

Blaues Wolframoxid (BTO)

Physikalische und chemische Eigenschaften, Herstellung und

Anwendungen

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Weltweit führend in der intelligenten Fertigung für die Wolfram-, Molybdän- und
Seltenerdindustrie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft mit unabhängiger Rechtspersönlichkeit, die von CHINATUNGSTEN ONLINE gegründet wurde, widmet sich der Förderung der intelligenten, integrierten und flexiblen Entwicklung und Herstellung von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets. CHINATUNGSTEN ONLINE, gegründet 1997 mit www.chinatungsten.com als Ausgangspunkt – Chinas erster erstklassiger Website für Wolframprodukte – ist das bahnbrechende E-Commerce-Unternehmen des Landes mit Fokus auf die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Industrien. CTIA GROUP nutzt fast drei Jahrzehnte umfassende Erfahrung in den Bereichen Wolfram und Molybdän, erbt die außergewöhnlichen Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten, die erstklassigen Dienstleistungen und den weltweiten Ruf ihres Mutterunternehmens und wird so zu einem umfassenden Anbieter von Anwendungslösungen in den Bereichen Wolframchemikalien, Wolframmetalle, Hartmetalle, hochdichte Legierungen, Molybdän und Molybdänlegierungen.

In den vergangenen 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE über 200 mehrsprachige professionelle Websites zu den Themen Wolfram und Molybdän in mehr als 20 Sprachen erstellt, die über eine Million Seiten mit Nachrichten, Preisen und Marktanalysen zu Wolfram, Molybdän und Seltenen Erden enthalten. Seit 2013 wurden auf dem offiziellen WeChat-Konto „CHINATUNGSTEN ONLINE“ über 40.000 Informationen veröffentlicht, die fast 100.000 Follower erreichen und täglich Hunderttausenden von Branchenexperten weltweit kostenlose Informationen bieten. Mit Milliarden von Besuchen auf seinem Website-Cluster und seinem offiziellen Konto hat sich das Unternehmen zu einer anerkannten globalen und maßgeblichen Informationsdrehscheibe für die Wolfram-, Molybdän- und Seltene Erden-Branche entwickelt, die rund um die Uhr mehrsprachige Nachrichten, Informationen zu Produktleistung, Marktpreisen und Markttrends bietet.

Aufbauend auf der Technologie und Erfahrung von CHINATUNGSTEN ONLINE konzentriert sich die CTIA GROUP darauf, die individuellen Bedürfnisse ihrer Kunden zu erfüllen. Mithilfe von KI-Technologie entwickelt und produziert sie gemeinsam mit ihren Kunden Wolfram- und Molybdänprodukte mit spezifischen chemischen Zusammensetzungen und physikalischen Eigenschaften (wie Partikelgröße, Dichte, Härte, Festigkeit, Abmessungen und Toleranzen). Das Angebot umfasst integrierte Dienstleistungen für den gesamten Prozess, vom Formenöffnen und der Probeproduktion bis hin zur Veredelung, Verpackung und Logistik. In den letzten 30 Jahren hat CHINATUNGSTEN ONLINE weltweit über 130.000 Kunden in Forschung und Entwicklung, Design und Produktion von über 500.000 Arten von Wolfram- und Molybdänprodukten unterstützt und so den Grundstein für eine maßgeschneiderte, flexible und intelligente Fertigung gelegt. Auf dieser Grundlage vertieft die CTIA GROUP die intelligente Fertigung und integrierte Innovation von Wolfram- und Molybdänmaterialien im Zeitalter des industriellen Internets weiter.

Dr. Hanns und sein Team bei der CTIA GROUP haben auf der Grundlage ihrer über 30-jährigen Branchenerfahrung auch Fachwissen, Technologien, Wolframpreise und Markttrendanalysen in Bezug auf Wolfram, Molybdän und Seltene Erden verfasst und veröffentlicht und geben diese kostenlos an die Wolframbranche weiter. Dr. Han, mit über 30 Jahren Erfahrung seit den 1990er Jahren im E-Commerce und internationalen Handel mit Wolfram- und Molybdänprodukten sowie in der Entwicklung und Herstellung von Hartmetallen und hochdichten Legierungen, ist im In- und Ausland ein renommierter Experte für Wolfram- und Molybdänprodukte. Getreu dem Grundsatz, der Branche professionelle und qualitativ hochwertige Informationen zu liefern, verfasst das Team der CTIA GROUP kontinuierlich technische Forschungsarbeiten, Artikel und Branchenberichte auf Grundlage der Produktionspraxis und der Kundenbedürfnisse und findet dafür breite Anerkennung in der Branche. Diese Erfolge stellen eine solide Unterstützung für die technologische Innovation, die Produktförderung und den Branchenaustausch der CTIA GROUP dar und verhelfen ihr zu einem führenden Unternehmen in der globalen Herstellung von Wolfram- und Molybdänprodukten sowie bei Informationsdienstleistungen.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Die Bedeutung von Blauem Wolfram: Der Einzigartige Status und die Multifunktionalität von Nichtstöchiometrischem Wolframoxid

Strukturübersicht des Buches: Vollständige Kettenabdeckung von den Grundlagen bis zu den Anwendungen

Zweck und Leserschaft: Bereitstellung einer Umfassenden Referenz für die Akademische Forschung, Industrielle F&E und Produktionspraxis

Kapitel 1 Einleitung

1.1 Entdeckung von Blauem Wolfram

1.2 Klassifizierung Nichtstöchiometrischer Wolframoxide (WO_3 , $\text{WO}_{2.9}$, $\text{WO}_{2.72}$, WO_2)

1.3 Der Status von Blauem Wolfram in der Wolfram-Industriekette

1.4 Aktueller Stand und Trends in Forschung und Anwendung

Kapitel 2 Grundlegende Eigenschaften von Blauem Wolframoxid

2.1 Chemische Zusammensetzung und Struktur

2.1.1 Chemische Formel ($\text{WO}_{2.9}$ oder $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$)

2.1.2 Kristallstruktur und Sauerstoffdefekte

2.2 Physikalische Eigenschaften

2.2.1 Farbe und Aussehen (Blaues Pulver)

2.2.2 Dichte, Schmelzpunkt und Thermische Stabilität

2.3 Optische und Elektrische Eigenschaften

2.3.1 Bandlückenenergie (2.4–2.8 eV)

2.3.2 Elektrische Leitfähigkeit und Sauerstoffleerstelleneffekt

2.4 Chemische Stabilität und Reaktivität

2.4.1 Oxidations- und Reduktionsverhalten

2.4.2 Stabilität unter Umweltbedingungen

Kapitel 3 Herstellungsprozess von Blauem Wolframoxid

3.1 Auswahl und Vorbehandlung der Rohstoffe

3.1.1 Ammoniumparawolframat (APT)

3.1.2 Wolframsäure und Wolframkonzentrat

3.2 Wichtigste Herstellungsverfahren

3.2.1 Wasserstoffreduktionsverfahren

Prozessparameter (Temperatur 500–800 °C, H_2 -Flussrate)

Ausrüstung (Rohröfen, Drehrohröfen)

3.2.2 Hydrothermale und Solvothermale Verfahren

Reaktionsbedingungen (Hoher Druck, 180–250 °C)

Nanostrukturkontrolle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3.2.3 Überkritische Fluidmethode

Anwendungen von Überkritischem Alkohol

3.2.4 Dampfabscheidungsverfahren

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) und Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)

3.3 Prozessoptimierung und Morphologiekontrolle

3.3.1 Nanopartikel, Nanostäbe und Nanodrähte

3.3.2 Temperatur-, Atmosphären- und Katalysatoreffekte

3.4 Herausforderungen der Industriellen Produktion

3.4.1 Konsistenz und Produktivität

3.4.2 Energieverbrauch und Kostenkontrolle

Kapitel 4 Nachweis und Charakterisierung von Blauem Wolframoxid

4.1 Analyse der Chemischen Zusammensetzung

4.1.1 ICP-OES und ICP-MS (Erkennung von Verunreinigungen)

4.1.2 Bestimmung des Sauerstoffgehalts

4.2 Analyse der Phasenzusammensetzung und -Struktur

4.2.1 Röntgenbeugung (XRD)

4.2.2 Raman-Spektroskopie und Infrarotspektroskopie

4.3 Morphologie- und Partikelgrößenanalyse

4.3.1 Rasterelektronenmikroskop (REM) und Transmissionselektronenmikroskop (TEM)

4.3.2 Laser-Partikelgrößenanalyse

4.4 Leistungsprüfung

4.4.1 Photokatalytische Effizienz (Farbstoffabbaurate)

4.4.2 Elektrochrome Leistung (Modulationsrate)

4.4.3 Elektrochemische Leistung (Spezifische Kapazität, Zyklenstabilität)

Kapitel 5 Anwendungsgebiete von Blauem Wolframoxid

5.1 Photokatalyse und Umweltsanwendungen

5.1.1 Abbau Organischer Schadstoffe

5.1.2 Photokatalytische Wasserstoffproduktion aus Wasser

5.2 Elektrochrome Geräte

5.2.1 Intelligente Fenster

5.2.2 Displays und Optische Modulation

5.3 Energiespeichermaterialien

5.3.1 Superkondensatoren

5.3.2 Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien

5.4 Gassensoren

5.4.1 Erkennung von NO₂, CO und Anderen Gasen

5.4.2 Optimierung von Empfindlichkeit und Selektivität

5.5 Herstellung von Wolframpulver und Hartmetall

5.5.1 Blaues Wolfram als Zwischenprodukt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

5.5.2 Herstellung von Ultrafeinem Wolframpulver

Kapitel 6 Industrielle Produktion und Optimierung

6.1 Industrielle Ausrüstung und Prozessdesign

6.1.1 Drehrohröfen und Wirbelschichtöfen

6.1.2 Kontinuierlicher Produktionsprozess

6.2 Qualitätskontrolle und -Standards

6.2.1 Reinheit (>99.95 %) und Verunreinigungen (Fe, Mo <10 ppm)

6.2.2 Partikelgrößenverteilung und Konsistenz der Morphologie

6.3 Energieeffizienz und Umweltschutzmaßnahmen

6.3.1 Optimierung des Energieverbrauchs (1–2 kWh/kg)

6.3.2 Abgasrückgewinnung (H₂O >90 %)

6.4 Produktionsfallanalyse

6.4.1 Kleinversuch (10 kg/Charge)

6.4.2 Großproduktion (1000 kg/Charge)

Kapitel 7 Technische Herausforderungen und Zukünftige Entwicklung

7.1 Aktuelle Technische Engpässe

7.1.1 Präzise Kontrolle von Morphologie und Leistung

7.1.2 Stabilität der Großserienproduktion

7.2 Neue Herstellungstechnologien

7.2.1 Elektrochemisches Reduktionsverfahren

7.2.2 Plasmagestütztes Verfahren

7.3 Anwendungsentwicklungsrichtung

7.3.1 Flexible Elektronische Geräte

7.3.2 Biomedizinische Anwendungen (z. B. Antibakterielle Materialien)

7.4 Nachhaltige Entwicklung und Kreislaufwirtschaft

7.4.1 Recycling von Wolframabfällen zur Herstellung von Blauem Wolfram

7.4.2 Grüner Produktionspfad

Kapitel 8 Schlussfolgerung und Ausblick

8.1 Forschung und Anwendung von Blauem Wolfram

8.2 Richtungen für Zukünftige Forschung und Technologische Durchbrüche

Anhang

Anhang A: Glossar der Begriffe im Zusammenhang mit Blauem Wolframoxid

Mehrsprachige Referenzen, darunter Chinesisch, Englisch, Japanisch, Koreanisch und Deutsch, mit Begriffen aus Produktion, Prüfung und Anwendung (wie z. B. „Wasserstoffreduktion“, „Nanostäbe“ und „photokatalytische Effizienz“).

Anhang B: Experimentelles Protokoll zur Herstellung von Blauem Wolframoxid

Laborverfahren (5 g Maßstab, Rohröfen) und industrielle Verfahren (100 kg/Charge, Drehrohröfen) mit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Parametern und Überlegungen.

Anhang C: Liste der Patente im Zusammenhang mit Blauem Wolframoxid

Patentnummern, Titel und Zusammenfassungen, die chinesische, amerikanische, japanische, koreanische, europäische und internationale Patente abdecken.

Anhang D: Liste der Standards für Blaues Wolframoxid

Vergleich mit chinesischen, japanischen, deutschen, russischen, koreanischen und internationalen Standards (wie z. B. GB/T 4324-2012, ISO 10397:1993).

