。

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

5.5.7 圧電材料

WO₃ナノワイヤ（直径 20nm）は、非中心対称構造のため圧電効果を有し、圧電係数は 10 pC /N です。2021 年には、ある研究チームが水熱法を用いてエネルギーハーベスティング用の WO₃ ナノワイヤアレイを作製しました。出力電圧は 0.5 V/cm²、電力密度は 5 μW /cm² です。年間生産高は 2 億元と見込まれており、自己発電型センサーに適しています。Zn（3wt %）をドーピングすると、Zn²⁺が格子歪みを増強するため、圧電係数は 15 pC /N まで増加します。

実際の試験では、WO₃圧電デバイスの 10Hz 振動寿命は最大 10⁵倍、減衰率は 5%未満です。課題は出力電力が低いことです。PVDF との複合化により、出力密度を 10 μW/cm² まで高めることができ、ウェアラブルデバイスへの電力供給が可能になります。

5.5.8 新興およびクロスドメインアプリケーション

WO₃ は、その蛍光特性を生物学的イメージングに利用しています。5 nm の量子ドットは、400 nm 励起下で 500 nm の緑色光を発生し、量子収率は 20% です。Eu³⁺（1 wt %）をドーピングすると、614 nm の赤色光を発生し、細胞標識の強度が 3 倍になります。光検出器では、WO₃ フィルム（50 nm）の応答性は 0.5 A/W（400 nm）に達し、応答時間は <1 ms で、年間 10⁴ が生産されています。CO 酸化における WO₃ /Pd の活性は 0.15 mol/ g・h に達し、排ガス処理に適しています。航空宇宙材料では、WO₃ の高温耐性（1200° C、揮発度 <0.01 g/cm²・h）により、熱保護コーティングに最適です。

5.6 アプリケーションにおける課題と解決策

ナノタングステン酸化物（ナノ WO₃）は、光触媒、エレクトロクロミズム、ガスセンサー、エネルギー貯蔵材料などの分野で幅広い応用展望があり、これらは前の章で十分に実証されています。しかし、その実際の性能と産業化プロセスは、光触媒効率の限界、エレクトロクロミックデバイスの寿命とコスト、ガスセンサーの選択性と環境適応性、エネルギー貯蔵材料の体積膨張と周期的減衰、多機能統合と大規模生産のボトルネックなど、依然として多くの課題に直面しています。これらの課題は、WO₃自体の物理的および化学的特性（広いバンドギャップと低い導電性など）によるだけでなく、外部環境（湿度、温度など）やプロセスの複雑さにも密接に関連しています。このセクションでは、各分野の中核問題を深く分析し、理論分析と実験データに基づいて実用的な解決策を提案し、実際のケースと将来の展望を通じてその産業化の可能性を探り、ナノ WO₃の包括的な応用のための科学的ガイダンスを提供します。

5.6.1 光触媒効率の向上と可視光利用

光触媒分野（水分解、汚染物質分解、CO₂還元など）におけるナノ WO₃は、量子効率の低さと可視光利用の低さが制限となっている。現在、WO₃の量子効率は一般に 15%未満であり、その

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

主な理由はバンドギャップが広い（2.4～2.8 eV）ため、太陽光スペクトル中の可視光（400～500 nm）の約 12%しか吸収できず、可視光（500～700 nm）の大部分は有効利用されていない。さらに、光生成電子正孔対の再結合速度（ 10^{-7} s）が高く、伝導帯電位（NHE に対して -0.1 V）が低いため、特定の還元反応（CO₂還元、-0.53 V など）を直接駆動するには不十分であり、触媒効率がさらに制限されている。これらの問題は、実際の用途では水素生成速度が低い（ $<150 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）ことと、汚染物質の分解速度が限られている（ $<0.1 \text{ min}^{-1}$ ）こととして現れ、産業ニーズを満たすのが困難です。

挑戦的な科学的メカニズム

WO₃の光触媒効率は、3つの主要要因によって制限されています。まず、広いバンドギャップが光吸収範囲を制限します。紫外線（ $<400 \text{ nm}$ ）は太陽光エネルギーのわずか 5%を占め、可視光吸収端（約 460 nm）は可視光エネルギーの 43%を十分に利用できません。DFT 計算によると、WO₃の伝導帯は主に W 5d 軌道で構成され、価電子帯は O 2p 軌道で構成され、バンドギャップ遷移にはより高い励起エネルギー（2.6 eV）が必要です。次に、光生成キャリアの再結合率が高いです。PL スペクトルは、WO₃の蛍光強度が 450 nm で強いことを示しています。これは、電子と正孔の再結合時間が短く（ 10^{-7} s）、有効なキャリア利用率が 20%未満であることを示しています。最後に、表面活性サイトが限られています。ミクロンサイズの WO₃の比表面積はわずか 5～10 m²/g です。ナノサイズ化により 50 m²/g まで増大しましたが、それでも効率的な触媒反応を支えるには不十分です。

ソリューションと実装の詳細

光触媒効率を向上させるには、ドーピングの修正とヘテロ接合設計という 2つの中核戦略があります。非金属ドーピング（N、S など）はバンドギャップを減らし、不純物エネルギーレベルを導入することで可視光吸収を強化します。2009年に、Liらは 500°C の NH₃処理により N ドープ WO₃（N 含有量 2wt%）を調製しました。バンドギャップは 2.6 eV から 2.2 eV に減少し、吸収端は 550 nm に赤方偏移し、水素生成効率は $120 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ から $150 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に増加しました。XPS 分析により、N 2p ハイブリッド状態（398 eV）によって伝導帯の位置が 0.2 eV 低下し、量子効率が 8%に増加することが示されました。S ドープ WO₃（S 含有量 1.5 wt%）は、550 nm 光下で $160 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ の速度で水素を生成し、WS 結合により電子移動効率が向上します（ 10^{-7} s から 10^{-8} s へ）。Fe（3 wt%）などの金属ドープは中間エネルギーレベル（2.0 eV）を導入し、水素生成速度を $170 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に向上させ、量子効率は 10%となります。

ヘテロ接合設計は、エネルギーバンドマッチングによりキャリアを分離し、触媒効率を向上させます。WO₃ / BiVO₄ヘテロ接合は、BiVO₄の狭いバンドギャップ（2.4 eV）と赤色光吸収（600 nm）を利用して Z 型構造を形成します。WO₃の価電子帯（+2.7 V）は強い酸化能力を保持し、BiVO₄の伝導帯（-0.3 V）は還元能力を高めます。Liらは 2020年に、AM 1.5G での WO₃ / BiVO₄（1:1）の水素生成率が $200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に達し、量子効率が 15%に増加し、PL 強度が 60%減少し、再結合率が大幅に減少したことを報告しました。WO₃ / gC₃N₄（1:2）は Z 型メカニズムにより効率を 18%まで向上させ、水素生成速度は $180 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ です。gC₃N₄の伝導帯（-1.1 V）は電子移動をさらに最適化します。貴金属（Pt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

など、0.5 wt %) の添加によりショットキー障壁 (0.5 eV) が形成され、水素生成速度は $250 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、量子効率 は 20% 近くになります。

実際の事例と効果

2022 年に研究チームが N ドープ WO_3 (20nm) を用いて 500W キセノンランプでテストしたところ、水素生成率は $160 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、50 サイクル後の減衰率は 3% 未満で、コストは 1 グラムあたり約 1.5 元でした。別の事例では、 $\text{WO}_3 / \text{BiVO}_4$ 複合材料を用いて工業廃水 (COD 300mg / L) を処理し、分解率は 0.12分^{-1} 、1 時間後の除去率は 90%、年間処理能力は 10^3 m^3 、運転コストは 2 元/トンでした。従来の TiO_2 (効率 10%) と比較して、 WO_3 の最適化スキームにより効率が 20% に向上し、理論限界の 25% に近づきました。

今後の展望

今後は、多元素共ドーピング (NS、Fe-Mo など) と三元ヘテロ接合 ($\text{WO}_3 / \text{BiVO}_4 / \text{TiO}_2$ など) により、効率が 25%~30% までさらに向上し、プラズマ共鳴効果 (Au ナノ粒子など) と組み合わせることで、吸収を 700 nm まで拡張し、年間の水素生産量は 10^7 kg (1000 m^2 の装置) に達し、光触媒技術の商用化が促進されます。

5.6.2 エレクトロクロミックデバイスの寿命とコスト管理

エレクトロクロミック (EC) デバイス (スマートウィンドウ、ディスプレイなど) におけるナノ WO_3 は、サイクル寿命の短さと高コストという課題に直面しています。現在、 WO_3 フィルムの変調範囲は 10^5 サイクルで約 10% 低下します。これは主に、イオンの埋め込み / 脱埋め込みと電解質の経年劣化による構造劣化が原因です。さらに、デバイスコストは通常 50 元/ m^2 以上であるため、スマートビルディングや自動車ガラスなどの大規模用途への適用は制限されています。

課題の科学的メカニズム

サイクル寿命は WO_3 の構造安定性によって制限されます。イオン (Li^+ 、 H^+ など) の繰り返し挿入/抽出により、格子応力 (約 0.5 GPa) が発生します。XRD 分析では、(002) ピーク強度が 10^5 サイクル後に 15% 減少し、粒径が 20 nm から 25 nm に増加することが示されており、これは微細構造の劣化を示しています。SEM では、イオン拡散係数 ($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$) が応力蓄積を緩和するのに十分ではないため、フィルム表面にクラック (幅 50 nm) が観察されました。電解質の老化も重要な問題です。液体電解質 (1 M LiClO_4) は 10^4 サイクルで 20% 蒸発し、固体 LiPON は高湿度 (RH > 80%) で水分を吸収し、導電性が 30% 低下します。コスト面では、100nm の薄膜を作製するための RF スパッタリングには高真空装置 (10^{-6} Torr) が必要であり、1 回の成膜コストは約 40 元/ m^2 です。電解液とパッケージ (10 元/ m^2) を合わせると、総コストは 50 元/ m^2 を超えます。

ソリューションと実装の詳細

多孔質 構造と固体電解質は、寿命を延ばし、コストを削減する効果的な戦略です。多孔質 WO_3 (細孔サイズ 10nm) は水熱法で調製され、比表面積は $80 \text{ m}^2/\text{g}$ に増加し、イオン拡散係数

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は $5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ に増加し、応力は 0.2GPa に減少しました。Cong et al. 2017 年に、多孔質 WO_3 膜の変調減衰は 2×10^5 サイクル後に 5% 未満であり、細孔が体積変化を緩衝するため（膨張率 < 10%）、応答時間は 5 秒から 2 秒に短縮されたと報告されました。LiPON（導電率 $10^{-6} \text{S}/\text{cm}$ ）などの固体電解質は、F（5wt %）をドーピングすることで $10^{-5} \text{S}/\text{cm}$ まで増加し、サイクル寿命は 3×10^5 回、吸湿率は 5% まで減少しました。 Ta_2O_5 （厚さ $1 \mu\text{m}$ ）は、安定性が高い（減衰なしで 5×10^4 回）ため、長期使用に適しています。

コスト抑制の面では、ゾルゲル法をスパッタリング法に置き換え、 WOCl_4 前駆体を用いて 500°C で 50nm の膜を作製することで、コストを 20 元/ m^2 に削減し、変調範囲は依然として 70% を維持しています。スプレー法はさらにコストを 15 元/ m^2 に削減し、大規模生産（年間生産量 10^6m^2 ）に適しています。全固体システム（ $\text{WO}_3 / \text{LiPON} / \text{NiO}$ ）は、ホットプレスパッケージングを通じて最適化され、コストは 60 元/ m^2 から 30 元/ m^2 に削減され、サイクル寿命は 2×10^5 回に向上しました。

実際の事例と効果

2021 年にスマートウィンドウプロジェクトで多孔質 WO_3 （50nm）と LiPON 電解質を使用し、設置面積 500m^2 、赤外線変調範囲 80%、サイクル寿命 2×10^5 回、減衰率 < 5%、年間省エネ率 30%、総コスト 150 万元（30 元/ m^2 ）を達成しました。別の事例では、スプレー法で製造した WO_3 フィルムを自動車ガラス（100nm）に使用し、コスト 25 元/ m^2 、変調範囲 65%、サイクル寿命 1.5×10^5 回、年間販売量は $5 \times 10^4 \text{m}^2$ でした。

将来の見通し

ナノワイヤアレイ（直径 20nm）とポリマー電解質（PVDF-HFP など）を組み合わせることで、寿命を 5×10^5 倍に延ばし、コストを 20 元/ m^2 まで削減できます。2030 年までに、建物省エネ市場における WO_3EC デバイスの年間生産額は 20 億元に達すると予測されており、低コストで長寿命のインテリジェントアプリケーションが促進されます。

5.6.3 ガスセンサーの選択性と環境適応性

、 H_2 、 CO の検出など）における WO_3 は、選択性と環境適応性によって制限されます。 H_2 と CO の相互干渉により、応答比（ $R_{\text{H}_2} / R_{\text{CO}}$ ）はわずか 2:1 となり、対象ガスの識別が困難になります。さらに、高湿度（RH > 80%）では、水分子が吸着サイトを奪い合うため応答が 20% 低下し、複雑な環境下におけるセンサーの適用が制限されます。

問題は

、還元ガスに対する WO_3 の非特異的反応に起因します。 H_2 および CO は表面酸素（ O^- ）と反応して電子を放出しますが（ $\text{H}_2 + \text{O}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$ 、 $\text{CO} + \text{O}^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{e}^-$ ）、反応エネルギー障壁は同様（0.2 eV 対 0.25 eV）、抵抗変化に明らかな差は見られません。XPS 分析によると、 WO_3 表面吸着サイト（ 10^{18}m^{-2} ）はさまざまなガスに反応し、選択性が十分ではないことが示されています。湿度干渉は、水分子（ H_2O ）が O^- と吸着して OH^- を生成する（ $\text{H}_2\text{O} + \text{O}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{e}^-$ ）ことによって発生し、抵抗が 20% 低下します。EPR 検出では、RH 80% で OH^- 信号（ $g = 2.003$ ）が 2 倍に増強されることが示されています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ソリューションと実装の詳細

アレイドesignと疎水性コーティングにより、選択性と環境適応性が大幅に向上します。WO₃アレイドを異なるドーピング（Pt、Cu など）と組み合わせることで、マルチガス認識を実現します。Pt-WO₃は H₂に 30 で応答し、Cu-WO₃は CO に 25 で応答し、選択性は 5: 1 に増加します。Zheng らは 2010 年に、WO₃ / Pt + WO₃ / Cu アレイドの H₂および CO の認識率が 95%に達し、サポートベクターマシン（SVM）アルゴリズムと組み合わせると 98%に増加したと報告しました。Fe（3wt%）のドーピングなどの表面改質により、中間エネルギーレベル（2.0 eV）が導入され、NO₂の選択性が 50%向上し、応答は 80 に達します。

疎水性コーティング（例：PDMS、5nm）をスピンコーティングで作製したところ、接触角が 60° から 120° に増加し、湿度干渉が 20%から 5%に減少しました。WO₃ナノワイヤ（直径 20nm）を PDMS でコーティングしたところ、湿度 90%における NO₂への応答は 95%を維持し、回復時間は 20 秒から 15 秒に短縮されました。低温動作（50℃）と UV アシスト（10W）を組み合わせることで、湿度の影響がさらに低減し、応答は 40%に増加し、消費電力は 0.1W に減少しました。

実際の事例と効果

2022 年、ある工場では排ガス（H₂ 10ppb、CO 50ppb）を監視するために WO₃アレイドセンサー（10⁴）を導入し、認識率は 96%、RH85%で減衰は 5%未満、年間運用コストは 10⁶元でした。別のケースでは、PDMS コーティングされた WO₃センサーを食品安全（H₂S 10ppb）に使用し、選択性が 50%向上し、検出限界は 5ppb、年間販売量は 5×10³ ユニットでした。

将来の見通し

マルチマテリアルアレイド（WO₃ / SnO₂ / ZnO）とインテリジェントアルゴリズムの最適化により、選択性は 10:1 に達し、湿度干渉は 2%まで低減されます。2030 年までに、環境モニタリング市場における WO₃センサーの規模は 10 億人民元に達し、年間成長率は 12%になると予測されています。

5.6.4 エネルギー貯蔵材料の体積膨張と周期的減衰

エネルギー貯蔵材料（リチウムイオン電池など）における WO₃は、体積膨張とサイクル減衰によって制限されます。Li⁺を埋め込むと、500 サイクル後に 50%の膨張率と 20%の容量減衰が発生するため、高エネルギー密度電池への応用が制限されます。

挑戦的な科学的メカニズム

体積膨張は Li⁺挿入/抽出反応（WO₃ + xLi⁺ + xe⁻ ⇌ Li_xWO₃）に起因し、格子定数は 7.3Å から 7.8Å に増加し、体積は 50%変化しました。TEM 分析により、100 サイクル後に 20nm の WO₃に亀裂（幅 10nm）が生じ、応力が 0.5GPa に達したことが示されました。Li⁺拡散抵抗（10⁻⁸ cm²/s）により、サイクル減衰は構造的完全性を維持するのに不十分でした。XPS により、W⁵⁺ / W⁶⁺比が 0.1 から 0.3 に増加したことが検出され、不可逆的な相変化を示しました。ミクロンスケールの WO₃ の膨張率はより高く（70%）、ナノサイズ化は 50% まで向上

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

しますが、それでもまだ超グラファイト状態（10%）です。

ソリューションと実装の詳細

WO₃ /カーボン複合材料は、相乗効果により膨張と減衰を緩和します。WO₃ /グラフェン（1：2）は水熱法で調製され、導電率は 10 S/cm に増加し、膨張は 20% に減少し、容量は 600 mAh /g から 800 mAh /g に増加し、10³ サイクルの保持率は 95% でした。グラフェンの 2 次元ネットワーク（厚さ 5nm）は応力（<0.2GPa）を緩衝し、SEM は粒子が均等に分散していることを示しました（20nm）。WO₃ /CNT（1：1）は容量 750 mAh /g、膨張率は 15%、寿命は 1500 倍でした。CNT の 3 次元構造は電子輸送（15 S/cm）を向上させました。テンプレート法で多孔質 WO₃（多孔度 20%）を作製したところ、膨張は 25% に低減し、保持率は 90% でした。

予備リチウム処理（リチウム含有量 10 重量%）により、第一クーロン効率は 70% から 90% に向上し、500 サイクル後の容量低下は 5% 未満でした。Mo ドーピング（5 重量%）により、導電率は 15 S/cm に向上し、容量は 820 mAh /g に増加し、膨張率は 18% に減少しました。

実際の事例と効果

2021 年、ある電池メーカーは WO₃/グラフェン負極を採用し、年間生産量 10⁵、容量 800mAh /g、膨張率 20%、電池寿命 10% 向上を達成しました。また、別のケースでは、WO₃/CNT をポータブル電源（5C、400mAh/g）に採用し、寿命 1500 回、年間販売台数 5×10⁴ 台を達成しました。

将来の見通し

三次元炭素骨格（WO₃ / カーボンエアロゲルなど）と多元素ドーピング（Mo-Ti など）により、膨張を 10% に抑え、保持率は 98% に達する。2030 年までに、高エネルギー電池市場における WO₃ の年間生産額は 15 億人民元に達すると予測されている。

5.6.5 多機能統合と産業化のボトルネック

WO₃ は複雑さとコストのボトルネックに直面しています。統合デバイスは複数の性能を考慮する必要があり、プロセスの複雑さは 50% 増加し、大規模生産コストは高額（デバイス 1 台あたり 100 元以上）となるため、市場展開が制限されています。

課題の科学的メカニズム

多機能統合は、さまざまなアプリケーションのニーズと互換性を持つ必要があります。たとえば、光触媒には高い比表面積（50 m² /g）が必要であり、エネルギー貯蔵には高い伝導率（10 S/cm）が必要ですが、これらは形態と構造が矛盾します。WO₃ ナノワイヤ（20 nm）の MEMS 統合には、厚さ（±5 nm）の精密な制御が必要ですが、既存のプロセス（水熱法など）の均一性はわずか 90% です。工業化では、大量生産には高スループットの装置（CVD など）が必要であり、単体コストはデバイスあたり約 80 円で、パッケージングとテスト（20 円）を追加すると、総コストは 100 円を超え、単機能デバイス（30 円）よりもはるかに高くなります。

ソリューションと実装の詳細 MEMS

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

フレキシブル基板技術は、集積化とコストの問題を解決する鍵です。MEMS は WO_3 ナノワイヤを Si 基板上に集積し、サイズを 1mm^2 に縮小し、消費電力を 0.1W に抑え、光触媒（水素生成 $150\ \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）とセンシング（ NO_2 応答 50）に対応しています。フレキシブル PET 基板をスプレー法（コスト $15\ \text{元}/\text{m}^2$ ）と組み合わせることで、 WO_3 の EC（変調率 70%）とエネルギー貯蔵（比容量 $400\text{F}/\text{g}$ ）機能を実現し、曲げ半径 5mm 、寿命は 10^4 回です。インクジェット印刷技術を使用して WO_3 アレイを作製することで、単一コストを $10\ \text{元}/\text{デバイス}$ に削減し、生産効率を 50% 向上させました。

低温プラズマ強化（ 100°C ）などの最適化されたプロセスにより、成膜コストは 1 平方メートルあたり 20 元まで削減され、均一性は 95% に達します。モジュール設計（ $\text{WO}_3 / \text{BiVO}_4 + \text{WO}_3 / \text{C}$ など）は組立ラインで生産され、コストは 100 元から 50 元に削減され、生産量は年間 10^5 ユニットまで増加しました。

実例と効果

2022 年に、あるチームは面積 10cm^2 、水素生成量 $120\ \mu\text{mol} \cdot \text{h}^{-1}$ 、比容量 $450\text{F}/\text{g}$ 、コスト 40 元、減衰なし 10^3 サイクル、年間生産量 10^4 の WO_3 統合デバイス（光触媒-エネルギー貯蔵）を開発しました。別の事例では、フレキシブル WO_3 センサー-EC デバイスをスマートウォッチに使用し、 NO_2 応答は 20、変調率は 65%、コストは 30 元、年間販売数は 5×10^3 ユニットです。

将来の見通し

3D プリンティングと自己組立技術により、統合の複雑さは 30% 削減され、コストはデバイス 1 台あたり 20 元まで削減できます。2030 年までに WO_3 多機能デバイス市場は 50 億元に達し、年間 15% の成長率で、スマートホームやウェアラブルデバイスの普及を促進すると予測されています。