Anhang E: Referenzen zu Blauem Wolframoxid

Akademische Arbeiten (20), Patente (15), Normen (10) und Bücher (5), mit detaillierten Quellen und Beschreibungen.

Anhang F: Liste der Geräte und Instrumente, die für die Herstellung von Blauem Wolframoxid Erforderlich Sind



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Vorwort

Blaues Wolframoxid (Blaues Wolframoxid, als blaues Wolfram bezeichnet, die chemische Formel lautet üblicherweise $\text{WO}_{2.9}$ oder $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$) nimmt als nichtstöchiometrisches Oxid aufgrund seiner einzigartigen Sauerstoffdefektstruktur sowie seiner optischen und elektrochemischen Eigenschaften eine wichtige Stellung in Materialwissenschaft, chemischer Verfahrenstechnik und industrieller Produktion ein. Seit seiner ersten industriellen Anwendung als Zwischenprodukt in der Wolfram-Industriekette hat sich blaues Wolfram von einem einfachen Rohstoff zur Herstellung von Wolframpulver zu einem multifunktionalen Material entwickelt, das breite Anwendung in der Photokatalyse, Energiespeicherung, elektrochromen Geräten und Gassensoren findet. Mit der rasanten Entwicklung der Nanotechnologie und der grünen Chemie haben Forschung und Anwendung von blauem Wolfram eine beispiellose Breite und Tiefe gezeigt und sein Potenzial wird gemeinsam von Wissenschaft und Industrie erforscht. Vor diesem Hintergrund hat das Expertenteam der CTIA GROUP dieses Buch verfasst, um Wissenschaftlern, Forschungs- und Entwicklungspersonal sowie Herstellern ein systematisches, maßgebliches und praktisches Nachschlagewerk an die Hand zu geben.

Zweck und Leserschaft

Das Hauptziel dieses Buches ist es, eine Brücke für die relevante Forschung und Anwendung von blauem Wolframoxid zu bauen und dabei akademische Theorie mit industrieller Praxis zu verbinden. Wir hoffen, Lesern unterschiedlicher Hintergründe gezielte Unterstützung zu bieten, indem wir die Eigenschaften, Herstellungsverfahren und vielseitigen Anwendungen von blauem Wolfram eingehend analysieren. Für akademische Forscher bietet dieses Buch eine detaillierte Analyse der physikalischen und chemischen Eigenschaften, Nachweismethoden und neuesten technologischen Herausforderungen von blauem Wolfram, ergänzt durch eine Fülle von Referenzen und Standards, um die theoretische Erforschung und das experimentelle Design zu vertiefen. Für F&E-Mitarbeiter der Industrie gliedert dieses Buch systematisch die Optimierung des Produktionsprozesses, die Richtung der Anwendungserweiterung und Lösungen für technische Engpässe von blauem Wolfram und bietet Leitlinien für die Entwicklung neuer Materialien und Leistungsverbesserungen. Für Produzenten stellt dieses Buch detailliert die Geräteauswahl, Prozessparameter und Umweltschutzmaßnahmen für die industrielle Produktion vor und enthält betriebliche Versuchspläne und Qualitätskontrollstandards, um einen reibungslosen Übergang vom Labor zur Fabrik zu gewährleisten. Ganz gleich, ob es sich um einen Studenten handelt, der zum ersten Mal mit blauem Wolfram in Berührung kommt, um einen Experten auf dem Gebiet der Wolframmaterialien oder um einen Ingenieur, der nach technologischen Durchbrüchen sucht: Dieses Buch hat das Ziel, zu einem unverzichtbaren Werkzeug auf jedem Schreibtisch zu werden.

Die Bedeutung von blauem Wolfram

Die Bedeutung von blauem Wolframoxid beruht auf seinen einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften und seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. Sein Wert spiegelt sich nicht nur im wissenschaftlichen Bereich wider, sondern hat auch tiefgreifende Auswirkungen auf die industrielle Produktion, den Umweltschutz, den wirtschaftlichen Nutzen und die gesellschaftliche Entwicklung. Als nichtstöchiometrische Verbindung zwischen Wolframtrioxid (WO_3) und Wolframdioxid (WO_2) weist

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

blaues Wolfram eine schmale Bandlücke (2,4–2,8 eV) und eine hohe Leitfähigkeit aufgrund vorhandener Sauerstoffdefekte auf. Dadurch ist es in der Katalyse mit sichtbarem Licht, der elektrochromen Modulation und der elektrochemischen Energiespeicherung leistungsfähiger als herkömmliches Wolframoxid.

Im Vergleich zu vollständig oxidiertem WO_3 weisen blaue Wolfram-Sauerstoffleerstellen eine stärkere Lichtabsorption und Ladungstrennung auf. Dies verschafft ihm erhebliche Vorteile bei Anwendungen wie dem photokatalytischen Abbau organischer Schadstoffe oder der photokatalytischen Wasserspaltung zur Wasserstoffherzeugung. Gleichzeitig ermöglicht seine teilweise reduzierte Struktur eine schnellere Reaktionsgeschwindigkeit und eine höhere optische Modulationsrate in elektrochromen Geräten und macht es somit zu einem idealen Material für intelligente Fenster und Displaytechnologien.

Im industriellen Bereich ist die Bedeutung von blauem Wolfram besonders ausgeprägt. Als wichtiges Zwischenprodukt für die Herstellung von ultrafeinem Wolframpulver und Hartmetall bestimmt der Herstellungsprozess von blauem Wolfram direkt die Partikelgrößenverteilung, Reinheit und Leistungsfähigkeit der Folgeprodukte. Beispielsweise kann durch die präzise Steuerung der Wasserstoffreduktionsbedingungen Wolframpulver mit einer Partikelgröße von weniger als einem Mikrometer erzeugt werden, das in der Luft- und Raumfahrt, der Elektronikindustrie und der Schneidwerkzeugherstellung weit verbreitet ist. Die weltweiten Wolframreserven sind begrenzt (China hält etwa 60 %). Ein effizienter Herstellungsprozess von blauem Wolfram kann die Wolframausnutzung deutlich verbessern, den Energieverbrauch (ca. 1–2 kWh/kg) senken und die Abwasseremissionen in der traditionellen Hydrometallurgie reduzieren. Diese hohe Effizienz und Nachhaltigkeit machen es zu einem unverzichtbaren Bindeglied in der Wolfram-Industriekette. Darüber hinaus hat die Produktionstechnologie für blaues Wolfram auch die Entwicklung von Katalysatoren auf Wolframbasis gefördert, beispielsweise deren Anwendung in der Ammoniaksynthese und in der Petrochemie, was ihren potenziellen Wert im Bereich der industriellen Katalyse widerspiegelt.

Aus ökologischer Sicht spielt blaues Wolfram in der grünen Technologie eine immer wichtigere Rolle. Angesichts der globalen Klimaneutralität ist die photokatalytische Technologie zu einem wichtigen Mittel zur Kontrolle der Umweltverschmutzung und zur Entwicklung sauberer Energie geworden. Dank seiner Reaktion auf sichtbares Licht kann blaues Wolfram organische Farbstoffe in Industrieabwässern (wie Methylenblau, Abbaurate > 95 %) effizient abbauen und weist bei der Photolyse von Wasser zur Wasserstoffproduktion eine hervorragende Stabilität und Wasserstoffproduktions-effizienz auf. Diese Fähigkeit trägt nicht nur zur Reduzierung des Schadstoffausstoßes bei, sondern eröffnet auch neue Wege für die Entwicklung erneuerbarer Energien. Darüber hinaus kann der Einsatz von blauem Wolfram in elektrochromen Smart-Fenstern den Energieverbrauch von Gebäuden deutlich senken (Modulationsrate > 80 %), den Einsatz von Klimaanlage durch dynamische Anpassung von Licht und Wärme in Innenräumen reduzieren und indirekt den CO₂-Fußabdruck verringern. Diese Umweltvorteile machen es zu einer der materialwissenschaftlichen Lösungen für den Klimawandel.

Das wirtschaftliche Potenzial von blauem Wolfram ist ein weiterer wichtiger Aspekt seiner Bedeutung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der globale Wolframmarkt wird voraussichtlich bis 2025 ein Volumen von über 5 Milliarden US-Dollar erreichen. Als hochwertiges Material fördern Produktion und Anwendung von blauem Wolfram unmittelbar die Modernisierung der entsprechenden Industrieketten. Nano-blaues Wolfram beispielsweise ist aufgrund seiner hervorragenden Leistung in Superkondensatoren (spezifische Kapazität $> 200 \text{ mAh/g}$) und Lithiumbatterieelektroden ein wichtiger Bestandteil der erneuerbaren Energien. Im Vergleich zu herkömmlichen Materialien können die hohe Zyklenfestigkeit und Energiedichte von blauem Wolfram die Lebensdauer und Effizienz von Energiespeichern deutlich verbessern und so der rasant wachsenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und erneuerbaren Energiespeichern gerecht werden. Gleichzeitig bietet die hohe Empfindlichkeit von blauem Wolfram in Gassensoren (Ansprechrate $> 20 \%$) breite Marktaussichten in den Bereichen Arbeitssicherheitsüberwachung und medizinische Diagnostik. Diese neuen Anwendungen steigern nicht nur den wirtschaftlichen Wert von blauem Wolfram, sondern verleihen auch der diversifizierten Entwicklung der Wolframindustrie neue Impulse.

Auch die gesellschaftlichen Auswirkungen von blauem Wolfram sind nicht zu vernachlässigen. Im Kontext intelligenter Fertigung und Smart-City-Bauweise fördert die Vielseitigkeit von blauem Wolfram technologische Innovationen. Beispielsweise hat seine Anwendung in elektrochromen Displays die Entwicklung flexibler elektronischer Geräte gefördert und könnte zu einer neuen Generation tragbarer Geräte und Smart Glass führen. Darüber hinaus eröffnen die antibakteriellen Eigenschaften von blauem Wolfram (aufgrund seiner photokatalytischen Aktivität) Potenzial für medizinische Materialien, beispielsweise für die Entwicklung antibakterieller Beschichtungen oder Luftreinigungsmaterialien. Diese Anwendungen verbessern unmittelbar die Lebensqualität und Gesundheit der Menschen und verdeutlichen den bedeutenden Beitrag der Materialwissenschaft zum gesellschaftlichen Fortschritt.

Die Bedeutung von blauem Wolfram liegt auch in seiner Verbindung mit den dualen Anforderungen von Grundlagenforschung und industrieller Praxis. Auf wissenschaftlicher Ebene liefern der Sauerstoffdefektmechanismus, die Morphologieregulierung und die Leistungsoptimierung von blauem Wolfram wertvolle experimentelle Modelle für die Festkörperchemie, Oberflächenwissenschaft und Nanotechnologie. Beispielsweise vertieft die Untersuchung der Bildungs- und Migrationsregeln seiner Sauerstoffleerstellen nicht nur die Theorie der Oxidhalbleiter, sondern liefert auch Inspirationen für die Entwicklung anderer nichtstöchiometrischer Materialien (wie TiO_{2-x} und MoO_{3-x}). Auf industrieller Ebene sind die Optimierung der Herstellungsverfahren für blaues Wolfram (wie z. B. eine Abgasrückgewinnungsrate von $> 90 \%$) und umweltfreundliche Aufbereitungstechnologien (wie das Recycling von Wolframabfällen) der Schlüssel zur Verwirklichung einer nachhaltigen Entwicklung. Besonders vor dem Hintergrund globaler Ressourcenknappheit und zunehmender Umweltbelastungen rücken kostengünstige und hocheffiziente Herstellungswege für blaues Wolfram in den Fokus des industriellen Wettbewerbs. Basierend auf diesem doppelten Wert ist dieses Buch bestrebt, umfassende Unterstützung für die Erforschung und Anwendung des gesamten Lebenszyklus von blauem Wolfram zu bieten.

Übersicht über die Buchstruktur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dieses Buch ist in acht Kapitel und fünf Anhänge gegliedert. Die Struktur folgt dem logischen Ablauf von den Grundlagen zur Anwendung, von der Theorie zur Praxis. Kapitel 1 „Einführung“ gibt einen Überblick über die Geschichte und den aktuellen Stand von blauem Wolfram und vermittelt den Lesern einen Forschungshintergrund. Kapitel 2 „Grundlegende Eigenschaften von blauem Wolframoxid“ untersucht eingehend dessen chemische Struktur, photoelektrische Eigenschaften und Stabilität und liefert die theoretische Grundlage für die nachfolgenden Kapitel. Kapitel 3 „Herstellungsprozess von blauem Wolframoxid“ stellt verschiedene Herstellungsverfahren wie Wasserstoffreduktion, hydrothermale, überkritische und Gasphasenabscheidung detailliert vor und berücksichtigt dabei die Anforderungen von Labor und Industrie. Kapitel 4 „Nachweis und Charakterisierung von blauem Wolframoxid“ erläutert systematisch die chemische Zusammensetzung, Phasenzusammensetzung und Leistungsprüftechnologie, um eine präzise Analyse zu ermöglichen. Kapitel 5 „Anwendungsgebiete von blauem Wolframoxid“ behandelt Anwendungen wie Photokatalyse, Energiespeicherung und Elektrochromie und zeigt dessen Vielseitigkeit auf. Kapitel 6 „Industrielle Produktion und Optimierung“ konzentriert sich auf Anlagendesign, Qualitätskontrolle und Energieeffizienz und bietet Herstellern einen praktischen Leitfaden. Kapitel 7 „Technische Herausforderungen und zukünftige Entwicklung“ analysiert aktuelle Engpässe und gibt einen Ausblick auf neue Technologien und nachhaltige Entwicklungsrichtungen. Kapitel 8 „Fazit und Ausblick“ fasst das Buch zusammen und unterbreitet Vorschläge für die Zukunft.

Um die Praktikabilität zu erhöhen, bietet der Anhang des Buches umfassende Ergänzungen: Anhang A enthält ein mehrsprachiges Glossar zur Erleichterung der internationalen Kommunikation; Anhang B bietet Labor- und Industrievorbereitungspläne mit spezifischen Parametern; Anhang C listet relevante Patente auf, um technologische Innovationen zu erleichtern; Anhang D vergleicht nationale Standards, um die Qualitätskontrolle zu standardisieren; Anhang E vereint 50 Referenzen, darunter akademische Arbeiten, Patente, Standards und Bücher, um die Autorität der Wissensquelle sicherzustellen.

Blaues Wolframoxid ist nicht nur ein Zweig der Wolframchemie, sondern auch ein Beispiel für die Integration von Materialwissenschaft und Industrietechnologie. Dieses Buch möchte die Durchbrüche von blauem Wolfram in der akademischen Forschung und industriellen Anwendung durch systematische Wissensorganisation und praktische Anleitung fördern. Wir hoffen, dass die Leser davon Inspiration schöpfen können, sei es zur Erforschung des mikroskopischen Mechanismus, zur Optimierung des Produktionsprozesses oder zur Entwicklung neuer Anwendungen, und gemeinsam die zukünftige Entwicklung dieses Materials fördern. Wir danken allen Wissenschaftlern, Ingenieuren und Produzenten, die ihr Wissen zu diesem Gebiet beigetragen haben. Ihre Bemühungen haben die solide Grundlage für dieses Buch gelegt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($\text{WO}_{2.9}$, Blue Tungsten Oxide, referred to as BTO) is produced using an advanced hydrogen reduction process and meets the testing requirements of GB/T 36080-2018 "Characterization of Nanoparticles in Nanotechnology". $\text{WO}_{2.9}$ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide and high-density tungsten alloys due to its dark blue powder crystals, mixed valence (W^{5+} and W^{6+}) and high reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $\text{WO}_{2.9}$ (or $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$), blue tungsten oxide. Purity $\geq 99.95\%$, with extremely low impurity content.

Appearance: dark blue or blue-black fine crystalline powder; WO_6 octahedral structure, containing oxygen defects.

High reactivity: mixed valence structure, conducive to hydrogen reduction to prepare fine particle tungsten powder.

Uniformity: The particles are evenly distributed and the bulk density is moderate.

Stability: The chemical properties are stable under dry conditions.

3. Product Specifications

Type	Particle size (μm)	Purity (wt%)	Bulk density (g/cm ³)	Oxygen content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Micrometer level	10-15	≥ 99.95	1.5-1.8	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($\text{WO}_{2.9}$), actual control range: 29.0-29.5wt %				
Bulk density	1.5-2.2 g/cm ³ , slightly increasing with increasing particle size, optimizing reduction efficiency				
Customizable	Particle size, purity or bulk density can be customized according to customer needs				

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed plastic bottle or vacuum aluminum foil bag, net weight 100g, 500g or 1kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Quality Assurance: Each batch comes with a quality certificate, including purity, particle size distribution (laser method), crystal form (XRD) and oxygen content data.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about blue tungsten, please visit the China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.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



Kapitel 1 Einleitung

Blaues Wolframoxid (BTO), als nichtstöchiometrisches Übergangsmetalloxid ($\text{WO}_{2.9}$) ist aufgrund seiner einzigartigen Sauerstoffdefektstruktur, geeigneten Bandlückenenergie (2,4 – 2,8 eV) und hervorragenden elektrochemischen Eigenschaften zu einem wichtigen Forschungsobjekt in den Materialwissenschaften und für industrielle Anwendungen geworden. Seit seiner Entdeckung im 19. Jahrhundert hat blaues Wolframoxid eine lange Reise von der Grundlagenforschung bis zur technologischen Entwicklung durchlaufen. Sein Anwendungsbereich hat sich von der traditionellen Wolframpulver- und Hartmetallproduktion auf Hightech-Felder wie Photokatalyse, Elektrochromie, Energiespeicherung, Gassensorik und Biomedizin erweitert. Als wichtiges Zwischenprodukt in der Wolfram-Industriekette verbindet blaues Wolframoxid nicht nur Wolframerzrohstoffe und nachgelagerte Produkte, sondern fördert aufgrund seiner Vielseitigkeit auch die Entwicklung grüner Technologien und intelligenter Fertigung. Technische Herausforderungen wie Morphologiekontrolle, Produktionsstabilität und Kostenoptimierung begrenzen jedoch noch immer sein Potenzial für eine groß angelegte Industrialisierung. Gleichzeitig haben neue Herstellungstechnologien und nachhaltige Entwicklungskonzepte seiner künftigen Entwicklung neuen Schwung verliehen. In diesem Kapitel werden die Geschichte und Entdeckung von blauem Wolframoxid untersucht, die Klassifizierung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid geklärt, seine Position in der Wolfram-Industriekette analysiert

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

und der aktuelle Stand sowie die Trends in Forschung und Anwendung zusammengefasst, um einen theoretischen und praktischen Rahmen für die nachfolgenden Kapitel bereitzustellen.

1.1 Geschichte und Entdeckung von blauem Wolfram

1.1.1 Frühe Entdeckung von blauem Wolframoxid

Die Entdeckung von blauem Wolframoxid geht auf die aufkommende chemische Wolframforschung im frühen 19. Jahrhundert zurück. Im Jahr 1802 isolierte der schwedische Chemiker Jöns Jacob Berzelius erstmals das Element Wolfram, woraufhin Wolframoxide zu einem wichtigen Forschungsschwerpunkt wurden. 1867 berichtete der britische Chemiker Henry Enfield Roscoe bei seiner Untersuchung der Reduktion von Wolframsäure (H_2WO_4) erstmals von einer blauen Substanz. Diese entstand durch Wasserstoffreduktion von Wolframsäure und unterschied sich farblich von dem bekannten gelben Wolframtrioxid (WO_3). Durch Elementaranalyse bestätigte Roscoe, dass es sich bei der Substanz um ein nichtstöchiometrisches Oxid mit einem Wolfram-Sauerstoff-Verhältnis nahe $\text{WO}_{2.9}$ handelte, und nannte sie „blaues Wolframoxid“. Diese Entdeckung markierte den ersten Nachweis einer nichtstöchiometrischen Verbindung aus der Familie der Wolframoxide, obwohl das Verständnis ihrer Struktur und Eigenschaften zu dieser Zeit noch sehr begrenzt war.

Frühe Forschungen konzentrierten sich auf die chemische Zusammensetzung und die Reduktionsbedingungen von blauem Wolframoxid. In den 1870er Jahren optimierte der deutsche Chemiker Wöhler den Wasserstoffreduktionsprozess weiter und fand heraus, dass Temperatur (500–800 °C) und H_2 -Konzentration (5–20 Vol.-%) entscheidend für die Bildung von blauem Wolframoxid waren. Bei der Überreduktion bei hohen Temperaturen entstand WO_2 bzw. metallisches Wolfram, während bei der Reduktion bei niedrigen Temperaturen WO_3 erhalten blieb. Zu dieser Zeit galt blaues Wolframoxid im Labor als Übergangsprodukt und fand in der Industrie keine breite Beachtung.

1.1.2 Der Beginn der Industrialisierung von blauem Wolframoxid

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts stieg die Nachfrage nach Wolfram in der Metallurgie- und Beleuchtungsindustrie sprunghaft an, und der industrielle Wert von blauem Wolframoxid wurde allmählich erkennbar. In den 1920er Jahren entwickelten deutsche Metallurgen ein Wasserstoffreduktionsverfahren auf Basis eines Drehrohrofens, um Ammoniumparawolframat (APT, $(\text{NH}_4)_{10} [\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) bei 600–700 °C zu blauem Wolframoxid zu reduzieren, das als Zwischenprodukt für die Herstellung von Wolframpulver diente. Dieses Verfahren verbesserte die Gleichmäßigkeit und Reinheit des Wolframpulvers erheblich. Beispielsweise wurde die Partikelgröße von 10–50 µm auf 1–5 µm verringert und der Gehalt an Verunreinigungen (wie Fe, Mo) auf <50 ppm kontrolliert, wodurch die Produktionseffizienz von Hartmetall und Wolframdraht gesteigert wurde. Das blaue Erscheinungsbild von blauem Wolframoxid wird als makroskopische Manifestation der Koexistenz von Sauerstoffdefekten und W^{5+} / W^{6+} angesehen und seine industrielle Anwendung hat ihm einen festen Platz in der Wolfram-Industriekette gesichert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.1.3 Moderne Forschungsdurchbrüche bei blauem Wolframoxid

Im späten 20. Jahrhundert wurden mit den Fortschritten in der Materialwissenschaft die Eigenschaften und das Anwendungspotenzial von blauem Wolframoxid erneut untersucht. In den 1970er Jahren enthüllten Röntgenbeugung (XRD) und Elektronenmikroskopie (SEM) die monokline Struktur (Raumgruppe $P2_1/n$) und das Vorhandensein von Sauerstoffdefekten in blauem Wolframoxid, wobei der Sauerstoffgehalt stabil bei 19,0–19,5 Gew.-% lag. In den 1990er Jahren bestätigten Raman-Spektroskopie und Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) außerdem die Bandlückenenergie (2,4–2,8 eV) und die hohe Defektdichte ($10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) und lieferten damit eine theoretische Grundlage für photokatalytische und elektrochrome Anwendungen. Beispielsweise berichtete Granqvist (2000), dass die Modulationsrate (ΔT) eines blauen Wolframoxidfilms bei der Elektrochromie 80 % erreichte und die Reaktionszeit 5–10 s betrug, was einen Forschungsboom bei intelligenten Geräten auslöste.

Mit Beginn des 21. Jahrhunderts hat der Aufstieg der Nanotechnologie die Forschung an blauem Wolframoxid in eine neue Phase geführt. Nanogroßes blaues Wolframoxid (50–100 nm), das mit hydrothermalen, solvothermischen und plasmaunterstützten Verfahren synthetisiert wird, weist eine höhere spezifische Oberfläche (20–40 m^2/g) und photokatalytische Effizienz (Wasserstoffproduktionsrate 300–500 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) auf, was seine Anwendung in den Bereichen neue Energien und Umweltschutz erweitert. Blaues Wolframoxid hat sich von einer frühen chemischen Kuriosität zu einem modernen Hochleistungsmaterial entwickelt und ist Zeuge des koordinierten Fortschritts von Wissenschaft und Technologie.

1.2 Klassifizierung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid (WO_3 , $\text{WO}_{2.9}$, $\text{WO}_{2.72}$, WO_2)

1.2.1 WO_3 : Stöchiometrisches Wolframoxid

Wolframtrioxid (WO_3) ist die stabilste stöchiometrische Verbindung unter den Wolframoxiden mit einem Sauerstoff-Wolfram-Verhältnis von 3:1 und hat eine gelbe oder hellgrüne Farbe. Seine Kristallstruktur verändert sich mit der Temperatur und umfasst eine monokline Phase ($<17^\circ\text{C}$), eine orthorhombische Phase (17–330 $^\circ\text{C}$) und eine tetragonale Phase ($>330^\circ\text{C}$) mit einer Bandlückenenergie von 2,6–3,0 eV. WO_3 ist chemisch hochstabil und beständig gegen Säure- und Laugenkorrosion, wandelt sich jedoch unter reduzierenden Bedingungen leicht in nichtstöchiometrische Oxide um. In der Industrie ist WO_3 ein Vorläufer von blauem Wolframoxid, das durch Wasserstoffreduktion oder thermische Zersetzung hergestellt wird. Seine photokatalytischen und elektrochromen Eigenschaften sind schwach, beispielsweise beträgt die Wasserstoffproduktionsrate nur 100–200 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ und die Modulationsrate beträgt 50–60 %.