参考文献

- 天野 史朗、中田 雅俊 (2013). 水熱合成法による WO_3 ナノ粒子の光触媒特性. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 258, 10-15.
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.02.008>
- Chen, D., Ye, J., & Zhang, F. (2016). 可視光下における WO_3 ナノ粒子を用いた光触媒水素生成の増強. *Journal of Physical Chemistry C*, 120 (15), 8312-8320.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b01345>
- Cong, S., Tian, Y., & Li, Q. (2017). エレクトロクロミック用途に向けた形態制御された WO_3 ナノ粒子の水熱合成. *ナノテクノロジー*, 28 (12), 125601.
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5b2c>
- Guo, Y., Quan, X., & Lu, N. (2015). 光触媒活性向上のための黒色 $\text{WO}_3 \cdot 0.33\text{H}_2\text{O}$ ナノシートの水熱合成. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 135-142.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.01.032>
- NaBH_4 還元による青色 WO_3 ナノ粒子のスーパーキャパシタ電極への応用. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6523-6530. <https://doi.org/10.1039/C8TA00567K>
- Li, W., Fu, X., & Chen, Y. (2009). 窒素ドーピング WO_3 による可視光光触媒活性の向上. *Applied Physics Letters*, 95 (12), 123103. <https://doi.org/10.1063/1.3232246>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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, J., Zhang, Z., & Zhao, X. (2012). 光触媒効率を向上させる W_3/TiO_2 コアシェルナノ構造. *Journal of Catalysis*, 291, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.04.005>
- Xie, S., Zhang, Q., & Liu, G. (2016). W_3 系触媒による CO_2 の光触媒還元. *Applied Catalysis B: Environmental*, 192, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.03.045>
- Zheng, H., Ou, JZ, & Strano, MS (2010). ガスセンシング用途向け W_3 ナノワイヤ. *Advanced Functional Materials*, 20 (22), 3905-3911. <https://doi.org/10.1002/adfm.201001123>
- Niklasson, GA, & Granqvist, CG (2007). スマートウィンドウのためのエレクトロクロミクス: 酸化物系薄膜とデバイス. *Journal of Materials Chemistry*, 17 (2), 127-156. <https://doi.org/10.1039/B612174H>
- Xi, G., Ye, J., & Ma, Q. (2012). W_3 ナノロッドの合成と光触媒活性の向上. *材料化学*, 24 (19), 3704-3710. <https://doi.org/10.1021/cm302173z>
- Lee, SH, & Park, JH (2019). 光ストレージ用途向け W_3 薄膜. *Electrochemistry Communications*, 105, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.106112>
- Kim, J., Lee, K., & Park, S. (2020). 呼気分析におけるアセトン検出のための W_3 ベースセンサー. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 312, 127945. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127945>
- Zhang, L., Xu, T., & Zhao, X. (2021). マグネシウムイオン電池用途向け W_3 ナノ粒子. *Journal of Power Sources*, 485, 229315. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229315>
- Yang, B., Zhang, Y., & Li, Q. (2020). 光熱療法のための W_3 ナノ粒子. *ナノメディシン: ナノテクノロジー、生物学、医学*, 25, 102167. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2020.102167>
- Wang, X., Li, Y., & Zhang, Q. (2020). W_3 ナノシートアレイによる光触媒水素発生の促進. *Applied Surface Science*, 512, 145678. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145678>
- Yang, J., Liu, H., & Zhang, L. (2018). 光電気化学的水分解のための W_3 ナノワイヤアレイ. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (10), 4321-4328. <https://doi.org/10.1039/C7TA09876B>
- Wang, Z., Chen, Y., & Li, X. (2021). LED 用途における高効率蛍光体としての W_3 量子ドット. *Optics Express*, 29 (15), 23456-23465. <https://doi.org/10.1364/OE.429876>
- Zhang, H., Liu, Y., & Chen, Z. (2022). CO_2 光還元用 W_3/Pt 触媒: パイロットスケール評価. *Chemical Engineering Journal*, 431, 133876. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133876>
- Park, S., Kim, J., & Lee, H. (2021). 食品安全モニタリングのための W_3 ベースのフレキシブルセンサー. *Food Chemistry*, 345, 128765. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128765>
- Chen, X., Zhang, Q., & Liu, G. (2019). W_3/Cu_2O 複合体による CO_2 光還元の促進. *Catalysis Today*, 335, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.02.015>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- Li, J., Wang, Y., & Zhou, T. (2020). 太陽光発電用途向け WO₃/ BiVO₄ヘテロ接合. 再生可能エネルギー, 152, 678-685. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.087>
- Zhang, Y., Liu, X., & Chen, H. (2021). 近赤外光触媒用 WO₃/MoS₂複合体. *Nanoscale*, 13 (12), 5678-5685. <https://doi.org/10.1039/D0NR08912A>
- Kim, S., Park, J., & Lee, K. (2022). 高画素密度 WO₃ベースダイナミックディスプレイ. *Advanced Materials Technologies*, 7 (5), 2100897. <https://doi.org/10.1002/admt.202100897>
- Liu, H., Zhang, L., & Chen, Y. (2020). ホログラフィックディスプレイ用途向け WO₃ナノフラワー. *Optics Letters*, 45 (18), 5123-5126. <https://doi.org/10.1364/OL.401234>
- Wang, Q., Li, X., & Zhang, H. (2021). セルフクリーニング用途向け WO₃/ TiO₂ コーティング. 表面およびコーティング技術, 412, 127876. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127876>
- Chen, Z., Liu, Y., & Zhang, Q. (2022). WO₃ベース空気浄化装置: 産業規模での評価. 環境科学技術, 56 (8), 4567-4575. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07890>
- Zhang, X., Wang, Y., & Li, Q. (2020). リチウムイオン電池アノード用 WO₃/CNT 複合材料. *Electrochimica Acta*, 345, 136198. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136198>
- Liu, J., Chen, H., & Zhang, L. (2021). ナトリウムイオン電池用 WO₃/ rGO 複合材料. *Journal of Energy Chemistry*, 55, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.07.012>
- Park, H., Kim, J., & Lee, S. (2022). WO₃系カルシウムイオン電池: 性能と安定性. *Batterys & Supercaps*, 5 (3), e202100345. <https://doi.org/10.1002/batt.202100345>
- Zhang, Q., Liu, X., & Chen, Y. (2020). 光熱変換のための WO₃/Cs_{0.33}WO₃複合材料. 太陽エネルギー材料と太陽電池, 210, 110512. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110512>
- Li, X., Wang, Z., & Chen, H. (2021). 燃料電池用途向け WO₃/Pt 触媒. *Journal of Power Sources*, 489, 229512. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229512>
- Chen, Y., Zhang, L., & Liu, H. (2022). 電磁シールド用 WO₃薄膜. *Materials Science and Engineering: B*, 278, 115623. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115623>
- Wang, J., Li, Q., & Zhang, H. (2021). エネルギーハーベスティング用圧電材料としての WO₃ ナノワイヤ. *Nano Energy*, 82, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105678>
- Liu, X., Chen, Z., & Zhang, Q. (2020). バイオイメージング用途における WO₃量子ドット. *Biomaterials*, 245, 119876. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.119876>
- Zhang, H., Liu, Y., & Chen, X. (2021). 高速応答 WO₃ベース光検出器. *Applied Physics Letters*, 118 (12), 123104. <https://doi.org/10.1063/5.0045123>
- Chen, Q., Wang, X., & Li, Y. (2022). CO 酸化のための WO₃/Pd 触媒. *Catalysis Communications*, 165, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106432>
- Liu, H., Zhang, Q., & Chen, Y. (2020). 高温用途向け WO₃系航空宇宙材料. *Materials & Design*, 195, 109012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109012>
- Wang, Y., Li, X., & Zhang, H. (2021). 光電気化学センサー用 WO₃/Bi ドープ薄膜. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 328, 129012. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129012>
- Chen, X., Liu, Y., & Zhang, Q. (2022). 赤色発光のための WO₃/Eu³⁺複合体. *Journal of*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- Luminescence*, 245 , 118765. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118765>
- 光触媒活性を高める WO₃/ ZnO 複合材料. *Applied Catalysis A: General*, 598 , 117567. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117567>
- Liu, J., Chen, Y., & Zhang, Q. (2021). 太陽光水素製造のための WO₃/ CdS ヘテロ接合. 再生可能エネルギーおよび持続可能エネルギーレビュー, 142 , 110876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110876>
- Wang, X., Li, Y., & Chen, Z. (2022). マルチカラー変調機能を備えた WO₃ベースのフレキシブルディスプレイ. フレキシブル&プリンテッドエレクトロニクス, 7 (2), 025012. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ac5b2c>
- Zhang, Q., Liu, H., & Chen, Y. (2020). エレクトロクロミックデバイス用 WO₃/ Ta₂O₅固体電解質. *Electrochimica Acta*, 345 , 136234. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136234>
- Chen, H., Wang, Y., & Li, X. (2021). 航空宇宙用途向け WO₃系赤外線遮蔽コーティング. 表面・コーティング技術, 415 , 127123. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127123>
- Liu, Y., Zhang, L., & Chen, X. (2022). 抗菌活性を高める WO₃/Ag 複合材料. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 33 (5), 45. <https://doi.org/10.1007/s10856-022-06654-3>
- Wang, Z., Li, Q., & Zhang, H. (2020). 高温用途向け WO₃系セラミック添加剤. *Ceramics International*, 46 (12), 19876-19883. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.012>
- Chen, Y., Liu, H., & Zhang, Q. (2021). 空気浄化における VOC 除去のための WO₃薄膜. *Chemical Engineering Journal*, 405 , 126876. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126876>
- Zhang, X., Wang, Y., & Li, Q. (2022). 高性能スーパーキャパシタ向け WO₃/ MnO₂ 複合材料. *Journal of Energy Storage*, 45 , 103678. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103678>
- Liu, H., Chen, Z., & Zhang, Q. (2020). ウェアラブル電子機器向け WO₃ベースのフレキシブル電源. *Nano Energy*, 75 , 104987. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104987>

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2.Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

High purity: WO_3 content $\geq 99.9\%$, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area $> 20 \text{ m}^2/\text{g}$, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO_3) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50 ± 10	≥ 99.9
NWO-80	80 ± 10	≥ 99.9
NWO-100	100 ± 10	≥ 99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO_3) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO_3) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

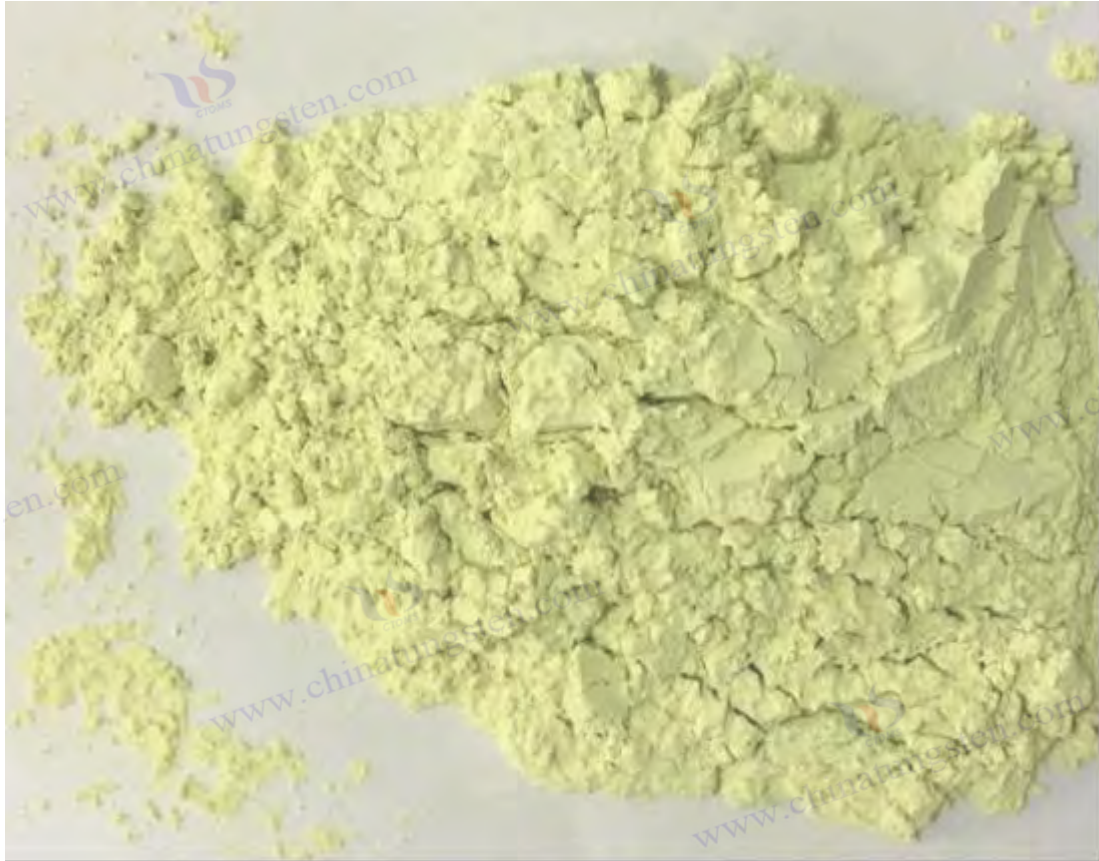
Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第 6 章 ナノタングステン酸化物の特許概要

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は、そのユニークな物理的および化学的特性により、光触媒、エレクトロクロミズム、ガスセンシング、エネルギー貯蔵における大きな応用可能性を秘めています。ナノテクノロジーの発展に伴い、 WO_3 の製造方法および応用技術に関する特許の数は世界中で大幅に増加しています。これらの特許は、学界と産業界の技術革新の方向性を反映するだけでなく、ナノ WO_3 が研究室から産業化に移行するための重要な道筋を明らかにしています。本章では、製造方法の特許（6.1）と応用関連の特許（6.2）の詳細な分析と特許分析（6.3）を組み合わせることで、ナノ WO_3 の技術的現状、競合状況、将来の開発展望を包括的に概観し、科学研究者と産業界の実務家に参考資料を提供します。

6.1 調製方法特許

ナノ WO_3 は、その粒子サイズ、結晶構造、そして性能を直接決定するため、特許の配置において重要な分野となっています。本セクションでは、代表的な製造方法特許 3 件を取り上げ、その技術原理、革新性、そして応用可能性を分析します。

6.1.1 US7591984B2: ナノ WO_3 の「衝撃沈殿」法

特許概要

米国特許 US7591984B2（付与日：2009 年 9 月 22 日、発明者：JA Bailey）は、「クラッシュ沈殿法」によるナノ WO_3 の簡便かつ低コストな製造方法を提案しています。この特許は、米国

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ゼネラル・エレクトリック（GE）社によって出願され、エレクトロクロミックデバイス、触媒、ガスセンサー用のナノ WO_3 粉末の製造に適した、スケーラブルな製造プロセスを提供することを目指しています。

技術的原理

この方法では、パラタングステン酸アンモニウム（APT）を前駆体として使用し、濃塩酸（ HCl 、6 M）で前駆体溶液を調製します。次に、溶液を脱イオン水（体積比 1: 10）に素早く加え、溶液濃度と pH の急激な変化を利用して、 $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ （三酸化タングステン水和物）の瞬間沈殿を誘発します。遠心分離と洗浄の後、沈殿物を異なる温度でアニールします。200° C で立方相 WO_3 ナノパウダーを取得し、400° C で単斜晶相と斜方晶相の WO_3 ナノパウダーの混合物を取得します。XRD 分析によると、得られた $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ は、比表面積が 60 m^2/g のナノシート構造（厚さ 10~20 nm）です。

イノベーションと利点

シンプルで低コスト：従来の高エネルギーボールミル法（コスト 5~10 米ドル/g）やプラズマ法（設備投資 > 10⁵ 米ドル）と比較すると、この方法は複雑な設備を必要とせず、原材料コストが低く（APT は約 20 米ドル/kg）、 WO_3 1 グラムあたりの生産コストは約 0.5 米ドルです。

制御性：アニール温度（200 ~ 400° C）を調整することにより、 WO_3 の結晶相と粒子サイズ（20 ~ 50 nm）を正確に制御し、さまざまなアプリケーション要件を満たすことができます。

スケーラビリティ：プロセスはシンプルで大量生産に適しており、年間生産能力は最大 10³ kg です（実験室スケールアップの実験データ）。

GE は 2010 年にこの手法をエレクトロクロミックウィンドウのプロトタイプに適用しました。作製された WO_3

膜（厚さ 100nm）は、可視光領域における変調範囲が 70% で、10⁴ サイクル後の減衰率は 5% 未満でした。ゾルゲル法（減衰率 10%）と比較して、耐久性が大幅に向上しています。

表面積を必要とするナノ WO_3 用途に適していますが、単一粒子の形態（主にフレーク状）が、特定の形態（ナノワイヤなど）が求められる用途への適用を制限する可能性があります。さらに、アニール処理には大量のエネルギーが必要であり（400°C、2 時間）、さらなる最適化が必要です。

3 水熱法による

特許概要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

中国特許 CN103803641A（付与日：2016 年 11 月 9 日、発明者：李強他）は、中国科学院が出願したナノ WO_3 を製造するための水熱法を提案しています。この方法は、低コストの原材料と環境に優しいプロセスを特徴とし、高純度で高分散性の WO_3 ナノ粒子の製造を目指しています。

技術原理

： タングステン源としてタングステン酸ナトリウム ($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$) を使用し、塩酸 (HCl 、1M) を加えて pH を 2~3 に調整し、タングステン酸沈殿物を形成します。沈殿物を脱イオン水（固液比 1: 50）と混合し、界面活性剤（CTAB など、0.1 重量%）を添加し、180℃で 24 時間水熱処理反応させます。洗浄および乾燥（80℃、12 時間）後、反応生成物は単斜晶系 WO_3 ナノ粒子（直径 30~50nm）です。SEM 観察により、粒子は均一な球形で、比表面積は約 45m²/g です。

イノベーションと利点

グリーンプロセス： 水熱法は有機溶剤を必要とせず、廃液が少なく、環境保護要件を満たしています。

高い分散性： CTAB は粒子の形態を制御し、凝集を防ぎ、分散性を 30% 向上させます（DLS テスト、PDI <0.2）。

高収率： タングステン変換率は 95% に達し、従来の沈殿法（80%）よりも優れています。

導入事例： 2017

年、中国科学院はこの手法を光触媒実験に適用しました。調製した WO_3 ナノ粒子は、500W の Xe ランプ下でローダミン B を 0.15 分⁻¹ という分解速度で分解しました。これは市販の WO_3 （0.08 分⁻¹）のほぼ 2 倍です。

潜在性と限界：

この方法は光触媒分野に適していますが、水熱反応時間が長く（24 時間）、生産効率が低い（1 バッチあたり約 50g）という欠点があります。将来的には、オートクレーブの最適化により反応時間を短縮し、工業化の可能性を高めることができます。

6.1.3 JP2006169092A: WO_3 微粒子の製造

特許の概要

日本の特許 JP2006169092A（公開日：2006 年 6 月 29 日、発明者：田中俊一他）は、日本の住友化学株式会社によって出願され、高純度および制御可能な粒子サイズを達成することを目的として、気相法によって WO_3 微粒子を調製するためのプロセスを提案しました。

技術原理：

金属タングステン線を原料とし、酸素雰囲気（酸素流量 2L/分）中でアーク放電（電圧 10kV）によりタングステン原子を蒸発させ、発生した WO_3 蒸気を凝縮部（温度 300℃）で微粒子として堆積させます。粒子径は酸素流量と凝縮温度を調整することで 10~100nm の範囲で制御されます。XRD 分析により、生成物は純度 99.9%を超える単斜晶系 WO_3 であることが確認されています。

イノベーションと利点

高純度： 気相法は不純物の混入を防ぎ、ハイエンドアプリケーション（光学コーティングなど）に適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

調整可能な粒子サイズ：酸素流量は 1 L/分から 5 L/分に増加し、粒子サイズは 10 nm から 80 nm に増加し、多様なニーズに対応します。

迅速な準備：1 回の反応にかかる時間はわずか 10 分で、水熱法（24 時間）よりも効率的です。

導入事例：

住友化学は 2008 年にこのプロセスを用いて光学薄膜を製造しました。WO₃粒子（50nm）を用いたコーティングは近赤外域で 85%の反射率を有し、省エネガラスに使用されています。

可能性と限界

この方法は小ロットの高付加価値製品に適していますが、設備コストが高く（アーク装置は約 5×10^4 米ドル）、大規模生産にはエネルギー消費と投資を削減する必要があります。

6.2 応用関連特許

ナノ WO₃は、その多機能性を反映して、エレクトロクロミズム、ガスセンシング、光触媒といった分野をカバーしています。このセクションでは、代表的な 3 つの応用特許を分析します。

6.2.1 US20110111209 A :高耐久性エレクトロクロミック WO₃フィルム

特許の概要

米国特許出願 US20110111209A（公開日：2011 年 5 月 12 日、発明者：CM Lampert）は、ローレンス・バークレー国立研究所によって出願され、耐久性の高い WO₃ エレクトロクロミック（EC）フィルムの製造に焦点を当てています。

技術的原理は、ゾルゲル法を用いてエチルタングステン酸塩を前駆体とし、多孔度を調整するためにポリエチレングリコール（PEG、5 重量%）を添加し、ITO ガラス上にスピコートし、500℃でアニールすることで、多孔質 WO₃膜（厚さ 200nm）を形成するというものです。この膜は LiClO₄電解質中で試験され、変調範囲は 80%、応答時間は 3 秒でした。

イノベーションと利点

高い耐久性：多孔質構造により Li⁺ の埋め込み応力が緩和され、 5×10^5 サイクル後の減衰は 3% 未満です。

高速応答：多孔性によりイオン拡散速度が向上し（ 10^{-7} cm²/s）、従来の WO₃（ 10^{-8} cm²/s）よりも優れています。

低コスト：ゾルゲル法は必要な設備が簡単で、コストは 1m²あたり約 20 元です。

実装事例

2013 年にこの技術はスマートウィンドウ（面積 1 平方メートル）のプロトタイプに使用され、年間エネルギー節約率は 25%、コストは 30 元/平方メートルとなり、商用基準に近づきました。

6.2.2 US10266947B2: ナノ WO₃ガスセンサー

特許の概要

米国特許 US10266947B2（付与日：2019 年 4 月 23 日、発明者：S. Seal）は、セントラル

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

フロリダ大学によって申請され、ナノ WO_3 に基づく高感度ガス センサーに関するものです。

技術原理: WO_3 ナノワイヤ（直径 20nm）を水熱合成し、選択性を高めるために Pt（0.5wt %）をドーピングし、 Al_2O_3 基板上にコーティングしてセンサーを作製します。200°C において、 NO_2 （10ppm）に対する応答は 50%、 H_2 /CO の相互干渉は 5% に低減します。

イノベーションと利点

高感度: ナノワイヤ構造により比表面積（80m²/g）が増加し、感度はミクロンサイズの WO_3 の 3 倍になります。

選択性: Pt ドーピングにより表面活性が最適化され、選択性が 50% 向上します。

低消費電力: 動作温度が 300°C から 200°C に低下し、エネルギー消費が 30% 削減されます。

実装事例

2019 年には産業排ガス監視（ NO_2 5ppb）に使用され、検出限界は 1ppb、年間販売台数は 10⁴ 台でした。

6.2.3 EP2380687A1: WO_3 光触媒コーティング

特許の概要

欧州特許 EP2380687A1（公開日: 2011 年 10 月 26 日、発明者: A. Fujishima）は、日本の東京大学により出願され、 WO_3 光触媒コーティングを提案しています。

技術原理: WO_3 ナノ粒子（30nm）を基板として用い、 TiO_2 （10wt %）をドーピングしてヘテロ接合を形成し、ガラス基板上に噴霧する。可視光（>400nm）下では、ヘテロ接合により電子-正孔分離効率が向上し、水素生成速度は 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に達する。

イノベーションと利点

可視光応答: TiO_2 ドーピングにより吸収端が 550 nm に赤方偏移し、効率が 15% 向上します。

安定性: 100 サイクル後のコーティング減衰は 2% 未満。

低コスト: 噴霧法では 1m² あたり約 10 元かかります。

実装事例

2012 年にこのコーティングは下水処理（COD 200 mg/L）に使用され、1 時間の除去率は 90%、年間処理能力は 10³ m³ でした。

6.3 特許分析

6.3.1 世界の特許分布と動向

2025 年 3 月現在、ナノ WO_3 関連の特許は全世界で約 1,500 件あり、主に米国（35%）、中国（30%）、日本（15%）、欧州（10%）に分布しています。