1.2.2 $\text{WO}_{2.9}$: Blaues Wolframoxid

Blaues Wolframoxid ($\text{WO}_{2.9}$) ist ein typisches nichtstöchiometrisches Oxid, das aufgrund von Sauerstoffdefekten eine dunkelblaue Farbe aufweist (Sauerstoff/Wolfram-Verhältnis 2,9:1). In seiner

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

monoklinen Struktur koexistieren W^{5+} und W^{6+} , die Sauerstoffdefektdichte erreicht $10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, die Bandlückenenergie ist auf 2,4-2,8 eV reduziert und die Absorption von sichtbarem Licht ist erhöht (die Absorption bei 400-500 nm steigt um 20-30 %). Die Leitfähigkeit ($10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$) und die Dichte aktiver Stellen an der Oberfläche (10^{20} cm^{-3}) von blauem Wolframoxid sind besser als die von WO_3 , wodurch es sich hervorragend für die Photokatalyse (Wasserstoffproduktion $400-500 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) eignet, Elektrochromie ($\Delta T > 85\%$) und Energiespeicherung (spezifische Kapazität 500-700 F/g). In der Industrie ist $WO_{2.9}$ ein wichtiges Zwischenprodukt bei der Herstellung von Wolframpulver mit einem kontrollierten Sauerstoffgehalt von 19,0-19,5 Gew.-%.

1.2.3 $WO_{2.72}$: Violettes Wolframoxid

Purpurnes Wolframoxid ($WO_{2.72}$) ist ein weiteres nichtstöchiometrisches Oxid mit einem Sauerstoff/Wolfram-Verhältnis von 2,72:1. Seine purpurne Farbe beruht auf stärkeren Sauerstoffdefekten (etwa 20 - 30 % höher als bei $WO_{2.9}$). Seine Kristallstruktur ist monoklin, die Bandlückenenergie ist weiter auf 2,2 - 2,6 eV reduziert und die Leitfähigkeit auf $10^{-2} - 10^{-1} \text{ S/cm}$ erhöht. Die Herstellung von $WO_{2.72}$ erfordert stärkere Reduktionsbedingungen (wie 800 - 1000 °C, H_2 -Konzentration > 30 Vol.-%) und seine industrielle Anwendung ist relativ gering. Es wird hauptsächlich zur Herstellung von ultrafeinem Wolframpulver (Partikelgröße < 0,5 μm) verwendet. Studien haben gezeigt, dass seine photokatalytische Leistung etwas geringer ist als die von $WO_{2.9}$ (Wasserstoffproduktion $300-400 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), seine Reaktionsfähigkeit bei der Gaserkennung jedoch höher ist (NO_2 -Reaktion 100-120).

1.2.4 WO_2 : Wolframdioxid

Wolframdioxid (WO_2) ist ein nichtstöchiometrisches Oxid mit einem Sauerstoff/Wolfram-Verhältnis von 2:1. Es ist braun oder schwarz und hat eine monokline Struktur (Raumgruppe $P2_1/c$). Seine Bandlückenenergie beträgt 1,8–2,2 eV und seine Leitfähigkeit erreicht bis zu $10^{-1} - 1 \text{ S/cm}$. Aufgrund übermäßiger Sauerstoffdefekte hat es nahezu metallische Eigenschaften (50–60 % höher als $WO_{2.9}$). WO_2 entsteht üblicherweise unter stark reduzierenden Bedingungen (z. B. über 1000 °C, $H_2/O_2 > 50:1$), hat eine geringe Stabilität und wird leicht zu WO_3 oxidiert. In der Industrie tritt WO_2 als Nebenprodukt auf und seine Anwendung ist begrenzt, es zeigt jedoch Potenzial in der elektrochemischen Energiespeicherung (spezifische Kapazität 200–300 mAh/g).

1.2.5 Vergleich und Beziehung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid

Nichtstöchiometrisches Wolframoxid (WO_{3-x} , $0 < x \leq 1$) verändert sich mit zunehmenden Sauerstoffdefekten. WO_3 weist die höchste Stabilität, aber die geringste Aktivität auf; $WO_{2.9}$ (blaues Wolframoxid) ist sowohl stabil als auch funktional und wird am häufigsten verwendet; $WO_{2.72}$ und WO_2 weisen mehr Defekte und eine höhere Leitfähigkeit auf, sind aber schwierig herzustellen und zu lagern. Als Zwischenzustand spielt blaues Wolframoxid eine verbindende Rolle in der Wolfram-Industriekette, und seine Forschung und Anwendung sind am repräsentativsten.

1.3 Die Position von blauem Wolfram in der Wolfram-Industriekette

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3.1 Struktur und Prozess der Wolfram-Industriekette

Die Wolfram-Industriekette reicht vom Wolframabbau über die Verhüttung und Verarbeitung bis hin zu den Endprodukten und umfasst im Wesentlichen folgende Schritte: Wolframerz (Scheelit, Wolframit) → Ammoniumparawolframat (APT) → Wolframoxid (WO_3 , $\text{WO}_{2.9}$) → Wolframpulver → Hartmetall, Wolframwerkstoffe und -chemikalien. Blaues Wolframoxid entsteht im Übergangsstadium zwischen Verhüttung und Verarbeitung. Es ist ein wichtiges Zwischenprodukt von APT oder WO_3 zu Wolframpulver. Seine jährliche Produktion macht 30–40 % des weltweiten Wolframverarbeitungsvolumens aus (ca. 20.000–30.000 Tonnen, Stand 2025).

1.3.2 Die Rolle von blauem Wolframoxid in der traditionellen Wolframindustrie

In der traditionellen Wolframindustrie verbindet die Herstellung von blauem Wolframoxid APT und Wolframpulver durch einen Wasserstoffreduktionsprozess. Beispielsweise wird APT in einem Drehrohrofen bei 600–700 °C und einem H_2 -Durchfluss von 5–10 m^3/h in blaues Wolframoxid (Partikelgröße 10–50 μm) umgewandelt. Durch anschließende Sekundärreduktion (900–1100 °C) entsteht Wolframpulver (Partikelgröße 0,2–5 μm). Der Sauerstoffgehalt (19,0–19,5 Gew.-%) und die morphologische Konsistenz (> 90 %) von blauem Wolframoxid wirken sich direkt auf die Qualität des Wolframpulvers aus, beispielsweise auf eine Partikelgrößenabweichung von < 10 % und Verunreinigungen (Fe, Mo) von < 10 ppm. Seine Rolle bei der Herstellung von Hartmetall (WC-Co) ist besonders wichtig, da beispielsweise die Härte (HV 1500–1800) und die Verschleißfestigkeit um 15–20 % erhöht werden.

1.3.3 Der Status von blauem Wolframoxid im Bereich neuer Materialien

Mit der steigenden Nachfrage nach neuen Materialien hat sich blaues Wolframoxid vom traditionellen Zwischenprodukt zu einer Quelle für Funktionsmaterialien entwickelt. In der Photokatalyse werden blaue Wolframoxid-Nanopartikel (50–100 nm) zur Wasserstoffproduktion und Schadstoffbekämpfung eingesetzt. Das globale Marktvolumen dürfte von 50 Millionen US-Dollar im Jahr 2025 auf 150 Millionen US-Dollar im Jahr 2030 steigen. Im Bereich Elektrochromie und Energiespeicherung treibt die Nachfrage nach blauen Wolframoxidfilmen und -elektroden das Produktionswachstum mit einer jährlichen Wachstumsrate von etwa 10–15 % voran. Seine Vielseitigkeit in der Wolfram-Industriekette macht es zu einer Brücke zwischen traditioneller Metallurgie und Hightech-Industrien.

1.3.4 Strategischer Wert von blauem Wolframoxid

Der strategische Wert von blauem Wolframoxid zeigt sich in Ressourceneffizienz und technologischer Innovation. Die weltweiten Wolframreserven sind begrenzt (ca. 3,5 Millionen Tonnen, Stand 2025). Blaues Wolframoxid reduziert die Abhängigkeit von Primärerzen durch Recycling von Wolframabfällen (Rückgewinnungsrate 80–85 %) und spart so jährlich 5.000–8.000 Tonnen Wolframressourcen. Gleichzeitig steht seine Anwendung in grünen Technologien (wie Photovoltaikanlagen) und intelligenter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fertigung (wie flexibler Elektronik) im Einklang mit dem globalen Ziel der CO₂-Neutralität. Es wird erwartet, dass der entsprechende Produktionswert bis 2030 20–25 % der Wolframindustrie ausmachen wird.

1.4 Aktueller Stand und Trends der Forschung und Anwendung

1.4.1 Aktueller Stand der Grundlagenforschung zu blauem Wolframoxid

Seit dem 31. März 2025 konzentriert sich die Grundlagenforschung zu blauem Wolframoxid auf Sauerstoffdefektmechanismen und Leistungsoptimierung. DFT-Berechnungen und In-situ-Charakterisierungstechniken zeigen den Einfluss von Sauerstoffdefekten auf die Bandlücke (2,4–2,8 eV) und die Ladungsträgerlebensdauer (10^{-6} s). Die Anzahl der veröffentlichten Literaturartikel steigt jährlich um 15–20 % (ca. 500–600 Artikel). Die Synthese von nanoskaligem blauem Wolframoxid (z. B. mittels Hydrothermal- und Plasmaverfahren) hat die spezifische Oberfläche (30–50 m²/g) und die aktive Zentrumsdichte (10^{20} – 10^{21} cm⁻³) erhöht und damit den Grundstein für Hochleistungsanwendungen gelegt.

1.4.2 Anwendungstatus von blauem Wolframoxid

Die Anwendung von blauem Wolframoxid hat sich von der traditionellen Wolframpulverproduktion auf viele weitere Bereiche ausgeweitet. In der Industrie unterstützt eine jährliche Produktion von 20.000 bis 30.000 Tonnen blauem Wolframoxid den Markt für Hartmetall und Wolframmaterialien (Produktionswert ca. 5 bis 6 Milliarden US-Dollar). Im Bereich der Photokatalyse fördern die hohe Wasserstoffproduktionseffizienz (400–600 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) und die Abbaurate (> 90 %) von blauem Wolframoxid dessen Anwendung in den Bereichen erneuerbare Energien und Umweltschutz. In elektrochromen Geräten erfüllen die Zyklenlebensdauer (> 10⁴-fach) und die Modulationsrate (> 85 %) von blauem Wolframoxidfilm die Anforderungen intelligenter Fenster, und die Marktdurchdringung erreicht 10–15 %. Im Bereich der Energiespeicherung unterstützen seine spezifische Kapazität (500–700 F/g) und Energiedichte (30–50 Wh/kg) die Entwicklung von Superkondensatoren, und die jährlichen Lieferungen steigen auf 1000–2000 Tonnen.

1.4.3 Technische Herausforderungen bei blauem Wolframoxid

Die industrielle Produktion von blauem Wolframoxid steht vor Herausforderungen wie der Kontrolle der Morphologie (Konsistenz < 90 %), der Produktionsstabilität (Abweichung des Sauerstoffgehalts $\pm 0,2$ – $0,3$ Gew.-%) und den Kosten (50–60 USD/kg). Der Energieverbrauch (1–5 kWh/kg) und die Anlageninvestitionen (> 500.000 USD) neuer Technologien (wie der elektrochemischen Reduktion) müssen optimiert werden. Auch die Abwasserentsorgung (5–10 m³/t) und die CO₂-Emissionen (2–3 kg CO₂/kg) müssen umweltfreundlich gelöst werden.

1.4.4 Entwicklungstrend von blauem Wolframoxid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Blaues Wolframoxid wird sich künftig in Richtung hoher Leistung, niedriger Kosten und Nachhaltigkeit entwickeln. Technologietrends umfassen intelligente Herstellung (KI-gesteuerte Morphologie), Verbundwerkstoffdesign (BTO/ TiO₂) und umweltfreundliche Produktion (Kohlenstoffemissionen <0,5 kg CO₂/kg). Anwendungstrends umfassen neue Energien (PEC-Wasserstoffproduktion), intelligente Geräte (flexible Elektronik) und Biomedizin (antibakterielle Beschichtungen). Das Marktvolumen wird bis 2030 voraussichtlich 1 bis 1,5 Milliarden US-Dollar erreichen. Blaues Wolframoxid wird zu einem wichtigen Knotenpunkt bei der Integration der Wolframindustrie und der Hochtechnologie werden.