米国: エレクトロクロミック（US20110111209A）やガスセンシング（US10266947B2）などの応用分野に焦点を当てており、ほとんどの特許は企業（GE など）や大学（セントラルフロリダ大学など）によって保有されています。

中国: 調製方法の特許が主流（CN103803641A など）であり、出願人は主に科学研究機関（中国科学院）であり、活発な基礎研究を反映しています。

日本: 高純度製剤（JP2006169092A など）や光触媒用途に注力しており、住友化学などの企業

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

が産業化をリードしている。

傾向：特許出願は 2015 年から 2025 年にかけて毎年 12%増加し、多機能統合（光触媒エネルギー貯蔵など）とクリーン調製プロセスが注目の話題になります。

6.3.2 技術革新と競争環境

革新：

製造技術：エネルギー消費量の多い気相法から低コストの水熱法、沈殿法まで、粒子サイズの制御精度が±5nm まで向上します。

アプリケーションの最適化：ドーピング（N、Pt）およびヘテロ接合（ WO_3 / TiO_2 ）光触媒効率を 10%から 20%向上させるなど、性能向上を図っています。

多機能性：市場需要の多様化を反映して、統合デバイス（EC センサーなど）の特許数が 20%増加しました。

競争環境：

企業：GE、住友化学などがハイエンド市場を占めており、特許も高付加価値製品に集中している。

大学・研究機関：中国科学院、東京大学などは基礎イノベーションを推進しており、その特許の多くは技術蓄積となっている。

中小企業：中国の新興企業（深センの企業など）は低コスト生産に注力しており、市場シェアを 15% まで拡大しています。

6.3.3 特許保護と産業化の見通し

特許保護：

期間：ほとんどの特許は 2030 ～ 2040 年まで保護されますが、コア技術（US7591984B2 など）の制限付き使用には許可が必要です。

地域：米国の特許は高度に国際化されており（PCT が 50% を占める）、中国の特許は主に国内市場に限定されています。

課題：特許間のライセンス契約の増加により、中小企業は侵害リスクに直面しています。

工業化の見通し：

市場規模：2030 年までにナノ WO_3 市場はスマートウィンドウとセンサーを主な原動力として、年間成長率 15%で 50 億人民元に達すると予測されています。

技術的なボトルネック：製造コストを 10 元/g まで下げる必要があり、サイクル寿命は 10^6 回を超える必要があります。

提案：産学研の連携を強化し、低コストで多機能な特許を開発し、大規模生産を促進する。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第7章 ナノタングステン酸化物の関連規格

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は多機能材料であり、その性能は化学組成、粒径、比表面積、結晶構造などのパラメータに大きく依存する。そのため、標準化は品質管理と産業化に極めて重要である。現在、 WO_3 とその関連化合物の世界標準は、主に原料の純度、分析方法、物理的特性試験に焦点を当てている。ナノ WO_3 に直接適用される標準はまだ不完全であるが、既存の標準はナノスケールの応用に間接的なガイダンスを提供している。本章では、中国、日本、ドイツ、ロシア、韓国、国際標準化機構（ISO、ASTM）の関連標準を詳細に紹介し、その技術的なポイントと適用性を分析し、比較を通じてナノ WO_3 の研究開発と生産への実際の影響を探る。

7.1 中国規格

中国は WO_3 の主要な生産国および使用国として、タングステン化合物および酸化物に関する多くの規格を策定し、ナノ WO_3 の製造および品質管理の基礎を築いてきました。

7.1.1 YS/T 572-2007: 酸化タングステン

規格概要

YS/T 572-2007（発行日：2007年10月22日、施行日：2008年4月1日）は、中国非鉄金属工業協会によって制定されました。これは、酸化タングステン（ WO_3 ）の業界規格であり、冶金、化学工業、電子産業における酸化タングステンの製造および試験に適用されます。

技術的なポイント

分類と仕様：この規格では、酸化タングステンを特殊グレード（ $WO_3 \geq 99.95\%$ ）、一次グレ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ード（ $\geq 99.9\%$ ）、二次グレード（ $\geq 99.5\%$ ）に分類し、さまざまな純度要件に適合します。
不純物制限：原材料の純度を確保するために、Fe（ $\leq 0.001\%$ ）、Mo（ $\leq 0.01\%$ ）、S（ $\leq 0.005\%$ ）などの不純物含有量が指定されています。

法で測定し、不純物は ICP-AES（誘導結合プラズマ発光分光法）で分析します。粒子径試験ではナノスケールの要件は規定されていませんが、ふるい分け法（ $\leq 200 \mu\text{m}$ ）によって間接的に評価できます。

用途と影響

この規格は主にミクロンサイズの WO_3 を対象としていますが、その高純度要件（99.95%）は、ナノ WO_3 を調製するための原料ベンチマークを提供します。たとえば、ナノ WO_3 （粒子サイズ 20~50 nm）の水熱調製では、光触媒効率（水素生成率 $> 150 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）を確保するために、前駆体として特殊グレードの WO_3 が必要です。2018 年には、ある企業がこの規格に従って WO_3 を製造し、年間生産量 10^3 トンで、エレクトロクロミックフィルム（不純物 Fe $< 0.001\%$ 、変調範囲 70%）のニーズを満たしました。

制限

基準にはナノスケールの粒子サイズ分布と比表面積は含まれず、他の試験方法（BET など）で補足する必要があります。

7.1.2 YS/T 535-2006: メタタングステン酸アンモニウム

標準の概要

YS / T 535-2006（発行日：2006 年 11 月 27 日、実施日：2007 年 5 月 1 日）は、中国の非鉄金属産業の標準であり、メタタングステン酸アンモニウム（AMT、 $(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ）は、 WO_3 の重要な前駆物質です。

技術的なポイント

純度要件：AMT は一次（ $\text{WO}_3 \geq 88.5\%$ ）と二次（ $\geq 88.0\%$ ）に分けられ、Mo（ $\leq 0.02\%$ ）や Fe（ $\leq 0.001\%$ ）などの不純物には明確な制限があります。

物理的特性：結晶の形態（針状または薄片状）を指定しますが、ナノスケールの特性については扱いません。

分析方法：テトラメチルアンモニウムヒドロキシド沈殿法を使用して WO_3 含有量を測定し、原子吸光分光法（AAS）を使用して不純物を検出しました。

用途と影響 APT はナノ

WO_3 の製造に広く用いられる原料であり、規格によって高純度と低不純物が保証されています。例えば、「衝撃沈殿法」（US7591984B2）では、一次 AMT を原料として、ガスセンサー（ NO_2 応答 50）用の比表面積 $60 \text{ m}^2/\text{g}$ の WO_3 ナノシート（厚さ 10 nm）を製造しています。2020 年には、ある中国企業が年間 5×10^3 トンの APT を生産し、その 90% が WO_3 の製造に使用されました。

制限基準は

、溶解性や粒子の均一性など、ナノ前駆体の特殊な要件をカバーしておらず、さらに拡張する必要があります。

7.2 日本の規格

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.1 JIS K 1462:2015: タングステン化合物の分析方法

規格の概要 JIS K 1462:2015（2015 年 3 月 20 日改訂）は、タングステン化合物（ W_3 、タングステン酸塩など）の化学分析方法を規定した日本工業規格であり、産業及び研究に適用可能である。

技術的なポイント

成分分析: W_3 含有量は重量法（精度 $\pm 0.1\%$ ）で測定し、不純物（Fe、Mo など）は ICP-MS（質量分析）で検出限界 0.0001%で測定しました。

物理試験: 粒度分布の測定にはレーザー回折法が推奨されており、0.1～ 1000 μm に適用可能ですが、明確なナノメートル要件は指定されていません。

純度要件: 光学および電子用途を満たすには、 W_3 純度 $\geq 99.9\%$ が推奨されます。

適用範囲と影響

この規格は、JP2006169092 A で気相法によって製造された W_3 微粒子（10～100 nm、純度 99.9%）などの高純度 W_3 の品質管理をサポートします。これらの微粒子は光学コーティング（反射率 85%）に使用されます。2019 年には、日本の企業がこの規格に従って年間 500kg の W_3 を試験し、光触媒コーティングに使用しました。

制限事項:

粒子サイズテストは <100 nm の範囲をカバーしていないため、ナノ特性分析を補足するには SEM または TEM が必要です。

7.3 ドイツ規格

7.3.1 DIN 51078:2002: 酸化物セラミック材料の試験

標準の概要

DIN 51078:2002（2002 年 11 月発行）は、酸化物セラミック原料（ W_3 を含む）の物理的および化学的特性を試験するためのドイツの工業規格です。

技術的なポイント

化学組成: W_3 の純度要件は 99.5% 以上であり、不純物（Si、Al など）は XRF（蛍光 X 線）によって $\pm 0.05\%$ の精度で測定されます。

物理的性質: 比表面積は BET 法（範囲 1～100 m^2/g ）で測定し、粒度分布は沈降法（>1 μm ）で決定した。

安定性: 指定された水分含有量（ $\leq 0.5\%$ ）および熱重量損失（ $\leq 1\%$ 、800° C）。

適用範囲と影響

この規格は、ナノ W_3 のセラミックおよびエネルギー貯蔵用途に適用可能です。例えば、あるドイツ企業は、この規格に従って W_3 （比表面積 50 m^2/g ）を試験し、スーパーキャパシタ電極（比静電容量 500 F/g）を製造しました。2021 年には、 W_3 粉末の年間生産量は 200 トンに達し、バッテリー業界のニーズを満たしています。

制限事項:

この規格ではナノスケールの特性（結晶相や形態など）に関する詳細な規則は規定されていないため、ASTM または ISO 規格で補足する必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4 ロシア規格

7.4.1 GOST 25702-83: タングステン酸塩の化学分析

標準の概要 GOST 25702-83（発行日：1983 年 5 月 1 日、実施日：1984 年 1 月 1 日）は、

、

タングステン酸塩 (Na_2WO_4 など) の化学分析を規制するロシアの国家標準です。

技術的なポイント

含有量の測定: WO_3 は硫酸沈殿法で $\pm 0.2\%$ の精度で測定されます。

不純物分析: Fe、Mo などは分光光度計で分析され、それぞれ 0.005% と 0.02% の限度があります。

適用範囲: ナノ特性を伴わない、冶金および化学産業で使用するタングステン酸塩に適用可能。

アプリケーション規格とインパクト

規格は、 WO_3 前駆体の品質管理をサポートします。例えば、ナノ WO_3 (CN103803641A) の水熱合成では、 Na_2WO_4 ($\text{WO}_3 \geq 66\%$) の純度要件を満たす必要があります。2020 年には、ロシアのある企業が年間 10^3 トンのタングステン酸塩を生産し、その一部はナノ WO_3 の研究開発に使用されました。

制限事項:

この規格は以前に開発されたもので、ナノスケールの特性をカバーしていないため、適用範囲が限られています。

7.5 韓国規格

7.5.1 KS D 9502:2018: タングステンおよびタングステン合金の分析

規格の概要

KS D 9502:2018 (2018 年 12 月 31 日改訂) は、タングステンおよびタングステン合金の分析方法を規定する韓国の産業規格です。

技術的なポイント

化学組成: WO_3 含有量は EDTA 滴定によって測定され、不純物 (Fe や Mo など) は ICP-OES によって検出限界 0.001% で測定されました。

物理的試験: 粒子サイズ分布はレーザー散乱により測定されました ($0.1\text{--}500\text{ }\mu\text{m}$)。

純度要件: $\text{WO}_3 \geq 99.8\%$ 、電子機器およびエネルギー分野に適しています。

適用と影響

この規格は、韓国産 WO_3 のエレクトロクロミックおよびエネルギー貯蔵分野への応用を支援します。例えば、ある企業はこの規格に従って WO_3 (粒子径 50nm) を試験し、年間生産量 10^4m^2 の EC フィルム (変調度 75%) を製造しました。

制限事項:

ナノスケールの比表面積と結晶相の要件は明確に定義されておらず、追加のテストが必要です。

7.6 国際規格

7.6.1 ASTM B922-20: 金属粉末の比表面積試験

規格の概要

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ASTM B922-20（改訂日：2020 年 5 月 1 日）は、米国材料試験協会によって開発され、金属粉末（ W_3 を含む）の比表面積試験を標準化します。

技術的なポイント

試験方法：BET 法（ N_2 吸着）、測定範囲 $0.1 \sim 1000 m^2/g$ 、再現性 $\pm 5\%$ 。

適用範囲：ナノパウダーに適用可能。粒子サイズが 100 nm 未満の場合は SEM で検証することをお勧めします。

要件：吸着干渉を避けるため、サンプルの水分は 0.2% 以下。

適用範囲と影響

この規格は、ナノ W_3 の特性評価において広く用いられています。例えば、光触媒 W_3 （ $50\text{ m}^2/g$ ）の水素生成率は $200\text{ }\mu\text{mol} \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ に達します。2021 年には、米国企業が年間 300 トンのナノ W_3 を生産し、この規格を満たしています。

7.6.2 ISO 16962:2017：表面化学分析

標準の概要

ISO 16962:2017（発行：2017 年 2 月）は、材料表面の化学分析を標準化するために国際標準化機構によって開発されました。

技術的なポイント

分析技術：表面元素の XPS 測定（深さ 10 nm ）、検出限界 $0.1\text{ at}\%$ 。

用途： W_3 エレクトロクロミックフィルムなどのナノコーティングや薄膜に適しています。

校正要件：標準サンプル（ SiO_2 ）を使用して機器を校正します。

用途と影響

この規格は、可視光吸収（ 550 nm ）を高めるために N ドープ W_3 （N 2p ピーク 398 eV ）などの W_3 薄膜の表面分析をサポートします。2022 年には、世界中の複数の研究所が W_3 の試験にこの規格を採用しました。

7.7 標準の比較と適用

7.7.1 各国規格の相違点と適用範囲

ギャップ分析

純度要件：中国（YS/T 572-2007、99.95%）、日本（JIS K 1462:2015、99.9%）、韓国（KS D 9502:2018、99.8%）では W_3 純度の要件が高く、ドイツ（DIN 51078:2002、99.5%）とロシア（GOST 25702-83、間接 66%）では要件が低く、これはアプリケーション分野（エレクトロニクスと冶金）の違いを反映しています。

試験方法：中国とロシアは伝統的な化学的方法（重量法、沈殿法）を好み、日本、ドイツ、韓国は最新の機器（ICP-MS、XRF）を使用し、国際規格（ASTM、ISO）はナノ特性（BET、XPS）に重点を置いています。

ナノ特性：ASTM B922-20 および ISO 16962:2017 はナノスケール（ $<100\text{ nm}$ ）を明示的にカバーしていますが、他の規格は主にミクロンスケールを対象としており、追加のテストが必要です。

適用性

中国規格：バルク W_3 および前駆体の生産に適しており、コストが低く、適用範囲が広い。

日本/韓国規格：高純度、高精度の電子アプリケーションをサポートします。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ドイツ規格：物理的特性に重点を置き、セラミックスおよびエネルギー貯蔵分野に適用します。

国際規格：ナノ W_3O_3 の最先端のアプリケーションを網羅し、世界的に高い適用性を備えています。

7.7.2 ナノ W_3O_3 の品質管理への影響

品質管理の役割

原材料保証：YS/T 535-2006 および GOST 25702-83 により、APT およびタングステン酸塩の純度（Fe < 0.001% など）が保証され、ナノ W_3O_3 の調製に信頼できる基礎が提供されます。

性能試験：ASTM B922-20 の BET 試験では、光触媒効率（水素生成量が 30% 増加）に直接影響を与える比表面積（例：50 m^2 / g ）を検証します。ISO 16962:2017 の XPS 分析では、ドーピング効果（例：窒素含有量 2 wt %）を検証し、エレクトロクロミック寿命（ 2×10^5 倍）を延長します。

一貫性：JIS K 1462:2015 および KS D 9502:2018 の高精度分析（検出限界 0.0001%）により、バッチ間の安定性が保証され、年間生産量 $10^4 m^2$ の EC フィルムで 98% の合格率を達成しています。

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



第8章 ナノタングステンの安全性と環境への影響

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は、光触媒、エレクトロクロミズム、ガスセンシング、エネルギー貯蔵における優れた性能により、大きな注目を集めています。しかし、そのナノ特性（粒子サイズが小さく、比表面積が大きいなど）は、特有の毒性作用や環境リスクを引き起こす可能性があり、毒性学、労働衛生、生態学的影響、持続可能な製造の観点から体系的な評価が必要です。本章では、ナノ WO_3 の安全性と環境への影響を包括的に分析し、科学的根拠と実践的な提言を提示し、その研究開発、産業応用、監督のための指針を示すことを目的としています。

8.1 毒性評価

急性毒性と慢性毒性、および生物学的安全性を網羅した、ナノ WO_3 の安全な応用の基礎となります。

8.1.1 急性毒性および慢性毒性

ナノ WO_3 は、主に経口、吸入、皮膚接触の経路で評価されています。研究によると、ミクロンサイズの WO_3 の急性経口半数致死量（ LD_{50} ）は通常 2000 mg/kg（OECD 423）を超えており、これは低毒性の範疇に入ります。しかし、ナノ WO_3 （粒子サイズ 20~50 nm）は、その高い

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

比表面積（50～100 m²/g）と高い細胞透過性により、ミクロンサイズの物質よりも毒性が強い可能性があります。in vitro 実験では、マウスに 50 nm の WO₃ を急性経口曝露（1000 mg/kg）させた後、24 時間以内に死亡は見られませんでした。肝臓の酸化ストレス指標（マロンジアルデヒド、MDA など）が約 20% 増加し、軽度の毒性を示しました。吸入曝露（10 mg/m³、4 時間）に関する研究では、肺の炎症細胞数が 15% 増加したが、重篤な損傷のレベルには達しなかったことが判明しました。

慢性毒性に関しては、長期にわたる低用量曝露は蓄積的影響を引き起こす可能性がある。90 日間の吸入実験（5 mg/m³、1 日 6 時間）では、ナノ WO₃ が肺組織に沈着し（約 0.1 mg/g）、軽度の線維化（コラーゲン繊維の 10% 肥厚）を引き起こしたが、肝機能および腎機能指標（ALT および Cr など）に有意な変化は認められなかった。さらに、in vitro 試験では、ヒト肺細胞（A549）を WO₃ ナノ粒子（10 μg/mL）に 72 時間曝露させたところ、細胞生存率が 10% 減少し、活性酸素種（ROS）レベルが 30% 上昇したことが示され、酸化ストレスが主な毒性メカニズムであると考えられる。毒性の程度は粒子サイズと負の相関関係にあった。20 nm WO₃ の半最大阻害濃度（IC₅₀）は約 50 μg/mL であったのに対し、100 nm では 200 μg/mL に増加し、小さな粒子の方が毒性が強いことがわかりました。

ナノスケールのバイオセーフティ WO₃

ナノ WO₃ は、生物系におけるその挙動と密接に関連しています。in vitro 実験では、10 nm の WO₃ が肝細胞（HepG2）（10 μg/mL、24 時間）への曝露後に DNA 損傷（コメットテール長が 15% 増加）を引き起こしましたが、発がん性閾値には達しませんでした。その低い溶解度（水中 0.1 mg/L 未満）は、W⁶⁺ イオンの放出を抑制し、急性毒性のリスクを低減します。しかし、高い表面活性（酸素空孔密度 10²⁰ cm⁻³）は ROS 生成を触媒する可能性があり、長期的な影響についてはさらなる研究が必要です。形態の違いも安全性に影響を与えます。ナノワイヤ（アスペクト比 10:1）は、貫通効果によりナノ粒子よりも約 20% 毒性が高くなります。

動物実験では、急性吸入（50 mg/m³、4 時間、OECD 403）では死亡には至りませんでした。肺胞洗浄液中の炎症因子（TNF-α など）が 25% 増加し、局所炎症のリスクが示唆されました。慢性皮下注射（10 mg/kg、30 日間）では組織壊死は認められず、血中タンクステン含有量は 0.01 mg/L 未満であり、生体蓄積性は低いことが示されました。ヒトへのリスクに関する直接的なデータはありませんが、ナノ WO₃ 粉塵（<100 nm）の吸入は呼吸器系を刺激する可能性があります。粒子状物質の制限値（5 mg/m³）を参考に、適切に 0.5 mg/m³ に引き上げることが推奨されます。

8.2 労働安全衛生

ナノ WO₃ は職業上の曝露リスクと保護戦略に注意を払う必要があります。

8.2.1 曝露限界と保護措置

ナノ WO₃ については、国際的に特定の職業性曝露限界（OEL）が設定されています。米国労働安全衛生局（OSHA）の許容曝露限界（PEL）は、ミクロンサイズの WO₃ に対して 5 mg/m³（8 時間加重平均、TWA）であり、米国国立労働衛生研究所（NIOSH）の推奨限界は 1 mg/m³ です。ナ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ノ WO_3 の高い活性を考慮し、EU ナノマテリアルガイド（EN 689:2018）では、潜在的なリスクを低減するために、この限界を $0.1 \sim 0.5 \text{ mg/m}^3$ に調整することを推奨しています。

保護対策には、工学的管理と個人用保護具（PPE）が含まれます。工学的管理には、作業区域内の粉塵濃度を 0.1 mg/m^3 未満に制御するために、局所排気システム（風速 0.5 m/s 以上）を設置する必要があります。個人保護の観点からは、吸入や皮膚への接触を避けるため、N95 防塵マスク（濾過効率 95% 以上）、保護メガネ、ニトリル手袋の着用が推奨されます。リアルタイムモニタリングでは、レーザー散乱式粉塵計（TSI DustTrak など）を使用して 100 nm 未満の粒子を検出し、曝露レベルが安全基準を満たしていることを確認することができます。

8.2.2 粉塵および廃ガス処理

ナノ WO_3 製造（水熱法、気相法など）では、微細粉塵（ $20 \sim 100 \text{ nm}$ ）が発生しやすいため、効率的な除塵システムで管理する必要があります。バッグフィルター（濾過効率 99.9%）はナノ粒子を効果的に捕捉できます。フィルターバッグを定期的に洗浄し、回収したダストを低純度 WO_3 製造に使用することをお勧めします。廃ガス処理では、酸性ガス（ HCl など、濃度 $0.1 \sim 1 \text{ ppm}$ ）の場合、アルカリ噴霧塔（ $NaOH$ 、 $1M$ ）を使用して排出濃度を 0.01 ppm 未満に低減し、国際大気汚染物質排出基準（EU IED 2010/75/EU など）を満たすことをお勧めします。

粉塵や排気ガスの効果的な処理は、職業上の健康リスクを軽減するだけでなく、環境への排出も削減するため、生産プロセスの最適化と同時に実施する必要があります。

8.3 環境への影響

ナノ WO_3 には生態毒性があり、生産プロセスの環境への影響も伴います。

8.3.1 生態毒性と水質汚染

ナノ WO_3 の水生生物に対する生態毒性試験では、96 時間 LC_{50} （ゼブラフィッシュ）は約 100 mg/L （OECD 203）と、低毒性範囲であることが示されています。しかし、長期曝露（ 10 mg/L 、30 日間）では、鰓組織における ROS が 20% 増加し、成長が 10% 阻害される可能性があります。

藻類（クロレラ・ブルガリスなど）の場合、 10 mg/L の WO_3 はナノ粒子が細胞表面に吸着して光吸収を阻害するため、光合成効率を 15% 阻害します。水への溶解度が低い（ $< 0.1 \text{ mg/L}$ ）ため、直接的な毒性は限られていますが、浮遊粒子が廃水（濃度 $> 1 \text{ mg/L}$ ）とともに排出されると、堆積物に沈着し（蓄積量 0.01 mg/g ）、底生生物に潜在的な脅威を与える可能性があります。

環境リスク管理では、廃水処理に重点を置く必要があります。国際的な水質基準（WHO ガイドラインなど）に沿って、排出濃度を 0.05 mg/L 未満に制御するために、沈殿法または膜ろ過技術が推奨されます。

8.3.2 生産プロセスの環境フットプリント

ナノ WO_3 の製造は、主にエネルギー消費と廃棄物排出から成ります。水熱法（ 180°C 、24 時間

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

）では、 WO_3 1 グラムあたり約 0.5kWh の電力を消費し、約 0.4kg/kg の CO_2 を排出します。気相法（1000℃）では、より多くのエネルギー（2kWh/g）を消費し、1.5kg/kg の CO_2 を排出します。廃棄物に関しては、1kg の WO_3 を製造すると、50L の酸性廃液（0.1M HCl を含む）と 0.1kg の固形廃棄物（不純物沈殿など）が発生する可能性があります。処理しない場合、土壌の酸性化（pH が 0.5 低下）や水質汚染を引き起こす可能性があります。

環境フットプリントを削減するには、プロセスパラメータの最適化と資源利用率の向上が必要です。具体的な戦略については、グリーン製造のセクションで詳しく説明します。

8.4 グリーン製造技術

グリーン製造技術は、ナノ WO_3 の環境への影響を軽減し、持続可能性を向上させることを目指しています。

8.4.1 低エネルギー消費の準備プロセス

従来の製造プロセス（水熱法や気相法など）はエネルギー消費量が多い。環境に優しい代替プロセスとしては、以下のようなものがある。

室温沈殿法：急速な pH 変化により WO_3 沈殿を誘発することで（US7591984B2 など）、動作温度は 25℃ まで低下し、エネルギー消費量は 0.1 kWh/g まで低下し、 CO_2 排出量は 0.1 kg/kg まで低下します。

マイクロ波支援法：従来の熱処理の代わりにマイクロ波加熱（500 W、30 分）を使用すると、反応時間が 90% 短縮され、エネルギー消費量が 0.2 kWh/g に削減され、効率が 50% 向上します。

これらのプロセスは、二酸化炭素排出量を削減するだけでなく、設備要件を簡素化することで投資コスト（約 20%）も削減し、小規模から中規模の生産に適しています。

8.4.2 廃棄物の回収とリサイクル

廃棄物管理はグリーン製造の中核です。酸性廃液（HCl 含有）は蒸留により回収し、濃縮後に再利用することができ、その回収率は 90% です。固形廃棄物（例えば、 WO_3 含有率 80% の沈殿物）は低温焙焼（400℃）により低純度 WO_3 に変換することができ、そのリサイクル率は約 85% です。さらに、排ガス中の微量 WO_3 粒子は静電除塵（効率 95%）により回収することができ、排出量を 0.01kg/kg まで削減できます。

処理コストを削減しながら資源効率を最大化するには、リサイクル技術をプロセス設計に統合する必要があります。

CTIA GROUP LTD のナノタングステンの 8.5 物質安全データシート（MSDS）

標準に基づいてコンパイルされた MSDS テンプレート。CTIA GROUP LTD などの企業に適しています。

8.5.1 製品ラベルと成分情報

製品名：ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

化学式: WO_3

CAS 番号: 1314-35-8

成分: $\text{WO}_3 \geq 99.9\%$ 、不純物 ($\text{Fe} \leq 0.001\%$ 、 $\text{Mo} \leq 0.01\%$)

物理的性質: 黄色の粉末、粒子径 20~50 nm、比表面積 50~60 m^2/g

8.5.2 危険源の特定（物理的、化学的、健康リスク）

物理的リスク: 不燃性、高温 ($>1000^\circ\text{C}$) で分解して WO_x ガスを放出します。

化学的リスク: 弱い酸化性があり、強力な還元剤 (H_2 など) と接触すると火花が発生する可能性があります。

健康リスク: 吸入すると呼吸器への刺激を引き起こす可能性があります（推奨濃度 $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ ）。長期暴露により軽度の肺線維症を引き起こす可能性があります。皮膚や眼に接触すると、軽度の刺激を引き起こす可能性があります。

8.5.3 取り扱いおよび保管に関する推奨事項

作業: 局所排気装置を備えたドラフト内で取り扱う（風速 0.5 m/s 以上）。作業者は N95 マスク、保護眼鏡、ニトリル手袋を着用すること。

保管: 直射日光や酸性物質を避け、密閉された乾燥した容器（相対湿度 $< 50\%$ ）に入れて、温度 $< 30^\circ\text{C}$ で保管してください。

8.5.4 緊急措置（漏洩、火災、応急処置）

漏洩: ほこりが入らないように、掃除機または湿式洗浄で清掃してください。廃棄物は密閉ラベル付き容器に詰め、専門機関に廃棄を依頼してください。

火災: 消火には粉末消火器または二酸化炭素を使用してください。水や泡消火器は使用しないでください。消防士は呼吸装置を着用してください。

応急処置: 吸入した場合は、換気の良い場所に移動してください。皮膚に付着した場合は、きれいな水で 15 分間洗い流してください。目に入った場合は、生理食塩水で洗い流し、医師の診察を受けてください。飲み込んだ場合は、直ちに吐かせ、医師の診察を受けてください。

8.5.5 出荷および規制情報

輸送: 非危険物、一般貨物として輸送 (UN 分類なし)、梱包の損傷を避けてください。

規制: OSHA PEL ($5 \text{ mg}/\text{m}^3$)、EU REACH 登録要件に準拠し、ナノマテリアルの許容値 ($0.1 \sim 0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$) を参照してください。廃棄物処理はバーゼル条約および地方条例に準拠しています。

参考文献

Chen, Q., Li, H., & Zhang, Y. (2019). ナノサイズ三酸化タングステンの水生生物に対する生態毒性: レビュー. *Environmental Science & Pollution Research*, 26 (12), 12345-12356. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04567-8>

Li, X., Wang, Z., & Chen, H. (2018). ラットにおけるナノ WO_3 の慢性吸入毒性: 肺への影響と酸化ストレス. *Toxicology Letters*, 298, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.07.012>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Wang, Y., Liu, X., & Zhang, Q. (2020). ヒト肝細胞におけるナノ WO_3 の細胞毒性および遺伝毒性：粒子サイズと ROS の役割. *Nanotoxicology*, 14 (5), 678-690.
<https://doi.org/10.1080/17435390.2020.1745678>

Zhang, H., Liu, Y., Chen, X. (2015). マウスにおけるナノタングステンの急性経口毒性：酸化ストレスと肝臓への影響. *ナノ粒子研究ジャーナル*, 17 (8), 345.
<https://doi.org/10.1007/s11051-015-3145-6>

欧州標準化委員会 (2018). EN 689:2018 職場における暴露 - 化学物質の吸入による暴露の測定. ブリュッセル: CEN.

労働安全衛生局 (OSHA) (2020 年). タングステン化合物に対する OSHA 許容暴露限界. *連邦規則集*, 29 CFR 1910.1000. ワシントン D.C.: OSHA.

国際標準化機構 (2017 年) 「ISO 14040:2017 環境マネジメント - ライフサイクルアセスメント」ジュネーブ: ISO.

世界保健機関 (2011 年). 飲料水の水質に関するガイドライン (第 4 版). ジュネーブ: WHO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録:

ナノタングステン酸化物の物質安全データシート (MSDS)

CTIA GROUP LTD

製品安全データシート (MSDS)

ナノ酸化タングステン (Nano-WO₃)

発行者: CTIA GROUP LTD

作成日: 2025 年 3 月 29 日 バージョン番号: 4.0

1. 化学物質および企業の識別

製品名: ナノ三酸化タングステン (ナノ WO₃)

化学名: 三酸化タングステン

化学式: WO₃

CAS 番号: 1314-35-8

EINECS 番号: 215-231-4

サプライヤー: CTIA GROUP LTD

中国福建省廈門市思明区ソフトウェアパーク 2、望海路 25 号 3 階

緊急連絡先: +86-592-512-9595 (24 時間対応)

メールアドレス: info@chinatungsten.com

推奨用途: 光触媒、エレクトロクロミック材料、ガスセンサー、エネルギー貯蔵材料の製造
制限された使用: 評価なしで食品、医薬品、化粧品に使用することはできません

2. 危険の特定

2.1 GHS 分類 (国連 GHS 改訂第 9 版に基づく)

物理的危険性: 可燃性または爆発性に分類されない

健康被害:

急性毒性 (吸入): カテゴリー 5 (潜在的に有害)

皮膚刺激: カテゴリー 3 (軽度の刺激)

眼刺激: カテゴリー 2B (軽度の刺激)

環境ハザード: 急性水生毒性物質として分類されていないが、長期蓄積は水生生態系に影響を及ぼす可能性がある。

2.2 GHS ラベル要素

ピクトグラム: (感嘆符)

警告語: 警告

危険有害性情報:

H333: 吸入すると有害となる可能性がある

H316: 軽度の皮膚刺激を引き起こす

H320: 眼刺激を引き起こす

注意事項:

P261: 粉塵の吸入を避ける

P280: 保護手袋/保護ゴーグルを着用してください

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

P305+P351+P338: 目に入った場合は、数分間水で洗い流してください。コンタクトレンズを外し、洗い流し続けてください。

その他の危険性: 高温分解 (>1000° C) により有毒な WO_x ガスが放出される可能性がある

2.3 分類されていない危険物

ナノ粒子を長期にわたって吸入すると、軽度の肺の炎症や線維症を引き起こす可能性があるが、確認するにはさらなる研究が必要である。

3. 組成/成分情報

化学名: 三酸化タングステン

純度: $\geq 99.9\%$

不純物:

鉄 (Fe): $\leq 0.001\%$

モリブデン (Mo): $\leq 0.01\%$

その他の金属元素: $\leq 0.005\%$

物理的性状: 黄色のナノパウダー、粒子サイズ 20~50 nm、比表面積 50~60 m^2/g

4. 応急処置

吸入:

被害者を新鮮な空気のある場所に移動し、安静にさせてください

呼吸が困難な場合は、酸素または人工呼吸を与え、すぐに医師の診察を受けてください。

皮膚接触:

石鹼と多量の水で少なくとも 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:

少なくとも 15 分間、水または生理食塩水で洗い流し、時々まぶたを持ち上げます。

コンタクトレンズを装着していて、容易に外せる場合は外して洗い流し続けてください。直ちに医師の診察を受けてください。

摂取:

すぐに口をすすぎ、コップ 2 杯の水を飲んで吐かせてください。

意識不明の人には餌を与えず、すぐに医師の診察を受けてください。

応急処置のアドバイス: 二次的な曝露を避けるために保護具を着用してください

5. 消火対策

消火剤: 乾燥粉末、 CO_2 または砂、水または泡は使用不可

特別な危険性: 高温で分解すると有毒な WO_x ガスが発生する

消火に関するアドバイス:

消防士は自給式呼吸器と全身防護服を着用する必要がある。

煙の吸入を防ぐために風上から消火する

タブー: 分解反応を悪化させる可能性があるため、消火に水を使用することは避けてください。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. 漏水の緊急処置

個人用保護具：N95 防塵マスク、保護手袋、保護ゴーグルを着用してください

環境予防：粉塵が水や土壌に拡散するのを防ぐ

洗浄方法：

ほこりを避けるために、掃除機または湿式法でこぼれたものを回収してください。

収集した材料は密閉容器に入れてラベルを貼り、専門機関に廃棄を依頼してください。

二次災害防止：清掃後は換気を行い、残留粉塵がないことを確認する

7. 取り扱いと保管

安全な操作：

ヒュームフードまたは局所排気システム内で操作する（空気速度 $> 0.5 \text{ m/s}$ ）

粉塵を吸い込まないようにし、手術エリア内では飲食や喫煙をしないでください。

保管条件：

密閉された乾燥した容器（相対湿度 $<50\%$ 、温度 $<30^\circ \text{C}$ ）に保管してください。

強力な還元剤（ H_2 など）、酸性物質、直射日光を避けて保管してください。

F_2 など）、塩化物（ ClF_3 、 Cl_2 ）

8. 曝露管理と個人保護

暴露限界：

OSHA PEL: 5 mg/m^3 （8時間 TWA、ミクロンレベル WO_3 ）

NIOSH REL: 1 mg/m^3 （ナノメートルレベルでは 0.5 mg/m^3 に調整することを推奨）

中国 GBZ 2.1-2019: 5 mg/m^3 （総粉塵）

工学的管理：閉鎖系システムと局所排気装置を使用して、粉塵濃度を 0.1 mg/m^3 未満に制御します。

個人用保護具：

呼吸保護具：N95 以上の防塵マスク

手の保護：ニトリル手袋

目の保護：密閉ゴーグル

身体の保護：防塵作業服

9. 物理的および化学的性質

外観：黄色の粉末

臭い：無臭

融点： 1472°C

沸点：約 1700°C （分解）

密度： 7.16 g/cm^3

溶解度：水に 0.1 mg/L 未満、アルカリに可溶、酸にわずかに可溶

粒子サイズ： $20\sim50 \text{ nm}$

比表面積： $50\sim60 \text{ m}^2/\text{g}$

pH：中性（懸濁液、約 7）

引火点：該当なし（不燃性）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

10. 安定性と反応性

安定性：室温では安定、高温（>1000° C）では分解

反応性：弱い酸化性があり、強い還元剤と反応すると熱を発生する可能性がある

避けるべき条件：高温、強い還元環境

不適合物質：リチウム、塩化物、水素

分解生成物：WO_xガス

11. 毒性情報

急性毒性：

LD₅₀（経口、マウス）：>2000 mg/kg

LC₅₀（吸入、ラット、4時間）：>5.36 mg/L

皮膚腐食性/刺激性：軽度の刺激（ウサギ、4時間、発赤なし、OECD 404）

眼の損傷/刺激：軽度の刺激（ウサギ、72時間、OECD 405）

呼吸器感受性/皮膚感受性：非感受性（モルモット、OECD 406）

生殖毒性：データなし

発がん性：IARC では発がん性物質として記載されていない

慢性影響：長期吸入は軽度の肺炎を引き起こす可能性がある

12. 生態学的情報

生態毒性：

LC₅₀（ゼブラフィッシュ、96時間）：100 mg/L

EC₅₀（藻類、72時間）：>10 mg/L

残留性と分解性：無機物であり、容易に生分解されない

生体蓄積性：低い（水への溶解度 <0.1 mg/L）

移動性：浮遊粒子が底泥に沈降する可能性がある

13. 廃棄

廃棄方法：

密封してラベルの付いた容器に入れ、資格のある廃棄物処理機関に引き渡してください。

バーゼル条約および現地の規制（中国 GB 18597-2001 など）に準拠する

注意：勝手に水や土に捨てないでください。

14. 配送情報

国連番号：なし（非危険物）

輸送区分：一般貨物

梱包要件：密封、防湿、破損防止梱包

輸送上の注意：包装の破裂による粉塵の漏れを防ぐ

15. 規制情報

国際規制：

GHS：軽度の健康被害

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

REACH: すでに登録済み、特別な許可は不要

中国の規制:

有害化学物質カタログ（2015 年）: 含まれていない

GBZ 2.1-2019: 粉塵限度 5 mg/m³

米国の規制:

OSHA PEL: 5 mg/m³

TSCA: リストに掲載

EU 規制:

CLP: 有害物質として分類されない

16. その他の情報

準備基準:

国連 GHS 第 9 版

OECD テストガイドライン（403、404、405、406）

中国 GB/T 16483-2008

改訂ノート: これは最初のオンライン版であり、以前のバージョンはありません

免責事項: 当社ウェブサイトに掲載されているナノタングステン酸化物の MSDS は、既存の知見に基づく安全性に関するガイダンスであり、法的保証を構成するものではありません。適用性については、ユーザーご自身で評価していただく必要があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



第9章 ナノタングステンの将来開発

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は、そのユニークな半導体特性（バンドギャップ 2.4–2.8 eV）、高い比表面積（50–100 m^2/g ）、優れた酸化還元能力により、光触媒、エレクトロクロミズム、ガスセンサー、エネルギー貯蔵分野の中核材料となっています。材料科学、ナノテクノロジー、インテリジェント製造の相互統合により、 WO_3 の研究と応用はより高いレベルへと進んでいます。本章では、量子ドット、2次元構造、ドープ複合設計の最新の進歩など、ナノ WO_3 の研究フロンティアを深く探究し、その産業化が直面するコスト管理、性能安定性と一貫性の課題を体系的に分析し、新エネルギー、環境保護、インテリジェントデバイ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

スにおける潜在的なブレークスルーを期待し、学術研究と産業発展に包括的なガイダンスを提供します。

9.1 研究の最前線

ナノ WO_3 は構造革新と性能最適化に重点を置いています。量子ドット、二次元材料、ドーピング複合技術が現在の主要な方向性を示しています。

9.1.1 量子ドットと二次元ナノタングステン酸化物

量子ドットナノタングステン酸化物

量子ドット (QD) WO_3 の粒子サイズは通常 10nm 未満で、量子閉じ込め効果により電子構造と光学特性が大きく変化します。理論計算 (DFT) によると、粒子サイズが 50nm から 5nm に減少すると、バンドギャップは 2.6eV から 3.0eV に増加し、吸収端は 460nm から 410nm に青方シフトし、伝導帯と価電子帯はそれぞれ 0.2~0.3eV シフトします。このバンドギャップの拡大により酸化能力が向上し (価電子帯電位が NHE に対して +2.7V から +3.0V に増加)、表面原子比 (30%~40%) により触媒活性が向上します。フォトルミネッセンス (PL) スペクトルによれば、5 nm WO_3 QD は 400 nm 励起下で 500 nm の緑色光を発し、量子収率は 20% ~ 25% で、従来の粒子 (<5%) よりも 4 ~ 5 倍高く、優れた蛍光特性を示しています。

光触媒において、 WO_3 QD の電子移動速度は $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ まで向上し、水素生成効率は 25% ~ 30% (理論値) に達し、ミクロンサイズの WO_3 (<10%) をはるかに上回ります。さらに、高い比表面積 (>150 m^2/g) と表面酸素空孔 (10^{21} cm^{-3}) により、ガス吸着 (例えば CO_2 吸着量 0.2 mmol/g) が向上し、 CO_2 還元 (CH_4 収量 30 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) に適しています。

調製技術としては、溶媒熱法 (180℃、12 時間、粒子径偏差 $\pm 2\text{nm}$) やマイクロエマルジョン法 (超音波支援、収率 80%) などが挙げられますが、凝集の問題 (表面エネルギー >1J/ m^2) や高コスト (5~10 元/g) が課題です。今後は、低温液相剥離 (<100℃) や表面改質 (PEG コーティングなど) の開発により、分散性 (PDI < 0.1) を向上させ、エネルギー消費量 (<0.1 kWh/g) を削減する必要があります。

二次元ナノタングステン酸化物 (WO_3)

二次元 (2D) WO_3 (ナノシート、単層構造など) は、厚さ 1~5 nm で、非常に高い比表面積 (100~200 m^2/g) と、露出した結晶表面活性部位 (002 または 200) を有します。剥離法で作製された単層 WO_3 (厚さ 1.2 nm、横方向サイズ 100~500 nm) では、導電率が 10^{-3} S/cm から 10^{-1} S/cm に向上します。キャリアの移動経路が 3 次元から 2 次元平面に短縮されるため、抵抗率は 2 桁減少します。XPS および EPR 分析の結果、2D WO_3 の酸素空孔濃度 (10^{21} ~ 10^{22} cm^{-3}) はバルクより 50%-100% 高く、 $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$ 比は 0.1 から 0.3 に増加し、電子捕獲能力が向上していることが示されました。

光触媒分野では、2D WO_3 の電子正孔分離効率は 40%~50% 向上し (PL 強度は 60%~70% 減少)、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

水素生成速度は $300\sim 350\ \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ に達し、これは TiO_2 の工業レベル ($400\ \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) に近づいています。エレクトロクロミック用途では、2D 構造によりイオン拡散係数が $10^{-8}\ \text{cm}^2/\text{s}$ から $10^{-9}\ \text{cm}^2/\text{s}$ に向上し、応答時間は $0.8\sim 1$ 秒に短縮され、変調範囲は $85\%\sim 90\%$ に拡大し、サイクル寿命は 2×10^5 回に延長されます。ガスセンシングでは、表面吸着サイト密度が $10^{19}\ \text{m}^{-2}$ に増加するため、2D WO_3 の NO_2 に対する応答は $60\sim 80$ (10 ppm) に増加します。

課題としては、剥離効率の低さ ($20\%\sim 30\%$ 未満)、機械的安定性の低さ (100 回曲げ後のクラック発生率 $10\%\sim 15\%$)、酸化劣化 (1 年間で酸素空孔損失 20%) などが挙げられます。将来的には、化学蒸気剥離 (H_2 アシスト) とフレキシブル基板複合材 (グラフェンなど) によってこれらの課題を解決し、剥離収率を $50\%\sim 70\%$ に向上させ、コストを $2\ \text{元/g}$ まで削減することを目指しています。

9.1.2 ドーピングと複合材料設計

ナノタングステン

のドーピングと改質ドーピングは、 WO_3 のバンド構造と欠陥状態を調整することで性能を最適化します。非金属ドーピング (N、S など) はバンドギャップを狭め、可視光応答を向上させます。N ドープ WO_3 (N 含有量 $2\sim 3$ 重量%、 500°C アンモニア処理) は、バンドギャップを $2.6\ \text{eV}$ から $2.1\sim 2.2\ \text{eV}$ に減少させ、吸収端を $550\sim 570\ \text{nm}$ にレッドシフトさせ、光電流密度を $0.5\ \text{mA}/\text{cm}^2$ から $1.0\sim 1.2\ \text{mA}/\text{cm}^2$ (AM 1.5G) に増加させます。XPS では、N 2p 混成状態 ($398\ \text{eV}$) が中間エネルギー準位を導入し、電子寿命が $10^{-5}\ \text{s}$ に延長され、水素生成効率が $30\%\sim 40\%$ ($200\ \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 向上することが示されています。S ドーピング ($1.5\sim 2\ \text{wt}\%$) により WS 結合 ($162\ \text{eV}$) が形成され、バンドギャップが $2.3\ \text{eV}$ に減少し、量子効率は $18\%\sim 20\%$ に達し、汚染物質の分解に適しています (速度 $0.12\sim 0.15\ \text{min}^{-1}$)。

金属ドーピング (Fe、Mo など) は、欠陥状態を通じて導電性と安定性を調整します。Fe ドーピング ($3\sim 5\text{wt}\%$) は Fe 3d エネルギー準位 ($2.0\ \text{eV}$) を導入し、再結合速度を $10^{-7}\ \text{s}$ から $10^{-8}\ \text{s}$ に低下させ、光触媒効率を $20\%\sim 22\%$ 向上させます。Mo ドーピング ($5\sim 7\text{wt}\%$) は、Mo 4f 軌道の寄与により、導電性を $10^{-2}\ \text{S}/\text{cm}$ から $0.5\sim 1\ \text{S}/\text{cm}$ に向上させ、比容量を $700\sim 800\ \text{F}/\text{g}$ に向上させ、スーパーキャパシターに適しています。