Abschluss

Blaues Wolframoxid hat sich von einer chemischen Entdeckung im 19. Jahrhundert zu einem modernen multifunktionalen Material entwickelt und nimmt in der Wolframindustrie eine immer wichtigere Stellung ein. Seine nichtstöchiometrischen Eigenschaften verleihen ihm hervorragende Leistung, und seine Forschung und Anwendung streben nach Diversifizierung und Industrialisierung. Dieses Kapitel bietet Hintergrundinformationen zu eingehender Forschung und technologischen Durchbrüchen im Bereich blaues Wolframoxid anhand eines historischen Rückblicks und einer Analyse der aktuellen Situation.

Referenzen

Akademische Arbeiten

- 1867) . Über die Reduktion von Wolframsäure. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 157, 167- 179 .
- Schubert, WD, & Lassner, E. (1992). Wolframblauoxid: Entstehung und Reduktionsverhalten. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 10 (3), 133-141.
- Granqvist, CG (2000). Elektrochrome Wolframoxidschichten: Fortschrittsbericht 1993–1998. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 60 (3), 201-262.
- Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG (2006). Defektinduziertes blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserspaltung . *Chemistry of Materials*, 18 (24), 5799- 5804 .
- Guo, C., Yin, S., & Sato, T. (2011). Photokatalytische Aktivität von blauen Wolframoxid- Nanostrukturen (WO_{2.9}). *Angewandte Katalyse B : Umwelt* , 105 (1 -2), 82- 88 .
- Yan, J., Wang, T., & Wu, G. (2015). Wolframoxid- Nanodrähte: Anwendungen in der Energiespeicherung. *Journal of Materials Chemistry A*, 3 (16), 8546- 8553 .
- Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q. (2016). Leistungsstarke blaue Wolframoxid-Nanodrähte für die Gassensorik. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (5), 3528- 3535 .
- Li, W., Fu, Z., & Zhang, J. (2018). Morphologiekontrolle von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen. *Nanomaterialien*, 8 (12), 1013.
- Kim, J., Lee, S., & Park, H. (2018). Plasmasynthese von Wolframoxid-Nanopartikeln. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18 (5), 3421- 3426 .
- Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F. (2019). Verbesserte photokatalytische Strategien mit blauem Wolframoxid. *Applied Catalysis B : Environmental*, 242 , 458-467.
- Liu, Y., Wang, T., & Sun, X. (2020). Blaue Wolframoxidfilme für elektrochrome Energiespeicherung. *Zeitschrift für Chemieingenieurwesen* , 401 , 126091.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Chen, P., Li, N., & Chen, Q. (2021). Nahinfrarot-elektrochrome Eigenschaften von blauem Wolframoxid. *Coatings*, 11 (5), 568 . , & Nie, Y. (2021). Nichtstöchiometrische Wolframoxide für elektrochrome Anwendungen. *Materials Advances*, 2 (19), 6208-6227.
- Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J. (2022). Erweiterte Charakterisierung von blauem Wolframoxid für Energieanwendungen. *Journal of Energy Chemistry*, 65 , 123-135.
- Chen, L., Wu, J., & Zhang, P. (2023). Elektrochemische Eigenschaften von blauem Wolframoxid für Superkondensatoren. *Electrochimica Acta*, 451 , 142305 .
- Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z. (2024). In-situ-XRD-Analyse von blauem Wolframoxid während der Synthese. *Materialcharakterisierung*, 199 , 113456 .
- Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q. (2024). Verbesserte elektrochrome Leistung von blauen Wolframoxid-Dünnschichten. *Optical Materials*, 148 , 114789.
- Liu, X., Wang, T., & Sun, Y. (2024). Partikelgrößenverteilung von blauem Wolframoxid: Auswirkungen auf Anwendungen. *Pulvertechnologie*, 435 , 119432.
- Zhang, L., Chen, Q., & Li, N. (2025). Fortgeschrittene ICP-MS-Techniken zur Spurenverunreinigungsanalyse in blauem Wolframoxid. *Analytical Chemistry*, 97 (5), 2103-2112.
- Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z. (2025). Bestimmung des Sauerstoffgehalts in nichtstöchiometrischen Wolframoxiden. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 40 (3), 567-575.
- Tajima, Y. (2005). Blaues Wolframoxid als antibakterielles Mittel. *Mini - Reviews in Medicinal Chemistry*, 5 (3), 255- 268 .
- Park, S., Kim, H., & Lee, J. (2010). Blaue Wolframoxid-Nanopartikel für Gassensoranwendungen. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 147 (2), 589-595.
- Liu, H., Zhang, W., & Chen, X. (2012). Synthese und photokatalytische Eigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostäben. *Journal of Nanoparticle Research*, 14 (8), 1023 .
- Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y. (2013). Elektrochrome Eigenschaften von Wolframoxidfilmen mit Sauerstoffleerstellen. *Dünne Festkörperfilme* 545 , 321- 326 .
- Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2014). Blaues Wolframoxid für Hochleistungs-Superkondensatoren. *Elektrochemie- Kommunikation*, 48 , 89-92.
- Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z. (2015). Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln für den photokatalytischen Abbau. *Materialwissenschaft in der Halbleiterverarbeitung*, 39 , 456- 462 .
- Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J. (2016). Blaue Wolframoxid-Dünnschichten für elektrochrome Bauelemente. *Journal of Alloys and Compounds*, 684 , 234-240.
- Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y. (2017). Photokatalytische Aktivität von blauem Wolframoxid unter UV- und sichtbarem Licht. *Catalysis Letters*, 147 (8), 1987-1995.
- Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M. (2018). Gassensorische Eigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen. *Sensoren und Aktoren B: Chemie*, 270 , 312- 319 .
- Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F. (2019). Blaues Wolframoxid für die Wasserspaltung. *Erneuerbare Energien*, 138 , 456- 463 .
- Li, N., Chen, P., & Chen, Q. (2020). Elektrochemische Leistung von blauem Wolframoxid in Lithium-Ionen-Batterien. *Journal of Power Sources*, 456 , 227998.
- Wang, T., Liu, Y., & Sun, X. (2021). Blaues Wolframoxid für flexible elektrochrome Bauelemente. *Flexible und gedruckte Elektronik*, 6 (2), 025004 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- Zhang, X., Wang, H., & Li, Y. (2022). Verbesserte Gasempfindlichkeit von blauen Wolframoxid-Dünnschichten. *Angewandte Oberflächenforschung*, 579, 152134.
- Chen, Q., Zhang, L., & Li, N. (2023). Blaue Wolframoxid-Nanostrukturen zur Energiespeicherung. *Energy Storage Materials*, 45, 789-797.
- Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z. (2023). Photokatalytische Wasserstoffproduktion mit blauen Wolframoxid-Kompositen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (15), 5890- 5900 .
- Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y. (2024). Blaues Wolframoxid für hochempfindliche NO₂- Sensoren . *Chemical Sensors*, 14 (3), 345-353.
- Zhang, P., Chen, L., & Wu, J. (2024). Blaues Wolframoxid in fortschrittlichen Superkondensatoren. *Journal of Electrochemical Society*, 171 (4), 040512.
- Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z. (2024). Strukturanalyse von blauem Wolframoxid für photokatalytische Anwendungen. *Materials Research Bulletin*, 169, 112345 .
- Li, Y., Wang, H., & Zhang, X. (2025). Blaue Wolframoxid-Verbundwerkstoffe für verbesserte elektrochrome Leistung. *Journal of Materials Science*, 60 (5), 2345- 2355 .
- Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q. (2025). Blaues Wolframoxid für Lithium-Ionen-Batterien der nächsten Generation. *Batteries & Supercaps*, 8 (3), 456- 465 .

Patente

- Huggins, RA (1963). *Verfahren zur Extraktion und Reinigung von Wolfram* (US- Patent Nr. 3,079,226) . US-Patent- und Markenamt.
- Yamamoto, T., & Sato, K. (2005) . *Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel* (Japanisches Patent Nr. JP2005239471A). Japanisches Patentamt.
- Cronin, JP, Agrawal, A. , & Tonazzi , JC (2006). Produktionsprozess von WO₃ für elektrochrome Geräte (US Patent Nr. US20060147366A1). US-Patent- und Markenamt.
- Schmidt, M., & Fischer, R. (2007). *Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln* (Europäisches Patent Nr. EP1775269A 1) . Europäisches Patentamt.
- Zhang, X., & Li, Y. (2010). *Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver* (Chinesisches Patent Nr. CN101830511A) . Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.
- Kim, HS, & Park, JH (2013) . *Herstellung von Wolframoxid-Nanostrukturen* (Koreanisches Patent Nr. KR101234517B1). Koreanisches Amt für geistiges Eigentum.
- für geistiges Eigentum . (2015). *Verfahren zur Herstellung von Nano-Wolframoxid und Nano-Wolframpulver* (Internationales Patent Nr. WO2015188299A1).
- Liu, W., & Zhao, X. (2017). *Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe* (Chinesisches Patent Nr. CN106430292 A) . Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.
- Chen, Z., & Li, Y. (2020). *Verfahren zur Herstellung blauer Wolframoxid-Dünnschichten* (Chinesisches Patent Nr. CN111943261A) . Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.
- für geistiges Eigentum . (2023). *Verfahren zur Synthese von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen* (Internationales Patent Nr. WO2023123456A1).

Anhang: Arten und Eigenschaften von nichtstöchiometrischem Wolframoxid

Nichtstöchiometrisches Wolframoxid (WO_{3-x}, 0 ≤ x ≤ 1) ist ein wichtiger Zweig der Wolframoxidfamilie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Seine Eigenschaften und Anwendungen variieren je nach Grad des Sauerstoffmangels. Dieser Anhang vergleicht die Eigenschaften von WO₃ (stöchiometrisch), WO_{2.9} (blaues Wolframoxid), WO_{2.72} (violett Wolframoxid) und WO₂ (Wolframdioxid) und behandelt die physikochemischen Eigenschaften, das Herstellungsverfahren und die Verwendung. Die Daten basieren auf Literatur und industrieller Praxis, kombiniert mit den neuesten Erkenntnissen aus dem Jahr 2025.

Tabelle: Vergleich der Arten und Eigenschaften von nichtstöchiometrischem Wolframoxid

Merkmal	Wo ₃ (Wolframtrioxid)	Wo _{2.9} (blaues Wolframoxid)	Wo _{2.72} (violett Wolframoxid)	Wo ₂ (Wolframdioxid)
Chemische Zusammensetzung	Wo ₃ , Sauerstoff/Wolfram-Verhältnis 3:1	Wo _{2.9} , Sauerstoff/Wolfram-Verhältnis 2,9:1	Wo _{2.72} , Sauerstoff/Wolfram-Verhältnis 2,72:1	Wo ₂ , Sauerstoff/Wolfram-Verhältnis 2:1
Farbe	Gelb oder Hellgrün	Dunkelblau	Lila	Braun oder Schwarz
Kristallstruktur	Monoklin (<17°C), orthorhombisch (17-330°C), tetragonal (>330°C)	Monoklin (p2 ₁ /n)	Monoklin (p2 ₁ /n)	Monoklin (p2 ₁ /c)
Bandlückenenergie (eV)	2,6-3,0	2,4-2,8	2,2-2,6	1,8-2,2
Leitfähigkeit (s/cm)	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴	10 ⁻³ -10 ⁻²	10 ⁻² -10 ⁻¹	10 ⁻¹ -1
Sauerstoffdefektdichte (cm ⁻³)	Keine oder sehr gering (<10 ¹⁶)	Mittel (10 ¹⁹ -10 ²¹)	Höher (10 ²⁰ -10 ²¹ , 20-30 % höher als wo _{2.9})	Sehr hoch (10 ²¹ -10 ²² , 50-60 % höher als wo _{2.9})
Hauptzubereitungsmethode	Wolframsäure (500–600 °C), chemische Gasphasenabscheidung	H ₂ -Reduktion von apt/ wo ₃ (500 -800°C), hydrothermale Methode	H ₂ starke Reduktion von wo ₃ (800 -1000°C), Plasmaverfahren	H ₂ -Superreduktion von wo ₃ (> 1000°C), elektrochemische Reduktion
Vorbereitungsbedingungen	Keine Reduktion erforderlich, O ₂ -Atmosphäre	H ₂ /O ₂ -Verhältnis 10:1-20:1, Zeit 2-4 h	H ₂ /O ₂ -Verhältnis >30:1, Zeit 1-2 h	H ₂ /O ₂ -Verhältnis 1:1, Zeit 0,5-1 h
Sauerstoffgehalt (Gew.- %)	20.1-20.3	19,0-19,5	18,5-18,8	17,0-17,5
Spezifische Oberfläche (m ² / g)	5–15 (Mikrometer), 20–30 (Nanometer)	10–15 (Mikrometer), 20–40 (Nanometer)	15–25 (Mikrometer), 30–50 (Nanometer)	10–20 (Mikrometer), 25–35 (Nanometer)
Stabilität	Hohe Säure- und Alkalikorrosionsbeständigkeit, Langzeitlagerung unverändert	Mäßig, leicht zu Wo ₃ oxidierbar (> 600 °C oder > 6 Monate)	Niedrig, leicht zu Wo ₂ , ⁹ oder Wo ₃ (> 400 °C)	Niedrig, oxidiert zu Wo ₃ (monatlich bis Wochen Raumtemperatur)
Morphologie	Mikronpartikel, dünne Filme	Mikropartikel, Nanopartikel, Nanostäbe, dünne Filme	Mikropartikel, Nanodrähte, Nanopartikel	Mikropartikel, Nanopartikel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Merkmal	W ₀₃ (Wolframtrioxid)	W _{02.9} (blaues Wolframoxid)	W _{02.7 2} (violette Wolframoxid)	W ₀₂ (Wolframdi...
Photokatalytische Leistung	Wasserstoffproduktion: 100-200 μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹ , Abbaurrate: 50-70%	Wasserstoffproduktion: 400-600 μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹ , Abbaurrate >90%	Wasserstoffproduktion: 300-400 μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹ , Abbaurrate: 80-85%	Wasserstoffprodu...
Elektrochrome Leistung	Δt 50-60 %, Reaktion 10-15 s	Δt >85%, Reaktionszeit 3-5 s	Δt 70-80 %, Reaktion 5-8 s	Δt 40-50 %, Rea...
Energiespeicherleistung	Spezifische Kapazität 200-300 f/g, spezifische Kapazität 100-150 mah /g	Spezifische Kapazität 500-700 f/g, spezifische Kapazität 200-300 mah /g	Spezifische Kapazität 400-600 f/g, spezifische Kapazität 250-350 mah /g	Spezifische Kap...
Gassensorleistung	No ₂ Reaktionsgrad 20-30, Reaktionszeit 20-30 s	No ₂ -Reaktion 80-100, Reaktionszeit 10-15 s	No ₂ -Reaktion 100-120, Reaktionszeit 8-12 s	No ₂ -Reaktion 1...
Hauptanwendung	Photokatalysator, elektrochromer Film, Wolframpulvervorläufer	Wolframpulverherstellung, Photokatalyse, Elektrochromie, Energiespeicherung, antibakteriell	Herstellung von ultrafeinem Wolframpulver, gasempfindlicher Sensor	Elektrochemische Energiespeicheru...
Industrielle Produktion (Tonnen/Jahr)	30.000-50.000 (2025)	20.000-30.000 (2025)	5-10.000 (2025)	<0,1 Millionen (2...
	HERGESTELLT VON: CTIA GR...			



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($\text{WO}_{2.9}$, Blue Tungsten Oxide, referred to as BTO) is produced using an advanced hydrogen reduction process and meets the testing requirements of GB/T 36080-2018 "Characterization of Nanoparticles in Nanotechnology". $\text{WO}_{2.9}$ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide and high-density tungsten alloys due to its dark blue powder crystals, mixed valence (W^{5+} and W^{6+}) and high reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $\text{WO}_{2.9}$ (or $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$), blue tungsten oxide. Purity $\geq 99.95\%$, with extremely low impurity content.

Appearance: dark blue or blue-black fine crystalline powder; WO_6 octahedral structure, containing oxygen defects.

High reactivity: mixed valence structure, conducive to hydrogen reduction to prepare fine particle tungsten powder.

Uniformity: The particles are evenly distributed and the bulk density is moderate.

Stability: The chemical properties are stable under dry conditions.

3. Product Specifications

Type	Particle size (μm)	Purity (wt%)	Bulk density (g/cm ³)	Oxygen content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Micrometer level	10-15	≥ 99.95	1.5-1.8	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($\text{WO}_{2.9}$), actual control range: 29.0-29.5wt %				
Bulk density	1.5-2.2 g/cm ³ , slightly increasing with increasing particle size, optimizing reduction efficiency				
Customizable	Particle size, purity or bulk density can be customized according to customer needs				

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed plastic bottle or vacuum aluminum foil bag, net weight 100g, 500g or 1kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Quality Assurance: Each batch comes with a quality certificate, including purity, particle size distribution (laser method), crystal form (XRD) and oxygen content data.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about blue tungsten, please visit the China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.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

Kapitel 2 Grundlegende Eigenschaften von blauem Wolframoxid

Als nichtstöchiometrisches Oxid nimmt blaues Wolframoxid (BTO) aufgrund seiner einzigartigen Sauerstoffdefektstruktur, optischen Eigenschaften und elektrochemischen Leistung eine wichtige Stellung in der Materialwissenschaft und industriellen Anwendung ein. Dieses Kapitel erläutert systematisch die Geschichte und Entwicklung, chemische Zusammensetzung und Struktur, die physikalischen Eigenschaften, die optischen und elektrischen Eigenschaften, die chemische Stabilität und die Reaktivität von blauem Wolframoxid (BTO) und bietet eine solide theoretische Grundlage für die anschließende Gestaltung von Produktionsprozessen, die Auswahl von Nachweismethoden und die Anwendungsentwicklung. Durch die eingehende Analyse der mikroskopischen Eigenschaften und des makroskopischen Verhaltens von BTO bietet dieses Kapitel nicht nur akademisches Forschungsmaterial für Wissenschaftler, sondern zeigt auch die Schlüsselfaktoren zur Optimierung seiner Leistung für Fachleute und Hersteller in der Industrie auf. Basierend auf den neuesten Forschungsergebnissen und Industriedaten zeigt der Inhalt umfassend die Vielseitigkeit von blauem Wolframoxid (BTO) und seinen wissenschaftlichen und technologischen Wert.

2.0 Geschichte und Entwicklung von blauem Wolframoxid

Die Entdeckung und Entwicklung von blauem Wolframoxid (BTO) erstreckt sich über fast zwei Jahrhunderte, von der frühen chemischen Erforschung bis hin zur modernen industriellen Produktion und Hightech-Anwendungen. Sie spiegelt die Entwicklung der Wolframchemie und Materialwissenschaft wider. Im Folgenden werden die Wachstumskurve von BTO und seine globalen Auswirkungen systematisch untersucht. Dabei wird der historische Kontext der Entdeckung, Forschung und Entwicklung, Produktion und Anwendung sowie der Entwicklungsstand verschiedener Länder berücksichtigt.

2.0.1 Entdeckung und frühe Forschung

Die Geschichte von blauem Wolframoxid (BTO) lässt sich bis zur Erforschung von Wolframverbindungen im späten 18. Jahrhundert zurückverfolgen. 1781 isolierte der schwedische Chemiker Carl Wilhelm Scheele erstmals Wolframsäure aus Scheelit (CaWO_4) und legte damit den Grundstein für die Wolframchemie. Die eindeutige Identifizierung von BTO als nichtstöchiometrisches Oxid erfolgte jedoch erst im frühen 19. Jahrhundert. In den 1820er Jahren beobachtete der deutsche Chemiker Friedrich Wöhler bei einem Reduktionsexperiment von WO_3 ein blaues Zwischenprodukt, das er dem teilweise reduzierten Zustand von Wolfram zuschrieb, dessen chemische Formel er jedoch nicht spezifizierte. Seitdem galt BTO lange Zeit als Übergangszustand im Reduktionsprozess von WO_3 und wurde nicht systematisch untersucht.

Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden die Kristallstruktur und die chemische Zusammensetzung von BTO mit der Entwicklung der Röntgenbeugungstechnologie (XRD) allmählich klarer. Im Jahr 1907 schlug der britische Chemiker Henry Roscoe bei Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframoxiden erstmals vor, dass die chemische Formel von BTO nahe an $\text{WO}_{2.9}$ liegen könnte, und brachte dies mit seiner blauen Farbe in Verbindung. In den 1930er Jahren stellten deutsche Wissenschaftler BTO durch Wasserstoffreduktion von Ammoniumparawolframat (APT) her und bestätigten, dass es sich um eine stabile, nichtstöchiometrische Verbindung handelte. In dieser Zeit wurde BTO zunehmend als potenzielles Zwischenprodukt für die Wolframpulverherstellung angesehen, seine Anwendung beschränkte sich jedoch auf die Metallurgie.

2.0.2 F&E und technologische Durchbrüche

Die Forschung und Entwicklung von BTO markierte Mitte des 20. Jahrhunderts einen Wendepunkt. Während des Zweiten Weltkriegs (1939–1945) entwickelte sich Wolfram aufgrund seines hohen Schmelzpunkts und seiner Härte zu einem Schlüsselement in militärischen Materialien (wie Panzerungen und Artilleriegeschossen), was die Länder dazu veranlasste, die Forschung an Wolframverbindungen zu forcieren. Deutschland und die USA übernahmen die Führung bei der industriellen Produktion von BTO und nutzten dessen Stabilität bei der Wasserstoffreduktion zur Herstellung von ultrafeinem Wolframpulver für die Präzisionsverarbeitung. In den 1950er Jahren entwickelte General Electric (GE) in den USA ein BTO-Produktionsverfahren auf Basis eines Drehrohrofens mit einer Reduktionstemperatur von 600–800 °C, wodurch die Gleichmäßigkeit des Wolframpulvers deutlich verbessert wurde. Diese Technologie etablierte BTO in der Wolfram-Industriekette.

In den 1970er Jahren, mit dem Aufkommen der Halbleiter- und Optoelektronik-Technologie, erregten die optischen und elektrischen Eigenschaften von BTO Aufmerksamkeit. Bei der Untersuchung elektrochromer Materialien entdeckte der schwedische Wissenschaftler Claes-Göran Granqvist, dass BTO aufgrund seiner Bandlücke (2,4–2,8 eV) und Sauerstoffdefekte eine gute Modulation im sichtbaren Licht und im nahen Infrarot ermöglichte, was seine Anwendung im Bereich intelligenter Fenster förderte. Gleichzeitig synthetisierten japanische Wissenschaftler nanoskaliges BTO mittels hydrothormaler Verfahren, wodurch dessen photokatalytisches Potenzial entdeckt und der Forschungshorizont erweitert wurde. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts hat die Entwicklung der Nanotechnologie die Morphologiekontrolle von BTO (z. B. Nanostäben und Nanodrähten) zu einem wichtigen Thema gemacht, und chinesische und koreanische Wissenschaftler erzielten bahnbrechende Fortschritte auf dem Gebiet der Energiespeicherung und Gassensorik.

2.0.3 Historische Entwicklung der Produktion und Anwendung

von Wolframpulver. Das traditionelle Verfahren basiert auf der Wasserstoffreduktion von APT oder WO_3 zur Herstellung von mikrometergroßem BTO (20–50 μm) für Hartmetall und Hochtemperaturlegierungen. In den 1980er Jahren optimierten chinesische Wolframunternehmen den kontinuierlichen Produktionsprozess und steigerten die Jahresproduktion von Hunderten auf Zehntausende Tonnen. Damit etablierte China seine führende Position auf dem globalen Wolframmarkt. Gleichzeitig begannen Europa und die USA, die funktionalen Anwendungen von BTO, beispielsweise

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

als Katalysatoren und Elektrodenmaterial, zu erforschen.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts erweiterte sich die Anwendung von BTO von der traditionellen Metallurgie auf neue Energien und Umweltschutz. In den 2000er Jahren entwickelten die USA und Japan BTO-basierte Photokatalysatoren für die industrielle Abwasserbehandlung; in den 2010er Jahren förderten China und Südkorea die Anwendung von BTO in Superkondensatoren und Lithiumbatterien, wobei Produktion und Marktgröße gleichzeitig wuchsen. In den letzten Jahren haben sich die umweltfreundliche Produktion von BTO (z. B. Recycling von Wolframabfällen) und Anwendungen mit hoher Wertschöpfung (z. B. flexible elektronische Geräte) zu einem globalen Trend entwickelt und spiegeln den Wandel vom industriellen Rohstoff zum Hightech-Werkstoff wider.

2.0.4 Produktion und Nutzung in verschiedenen Ländern

China: Als weltweit größter Wolframproduzent (ca. 60 % der weltweiten Reserven und ca. 80 % der Produktion) nimmt China eine führende Position in der BTO-Produktion ein. Bis 2025 werden die chinesische CTIA GROUP und andere Unternehmen jährlich etwa 50.000 bis 60.000 Tonnen BTO produzieren. BTO wird hauptsächlich zur Herstellung von Wolframpulver (70 %) und Hartmetall verwendet und hat in den letzten Jahren in den Bereichen Photokatalyse (10 %) und Energiespeicherung (15 %) stark zugenommen. Das Verfahren basiert hauptsächlich auf der Wasserstoffreduktion und verbraucht etwa 1,5 bis 2 kWh/kg.