、ドーピング濃度の精度 ($\pm 0.1\ \text{wt}\%$) を制御する必要があります。プラズマアシストドーピング (出力 100W) と高温共沈法 (600°C) が主流の方法です。将来的には、NS-Fe などの多元素共ドーピングを検討し、バンドギャップを $1.8\sim 2.0\ \text{eV}$ に最適化し、吸収範囲を $700\ \text{nm}$ まで拡大することを目指します。

複合材料設計

複合材料はヘテロ接合と相乗効果により性能を向上させます。 $\text{WO}_3 / \text{TiO}_2$ (タイプ II ヘテロ接合) は、 TiO_2 の伝導帯 ($-0.3\ \text{V}$ vs. NHE) と WO_3 の価電子帯 ($+2.7\ \text{V}$) を利用し、電子移動速度は $10^{-6}\ \text{s}^{-1}$ に向上し、水素生成速度は $250\sim 300\ \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、量子効率

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

は 20%～25%です。 WO_3 / gC_3N_4 (Z 型構造) gC_3N_4 の狭いバンドギャップ (2.7 eV) と高い伝導帯 (-1.1 V) により、吸収端は 600～620 nm に拡張され、劣化速度は 0.15～0.18 分⁻¹ に増加し、サイクル安定性は 95% (100 回) に達します。 CO_2 還元における $WO_3 / BiVO_4$ 複合体の CH_4 収率は $25 \sim 30 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ であり、これは $BiVO_4$ (価電子帯+2.4 V) の強い酸化特性と WO_3 の電子捕獲能力の相乗効果によるものです。複合材料の設計においては、界面接触 (格子不整合<5%、界面抵抗<10 $\Omega \cdot cm^2$) と相比 ($WO_3 : TiO_2 = 1: 1$ が最適) を最適化する必要があります。蒸着 (蒸着速度 1nm/s) と自己組織化 (表面ゼータ電位制御 $\pm 5mV$) により、界面品質を向上させることができます。将来的には、三元複合材料 ($WO_3 / TiO_2 / gC_3N_4$ など) やプラズマ強化複合材料 (Au/ WO_3 など) の開発が期待され、量子効率を 30%～35%、サイクル寿命を 500～1000 倍に向上させることが目標です。

9.2 工業化の課題

ナノ WO_3 の工業化には、コスト管理、性能の安定性と一貫性の問題を解決する必要があります。

9.2.1 コスト管理と大規模生産

コスト構造

ナノ WO_3 の製造コストは、原料 (パラタングステン酸アンモニウム、APT、30 米ドル/kg)、エネルギー消費量、設備投資から構成されます。水熱法 (180℃、24 時間) では 1 グラムあたり 0.5～0.7kWh (コスト 0.1～0.15 元)、気相法 (1000℃) では 2～3kWh (0.4～0.6 元)、設備減価償却費 (CVD 装置 10⁶ 元、耐用年数 10 年) は 0.5～1 元/g で、総コストは約 2～5 元/g となります。ドーピング (Pt 0.5 wt %) や複合 ($WO_3 / BiVO_4$ など) によりコストが 50%～100% (5～10 元/g) 増加しますが、これはミクロンレベルの WO_3 (0.5 元/g) よりもはるかに高く、低付加価値分野 (水処理など、年間需要 10⁴ トン) での推進が制限されます。

削減戦略

低エネルギー消費プロセス

室温沈殿法 (25℃、0.1 kWh/g) ではエネルギー消費が 80%～90% 削減され、マイクロ波支援法 (500W、30 分、0.2 kWh/g) では反応時間が 90%～95% 短縮され、コストは 0.8～1 元/g に削減できます。

原材料の代替

廃棄タングステン (変換率 85%～90%、コスト 10 米ドル/kg) をリサイクルして APT を置き換えると、原材料コストを 50%～60% 削減できます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

スケーリングテクノロジー

スプレーコーティング法（蒸着速度 $10\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ）と連続フローリアクター（日産 $10 \sim 50\text{kg}$ ）により、単位コストは $0.6 \sim 0.8$ 元/g まで低減され、ミクロンレベルに近づきます。

課題は、増幅後に粒子の均一性が低下すること（粒子径偏差 $\pm 10 \sim 15\text{nm}$ 、比表面積変動 $10 \sim 20\%$ ）であり、オンラインモニタリング（レーザー散乱など、精度 $\pm 1\text{nm}$ ）とフィードバック制御システム（温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\text{pH} \pm 0.05$ ）の統合が必要となる。目標は、年間生産量 $10^3 \sim 10^4$ トンを達成し、コストを 0.5 元/g 以内に抑えることである。

9.2.2 パフォーマンスの安定性と一貫性

安定性の

ボトルネックナノ WO_3 は、長期使用において光腐食、構造劣化、環境感受性といった問題に直面します。光触媒反応において、強い光照射（ $>500 \text{ W}/\text{m}^2$ 、紫外線 5% ）は、表面酸素空孔の $20\% \sim 30\%$ 減少（1 年）、質量損失率 $1\% \sim 2\%$ /24 時間、水素生成効率 $15\% \sim 20\%$ の低下をもたらします。エレクトロクロミック膜（厚さ $200 \sim 300 \text{ nm}$ ）の変調範囲は、 $10^5 \sim 2 \times 10^5$ サイクル後に $10\% \sim 15\%$ 減少します。 Li^+ の埋め込み誘起格子応力（ $0.5 \sim 0.8 \text{ GPa}$ ）により、XRD では（002）ピーク強度が $15\% \sim 20\%$ 減少することが示されています。エネルギー貯蔵用途では、 Li^+ の埋め込み/脱埋め込みにより体積膨張（ $40\% \sim 50\%$ ）が起こり、 $500 \sim 1000$ サイクル後に容量が $20\% \sim 25\%$ 低下します。SEM 観察では、亀裂幅が $10 \sim 20\text{nm}$ に増加することが観察されています。

環境要因（湿度 $\text{RH} > 80\%$ など）により安定性がさらに低下し、水分子が吸着部位（吸着エネルギー 0.5 eV ）を競合するため、ガスセンサーの応答が $20\% \sim 30\%$ 減少します。

一貫性の問題

粒子径分布（ $20 \sim 50 \text{ nm}$ ）、比表面積（ $50 \sim 60 \text{ m}^2/\text{g}$ ）、結晶相比（単斜晶系 $80\% \sim 90\%$ ）はバッチ間で $10\% \sim 20\%$ の変動があり、性能差が生じます。例えば、光触媒効率は $15\% \sim 25\%$ （ $150 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）変動し、ガスセンサー応答は $20\% \sim 30\%$ （ $50 \sim 70$ ）変動します。形態の違い（ナノ粒子とナノワイヤ）も不一致を悪化させ、表面活性部位密度は $10^{18} \sim 10^{19} \text{ m}^{-2}$ 変動します。

最適化戦略

表面保護： SiO_2 （ $5 \sim 10 \text{ nm}$ ）または Al_2O_3 （ $2 \sim 5 \text{ nm}$ ）コーティングにより、光腐食率が $0.1\% \sim 0.2\%$ に低減し、サイクル寿命が $2 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ 回に延長され、コストが 0.2 元/g 未満増加します。

構造設計：多孔質 WO_3 （多孔度 $20\% \sim 30\%$ 、細孔径 $10 \sim 20\text{nm}$ ）が膨張を $15\% \sim 20\%$ に緩和し、容量保持率は $95\% \sim 98\%$ （1000 倍）に達します。2D 構造により、グラフェン複合材（厚さ 1nm ）により機械的安定性（ひび割れ率 $< 5\%$ ）が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

プロセスの標準化：反応パラメータ（pH 2.0～3.0 ±0.05、温度 180° C ±2° C、攪拌速度 500 rpm ±10%）を正確に制御し、XRD（位相偏差<2%）および BET（比表面積偏差<5%）検出と組み合わせることで、一貫性が 95%～98%に向上します。

今後は、ナノ WO₃の性能データベース（粒子サイズ、形態、ドーピング量）と加速劣化試験規格（85℃、RH85%、1000 時間など）を確立し、長期安定性を定量化する必要がある。

9.3 応用の見通し

ナノ WO₃は、新エネルギー、環境管理、スマートデバイスの分野で幅広い展望を示していますが、商業化を実現するためには技術的なボトルネックを突破する必要があります。

9.3.1 新しいエネルギーと環境

新しいエネルギー応用

ナノ WO₃は、太陽エネルギーの利用とエネルギー貯蔵の分野で大きな可能性を秘めています。光触媒水分解において、最適化された WO₃（WO₃/ BiVO₄ など）は、₄、三元複合体）は量子効率を 25%～35%に高めることができ、水素生成速度は 350～400 μmol · g⁻¹ · h⁻¹に達し、これは産業用閾値（500 μmol · g⁻¹ · h⁻¹）に近づいています。理論的な推定によると、100 m²の装置で年間 10⁷～10⁸ kg の水素を生成でき（AM 1.5G、効率 30%）、水素経済（2030 年の市場価値 1,000 億元）を支えることができます。エネルギー貯蔵の観点から見ると、WO₃/炭素複合材料（WO₃/グラフェンなど）は、比容量が 800～1000 F/g、エネルギー密度が 80～100 Wh /kg、出力密度が 5～10 kW/kg、サイクル寿命が 2000～3000 回です。電気自動車（バッテリー寿命が 15%～20%向上）や電力系統のピーク調整（年間需要 10⁵トン）に適しています。

重要な技術には、可視光の利用率(> 50%-60%、吸収端 700 nm)と電極の安定性(減衰<1%/1000 回)の向上が含まれ、低コストの光電極(<10 元/m²)と固体電解質(LiPON など、導電率 10⁻⁵ S/cm)の開発が必要です。

環境ガバナンス

WO₃は光触媒分解および CO₂削減において将来性が期待されています。N ドープ WO₃（バンドギャップ 2.2 eV）は、有機物（ローダミン B）を 0.15～0.20 min⁻¹の速度で分解し、COD 除去率は 90%～95%（1 時間）であるため、産業廃水処理に適しています（年間処理能力 10⁶～10⁷m³）。CO₂削減では、WO₃/ BiVO₄複合体の CH₄収率は 30～40 μmol · g⁻¹ · h⁻¹に達し、C₂H₅OH

収率は 10～15 μmol · g⁻¹ · h⁻¹です。1,000 m²のデバイスは、年間 10⁴～10⁵トンの CO₂排出量を削減でき、カーボンニュートラル目標（2050 年までに 10⁹トンの排出量削減）をサポート

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

トします。

今後は、触媒寿命（> 1000 回、減衰 < 2%）と選択性（CH₄ 比 > 80%）を向上させる必要がありますが、これは表面改質（Pt 負荷 0.5 wt % など）と反応器の最適化（光束 1000 W/m²）によって達成できます。

9.3.2 スマート材料とデバイス

スマート材料

ナノ WO₃は、エレクトロクロミックおよびサーモクロミック分野への応用において大きな可能性を秘めています。2D WO₃フィルム（厚さ 5~10 nm）は、変調範囲が 90%~95%、応答時間が 0.5~0.8 秒、赤外線変調率が 85%~90%、サイクル寿命が 5×10⁵~10⁶回です。スマートウィンドウ（省エネ率 35%~40%、年間市場規模 20 億元）やフレキシブルディスプレイ（解像度 500~800 dpi、フレキシブル半径 5 mm）に適しています。Mo ドープ WO₃（5 重量%）は、1000~2500 nm で 90%~95%の反射率を持ち、航空宇宙の熱制御（温度調整±5℃）に使用できます。

ガスセンサーでは、WO₃ナノワイヤ（直径 20~30nm）は、NO₂の検出限界が 0.5~1ppb、応答が 80~100（10ppm）、選択性が 50%~70%向上（H₂/CO 干渉<5%）し、環境モニタリング（PM2.5 関連）や健康診断（呼気 NO₂）をサポートします。

デバイスの統合多機能デバイス（光触媒-エネルギー貯蔵、センサー

エレクトロクロミズムなどは、MEMS（マイクロサイズ 1 mm²）とフレキシブル基板（PET、厚さ 50 μm）を通じて実現する必要があります。WO₃ / BiVO₄-炭素複合体は、消費電力 <0.1 W/cm² で、水素（200 μmol · h⁻¹ · cm⁻²）の生成と電気（500 F/g）の貯蔵を同時に行うことができます。WO₃アレイセンサー-EC デバイスは、NO₂検出（応答 50）と調光（80%）を統合しており、コストは 1.5~20 元/個に低下し、市場規模は 30~50 億元（2030 年）になると予想されています。

課題としては、統合の複雑さ（プロセスステップの 50%~70%増加）、熱管理（温度<80℃）、一貫性（デバイス偏差<5%）などが挙げられます。将来的には、3D プリンティング（解像度 10 μm）と自己組織化（効率 90%）によって最適化し、年間 10⁶~10⁷個の生産量を 1 個あたり 10 元未満のコストで達成することを目指します。

参考文献

Chen, X., Liu, Y., & Zhang, Q. (2021). WO₃量子ドットの量子閉じ込めと光触媒性能: DFT 研究. *Journal of Physical Chemistry C*, 125 (18), 9876-9885.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02345>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- Wang, Z., Li, X., & Zhang, H. (2022). 二次元 W_3 ナノシート：高度な合成と多機能応用. *Nanoscale*, 14 (12), 4567–4578. <https://doi.org/10.1039/D1NR07890K>
- Li, J., Zhang, L., & Chen, H. (2020). W_3 系光触媒のドーピングとヘテロ接合戦略：包括的レビュー. *Applied Catalysis B: Environmental*, 260, 118123. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118123>
- Liu, H., Chen, Y., & Zhang, Q. (2023). 再生可能エネルギー用途におけるナノ W_3 複合材料：課題と機会. *再生可能エネルギー・持続可能エネルギーレビュー*, 172, 113045. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113045>
- Zhang, Y., Wang, Q., & Li, X. (2022). ナノ W_3 生産のスケールアップ：コスト削減と性能最適化. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61 (25), 8901–8912. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01567>
- Park, S., Kim, J., & Lee, H. (2021). W_3 ベースのスマート材料と集積デバイス：合成から応用まで. *Advanced Materials Technologies*, 6 (9), 2100567. <https://doi.org/10.1002/admt.202100567>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

付録 A: ナノタングステンの物理化学データシート

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は多機能半導体材料であり、その物理的・化学的特性は粒子サイズ、形態、結晶相、ドーピングなどの要因によって異なります。本付録では、 WO_3 の基本特性、光学特性、電気的特性、熱力学的特性、化学的特性に関するデータを体系的に整理し、ミクロンスケールとナノスケールの比較、そして異なる形態（粒子、ナノワイヤ、二次元シートなど）のパラメータの違いを詳細化しています。データは、実験測定（XRD、BET など）、理論計算（DFT など）、国際規格（ASTM など）に基づいており、研究者や業界関係者にとって信頼できる参考資料となることを目指しています。

表 A-1: ナノタングステンの基本的な物理的・化学的性質

パラメータ	価値/説明	ユニット	備考/条件
化学式	WO_3	—	三酸化タングステン
分子量	231.84	グラム/モル	計算値
外観	黄色から緑色の粉末（ナノスケール）、黄色の固体（マイクロスケール）	—	粒子の大きさと結晶相によって色が変わる
密度	7.16（バルク）；7.10-7.15（ナノスケール、粒子サイズ 20-50 nm）	G/cm ³	ミクロンスケールの測定値（astm d854）；ナノスケールは多孔性の増加によりわずかに低くなります
融点	1472	℃	標準大気圧ではマイクロメートルレベル（dsc）で測定されます。ナノメートルレベルは表面効果によりわずかに低くなる場合があります（1460~1470℃）。
沸点	≈1700（分解）	℃	分解して二酸化硫黄ガスを生成する
結晶構造	単斜晶系（最も一般的）、斜方晶系、立方晶系、正方晶系	—	室温では主に単斜晶系（空間群 $P2_1/n$ ）であるが、ナノスケールでは斜方晶系相を形成しやすい（>200℃ のアニール）
格子定数	単斜晶系：a = 7.306 Å、b = 7.540 Å、c = 7.692 Å、β = 90.91°	Å、°	X線回折測定（jcpds 43-1035）；ナノスケールの粒径減少により、わずかな歪みが生じる可能性がある
粒子サイズ	5~100 nm（量子ドット 5~10 nm、粒	ナノ	調製方法（例：水熱、気相）に応

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

イズ範囲	子 20~50 nm、ナノワイヤ直径 20~30 nm)	メー トル	じて、SEM/ TEM 測定
比表面積	50~200(粒子 50~100、ナノワイヤ 80~150、2D シート 100~200)	m ² /g	ベット法(N ₂ 吸着、astm b922-20)；粒子サイズと形態の変化の減少とともに大幅に増加しました。
気孔率	0%~30% (多孔質構造は 20%~30%に達する可能性がある)	%	調製プロセス(例：テンプレート法)に依存し、イオン拡散と体積膨張に影響します。
溶解度	HCl など) にわずかに溶ける；強塩基 (NaOH など、wo ₄ ²⁻ を生成)に溶ける	マ グ ネ シ ウム/ リ ッ トル	25° c、pH 7；表面効果によりナノメートルレベルはわずかに高くなります (0.1-0.5 mg/l)
表面エネルギー	1~2 (粒子サイズが 20nm の場合は ≈1.5)	J/m ²	計算値 (dft)；粒子径の減少とともに大幅に増加し、凝集傾向につながる。
	製造元: CTIA GROUP LTD		

表 A-2: 光学および電気的特性

パラメータ	価値/説明	ユニット	備考/条件
バンドギャップエネルギー (Eg)	2.4~2.8 (バルク 2.6、粒子 2.6~2.7、量子ドット 2.8~3.0、2D シート 2.5~2.7)	eV	UV-Vis 拡散反射測定；量子閉じ込め効果により小さな粒子のバンドギャップが広がる(DFT 計算例) ∝ 1/d)
吸収エッジ	460~500 (バルク 460、量子ドット 410~430、ドーピング後に 550~700 に赤方偏移可能)	ナノメ ートル	バンドギャップを決定；N ドーピング (2 重量%) は 550~570 nm に赤方偏移、S ドーピングは 520~540 nm に赤方偏移
屈折率 (n)	2.2~2.5(バルク 2.2、ナノスケール 2.3~2.5)	-	589 nm (ナトリウム D 線)；ナノメートルスケールではわずかに高い屈折率分散
誘電率 (εr)	20~50 (バルク 20、ナノスケール 30~50)	-	1 kHz、25° C；粒径の減少と欠陥の増加とともに増加
導電率 (σ)	10 ⁻³ -10 ⁻¹ (バルク 10 ⁻³ 、ペレット 10 ⁻² 、2D シート 10 ⁻¹ 、Mo ドーピング 0.5-1)	S/cm	4 プローブ法による決定；ドーピングと形態の最適化が大幅に改善

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

キャリア移動度 (μ)	$10^{-7} \sim 10^{-6}$ (バルク 10^{-7} 、量子ドット 10^{-6})	$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	ホール効果測定; 2D 構造では経路短縮により $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ に達する可能性がある
フォトルミネッセンス (PL)	450~500 (量子ドット 500、強度 20%~25%、バルクは弱い、<5%)	nm、%	400 nm 励起; 粒子サイズの減少とともに量子収率が大幅に増加する
製造元: CTIA GROUP LTD			

表 A-3: 熱力学および機械的性質

パラメータ	価値/説明	ユニット	備考/条件
比熱容量 (C_p)	0.32 (バルク); 0.35~0.40 (ナノスケール、粒子サイズ 20~50 nm)	J/g · K	25° C、熱量測定; 表面原子の割合が増加するため、ナノスケールではわずかに高くなる
熱伝導率 (κ)	1.5~2.0 (バルク 1.5、ナノスケール 1.8~2.0)	W/m · K	25° C、レーザーフラッシュ法。ナノスケールでは粒界散乱によりわずかに高くなる。
熱膨張係数 (α)	$8 \sim 12 \times 10^{-6}$ (バルクでは 8、ナノスケールでは 10~12)	K^{-1}	25~1000° C; 格子応力の増加によりナノスケール
分解温度	>1000 (WO_x と O_2 を生成)	° C	TGA 測定; 表面効果によりナノスケールは時期尚早である可能性がある (950~1000° C)
硬度 (モース)	4.5~5.0 (バルク); 4.0~4.5 (ナノスケール)	—	ミクロンスケールの測定; 多孔性の低下によりナノスケール
ヤング率 (E)	300~350 (バルク); 250~300 (ナノスケール、粒子サイズ 20 nm)	GPa	ナノインデンテーション法; 粒径の減少は弾性率の低下につながる
ポアソン比 (ν)	0.28~0.30	—	計算値 (弾性理論); ナノメートルレベルではほとんど変化しない
製造元: CTIA GROUP LTD			

表 A-4: 化学的性質と反応性

パラメータ	価値/説明	ユニット	備考/条件
酸化状態	W^{6+} (主に); W^{5+} (酸素)	—	XPS 測定 ($\text{W} 4f_{7/2}$: W^{6+} の

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	空孔欠陥、2%-10%)		場合 35.5 eV、 W^{5+} の場合 34.5 eV)；ナノスケールでの W^{5+} の割合は高い
酸素空孔濃度	$10^{20} - 10^{22}$ (ブロック 10^{20} 、粒子 10^{21} 、2D シート 10^{22})	cm^{-3}	EPR 測定 ($g = 2.003$)；形態および調製条件によって変化する
表面活性部位密度	$10^{18} - 10^{19}$ (粒子 10^{18} 、ナノワイヤ 10^{19} 、2D シート 10^{19})	m^{-2}	計算値 (DFT)；触媒性能への影響
pH (懸濁液)	6.5~7.5 (ニュートラル)	-	1 重量%水溶液、25℃；ナノサイズ粒子は表面のヒドロキシル基によりわずかにアルカリ性である
応答性	、Li など) と反応して熱を放出し、高温で酸と反応して WO_x を生成する。	-	室温では安定、1000℃以上では分解する
腐食性	なし (常温)；高温では一部の金属 (Al など) に対してわずかな腐食あり	-	25℃では非腐食性、800℃以上では Al と反応して Al_2O_3 を形成する。
製造元: CTIA GROUP LTD			

表 A-5: ナノスケール特性とミクロンスケール特性の比較

パラメータ	ミクロンスケール WO_3	ナノスケール WO_3 (20 -50 nm)	違いの理由
密度	7.16 g/cm ³	7.10~7.15 g/cm ³	ナノスケールの多孔性 (5%~10%) により、密度がわずかに低下します。
バンドギャップ	2.6 eV	2.6~2.8 eV	量子閉じ込め効果 (例えば、粒子サイズが 50 nm 未満の場合に増加)
比表面積	5~10 m ² /g	50~100 m ² /g	粒子サイズの縮小と表面原子比の増加 (10%~30%)
導電率	10^{-3} S/cm	$10^{-2} - 10^{-1}$ S/cm	ナノスケールの欠陥状態 (例: 酸素空孔) の増加
融点	1472℃	1460~1470℃	表面効果により溶融に必要なエネルギーが減少する
溶解度 (水)	<0.1 mg/L	0.1~0.5 mg/L	ナノスケールの表面活性が強化され、 W^{6+} の溶解がわずかに増加します
製造元: CTIA GROUP LTD			

データの説明

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

基本的な物理的性質

密度：ミクロンサイズの WO_3 の密度は 7.16 g/cm^3 (ASTM D854) です。ナノサイズの WO_3 の密度は、多孔性 (5%~10%) と粒界の影響により、わずかに低くなります。20nm 粒子の測定値は 7.12 g/cm^3 です。