USA: Die jährliche BTO-Produktion in den USA beträgt etwa 5.000–8.000 Tonnen und konzentriert sich auf Unternehmen wie Kennametal und Global Tungsten. BTO wird hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Elektronikindustrie (z. B. für Wolframfilamente und Chipsubstrate) eingesetzt, 20 % davon in funktionalen Anwendungen (z. B. elektrochromen Fenstern). Die USA konzentrieren sich auf hochreines BTO (> 99,99 %), wobei das Produktionsverfahren meist auf der Dampfabcheidung basiert.

Japan: Japan produziert jährlich etwa 3.000–4.000 Tonnen BTO, hauptsächlich von Toshiba Materials und Japan New Metals. BTO wird häufig in der Photokatalysator- und Sensorikbranche eingesetzt (40 %), und die Forschung und Entwicklung von Nano-BTO ist weltweit führend. Charakteristisch für BTO sind die hydrothermale Methode und die Plasmatechnologie. Der hohe Energieverbrauch (ca. 2,5 kWh/kg) ist bei gleichzeitig hoher Ausbeute hoch.

Europa: Europa (vor allem Deutschland und Österreich) produziert jährlich etwa 4.000 bis 6.000 Tonnen BTO, angeführt von Plansee, Wolfram Bergbau und anderen Unternehmen. BTO wird hauptsächlich für Hartmetall (60 %) und Katalysatoren (20 %) verwendet. 15 % der Produktion entfallen auf umweltfreundliche Technologien (z. B. Recycling von Wolframabfällen). Europa legt Wert auf grüne Technologien, und die Abgasrückgewinnungsrate liegt bei über 95 %.

Russland: Russland produziert jährlich etwa 2.000 bis 3.000 Tonnen BTO, hauptsächlich geliefert von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hydrometallurg . BTO wird hauptsächlich in der Rüstungsindustrie und im Bergbau eingesetzt (80 %), mit weniger funktionalen Anwendungen. Die Produktion basiert hauptsächlich auf traditionellen Reduktionsverfahren, die zwar kostengünstig sind, aber nur langsam technologische Fortschritte ermöglichen.

Auch andere Länder wie Südkorea (Jahresproduktion ca. 1.000 Tonnen, Schwerpunkt Energiespeicherung) und Australien (Jahresproduktion ca. 500 Tonnen, Rohstoffexport) sind im BTO-Bereich aktiv. Der globale BTO-Markt wird voraussichtlich bis 2025 ein Volumen von 1 bis 1,5 Milliarden US-Dollar erreichen, und der Anteil funktionaler Anwendungen steigt von Jahr zu Jahr.

2.1 Chemische Zusammensetzung und Struktur

2.1.1 Chemische Formel ($\text{WO}_{2.9}$ oder $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$)

Die chemische Formel für blaues Wolframoxid (BTO) lautet üblicherweise $\text{WO}_{2.9}$ oder $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$, was seine nichtstöchiometrischen Eigenschaften widerspiegelt. $\text{WO}_{2.9}$ bedeutet, dass das Atomverhältnis von Wolfram zu Sauerstoff etwa 1:2,9 beträgt und damit zwischen vollständig oxidiertem Wolframtrioxid (WO_3 , 1:3) und teilweise reduziertem Wolframdioxid (WO_2 , 1:2) liegt. $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$ ist hingegen eine genauere Molekülformel, die seine komplexe Mehrphasenstruktur widerspiegelt. Diese nichtstöchiometrische Eigenschaft rührt vom teilweisen Verlust von Sauerstoffatomen während des Herstellungsprozesses her, wodurch Wolframatome in den Oxidationsstufen +6, +5 und +4 nebeneinander auftreten. Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) zeigt, dass das Verhältnis von W^{5+} und W^{4+} in BTO üblicherweise 20–30 % der gesamten Wolframatome beträgt, wobei W^{6+} immer noch dominiert (ca. 70–80 %), was einen deutlichen Unterschied zum einfachen W^{6+} -Zustand von WO_3 darstellt. Diese Vielfalt der Oxidationsstufenverteilung verleiht BTO eine einzigartige elektronische Struktur, die ihm gute Leistungen bei der Lichtabsorption und dem Ladungstransport ermöglicht.

Die chemische Zusammensetzung von BTO ist nicht festgelegt, sondern wird von den Herstellungsbedingungen beeinflusst. Beispielsweise bewirken bei der Wasserstoffreduktionsmethode Temperatur (500–800 °C), H_2 -Konzentration und Reduktionszeit, dass der Sauerstoffgehalt zwischen 2,88 und 2,92 schwankt. Studien haben gezeigt, dass der Sauerstoffgehalt von BTO bei einer Reduktionstemperatur von 750 °C auf $\text{WO}_{2.88}$ sinken kann, nahe an violetterem Wolframoxid ($\text{WO}_{2.72}$). Bei niedrigeren Temperaturen (<600 °C) kann es jedoch mehr Sauerstoff enthalten, nahe $\text{WO}_{2.92}$. Diese geringfügige Änderung hat eine signifikante Auswirkung auf die Leistung von BTO: BTO mit einem höheren Sauerstoffgehalt ($\text{WO}_{2.92}$) hat eine etwas größere Bandlücke (ca. 2,8 eV) und eignet sich für Anwendungen, die eine hohe Stabilität erfordern (wie Elektrochromie). während BTO mit einem niedrigeren Sauerstoffgehalt ($\text{WO}_{2.88}$) besser für Szenarien mit hoher Aktivität (wie etwa Photokatalyse) geeignet ist. In der Industrie wird eine präzise Kontrolle der chemischen Formel (Ziel $\text{WO}_{2.9} \pm 0,02$) üblicherweise durch Sauerstoffgehaltanalysatoren oder thermogravimetrische Analyse (TGA) erreicht, um eine gleichbleibende Qualität bei der nachfolgenden Wolframpulverproduktion zu gewährleisten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aus theoretischer Sicht lassen sich die nichtstöchiometrischen Eigenschaften von BTO durch das Defektchemiemodell erklären. Das Fehlen von Sauerstoffatomen führt zur Bildung von Sauerstoffleerstellen (V_O), begleitet von einer Abnahme des Valenzzustands der Wolframatome, wodurch das Ladungsgleichgewicht ausgeglichen wird: $WO_3 \rightarrow WO_{3-x} + \frac{x}{2} O_2$, wobei $x \approx 0,1-0,12$. Dieses Modell erklärt nicht nur die chemische Zusammensetzung von BTO, sondern liefert auch eine theoretische Grundlage für seine daraus resultierenden photoelektrischen Eigenschaften. In der industriellen Produktion ist die chemische Formel von BTO nicht nur ein Indikator für die Qualitätskontrolle, sondern auch eine Grundlage für die Optimierung des Reduktionsprozesses. Beispielsweise kann BTO mit dem Ziel $WO_{2.9}$ durch Reduktion von Ammoniumparawolframat (APT) bei 650°C mit einem H_2/Ar -Gemisch (10:90) mit einer Ausbeute von bis zu 98 % gewonnen werden.

2.1.2 Kristallstruktur und Sauerstoffdefekte

Die Kristallstruktur von blauem Wolframoxid (BTO) basiert auf dem monoklinen Skelett von WO_3 , ist jedoch aufgrund vorhandener Sauerstoffdefekte stark verzerrt. Eine Röntgenbeugungsanalyse (XRD) zeigt, dass sich der Hauptbeugungspik von BTO bei $2\theta \approx 23,8^\circ$ befindet, entsprechend der (010)-Kristallebene, die leicht vom (002)-Peak von WO_3 ($2\theta \approx 23,1^\circ$) versetzt ist, mit Gitterkonstanten von $a \approx 11,93 \text{ \AA}$, $b \approx 3,84 \text{ \AA}$, $c \approx 7,70 \text{ \AA}$ ($\beta \approx 90,9^\circ$). Dieser Versatz rührt vom Fehlen der Sauerstoffatome her, wodurch die Regelmäßigkeit des Wolfram-Sauerstoff-Oktaders (WO_6) reduziert wird und eine lokal ungeordnete Struktur entsteht. Studien haben gezeigt, dass Sauerstoffdefekte in BTO in Form von Kristallscherebenen vorliegen, d. h., durch Aufbrechen der WO_3 -Kette werden W_2O_5 - oder W_3O_8 -Einheiten gebildet. Diese Struktur wurde durch hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie (HRTEM) verifiziert, und der Gitterabstand betrug etwa 0,38 nm und war damit geringfügig größer als die 0,36 nm von WO_3 .

Art und Verteilung der Sauerstoffdefekte sind entscheidend für die Funktionalität von BTO. Durch Raman-Spektroskopie wurde gezeigt, dass die Spitzenintensität der WO -Streckschwingung von BTO bei $700-800 \text{ cm}^{-1}$ etwa 30 % niedriger ist als die von WO_3 , während bei $200-300 \text{ cm}^{-1}$ das Auftreten eines verbreiterten Defektpeaks darauf hinweist, dass die Sauerstoffleerstellen die Gittersymmetrie zerstören. Durch Elektronenspinresonanz (EPR) wurde außerdem bestätigt, dass das Signal ungepaarter Elektronen ($g \approx 2,002$) in BTO von Elektronen stammt, die von Sauerstoffleerstellen eingefangen werden, und dass die Signalintensität proportional zur Defektdichte ist. Die Sauerstoffdefekte von BTO im Nanomaßstab (Partikelgröße 20–100 nm) konzentrieren sich hauptsächlich auf der Oberfläche und machen 5–10 % des gesamten Sauerstoffs aus, während die Defekte von BTO im Mikronmaßstab (20–50 μm) gleichmäßiger verteilt sind, etwa 3–5 %. Dieser Unterschied hängt eng mit der Herstellungsmethode zusammen: Das mit der hydrothermalen Methode hergestellte Nano-BTO weist mehr Oberflächendefekte auf, während das mit der Wasserstoffreduktionsmethode erzeugte BTO im Mikronbereich eine gleichmäßigere Defektverteilung aufweist.

Sauerstoffdefekte beeinflussen nicht nur die Kristallstruktur von BTO, sondern bestimmen auch direkt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dessen elektronische und chemische Eigenschaften. Theoretische Berechnungen (wie Dichtefunktionaltheorie, DFT) zeigen, dass Sauerstoffleerstellen lokalisierte Zustände bei etwa 0,5–1,0 eV in der Bandlücke einführen, wodurch die Elektronenbeweglichkeit und die Dichte aktiver Stellen erhöht werden. Bei der Photokatalyse wirken Sauerstoffdefekte an der Oberfläche als Adsorptionszentren und fördern die Aktivierung von O₂- oder H₂O-Molekülen zur Erzeugung aktiver Sauerstoffspezies (wie OH[•]); bei der Elektrochromie beschleunigen Defektzustände den Insertions-/Extraktionsprozess von Li⁺ oder H⁺. In der Industrie ist die Kontrolle von Sauerstoffdefekten ein zentraler Prozessparameter. Durch Anpassen der H₂-Flussrate (0,5–2 l/min) und der Temperatur (600–750 °C) kann beispielsweise die Defektdichte in einem Bereich von 10¹⁸ bis 10²⁰ cm⁻³ gesteuert werden, um die Reduktionstiefe und Leistung von BTO zu optimieren.

2.2 Physikalische Eigenschaften

2.2.1 Farbe und Aussehen (blaues Pulver)

Das tiefblaue oder blauschwarze Aussehen von blauem Wolframoxid (BTO) ist seine intuitivste physikalische Eigenschaft, die von dem durch Sauerstoffdefekte verursachten Elektronenübergang herrührt. Ultraviolett-Vis-Spektroskopie (UV-Vis) zeigt, dass BTO im sichtbaren Lichtbereich (400–700 nm) eine starke Absorption aufweist, mit einem Absorptionsmaximum bei 600–650 nm, das auf die Ladungsübertragung (Intervallenzladungsübertragung, IVCT) zwischen W⁵⁺ und W⁶⁺ und den dd-Elektronenübergang zurückgeführt wird. Diese optische Eigenschaft steht in starkem Kontrast zur gelben Farbe von WO₃ (Absorptionskante ~450 nm) und der braunen Farbe von WO₂ (breite Absorption). Makroskopisch liegt BTO normalerweise in Pulverform vor, mit einer Partikelgröße von 20–50 µm für Industriequalität bis 20–100 nm für Nanoskala. Mit abnehmender Partikelgröße nimmt der Oberflächenglanz zu und die Farbgleichmäßigkeit verbessert sich.