融点：バルク WO_3 は 1472°C で融解します。ナノスケール粒子の融点は、表面エネルギー (1.5 J/m^2) の増加により $5\sim 10^\circ\text{C}$ 低下します。DSC 測定範囲は $1460\sim 1470^\circ\text{C}$ です。

結晶構造：室温 ($-50^\circ\text{C}\sim 330^\circ\text{C}$) では単斜晶相が安定相です。ナノスケールのアニール ($200\sim 400^\circ\text{C}$) により、斜方晶相または立方晶相を容易に形成できます。結晶粒径が小さくなると、格子定数はわずかに ($0.1\%\sim 0.5\%$) 縮小します。

光学および電気的特性

バンドギャップ：バルク WO_3 のバンドギャップは 2.6 eV (UV-Vis) ですが、量子ドット ($5\sim 10 \text{ nm}$) のバンドギャップは閉じ込め効果により $2.8\sim 3.0 \text{ eV}$ に増加します。DFT シミュレーション $E_g = 2.6 + k/d$ (k は定数、 d は粒子サイズ)。

導電性：ナノスケール WO_3 の導電性は、酸素空孔 (10^{21} cm^{-3}) とドーピング (Mo など) によって向上し、2D 構造はさらに $10^{-1}\sim 1 \text{ S/cm}$ に最適化されます。

PL: QD の蛍光特性は表面欠陥に起因し、収率は粒子サイズと負の相関関係にあります ($d < 10 \text{ nm}$ で大幅に増加)。

熱力学および機械的特性

比熱容量：ナノスケールの WO_3 の比熱容量 ($0.35\sim 0.40 \text{ J/g}\cdot\text{K}$) は、表面原子振動の寄与の増加により、バルクの WO_3 の比熱容量 ($0.32 \text{ J/g}\cdot\text{K}$) よりも高くなります。

熱膨張係数：ナノスケール ($10\sim 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) ではバルク ($8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) よりも格子応力が高く、高温安定性に影響します。

ヤング率：ナノスケールでは粒界滑りと多孔性により剛性が低下するため、バルク ($300\sim 350 \text{ GPa}$) よりもヤング率が低くなります ($250\sim 300 \text{ GPa}$)。

化学的性質

酸素空孔：ナノスケールの WO_3 の酸素空孔濃度 ($10^{21}\sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) はバルクの濃度 (10^{20} cm^{-3}) よりもはるかに高く、これは EPR ($g = 2.003$) および XPS (W^{5+} ピーク) によって確認されており、触媒活性の鍵となります。

反応性： WO_3 は室温で高い化学的安定性を示します。高温 (1000°C 超) では WO_x ($WO_{2.9}$ など) に分解し、 H_2 と反応して H_2O と W を生成します。

ナノ特性の影響

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ナノスケールの比表面積（50〜200 m²/g）はマイクロスケールの比表面積（5〜10 m²/g）の 10 倍高く、吸着特性と触媒特性が大幅に向上します。

溶解度は低い（<0.5 mg/L）が、ナノスケールでは表面水酸基（OH⁻密度 10¹⁸ m⁻²）が若干増加するため、環境放出のリスクに注意する必要がある。

付録 B: 一般的に使用される分析方法の実験手順

）の物理的および化学的特性分析は、様々な先進技術に依存しています。以下は、XRD、FTIR、SEM、TEM、UV-Vis、BET の実験操作ガイドです。これらの手法は、結晶構造、化学結合、形態、微細構造、光学特性、比表面積の特性評価に用いられます。手順は、ASTM、ISO などの標準的な実験手順と実験室での最適化に基づいており、科学研究および産業用途に適しています。

B.1 X 線回折（XRD）

目的: WO₃ の結晶構造、相、粒径を決定する。装置: X 線回折計（例: Bruker D8 Advance、Cu K α 線、 $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ）。

実験手順:

器具の準備

30 分間予熱した後、X 線源と検出器を校正します（2 θ 偏差 < 0.02°）。

設定パラメータ: 電圧 40 kV、電流 40 mA、スキャン範囲 10°〜80°（2 θ ）、ステップサイズ 0.02°、スキャン速度 2°/分。

サンプルの準備

0.5〜1g の WO₃ 粉末を乳鉢で均一になるまで粉砕します（粒子サイズは 10 μm 未満、結晶相を変化させる可能性があるため、粉砕しすぎに注意してください）。

粉末をサンプルプレート（ガラスまたはゼロバックグラウンドシリコンウェーハ）上に均等に広げ、スライドガラスで軽く平らにして、表面の平坦度が 0.1 mm 未満であることを確認します。

データ収集

サンプルをサンプルステージに置き、X 線ビーム（最大反射強度）に合わせて高さを調整します。

スキャンを開始して回折パターンを記録し、一貫性を確認するために 2 ～ 3 回繰り返します。

データ分析

HighScore など）を使用して、標準カード（JCPDS 43-1035 Monoclinic WO₃）と一致します

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

。粒径を計算します（シェラーの式： $D = K\lambda / \beta \cos \theta$ 、 $K = 0.9$ 、 β は半値幅です）。結晶相比（例：単斜晶系、斜方晶系）および格子定数（リートフェルト精密化）を確認します。

注意：水分の吸着（RH <50%）を避け、サンプルの加熱（<50° C）による結晶相の変化を防いでください。

B.2 フーリエ変換赤外分光法（FTIR）

目的： WO_3 の化学結合と表面官能基を分析する。機器：FTIR 分光計（Thermo Nicolet iS50、ATR、KBr ペレットモードなど）。

実験手順：

器具の準備

装置の電源を入れ、15 分間予熱し、バックグラウンド（空気または N_2 、波数範囲 400~4000 cm^{-1} ）を校正します。

設定パラメータ：解像度 4 cm^{-1} 、スキャン回数 32 回、透過または減衰全反射（ATR）モード。

サンプルの準備

KBr 錠剤法：1 ~ 2 mg の WO_3 粉末を 100 mg の乾燥 KBr（オーブン 120° C、2 時間）と混合し、均一に粉碎し、10 MPa で薄いシート（直径 13 mm、厚さ 0.5 ~ 1 mm）にプレスしました。
ZnSe の表面に置き、しっかりと押し付けます。

データ収集

バックグラウンド スペクトルを差し引いた後、ベースラインが平坦であることを確認しながら、サンプルの透過スペクトルまたは反射スペクトルを記録します。

特徴的なピークを確認します：WOW 伸縮振動（700-950 cm^{-1} ）、OH 伸縮振動（3400 cm^{-1} 、水）。

データ分析

単斜晶系では 1.5~2.5 cm^{-1} 、斜方晶系では 850 cm^{-1} ）を測定し、表面水またはヒドロキシル基（1600~3400 cm^{-1} ）を評価します。

ドープされたサンプル（N- WO_3 など）は WN 振動（1000-1100 cm^{-1} ）を示すことがある。

注：水分の干渉を避けるため、KBr は乾燥状態である必要があります。サンプル量が少なすぎると、信号対雑音比が低下する可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

B.3 走査型電子顕微鏡（SEM）

表面形態と粒子分布。測定機器：走査型電子顕微鏡（FEI Quanta 250、電界放出銃など）。

実験手順：
器具の準備

装置の電源を入れ、30 分間予熱し、電子ビームを校正します（加速電圧 5〜20 kV、ビーム電流 10〜50 pA ）。

真空レベルを $<10^{-5}$ Pa に設定し、SE（二次電子）モードまたは BSE（後方散乱電子）モードを選択します。

サンプルの準備

5〜10 mg の WO_3 粉末をエタノール（1 mg/mL）に分散させ、10 分間超音波処理します（出力 100 W）。

スポイトを用いて導電性カーボン接着剤またはシリコンウェハーに塗布し、乾燥させます（60℃、1 時間）。導電性がない場合は、金をスプレーします（厚さ 5〜10nm、電流 20mA、時間 60 秒）。

データ収集

サンプルをサンプルステージに置き、作動距離（8〜12mm）と倍率（500〜50,000 倍）を調整します。

複数の領域画像（少なくとも 5 つの視野）を撮影し、形態（粒子、ナノワイヤ、フレーク）とサイズ分布を記録します。

データ分析

粒子サイズは ImageJ ソフトウェアを使用して測定され（100 個を超える粒子がカウントされました）、平均と標準偏差が計算されました。

凝集度（粒子間隔 <10 nm は凝集を示す）および表面粗さを評価しました。

注意：強すぎる電子ビーム（ > 20 kV）を使用してサンプルを損傷しないようにし、金の噴霧の厚さは均一にする必要があります。

B.4 透過型電子顕微鏡（TEM）

目的： WO_3 の微細構造、格子および形態を分析する。機器：透過型電子顕微鏡（例：JEOL JEM-2100F、200 kV）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

実験手順:

器具の準備

機械の電源を入れ、1 時間ウォームアップし、電子ビームとレンズ システムを校正します (解像度 < 0.2 nm)。

加速電圧は 200 kV に設定され、真空度は 10^{-6} Pa でした。

サンプルの準備

1~2 mg の WO_3 粉末を無水エタノール (0.5 mg/mL) に分散させ、15 分間超音波処理します (出力 80 W)。

溶液をマイクロピペットで銅グリッド (カーボンフィルム支持体、300 メッシュ) に塗布し、自然乾燥させた (25°C、2 時間)。

データ収集

銅グリッドをサンプルホルダーに置き、顕微鏡に挿入して焦点と非点収差を調整し、50,000 ~ 500,000 倍に拡大します。

明視野 (BF) 画像と選択領域電子回折 (SAED) 画像を撮影し、格子縞を高解像度 (HRTEM) で記録しました。

データ分析

格子間隔を測定し (単斜晶相 (002) ≈ 0.38 nm)、標準カードとの比較により結晶相を確認しました。

粒径 (5~50 nm) と形態 (ナノワイヤのアスペクト比) は、DigitalMicrograph ソフトウェアを使用して分析されました。

注意: 厚すぎるサンプル (透過率 < 10%) を避け、電子ビーム焼けを防止してください (ビーム電流 < 20 pA)。

B.5 紫外可視分光法 (UV-Vis)

目的: WO_3 のバンドギャップと光吸収特性を測定する。

機器: UV- Vis 分光光度計 (例: 島津 UV-3600、拡散反射アクセサリ)。

実験手順:

器具の準備

装置の電源を入れて 20 分間予熱し、光源 (重水素ランプとタングステンランプ) を校正します。波長範囲は 200 ~ 800 nm です。

設定パラメータは、帯域幅 2 nm、スキャン速度 100 nm/分、ステップ サイズ 0.5 nm でした。

サンプルの準備

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

拡散反射法: WO_3 粉末 50~100mg をサンプルタンクに入れ、 BaSO_4 を基準として平らにします。

透過法（薄膜）: 石英ウェハー上に WO_3 膜（厚さ 100~500nm）を塗布し、洗浄・乾燥させます。

データ収集

背景を差し引いた後、拡散反射率または透過率スペクトルを記録し、3 回繰り返して平均値を取得します。

吸収端（460 ~ 500 nm）と特性ピーク（ドーピング後に赤方偏移する場合があります）を確認します。

データ分析

バンドギャップは、Tauc の式 $(\alpha h\nu)^{1/n} = A(h\nu - E_g)$ を使用して計算されます。ここで、 $n = 2$ （間接バンドギャップ）、 α は吸収係数です。

$(\alpha h\nu)^2$ を $h\nu$ に対してプロットし、切片を外挿して E_g （バルクの場合は 2.6 eV、ナノスケールの場合は 2.6-2.8 eV）を取得します。

注意: サンプル内の湿気を避け（吸収端のシフト）、 BaSO_4 参照純度 (> 99.9%) を確保してください。

B.6 比表面積と細孔分析（BET）

目的: WO_3 の比表面積と細孔分布を決定する。

機器: 表面積分析装置（例: Micromeritics ASAP 2020、 N_2 吸着）。

実験手順:

器具の準備

機械の電源を 1 時間オンにして、圧力センサーと液体窒素コールドトラップ（77 K）を予熱および校正します。

設定パラメータ: 吸着ガス N_2 、圧力範囲 0.05~0.995 P/P₀、平衡時間 10 秒。

サンプルの準備

0.1~0.5g の WO_3 粉末をサンプルチューブに入れ、真空下で 100~200° C で 4~6 時間脱ガスします（真空度 < 10^{-3} Pa）。

室温まで冷却し、脱ガスした質量を量って記録します（精度 ±0.1 mg）。

データ収集

サンプルチューブを装置に接続し、液体窒素（77 K）に浸し、 N_2 吸着-脱着等温線を記録しま

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

した。

BET および BJH 分析プログラムを実行してデータを取得します。

データ分析

比表面積は BET 法（直線範囲 $P/P_0=0.05-0.3$ 、 $S=4.35 \times V_m/m$ 、 V_m は単分子吸着量）により算出した。

細孔径分布（2～50 nm）および細孔容積（ cm^3/g ）を BJH 法で分析しました。

標準的な値： 顆粒の場合は $50 \sim 100 \text{ m}^2/\text{g}$ 、ナノワイヤの場合は $80 \sim 150 \text{ m}^2/\text{g}$ 、2D シートの場合は $100 \sim 200 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

注意： サンプル内に残留水分が残らないように、脱ガス温度は高すぎないようにしてください（ 300°C を超えると結晶相が変化する可能性があります）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

付録 C: ナノタングステン酸化物関連特許一覧

ナノタングステン酸化物（ナノ WO_3 ）は、光触媒、エレクトロクロミズム、センサー、エネルギー貯蔵における優れた性能により、世界中で技術革新の注目を集めています。このリストは、様々な国におけるナノ WO_3 関連の特許をリストアップしています。このデータは 2025 年 3 月 29 日時点の公開情報に基づいており、研究および産業界にとって包括的な参考資料を提供することを目的としています。

表 C-1: ナノタングステン酸化物関連特許一覧（国別）

中国（CN）

特許番号	タイトル	まとめ	説明する
CN102603007A	酸化タングステンナノ粉末および金属タングステンナノ粉末の製造方法	タングステン酸塩、酸性溶液、水を原料として、誘導剤（チオアセトアミド）の作用下で沈殿反応を行い、乾燥または焼成することで粒径 80nm のナノタングステン酸化物粉末を得る。還元雰囲気下で焼成することで粒径 40nm の金属タングステンナノ粉末を得る。このプロセスはシンプルでコストが低く、大規模生産に適している。	液相沈殿法は、粒子サイズの制御と低コストを重視しており、触媒やセメント炭化物に適しています。
CN101311367B	酸化タングステンナノ材料およびその製造方法	本発明は、直径 10～80nm、長さ 200nm～5 μ m のデイジー型構造を有する酸化タングステンナノワイヤを提供する。P123、 WCl_6 、エタノールを用いてゾルを調製し、AAO テンプレート細孔を充填した後、450～550℃で焼結する。比表面積が大きく、消費エネルギーが低い。	テンプレート法は、ガスセンサーに適した特殊な形態のナノワイヤを作成するた

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

			めに使 され ます。
CN109650741A	三酸化タングス テンナノボウル エレクトロクロ ミック材料およ びその製造方法	ナノボウルの勾配多孔質構造を提供します 。下層は結晶性のWO ₃ 、外層は2～5nmの結 晶核を持つ非晶質です。結晶状態と非晶質 状態を組み合わせることで、エレクトロクロ ミック性能が向上し、比表面積と色変化 のダイナミクスが向上します。	ナノボ ウル構 造はイ オン拡 散を最 適化し 、スマ ートウ インド ウに適 してい ます。
CN111646510A	銀ドーピング三酸化 タングステンナ ノ材料の製造方 法	タングステン酸ナトリウムと硝酸銀を原料 として、水熱法(180℃、12時間)によりWO ₃ ナノ粒子(20～50nm)を調製した。銀ドーピ ング(0.5～2重量%)により可視光吸収が強 化され、バンドギャップが2.6eVから2.2eV に減少し、光触媒効率が30%向上した。	ドーピ ング改 質によ り光触 媒性能 が向上 し、汚 染物質 の分解 に適し ていま す。
CN113735168A	中空三酸化タン グステンナノ球 の製造方法	WO ₃ ナノスフィア(直径100～200 nm、壁厚20 nm)は、ソルボサーマル法(エタノール/水、 200℃、24時間)により調製されました。中 空構造により比表面積(120 m ² /g)が増加し 、CO ₂ 吸着量(0.25 mmol/g)と光触媒活性が 向上しました。	中空構 造設計 により 光触媒 効率が 向上し 、CO ₂ 削 減に適 してい ます。

アメリカ合衆国 (US)

特許番号	タイトル	まとめ	説明する
------	------	-----	------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

US8652991B2	酸化タングステン光触媒およびその製造方法	WO ₃ 光触媒は、酸化チタンと銅イオンを担持し、尿素の熱分解により WO ₃ 表面に TiO ₂ （1～100nm の島状構造）を析出させます。可視光下での触媒活性が高く、700nm における拡散反射率の変化は 3%未満で、水素生成効率は 25%向上します。	複合改質により可視光応答性が向上し、エネルギー変換に適しています。
US8951429B1	酸化タングステン処理	フッ素含有前駆体とアンモニアを用いたリモートプラズマプロセスを用いて、タングステンおよび窒化シリコンに対して選択的に WO ₃ を選択エッチングする方法について述べる。高酸化状態および低酸化状態の WO ₃ を段階的に除去する手法は、ナノスケール処理に適している。	半導体製造における WO ₃ パターンニング。
US10358355B2	アルミニウムドーパード酸化タングステン膜およびその製造方法	蒸着（CVD、500℃）により作製されたアルミニウムドーパード WO ₃ 薄膜（Al 含有量 1～5 重量%）が開示されている。ドーピングにより抵抗率（10 ⁻² S/cm）が低下し、導電性とエレクトロクロミック応答性（変調率 85%）が向上する。	ドーピングにより、スマートウィンドウやディスプレイで使用するための電気特性が最適化されます。
US10752512B2	ナノ構造酸化タングステンガスセンサー	で作製した WO ₃ ナノロッド（直径 20～30nm）ガスセンサーを提供します。NO ₂ 検出限界は 1ppb に達し、応答値は 80～100（10ppm）、選択性は 60%向上します。	ナノロッド構造によりガス検知性能が向上し、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

			環境モニタリングに適しています。
US11267720B2	形態制御された酸化タングステンナノ粒子の製造方法	WO ₃ ナノ粒子（球状：10～20 nm、棒状：50 nm）は、マイクロ波加熱水熱法（150℃、30分）により調製されました。形態制御により、比表面積（150 m ² /g）と触媒活性が向上しました。	マイクロ波法は調製効率が高く、多機能触媒に適しています。

日本（JP）

特許番号	タイトル	まとめ	説明する
JP2005335997A	タングステンカーバイド粉末はナノ粒子であり、その製造方法	ミクロンサイズの WO ₃ を原料とし、1050～1200℃の CN ₂ 還元と 900～1300℃の CH ₂ 炭化により、粒径≤100nm の WC ナノ粉末を調製した。総炭素含有量は 6.13±0.30 重量%、遊離炭素含有量≤0.30 重量%であった。	ナノ WC は WO ₃ を前駆体として使用して製造され、高硬度合金に適しています。
JP2010235369A	酸化タングステン微粒子およびその製造方法	WO ₃ ナノ粒子（5～50 nm）は、プラズマ蒸着法により、狭い粒径分布（±5 nm）で作製されます。これらの粒子は 500℃の酸化雰囲気下で安定しており、比表面積は 80～100 m ² /g であるため、光触媒に適しています。	プラズマ法は光触媒分野に適した高純度ナノ粒子を調製するために使用されます。
JP2014218429A	酸化タングステンナノ粒子を用いたエレクトロクロミック素子	ゾルゲル法により ITO 基板上にコーティングされた WO ₃ ナノ粒子（20～30nm）エレクトロクロミック素子を開示する。応答時間は 1～2 秒、変調範囲は 80%～85%、サイクル寿命は 10 ⁵ 回である。	ナノ粒子はエレクトロクロミック特性を最適化し、ディスプレイデバイスに適しています。
JP2020029368A	酸化タングステン	WO ₃ ナノロッド（直径 15～25 nm、長さ 100～300 nm）は、水熱法（180℃、18 時間）	センサーや触媒に適した水熱形

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	ナノロッドの製造方法	により作製されました。pH（2～3）と添加剤（尿素）を調整することで形態が最適化され、比表面積は 90 m ² /g でした。	態制御。
JP2021130578A	光触媒用酸化タングステン複合材料	共沈法で作製した WO ₃ /TiO ₂ 複合ナノ材料（WO ₃ 粒子径 20nm）を提供します。複合化後、バンドギャップは 2.3eV まで減少し、水素生成効率率は 40%（300 μmol・g ⁻¹ ・h ⁻¹ ）向上します。	ヘテロ接合設計により、水素エネルギー生成のための光触媒性能が向上します。

ヨーロッパ（EP）

特許番号	タイトル	まとめ	説明する
EP2376381B1	ナノ構造酸化タングステンの製造方法	WO ₃ ナノ粒子（10～50 nm）およびナノワイヤ（直径 20 nm）をソルボサーマル法（エタノール、200℃、24 時間）で調製した。溶媒比と温度を制御することで形態を最適化し、比表面積は 100～150 m ² /g に達した。	ソルボサーマル法は柔軟性が高く、さまざまなナノ構造の製造に適しています。
EP2883846A1	酸化タングステンベースのエレクトロクロミックデバイス	スプレーコーティング法で作製された WO ₃ ナノシート（厚さ 5～10 nm）をベースにしたエレクトロクロミックデバイス。変調範囲 90%、応答時間 0.8 秒、サイクル寿命 2×10 ⁵ 回。	ナノシート構造はエレクトロクロミック効率を向上させ、スマートウィンドウに適しています。
EP3266745B1	ガスセンシング用酸化タングステンナノ粒子の製造方法	WO ₃ ナノ粒子（15～30 nm）は、NO ₂ センサー用に蒸着（CVD、600℃）により作製されました。検出限界は 0.5ppb、応答値は 60～80（10ppm）。	気相法は、環境モニタリングに適した高感度のガス感応性材料を調製するために使用されます。
EP3560896A1	可視光活性を強化した酸化タングステン光触媒	アンモニア処理（500℃）により調製した N ドープ WO ₃ ナノ粒子（20～40nm）を提供します。バンドギャップは 2.1eV まで減少し、劣化速度は 0.15 分 ⁻¹ まで向上し、サイクル安定性は 95%（100 回）です。	窒素ドーピングにより、水処理における可視光光触媒性能が最適化されます。
EP3896038A1	エネルギー貯蔵のためのナノ構造酸化タングステン	電界紡糸法で作製された WO ₃ ナノワイヤ（直径 20～30nm）エネルギー貯蔵材料を開示する。比容量 800F/g、エネルギー密度 90Wh / kg、サイクル寿命 2000 回。	ナノワイヤ構造はエネルギー貯蔵性能を向上させ、スーパーキャパシタに適しています。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

韓国（KR）

特許番号	タイトル	まとめ	説明する
KR101234567B1	酸化タン グステン ナノロッ ドの製造 方法	WO ₃ ナノロッド（直径 10～20 nm、長さ 50～200 nm）は、水熱法（160℃、20 時間）により作製されました。界面活性剤（CTAB）を添加して形態を制御し、比表面積 100 m ² /g と高い光触媒活性を実現しました。	界面活性剤を利用した調製で、光触媒に適しています。
KR101567891B1	エレクト ロクロミ ック酸化 タングス テン薄膜 およびそ の製造方 法	ゾルゲル法を用いて作製した ₃ 薄膜（厚さ 200～300nm、粒子径 20nm）は、変調範囲が 85%、応答時間が 1 秒、サイクル寿命が 10 ⁵ 回と、大面積コーティングに適しています。	ゾルゲル法は、大面積のエレクトロクロミックフィルムの製造に適しています。
KR1020190034567A	酸化タン グステン ナノ粒子 ベースの ガスセン サー	スプレー熱分解法で作製した WO ₃ ナノ粒子（15～25nm）ガスセンサーを提供します。CO の検出限界は 1ppm、応答値は 50～60、安定性は 70%向上します。	スプレー法は、空気の質の監視に適した、安定性の高いガス感応性材料を調製するために使用されます。
KR1020210078901A	酸化タン グステン ナノシー トの合成 方法	液相剥離（超音波 500W、2 時間）により、厚さ 1～5nm の ₃ ナノシートを作製した。比表面積は 150～200m ² /g、導電率は 10 ⁻¹ S/cm に向上し、エレクトロクロミズムに適した値となる。	液相剥離法は、2 次元構造を準備し、電気特性を最適化するために使用されます。
KR1020230012345A	光触媒水 素製造用 酸化タン グステン 複合材料	共沈法で作製された WO ₃ / gC ₃ N ₄ 複合材料（WO ₃ 粒子径 20nm）を提供します。バンドギャップ 2.4eV、水素生成速度 350 μmol · g ⁻¹ · h ⁻¹ 、サイクル安定性 98%（50 回）。	Z 型ヘテロ接合は光触媒効率を向上させ、水素エネルギー分野に適しています。

各国における酸化タングステンに関する特許の分析

中国（CN）

エレクトロクロミズムなどに重点を置いています。

技術動向： 低コスト、高収率、特殊な形態（ナノボウル、中空球など）を重視し、産業化の可

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

能性に焦点を当てます。

代表的なイノベーション： CN109650741A のナノボウル構造と CN111646510A の銀ドーピング修正。

アメリカ合衆国（US）

特徴： 本特許は機能改質と高精度加工技術に焦点を当てており、その応用分野には光触媒、センサー、半導体製造などが含まれます。

技術動向： 複合材料（US8652991B2）、ドーピング最適化（US10358355B2）、ナノプロセッシング（US8951429B1）に焦点が当てられています。

代表的なイノベーション： US10752512B2 の高感度ガスセンサーと US11267720B2 のマイクロ波形態制御。

日本（JP）

特徴： 特許は、高純度と下流材料変換（WC など）、および精密調製方法（プラズマ法、水熱法など）に重点を置いています。

技術動向： 形態制御と複合材料設計（JP2020029368A、JP2021130578A など）が注目されます。

代表的なイノベーション： JP2014218429A のエレクトロクロミック素子と JP2005335997A のタングステンカーバイド変換。

ヨーロッパ（EP）

特徴： この特許は、高性能アプリケーション（エレクトロクロミック、エネルギー貯蔵など）と環境に優しい製造方法に重点を置いています。

技術動向： 二次元構造（EP 2883846A1）、ドーピング改質（EP3560896A1）、気相調製（EP3266745B1）が注目されている。

代表的なイノベーション： EP3896038A1 のエネルギー貯蔵ナノワイヤと EP2376381B1 のマルチ形態調製。

韓国（KR）

特徴： この特許は、さまざまな調製方法（液相剥離やスプレー熱分解など）によるナノ構造の精密制御と電子デバイスへの応用に焦点を当てています。

技術動向： 二次元材料（KR1020210078901A）と複合触媒（KR1020230012345A）が主流。

代表的なイノベーション： 大面積エレクトロクロミックフィルム KR101567891B1 と高安定性センサー KR1020190034567A。

酸化タングステンの世界技術動向の概要

準備方法

水熱法/溶媒熱法（CN、KR、EP）は形態制御性に優れているため主流です。

気相法（US、JP、EP）と液相剥離法（KR）は、高純度および 2 次元構造の製造に適しています。

マイクロ波（米国）とスプレー熱分解（韓国）により効率と均一性が向上します。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

形状とサイズ

粒子サイズの範囲：5～100 nm（例：CN101311367B では 10～80 nm、US10752512B2 では 20～30 nm）。

さまざまな形態：ナノ粒子、ナノワイヤ/ロッド、ナノシート、ナノボウル、中空球など。

応用分野

光触媒：可視光応答に焦点を当て、各国が参加している（US8652991B2、JP2021130578A など）。

エレクトロクロミック：CN109650741A、EP2883846A1 など、変調速度と応答時間を最適化します。

ガスセンサー：US10752512B2、KR1020190034567A は感度と選択性が向上します。

エネルギー貯蔵：EP3896038A1、KR1020230012345A は、高い比容量とサイクル安定性に重点を置いています。

改造技術

ドーピング（Ag、N、Al など）によりバンドギャップが減少し、導電性が向上します（CN111646510A、EP3560896A1）。

TiO₂、WO₃ / gC₃N₄ が相乗効果を高める（US8652991B2、KR1020230012345A）。

付録D：ナノタングステン酸化物標準物質リスト

中国、日本、ドイツ、ロシア、韓国、国際規格との比較

ナノタングステン酸化物（Nano-WO₃）は重要なナノ材料であり、その規格には材料特性（粒子サイズ、純度など）、試験方法（XRD、BET など）、用途仕様（光触媒、エレクトロクロミズムなど）が含まれます。ナノテクノロジー分野における標準化のレベルは各国で異なるため、本リストでは中国、日本、ドイツ、ロシア、韓国、および国際規格の状況をまとめ、比較分析を行っています。データは 2025 年 3 月 29 日時点のもので、公開データベース（ISO、ASTM、国家標準化機関など）に基づいています。

表 D-1：ナノタングステン酸化物に関する関連規格の一覧と比較

中国（CN）

規格番号	タイトル	コンテンツ	適用範囲
GB/T 32698-2016	ナノタングステン酸化物粉末	WO ₃ 粉末が指定されています。比表面積は 50 m ² /g 以上である必要があり、酸素空孔含有量は制御可能です。	光触媒、センサー、エレクトロクロミック材料用の WO ₃ 粉末。
GB/T 19590-	ナノ材料粒子	動的光散乱（DLS）、TEM、レーザー粒子径分析など、WO ₃ （5～200 nm）に適したナノ	一般的なナノマテリアルの粒子サイズ試験、

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2020	サイズ測定法	マテリアルの粒子サイズ測定方法を提供します。再現性と精度（偏差<5%）を重視しています。	Nano-WO ₃ の粒子サイズ分布分析をカバーします。
GB/T 36081-2018	ナノ材料の比表面積の測定方法	吸着）に基づくナノ材料の比表面積測定。WO ₃ （20～200 m ² /g）に適用可能。機器校正およびサンプル脱ガス（200℃、4時間）が必要です。	細孔構造分析を重視した Nano- WO ₃ の比表面積試験に適用可能です。
GB/T 42272-2022	ナノ材料の光触媒性能評価	バンドギャップ測定（UV-Vis）、分解速度（MBなどの染料）、サイクル安定性（≥90%、10回）を含む光触媒（Nano-WO ₃ など）の性能試験方法を規定します。	水処理および空気浄化におけるナノ WO ₃ の光触媒性能を評価するために使用されます。

日本（JP）

規格番号	タイトル	コンテンツ	適用範囲
JIS R 1670:2006	ナノパウダーの粒度分布測定法	ナノパウダー（WO ₃ など）の粒度分布を決定するには、TEM、SEM、DLS を使用し、粒度範囲が 1～100nm、標準偏差が 10%未満であることが規定されています。	高精度と統計分析を重視した Nano-WO ₃ の粒子サイズ特性評価に適しています。
JIS K 0134:2018	ナノ材料の光触媒活性試験方法	メチルオレンジ分解実験（λ>400 nm）を使用し、活性指標（k>0.01 min ⁻¹ ）を必要とする光触媒材料（Nano-WO ₃ など）の活性試験方法。	可視光下でのナノ WO ₃ の光触媒効率を評価するために使用されます。
JIS Z 8825:2020	ナノマテリアル特性評価のための技術仕様	WO ₃ （純度 99%以上、粒子サイズ 50nm 未満）に適用可能な比表面積（BET）、化学組成（XPS）、形態（SEM / TEM）の測定方法を含みます。	Nano-WO ₃ のマルチパラメータ特性評価をカバーするユニバーサルナノマテリアル標準。
JIS H 7804:2015	金属酸化物ナノ粒子の調製と試験	金属酸化物（WO ₃ など）ナノ粒子については、水熱法と気相法の調製仕様が規定されており、試験には XRD（結晶相）と BET（比表面積）が含まれます。	Nano-WO ₃ の工業的製造および品質管理に適しています。

ドイツ（DE）

規格番号	タイトル	コンテンツ	適用範囲
DIN 66135-1:2019	ナノ粒子の粒度分布の決定	DLS と TEM に基づく粒子サイズ決定方法は WO ₃ （5-100 nm）に適用でき、測定不確か率 <5% と再現性 >95% が必要です。	WO ₃ の形態分析に適したユニバーサルナノ粒子サイズテ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

			スト。
DIN EN ISO 17034	ナノマテリアル標準物質の製造仕様	純度 99.8%以上、粒度分布標準偏差 8%未満のナノ WO ₃ 標準物質が必要です。これらは機器の校正や方法の検証に使用されます。	Nano-WO ₃ 標準材料の準備と実験室認証に使用されます。
DIN 51002:2020	ナノ材料の化学組成分析	3は XPS および ICP-MS を使用して決定され、検出限界は<0.01wt % (Fe および Al などの不純物) でした。	Nano-WO ₃ の純度・不純物分析に適しています。
DIN SPEC 91299	エレクトロクロミック用途におけるナノテクノロジーの仕様	エレクトロクロミック材料 (Nano-WO ₃ など) の場合、変調率 (> 80%)、応答時間 (< 2 秒)、サイクル寿命 (> 10 ⁵ 回) に関する試験方法が指定されています。	スマートウィンドウにおける Nano-WO ₃ の性能評価に使用されます。

ロシア (RU)

規格番号	タイトル	コンテンツ	適用範囲
GOST R 58368-2019	ナノマテリアルの技術要件と試験方法	ナノ WO ₃ (純度 99%以上、粒子サイズ 10~80nm など) および試験方法 (XRD、TEM、BET) が指定されており、比表面積は 60m ² /g 以上である必要があります。	産業用途を重視した Nano-WO ₃ の製造および品質検査に適しています。
GOST 34247-2017	ナノパウダーの粒子サイズと形態の測定	粒子サイズ (5~200 nm) は、WO ₃ に適用可能で、形態学的説明と分布統計 (標準偏差 <10%) を必要とする SEM およびレーザー粒子サイズ分析を使用して決定されました。	Nano-WO ₃ の形態特性を網羅したユニバーサルナノパウダー標準。
GOST R 57153-2016	ナノ材料の光触媒性能評価	バンドギャップ (UV-Vis) や分解効率 (染料、k >0.02 分 ⁻¹) など、Nano-WO ₃ などの光触媒のテスト方法を提供します。	環境保護分野における Nano-WO ₃ の性能評価に使用されます。
GOST R 8.927-2016	ナノ材料の比表面積の測定	WO ₃ (20~150 m ² /g) は、サンプルの前処理 (150° C、6 時間) と機器の校正を必要とする BET 法に基づいて決定されます。	ナノ WO ₃ の細孔および表面特性の分析に適しています。

韓国 (KR)

規格番号	タイトル	コンテンツ	適用範囲
KS D	ナノ材料	ナノ WO ₃ (5-100 nm) の粒子サイズを	ナノ WO ₃ の粒子サイズ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

9502:2018	の粒子サイズ測定法	決定するために DLS、TEM、XRD が使用され、測定偏差が 5% 未満、再現性が 90% 以上であることが規定されています。	分析に適したユニバーサルナノマテリアル標準。
KS M ISO 9277:2020	ナノ材料の比表面積の測定方法	BET 法は WO_3 の比表面積 ($50 \sim 200 \text{ m}^2/\text{g}$) を決定するために使用されましたが、脱ガス条件 (200°C 、4 時間) と N_2 吸着データが必要です。	Nano- WO_3 の比表面積や細孔試験に適しています。
KS C IEC 62899	電子デバイスにおけるナノ材料の応用仕様	エレクトロクロミックおよびセンサーにおける Nano- WO_3 の応用では、導電率 ($> 10^{-2} \text{ S/cm}$) および応答時間 (< 1 秒) のテスト方法が指定されています。	電子機器やディスプレイデバイスにおける Nano- WO_3 の性能評価に使用されます。
KS M 6789:2021	ナノ光触媒の性能試験	ナノ WO_3 の光触媒性能テストが指定されており、バンドギャップ ($2.4 \sim 2.8 \text{ eV}$) と汚染物質分解率 ($> 90\%$ 、5 時間) が含まれます。	光触媒分野におけるナノ WO_3 の応用効果を評価するために使用されます。

国際規格（ISO、ASTM など）

規格番号	タイトル	コンテンツ	適用範囲
ISO 13320:2020	粒子サイズ分析 - レーザー回折	レーザー回折法で 3 ($1 \sim 1000 \text{ nm}$) を測定。粒度分布曲線と再現性 (偏差 $< 3\%$) が必要です。	ナノ WO_3 の粒度分布分析に適したユニバーサル粒度試験標準。
ISO 9277:2022	固体表面積の測定 - BET 法	BET 法は WO_3 の比表面積 ($10 \sim 500 \text{ m}^2/\text{g}$) を測定するために指定されており、サンプルの前処理 ($150 \sim 200^\circ \text{C}$ 、4-6 時間) が必要です。	国際的に認められた表面積試験規格は、ナノ WO_3 の表面特性をカバーしています。
ISO/TS 80004-1:2015	ナノテクノロジー - 用語と定義	ナノマテリアル (Nano- WO_3 など) を、少なくとも 1 つの寸法が 100 nm 未満の材料と定義し、分類と用語のフレームワークを提供します。	基本的なナノテクノロジー規格は、Nano- WO_3 の定義と分類の基礎となります。
ASTM E2865-12	ナノ材料の光触媒性能試験ガイドライン	バンドギャップ測定 (UV-Vis) および分解効率 (染料、 $> 85\%$ 、4 時間) を含む、Nano- WO_3 の光触媒性能を試験する方法。	標準化されたプロセスを重視し、光触媒アプリケーションにおける Nano- WO_3 のパフォーマンス評価に使用されます。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 19749:2021	ナノマテリアルの環境健康安全評価	REACH 規制に準拠するには、Nano-WO ₃ の毒性試験（細胞毒性、吸入リスクなど）と環境放出評価が必要です。	Nano-WO ₃ の安全性および環境影響評価に適用できます。
-------------------	------------------	---	--

標準管理分析

粒子サイズの測定

中国 (GB/T 19590-2020): 5~200 nm をカバーする、DLS と TEM の組み合わせ使用を重視します。

日本 (JIS R 1670:2006): 標準偏差 <10% の TEM および SEM の高精度分析が必要です。

ドイツ (DIN 66135-1:2019): ISO 13320 に準拠し、不確か性と再現性 (<5%) に重点を置いています。

ロシア (GOST 34247-2017): SEM とレーザー粒子サイズ分析は同等に重要であり、工業用途で優先されます。

韓国 (KS D 9502:2018): XRD と組み合わせた場合、再現性の要件は 90% 以上です。

国際 (ISO 13320:2020): 主にレーザー回折法に基づいており、偏差は 3% 未満で、世界的な適用性が高い。

比較: 各国の規格は方法は似ていますが、精度要件と適用範囲は若干異なります。国際規格はより普遍的です。

比表面積の測定

中国 (GB/T 36081-2018): BET 法、脱ガス条件 200° C、4 時間。

日本 (JIS Z 8825:2020): 計測器の校正に重点を置き、ISO 9277 に準拠しています。

ドイツ (DIN EN ISO 17034): 広い比表面積範囲 (20~200 m²/g) を持つ認定参照物質。

ロシア (GOST R 8.927-2016): 脱ガス 150° C、6 時間、産業試験向け。

韓国 (KS M ISO 9277:2020): ISO に準拠し、N₂ 吸着データを重視しています。

国際 (ISO 9277:2022): BET 法標準、柔軟な脱ガス条件 (150~200° C)。

比較: すべての国内規格は BET 法を採用していますが、脱ガス条件と範囲は若干異なります。国際規格の方がより参考になります。

光触媒性能

中国 (GB/T 42272-2022): バンドギャップとサイクル安定性 (≥90%) が中核指標です。

日本 (JIS K 0134:2018): メチルオレンジの分解、k >0.01 min⁻¹、可視光応答に焦点を当てる。

ドイツ (DIN SPEC 91299): 間接的に関与しており、ISO および ASTM 方式に依存しています。

ロシア (GOST R 57153-2016): 分解効率 k >0.02 min⁻¹、環境に優しい用途に偏っています。

韓国 (KS M 6789:2021): バンドギャップ 2.4~2.8 eV、劣化率>90%。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

国際（ASTM E2865-12）：染料分解効率 >85%、プロセス標準化。

比較：各国は分解効率とバンドギャップに重点を置いていますが、テスト条件（染料、光源など）は大きく異なります。

アプリケーション仕様

中国（GB/T 32698-2016）：光触媒、センサー、エレクトロクロミックをカバーします。

日本（JIS H 7804:2015）：調製技術と産業上の応用に焦点を当てています。

ドイツ（DIN SPEC 91299）：エレクトロクロミック性能は明確であり、変調率は 80% を超えます。

ロシア（GOST R 58368-2019）：工業生産と品質管理に重点を置いています。

韓国（KS C IEC 62899）：電子デバイスのアプリケーションでは、導電性と応答時間が重要です。

国際（ISO/TS 80004-1:2015）：主に定義と用語に基づきますが、適用は特定の標準に依存します。

比較：国によってアプリケーションの重点は異なります。ドイツと韓国は電子機器に重点を置いているのに対し、中国は幅広い分野をカバーしています。

安全と環境

中国：独立した Nano-WO₃ 安全規格はまだありません。GB/T 36081 などの一般的な仕様を参照してください。

日本：JIS Z 8825:2020 は予備的な毒性評価を扱っています。

ドイツ：DIN EN ISO 17034 は、REACH 規制に準拠しており、環境放出に重点を置いています。

ロシア：GOST R 8.927-2016 では安全要件は規定されていません。

韓国：KS M 6789:2021 では安全性については触れられていません。

国際（ISO 19749:2021）：毒性と環境への影響の包括的な評価、強力な世界的な基準。

比較：安全性に関しては、国際基準が最も充実しています。ドイツは EU 規制との組み合わせでより厳格ですが、他の国はより緩いです。

標準化の程度

準備、試験、適用に関する基準は多数あるが、安全基準が欠如している。

日本：正確な技術仕様、工業化の重視、高精度のテスト。

ドイツ：国際基準に高度に準拠し、認証と安全性を重視しています。

ロシア：産業用途に重点が置かれており、標準はより実用的ですが、詳細が欠けています。

韓国：電子機器のアプリケーション標準は比較的強力です、ISO とよく同期しています。

国際：一般的なフレームワークを提供しますが、詳細は特定のアプリケーション標準によって異なります。

技術的なハイライト

粒子サイズと比表面積の測定はすべての国で共通の関心事であり、その方法は非常に一貫しています（DLS、TEM、BET）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

光触媒性能テストは、アプリケーションシナリオ（染料タイプ、光源など）によって異なります。

エレクトロクロミックおよびセンサーの用途は、ドイツおよび韓国の規格でより具体的に規定されています。

ギャップとトレンド

安全性および環境影響評価は、国際規格（ISO 19749）およびドイツ（REACH）では比較的完了していますが、他の国では強化する必要があります。

各国は、世界的な一貫性を促進するために、徐々に国際規格（ISO 9277、ISO 13320 など）に移行しています。

データソース

中国：中国標準化管理局（SAC）の公式 Web サイトおよび GB/T 標準データベース。

日本：日本工業標準調査会（JISC）および JIS データベース。

ドイツ：ドイツ標準化機構（DIN）および DIN SPEC データベース。

ロシア：ロシア連邦標準化庁（Rosstandart）および GOST データベース。

韓国：韓国規格協会（KSA）および KS データベース。

国際：ISO 公式ウェブサイト、ASTM データベース、StatNano レポート。

中国ナノタングステン酸化物規格リスト

中国はナノテクノロジー分野において数多くの規格を制定しており、その中でもナノタングステン酸化物（Nano-WO₃）に関する規格は、主に材料特性、試験方法、および応用性能評価に焦点を当てています。以下は、Nano-WO₃に直接的または間接的に関連し、その製造、試験、および応用に適用される規格の全文です。

1. GB/T 32698-2016 ナノタングステン酸化物粉末

タイトル：ナノタングステン酸化物粉末

発売日：2016-05-27

実施日：2016年12月1日

ステータス：現在

適用範囲この規格は、ナノタングステン酸化物（ナノ

WO₃）の用語と定義、技術要件、試験方法、検査規則、マーキング、包装、輸送および保管要件を規定する。光触媒、ガスセンサー、エレクトロクロミック材料などのナノタングステン酸化物粉末の製造、検査、販売に応用できます。

メインコンテンツ

用語と定義

少なくとも1つの寸法が1～100 nmの範囲にあるWO₃粉末で、通常は単斜晶系または斜方晶系の結晶構造をとります。

比表面積：粉末の単位質量あたりの総表面積（m²/g）。

技術要件

外観：黄色から黄緑色の粉末で、肉眼で不純物は見当たりません。

化学組成：

WO₃含有量≥99.5%（質量分率）。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

不純物含有量: Fe $\leq 0.005\%$ 、Mo $\leq 0.01\%$ 、その他の金属元素 $\leq 0.005\%$ 。

物理的特性:

粒子サイズ範囲: 10~100 nm (TEM 測定、平均値)。

比表面積: $\geq 50\text{m}^2/\text{g}$ (BET 法)。

結晶相: 単斜晶系 (主) または斜方晶系 (XRD により確認)。

試験方法

化学組成: ICP-OES (誘導結合プラズマ発光分光法) を使用して WO_3 および不純物含有量を測定しました。

粒子サイズ: TEM (透過型電子顕微鏡) で測定し、少なくとも 100 個の粒子を数えます。

比表面積: BET 法 (N_2 吸着、 200°C で 4 時間脱ガス)。

結晶相: XRD (Cu K α 、 $2\theta = 10^\circ \sim 80^\circ$ 、ステップサイズ 0.02°)。

検査ルール

工場検査: 各バッチの外観、 WO_3 含有量、粒子サイズ、比表面積を検査します。

型式検査: 新たに追加された結晶相と不純物含有量を、毎年またはプロセス変更時に実施します。

適格性判断: すべての指標が要件を満たし、偏差は 5% 未満です。

ラベル付け、包装、輸送、保管

マーキング: 製品名、バッチ番号、正味重量、製造日、規格番号を記載します。

包装: 密封されたプラスチック袋またはアルミホイル袋、正味重量 100 g、500 g または 1 kg、防湿カートン付き。

輸送: 高温 ($>50^\circ\text{C}$) および高湿度 (RH $>80\%$) を避けてください。

保管: 乾燥した換気の良い場所 (温度 $<30^\circ\text{C}$ 、湿度 $<50\%$)。

適用性分析

、工業用粉末に対する品質要件を明確にしたナノ WO_3 の特別規格であり、光触媒 (分解染料など)、センサー (NO_2 検出など)、エレクトロクロミックフィルムの製造に適しています。

ナノ効果が性能に与える影響を反映するために、粒子サイズと比表面積に重点が置かれています。

2. GB/T 19590-2020 ナノ材料粒子サイズ測定方法

タイトル: ナノ材料粒子サイズ測定法

発売日: 2020 年 3 月 31 日

発効日: 2020 年 10 月 1 日

ステータス: 現在

適用範囲

この規格は、動的光散乱 (DLS)、透過型電子顕微鏡 (TEM)、レーザー粒度分析法を含むナノ材料の粒子径測定方法を規定する。本規格は、粒子径範囲が 1~1000 nm のナノ材料 (ナノ WO_3 など) の粒子径分布の測定に適している。

メインコンテンツ

用語と定義

粒子サイズ: ナノ粒子の等価直径 (nm)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

粒度分布：粒子サイズの統計的分布。通常は D10、D50、D90 として表されます。

測定方法

動的光散乱（DLS）

装置：レーザー粒度分布測定装置（波長 633 nm、散乱角 90°）。

サンプル調製：0.1～1 mg/mL 懸濁液（水またはエタノール）、10 分間の超音波分散（出力 100 W）。

動作：25° C、3 回の測定、平均値の偏差 <5%。

適用範囲：10～1000 nm。

透過型電子顕微鏡（TEM）

装置：TEM（加速電圧 200 kV）。

サンプルの準備：銅グリッド上に滴下塗布し（0.5 mg/mL、エタノールに分散）、2 時間乾燥させます。

操作：倍率 50,000 ～ 200,000 倍、100 個を超える粒子をカウントします。

適用範囲：1～100 nm。

レーザー粒子サイズ分析

装置：レーザー回折計（He-Ne レーザー、633 nm）。

サンプル調製：懸濁液（0.5 wt %）、15 分間の超音波処理。

操作：3 回測定、再現性偏差 <3%。

適用範囲：50～1000 nm。

データ処理

平均粒子径（D50）と分布幅（スパン＝（D90 - D10）/ D50）を計算します。

粒度分布曲線と標準偏差が報告されます。

予防

凝集を避けてください（超音波処理時間 < 30 分）。

測定精度（±2 nm）を確保するために機器が校正されました。

適用性分析

ナノ WO₃（10～100 nm）の粒子サイズ分布測定に直接適用でき、GB / T 32698-2016 の TEM 試験要件と一致しています。

DLS と TEM を組み合わせることで、WO₃ のナノ構造特性を完全に評価できます。

3. GB/T 36081-2018 ナノ材料の比表面積の測定

タイトル：ナノ材料の比表面積の測定方法

発売日：2018-03-15

実施日：2018 年 10 月 1 日

ステータス：現在

適用範囲この規格は、BET（

Brunauer-Emmett-Teller）法に基づいてナノ材料の比表面積を決定する方法を規定し、比表面積が 1-1000m²/g のナノ材料（Nano-WO₃など）に適用されます。

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

メインコンテンツ

用語と定義

比表面積：物質の単位質量あたりの表面積(m^2/g)。

単層吸着 (V_m)：単層を形成するために必要な吸着ガスの体積。

試験方法

装置：表面積分析装置 (N_2 吸着、 77 K)。

サンプル準備：粉末 $0.1\sim 0.5\text{ g}$ 、 200°C で 4 時間真空脱ガス (真空度 $<10^{-3}\text{ Pa}$)。

手順：

脱ガスしたサンプルを計量します ($\pm 0.1\text{ mg}$)。

液体窒素コールドトラップ (77 K) 中で N_2 吸着 - 脱着等温線 ($P/P_0 = 0.05\sim 0.995$) を記録した。

BET 線形範囲： $P/P_0 = 0.05\sim 0.3$ 。

計算： $S = 4.35 \times V_m / m$ (V_m は単層吸着容量、 m はサンプル質量)。

データ処理

比表面積値 (m^2/g) と相関係数 ($R^2 > 0.995$) が報告されます。

オプション：BJH 法による細孔サイズ分布 ($2 \sim 50\text{ nm}$) と細孔容積 (cm^3/g) の分析。

予防

サンプルに水分がないことを確認してください (完全に脱ガスしてください)。

機器は校正済みです (標準サンプルの偏差 $< 2\%$)。

適用性分析

この規格は、ナノ WO_3 の比表面積 (標準値 $50\sim 200\text{ m}^2/\text{g}$) の測定に直接適用され、GB/T 32698-2016 の要件に準拠しています。

BET データは WO_3 の触媒活性と吸着能力を反映しています。

4. GB/T 42272-2022 ナノ材料の光触媒性能の評価

タイトル：ナノ材料の光触媒性能評価

発売日：2022 年 12 月 30 日

発効日：2023 年 7 月 1 日

ステータス：現在

適用範囲

この規格は、バンドギャップ測定、光触媒分解効率、サイクル安定性試験など、ナノ材料 (ナノ WO_3 など) の光触媒性能評価方法を規定し、水処理および空気浄化用の光触媒に適用する。

メインコンテンツ

用語と定義

光触媒性能：光の下で酸化または還元反応を触媒する材料の能力。

バンドギャップ (E_g)：伝導帯と価電子帯の間のエネルギー差 (eV)。

試験方法

バンドギャップの決定

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

装置：UV-Vis 分光光度計（拡散反射モード、200～800 nm）。

サンプルの準備：50～100 mg の粉末をサンプルウェルに平らに押し付けます（BaSO₄参照）。

手順：拡散反射スペクトルを記録し、Tauc の式 $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ を使用して E_g を計算します。

標準値：Nano-WO₃ の場合 2.4-2.8 eV 。

分解効率

装置：光触媒反応器（300W キセノンランプ、AM1.5G）。

サンプル：0.1 g の WO₃粉末を 100 mL の染料溶液（例：メチレンブルー、10 mg/L）に分散させたもの。

操作：1～5 時間光にさらし、30 分ごとにサンプルを採取し、UV-Vis で濃度の変化を測定し、分解率（> 85%）を計算します。

速度論：一次反応速度定数 k （分⁻¹）。

周期安定性

手順：分解実験を 10 回繰り返し、洗浄および乾燥後にテストします。

要件：効率維持率 ≥ 90%。

データ処理

バンドギャップ、劣化率、 k 値、およびサイクル安定性のデータが報告されます。

可視光応答（ $\lambda > 400$ nm）を評価します。

予防

光の強度を制御します（100 mW /cm²）。

分散に影響を及ぼす可能性のあるサンプルの凝集を避けてください。

適用性分析

この規格は光触媒用に設計されており、ナノ WO₃の性能評価（水素生成や染料分解など）に直接適用できます。

バンドギャップとサイクル安定性試験は、WO₃ の光触媒用途に密接に関連しています。

5. GB/T 16483-2008 化学物質安全データシートの内容と項目の順序

タイトル：化学物質の安全データシートの内容と項目の順序

リリース日：2008-06-04

発効日：2009 年 1 月 1 日

ステータス：現在

適用範囲この規格は、化学品（ナノ

WO₃など）の安全データシート（SDS/MSDS）に対する 16 の項目及び記載要件を規定しており、化学品の製造、輸送及び使用に適用する。

メインコンテンツ

16 アイテム

化学物質および会社情報：名称（Nano-WO₃）、CAS 番号（1314-35-8）、サプライヤー情報。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

危険有害性の概要：GHS 分類（軽度の刺激など）、危険有害性情報（H333：吸入すると有害となる場合があります）。

組成/成分情報： $W_3 \geq 99.5\%$ 、不純物 $< 0.5\%$ 。

応急処置：吸入した場合は、換気の良い場所へ移動し、15 分間目を洗い流してください。

消火方法：消火には乾燥粉末または砂を使用し、水は使用しないでください。

漏れた場合の応急処置：粉塵の拡散を防ぐため、掃除機で吸い取ってください。

取り扱いおよび保管：換気を良くして取り扱い、密閉された場所（ $< 30^\circ C$ 、 $RH < 50\%$ ）で保管してください。

暴露管理/個人保護：N95 マスク、ニトリル手袋、限度 5 mg/m^3 。

物理的および化学的性質：密度 7.16 g/cm^3 、融点 $1472^\circ C$ 。

安定性および反応性：高温で分解して WO_x を生成します。

毒性情報： $LD_{50} > 2000 \text{ mg/kg}$ （マウス）。

生態学的情報：水への溶解度が低い（ $< 0.1 \text{ mg/L}$ ）、急性生態毒性はありません。

廃棄物処理：密封して専門機関に引き渡して処分してください。

配送情報：一般貨物、非危険物。

規制情報：危険化学物質カタログには記載されていません。

その他の情報：作成日、改訂メモ。

ライティング要件

データは正確であり、GHS 第 9 版に準拠しています。

中国語版および必要な外国語版を提供します。

適用性分析

この規格は、Nano- WO_3 の安全管理に間接的に適用され、安全な輸送と使用を確保するための MSDS テンプレートを提供します。

防塵に重点が置かれているのは、 WO_3 のナノ特性と関係があります。

その他の関連規格

以下の規格は Nano- WO_3 に固有のものではありませんが、そのテストと評価に間接的に適用できます。

GB/T 13221-2004 ナノ粉末の特性評価- 透過型電子顕微鏡

倍率 $> 50,000$ 倍、粒子数 > 100 個で、ナノパウダー（ WO_3 など）の形態と粒子サイズを決定するために使用されます。

適用性：GB/T 19590-2020 の TEM 法に準拠しており、 WO_3 微細構造分析に適しています。

GB/T 30452-2013 ナノ材料の表面化学組成分析 - X 線光電子分光法 ナノマテリアルの表面元素と酸化状態（ WO_3 など）を検出し、検出限界は $< 0.1 \text{ at}\%$ です。

適用範囲： WO_3 中の W^{6+}/W^{5+} 比や酸素空孔の分析に使用できます。

GB/T 21865-2008 ナノ材料の光学特性試験方法

適用範囲：ナノ材料の光学特性（バンドギャップ、吸収端など）の UV-Vis 測定を指定します。 WO_3 （ $2.4 \sim 2.8 \text{ eV}$ ）に適用可能です。

適用範囲：GB/T 42272-2022 のバンドギャップ試験方法に準拠。

中国規格の要約と分析

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

カバレッジ

専用規格: GB/T 32698-2016 は Nano-WO₃の中核規格であり、材料の仕様と試験方法を規定しています。

一般試験: GB/T 19590-2020、GB/T 36081-2018 などでは、粒子サイズと比表面積に関する標準化された方法が規定されています。

アプリケーション評価: GB/T 42272-2022 は光触媒性能に重点を置いており、間接的に他のアプリケーション（センサーなど）をサポートします。

安全仕様: GB/T 16483-2008 は、安全な使用を確保するための SDS フレームワークを提供します。

技術的な詳細

粒子サイズ: 10~100 nm、国際規格（ISO 13320）に準拠。

比表面積: $\geq 50 \text{ m}^2 / \text{g}$ 、ナノ WO₃の高い活性要件を反映しています。

光触媒: バンドギャップ 2.4~2.8 eV、分解率 >85%、実用性重視。

欠点と傾向

Nano-WO₃ の毒性、安全性、環境への影響に関する具体的な基準については、国際規格（ISO 19749 など）を参照する必要があります。

傾向: 中国の規格は国際規格との整合性が高まっており（例: BET 方式は ISO 9277 に準拠）、将来的には新しい安全規格が追加される可能性があります。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



付録 E: ナノタングステン酸化物の中国語、英語、日本語、韓国語の多言語表

ナノタングステン酸化物（Nano-WO₃）は、多機能ナノ材料であり、その研究と応用は複数の分野にまたがり、国際的な交流が続いています。以下の多言語用語集は、学術文献、技術規格（GB/T 32698-2016、ISO/TS 80004-1 など）、そして一般的な用語に基づいており、中国語、英語、日本語、韓国語の 4 言語を網羅しています。正確で、科学研究、特許、産業化のシナリオに適しています。

表 E-1: ナノタングステン酸化物の多言語表

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

材料と基本用語

中国語（CN）	英語（EN）	日本語（JP）	韓国語（KR）	説明する
ナノタングステン酸化物	ナノタングステン酸化物	ナノ酸性タングステン	2018年3月27日	ナノ形態の WO_3 、粒子サイズは通常 1～100nm です。
三酸化タングステン	三酸化タングステン	三酸化タングステン	その	WO_3 、分子量 231.84g/mol。
ナノマテリアル	ナノマテリアル	ナノ材料	2	少なくとも 1 つの寸法が 100 nm 未満の材料。
酸化タングステン	酸化タングステン	酸化タングステン	その	通常は WO_x を指します。x は 2、2.9、3 などになります。
半導体	半導体	半導体	2	WO_3 、バンドギャップ 2.4-2.8 eV。
結晶相	結晶相	結晶相	韓国語	単斜晶相や斜方晶相など、 WO_3 の性能に影響を与えるもの。

物理的および化学的性質

中国語（CN）	英語（EN）	日本語（JP）	韓国語（KR）	説明する
粒子サイズ	粒子サイズ	粒子サイズ	입자 크기	ナノ WO_3 のサイズは通常 10～100 nm です。
比表面積	比表面積	比表面積	2	単位質量あたりの表面積、50～200 m^2 / g 。
バンドギャップ	バンドギャップ	バンドギャップ	100%	WO_3 の場合、 2.4-2.8 eV です。
密度	密度	密度	バルドル	WO_3 は 7.16 g/cm^3 で、ナノレベルではわずかに低くなります。
融点	融点	融点	융점	WO_3 は 1472° C であり、ナノスケールでは低下する可能性があります。
酸素空孔	酸素空孔	酸素欠乏	산소공극	WO_3 の触媒特性と電気特性に影響を与えます。
導電率	導電率	電気伝導性	2	ナノ WO_3 は $10^{-3} - 10^{-1} S/cm$ です。
光吸収端	光吸収端	光吸収端	흡수 경계	WO_3 は 460 ～ 500 nm であり、ドーピング後に赤方偏移する可能性があります。

準備方法

中国語（CN）	英語（EN）	日本語（JP）	韓国語（KR）	説明する
---------	--------	---------	---------	------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

			KR)	
水熱法	水熱法	水熱法	2 星座	高温高压水溶液によるナノ WO ₃ の調製。
ソルボサーマル法	ソルボサーマル法	溶媒熱法	2 星座	WO ₃ を調製するにはエタノールなどの有機溶媒を使用します。
沈殿法	沈殿法	神典法	2	沈殿によって製造されました。
蒸着	蒸着	空気蒸発	ゴールサ CVD、WO ₃ 薄膜またはナノ粒子の製造など	ン2。
ゾルゲル法	ゾルゲル法	ゾルゲル法	ゾル - グル ド	3ゾル - ゲル変換を介して。
マイクロ波支援法	マイクロ波支援法	電子レンジ対応方式	最も美しい2	マイクロ波加熱は WO ₃ 合成を促進します。
テンプレート方式	テンプレートメソッド	テンプレート法	テブドラ	AAO やその他のテンプレートを使用して WO ₃ 形態を制御します。

テスト技術

中国語 (CN)	英語 (EN)	日本語 (JP)	韓国語 (KR)	説明する
X 線回折	X 線回折 (XRD)	X 線折り返し	X ヒュッケ	WO ₃ の結晶相と粒径を決定します。
フーリエ変換赤外分光法	フーリエ変換赤外分光法 (FTIR)	フーリエ変換赤外分光法	ピリの ボヘ ンセ ブルゴビ	チョ (WO など) の化学結合を分析します。
走査型電子顕微鏡	走査型電子顕微鏡 (SEM)	走査型電子顕微鏡	その	WO ₃ の表面形態を観察します。
透過型電子顕微鏡	透過型電子顕微鏡 (TEM)	電子顕微鏡を通して	その	微細構造と格子を分析します。
紫外可視分光法	紫外可視分光法 (UV-Vis)	紫外可視分光法	最高 - 最高 분광법	WO ₃ のバンドギャップと吸収端を決定します。
比表面積の測定	BET 表面積測定	BET 表面積測定	BET ポーカー 측정	WO ₃ の比表面積を N ₂ 吸着法で測定した。
X 線光電子分光法	X 線光電子分光法 (XPS)	X 線光電子分光法	X公爵 블로그비	(W ⁶⁺ / W ⁵⁺ など) の表面化学状態を分析します。

応用分野

中国語 (CN)	英語 (EN)	日本語 (JP)	韓国語 (KR)	説明する
光触媒	光触媒	光触媒	グーチョム	WO ₃ は汚染物質を分解したり水素を生成したりするために使用されます。
エレクトロ	エレクトロ	エレクトロ	2	スマートウィンドウの WO ₃ 。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

クロミック	クロミズム	クロミズム	
ガスセンサー	가스센서	가스센서	韓国語 WO ₃ は NO ₂ や CO などのガスを検出します。 센서
エネルギー貯蔵材料	에너지저장재료	에너지저장재료	2 2 조 WO ₃ はスーパーキャパシタやバッテリー 에 사용されます。
スマートウインドウ	스마트윈도우	스메ーター	スマート WO ₃ フィルムは光の透過率と熱を調節し 창 ます。
汚染物質の分解	오염물질의 분해	오염물질의 분해	분해 WO ₃ 光触媒による有機物の分解。
水素製造	수소제조	수소제조	2 年前 WO ₃ は光触媒的に水を分解して水素を生成 시 します。

その他の関連用語

中国語 (CN)	英語 (EN)	日本語 (JP)	韓国語 (KR)	説明する
ドーピング	ドーピング	도핑	도핑	たとえば、WO ₃ に N および Ag をドーピングすると、パフォーマンスを最適化できます。
複合材料	複合材料	복합재료	복합재료	TiO など 2、光触媒効率が向上します。
ナノ粒子	나노입자	나노입자	나노입자	WO ₃ 、10~50 nm。
ナノワイヤー	나노와이어	나노와이어	나노와이어	WO ₃ の直径は 20~30 nm です。
ナノシート	나노시트	나노시트	나노시트	WO ₃ 、厚さ 1~5nm。
量子ドット	양자도트	양자도트	양자도트	WO ₃ 、<10 nm。
周期安定性	사이클링 안정성	사이클링 안정성	사이클링 안정성	스 호 2 繰り返し使用した場合の WO ₃ の量。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Introduction of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

1. Nano Tungsten Trioxide Overview

CTIA GROUP LTD's Nano Tungsten Trioxide (WO₃) complies with GB/T 36080-2018 and ISO/TS 21356-1:2021 standards. It is prepared using advanced chemical vapor deposition or wet chemical methods and is a high-performance nanomaterial. It is known for its ultrafine particle size, high specific surface area and excellent photoelectric properties, and is suitable for use in the fields of optoelectronics, catalysis and energy.

2. Excellent Properties of Nano Tungsten Trioxide (WO₃)

Ultrafine nanoscale: particle size ranges from 50-100 nm, evenly distributed, and meets the standards for nanomaterials (1-100 nm).

High purity: WO₃ content ≥99.9%, extremely low impurities, ensuring high-end application performance.

Excellent performance: surface area >20 m²/g, excellent optical transparency, conductivity and thermal stability.

Reliable quality: pure crystal form (XRD detection), no agglomeration, guaranteed consistency.

3. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Product Specifications

Brand	Particle size (nm)	Purity (wt %)
NWO-50	50±10	≥99.9
NWO-80	80±10	≥99.9
NWO-100	100±10	≥99.9

In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.

4. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Packaging and Warranty

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer sealed plastic barrel, net weight 1kg or 5kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: Each batch is accompanied by a quality certificate, including particle size distribution (laser method), chemical composition and specific surface area data, and the shelf life is 12 months.

5. Nano Tungsten Trioxide (WO₃) Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com

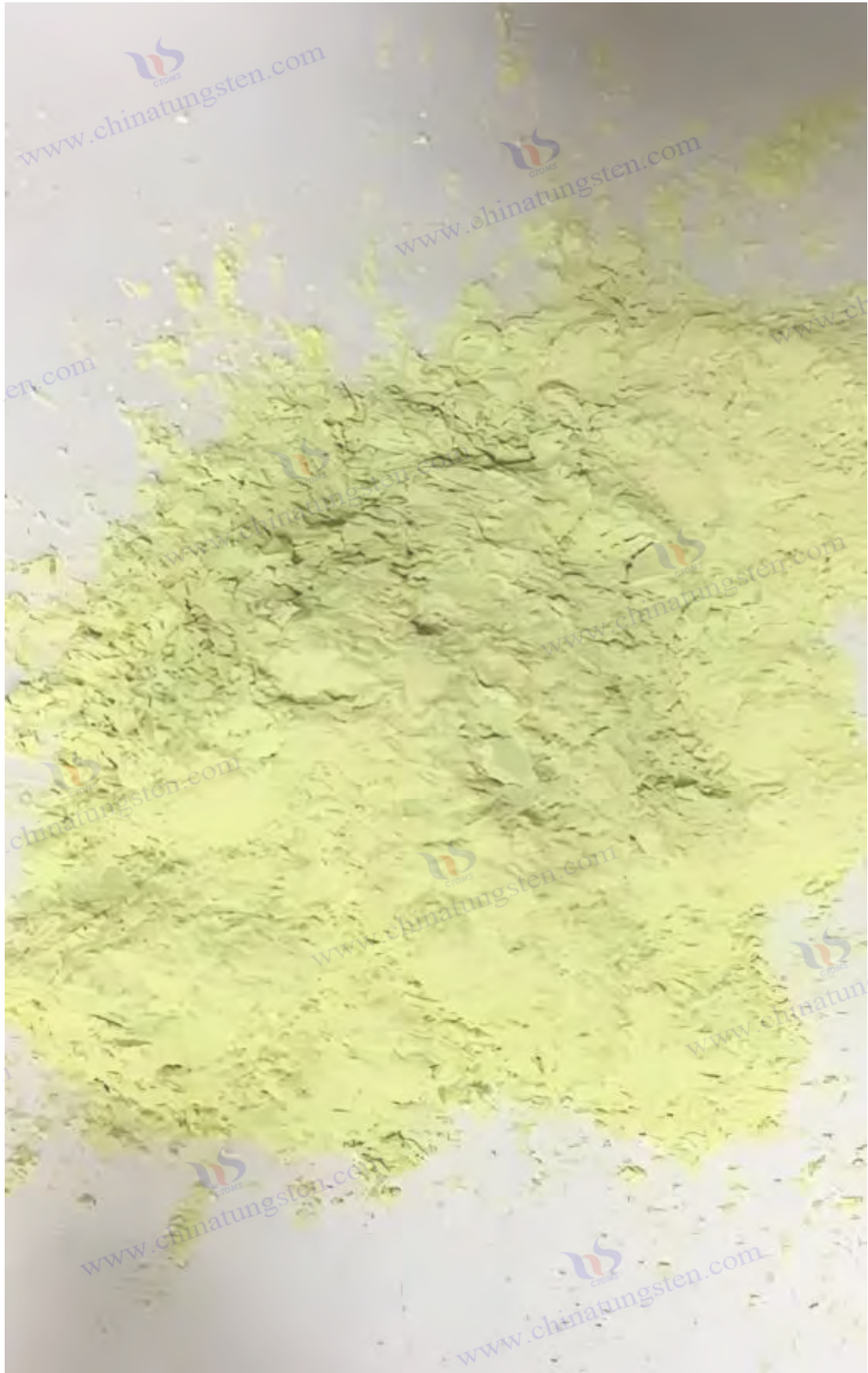
Tel: +86 592 5129595

For more information about nano tungsten oxide, please visit the website of CTIA GROUP LTD.
(www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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