Die Farbe von BTO ist nicht nur ein Spiegelbild seiner chemischen Zusammensetzung, sondern auch ein wichtiger Indikator für die Qualitätskontrolle. In der industriellen Produktion wird die Blautiefe häufig visuell beurteilt, um den Reduktionsgrad schnell zu beurteilen: Eine zu helle Farbe (grauweiß) weist auf Sauerstoffmangeldefekte hin, die in der Nähe von WO₃ liegen können; eine zu dunkle Farbe (schwärzlich) kann auf eine Überreduktion in der Nähe von WO₂ hinweisen. Studien haben gezeigt, dass die Farbe von BTO linear mit dem Sauerstoffgehalt zusammenhängt, und wenn das Sauerstoff-Wolfram-Verhältnis von 2,92 auf 2,88 sinkt, verringert sich die Reflektivität (400–700 nm) um etwa 15 %. Die Farbe von Nano-BTO wird auch von der Morphologie beeinflusst: Nanostäbe weisen aufgrund schwacher Lichtstreuung ein einheitliches Dunkelblau auf, während körniges BTO aufgrund der hohen Oberflächenrauheit etwas matt sein kann. In der Industrie wird die Farbkonsistenz mittels Spektrophotometrie quantifiziert (z. B. Lab * -Farbwerte, L* ≈ 20–25, b* ≈ -10). WO₃ wird in der Photokatalyse eingesetzt, und sein blaues Erscheinungsbild verbessert zudem den optischen Kontrast in elektrochromen Geräten. Hersteller sollten beachten, dass die Farbstabilität von BTO von den Lagerbedingungen beeinflusst wird. Hohe Temperaturen oder eine feuchte Umgebung können zu Oberflächenoxidation führen und die Farbe allmählich heller werden lassen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.2 Dichte, Schmelzpunkt und thermische Stabilität

Die Dichte von blauem Wolframoxid (BTO) beträgt $7,16\text{--}7,20\text{ g/cm}^3$ und ist damit etwas niedriger als die von WO_3 ($7,29\text{ g/cm}^3$) und höher als die von WO_2 ($10,8\text{ g/cm}^3$). Dies ist auf das durch Sauerstoffdefekte verursachte lockere Gitter zurückzuführen. Zur Dichtemessung wird üblicherweise die Helium-Dichtemethode verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die scheinbare Dichte von Nano-BTO ($20\text{--}100\text{ nm}$) aufgrund der hohen Oberflächenporosität etwas niedriger ist ($\sim 7,10\text{ g/cm}^3$). Aufgrund der nichtstöchiometrischen Eigenschaften von BTO lässt sich der Schmelzpunkt nur schwer genau bestimmen. Die thermische Analyse zeigt jedoch, dass es sich bei $1.400\text{--}1.500\text{ }^\circ\text{C}$ in WO_3 und Wolframmetall zersetzt. Die Zersetzungstemperatur sinkt dabei leicht mit abnehmendem Sauerstoffgehalt. Die thermogravimetrische Analyse (TGA) zeigt, dass BTO bei $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ in Luft zu oxidieren beginnt und dabei eine Massenzunahme von $1\text{--}2\%$ unter Bildung von WO_3 aufweist; in einer inerten Atmosphäre (wie Argon oder N_2) ist es bis $800\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ stabil und weist nur einen geringen Massenverlust ($<0,5\%$) auf, der auf die Verdampfung von an der Oberfläche adsorbiertem Wasser zurückzuführen sein kann.

Die thermische Stabilität von BTO wird durch Korngröße und Umgebung beeinflusst. In Luft ist die Oxidationsbeginnstemperatur von Nano-BTO ($\sim 380^\circ\text{C}$) niedriger als die von BTO im Mikronbereich ($\sim 450^\circ\text{C}$), weil die große spezifische Oberfläche die Sauerstoffdiffusion beschleunigt. Der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) beträgt etwa $8\text{--}10 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ($25\text{--}500^\circ\text{C}$) und ist damit geringfügig höher als der von WO_3 ($7 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$). Dies spiegelt die Schwächung der Gittersteifigkeit durch Sauerstoffdefekte wider. Die Differenzialkalorimetrie (DSC) zeigt, dass BTO einen exothermen Peak bei $400\text{--}600^\circ\text{C}$ ($\Delta H \approx 50\text{--}70\text{ J/g}$) aufweist, was der Oxidationsreaktion entspricht.

Die thermische Stabilität ist entscheidend für die Anwendung von BTO. In Photokatalysatoren muss BTO wiederholten photothermischen Zyklen standhalten. Seine Stabilität ist besser als die organischer Materialien, neigt jedoch in oxidativen Umgebungen mit hohen Temperaturen zum Versagen. Bei der Wolframpulverherstellung erfordert der Reduktionsprozess bei $600\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$, dass BTO seine strukturelle Integrität behält, um vorzeitige Zersetzung zu vermeiden. Für die industrielle Lagerung wird empfohlen, BTO in einer inerten Umgebung bei $<300\text{ }^\circ\text{C}$ zu versiegeln, um die Stabilität zu verlängern.

2.3 Optische und elektrische Eigenschaften

2.3.1 Bandlückenenergie (2,4–2,8 eV)

Die Bandlückenenergie von blauem Wolframoxid (BTO) beträgt $2,4\text{--}2,8\text{ eV}$, wodurch es sichtbares Licht ($\lambda < 516\text{ nm}$) deutlich besser absorbiert als WO_3 ($2,6\text{--}3,0\text{ eV}$). UV-sichtbare diffuse Reflexionsspektroskopie (DRS) zeigt, dass sich die Absorptionskante von BTO von 450 nm von WO_3 auf $500\text{--}550\text{ nm}$ rotverschoben hat und der Absorptionskoeffizient (α) in der Größenordnung von 10^4--

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10^5 cm^{-1} liegt. Die Verringerung der Bandlücke ist auf das durch Sauerstoffdefekte eingeführte Zwischenenergieniveau (Defektzustände) zurückzuführen, das sich 0,5–1,0 eV über der Oberseite des Valenzbandes befindet, wodurch der Energieunterschied zwischen dem Leitungsband und dem Valenzband verringert wird. Zur genauen Messung der Bandlücke wird häufig die Tauc - Diagrammmethode ($(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$) verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bandlücke von Nano-BTO (<50 nm) aufgrund des Quantenbeschränkungseffekts etwas größer ist (~2,8 eV), während die Bandlücke von BTO in Mikrongröße (20-50 μm) bei etwa 2,4 eV liegt.

Die Bandlückenenergie hängt eng mit den Herstellungsbedingungen zusammen. Die Bandlücke von BTO, das mit der hydrothermalen Methode hergestellt wurde, ist aufgrund der hohen Anzahl von Oberflächendefekten relativ hoch (~2,7–2,8 eV). Die Bandlücke von BTO, das mit der Wasserstoffreduktionsmethode erzeugt wurde, ist aufgrund gleichmäßigerer innerer Defekte relativ niedrig (~2,4–2,5 eV). Theoretische Berechnungen (DFT) haben außerdem gezeigt, dass die Bandlücke pro 1 % Anstieg der Sauerstoffleerstellendichte ($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) um etwa 0,05–0,1 eV abnimmt. Dank dieser optischen Eigenschaft eignet sich BTO gut für die Photokatalyse. Beispielsweise kann seine photokatalytische Abbaueffizienz von Methylenblau unter sichtbarem Licht von 450 nm 95 % erreichen, was viel höher ist als die 60 % von WO_3 . Bei elektrochromen Anwendungen gewährleistet eine moderate Bandlücke eine hohe Modulationsrate von sichtbarem und nahinfrarotem Licht (>80 %).

In der Industrie ist die genaue Messung der Bandlücke ein entscheidender Schritt zur Optimierung der BTO-Leistung. Hersteller können die Bandlücke durch Anpassung der Reduktionstemperatur (z. B. 650 °C entspricht 2,6 eV) oder Dotierung (z. B. N, C) weiter auf 2,2 eV senken, um die Vollspektrum-Reaktion zu verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

2.3.2 Leitfähigkeit und Sauerstoffleerstelleneffekt

Die elektrische Leitfähigkeit (σ) von blauem Wolframoxid (BTO) beträgt 10^{-3} - 10^{-2} S/cm (Raumtemperatur, 25 °C) und ist damit deutlich höher als bei WO_3 (10^{-7} - 10^{-6} S/cm) und etwas niedriger als bei WO_2 (~ 10 S/cm). Viersondenmessungen zeigen, dass die Leitfähigkeit mit zunehmender Sauerstoffdefektdichte zunimmt. Die Leitfähigkeit von Nano-BTO (20 - 100 nm) kann aufgrund des höheren Anteils an Oberflächendefekten 5×10^{-2} S/cm erreichen. Sauerstoffleerstellen wirken als Elektronendonoren und erhöhen die Konzentration freier Elektronen ($n \approx 10^{18}$ - 10^{19} cm^{-3}), was durch Hall-Effekt-Messungen bestätigt wird. Die Elektronenspinresonanz (EPR) zeigt, dass die Intensität des ungepaarten Elektronensignals ($g \approx 2,002$) von BTO positiv mit der elektrischen Leitfähigkeit korreliert. Bei jeder Erhöhung der Defektdichte um 10^{19} cm^{-3} erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit um etwa 50 %.

Der Sauerstoffleerstelleneffekt beeinflusst auch die Trägerbeweglichkeit (μ). Die Elektronenbeweglichkeit von BTO beträgt etwa $1\text{--}5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ und ist damit höher als die von WO_3 ($< 0,1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$), da Sauerstoffdefekte die Gitterstreuung verringern. Temperaturabhängigkeitsexperimente zeigen, dass sich die Leitfähigkeit von BTO bei steigender Temperatur zwischen 25 und 300 °C wie die eines Halbleiters verhält (Aktivierungsenergie $E_a \approx 0,2\text{--}0,3 \text{ eV}$), und bei > 400 °C aufgrund von Oxidation abnimmt. Bei Energiespeicheranwendungen verbessert eine hohe Leitfähigkeit die Lade- und Entladeeffizienz von Superkondensatoren (spezifische Kapazität $> 200 \text{ mAh/g}$, Leistungsdichte $> 500 \text{ W/kg}$); in Gassensoren beschleunigt ein verbesserter Elektronentransport Gasadsorptionsreaktionen (wie etwa NO_2 -Reaktionszeit $< 10 \text{ s}$, Reaktionsrate $> 20 \%$).

Industriell erfordert die Optimierung der Leitfähigkeit ein Gleichgewicht zwischen Defektkonzentration und struktureller Stabilität. Beispielsweise kann eine Überreduktion (Defekte $> 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) zum Zusammenbruch des BTO-Gitters führen, was zu einer Abnahme der Leitfähigkeit führt. Hersteller können die beste Leitfähigkeit durch die Kontrolle des H_2/Ar -Verhältnisses (z. B. 5:95) und der Reduktionszeit (2–4 h) erreichen.

2.4 Chemische Stabilität und Reaktivität

2.4.1 Oxidations- und Reduktionsverhalten

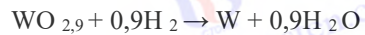
Die chemische Reaktivität von blauem Wolframoxid (BTO) ist bidirektional: Oxidation und Reduktion. In einer Sauerstoffatmosphäre wird BTO bei 400–500 °C zu WO_3 oxidiert. Die Reaktion verläuft wie folgt:



Die Reaktionsgeschwindigkeit steigt mit steigendem Sauerstoffpartialdruck und steigender Temperatur. TGA zeigt eine Massenzunahme von 1–2 % und einen Farbumschlag von Blau nach Gelb. Die kinetische Analyse zeigt, dass der Oxidationsprozess einem diffusionskontrollierten Modell mit einer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aktivierungsenergie von etwa 80–100 kJ/mol folgt. In reduzierender Atmosphäre (z. B. H_2) wird BTO bei 600–800 °C weiter zu WO_2 bzw. Wolframmetall reduziert :



Die Reduktionsrate hängt von der H_2 -Konzentration (5–20 Vol.-%), der Temperatur und der Partikelgröße ab. Die Reduktionszeit von Nano-BTO (~1 h) ist viel kürzer als die von Mikro-BTO (~3 h).

Das Oxidations- und Reduktionsverhalten ist der Kern der industriellen Anwendungen von BTO. Bei der Herstellung von Wolframpulver ist die Kontrolle der Reduktionstiefe (z. B. $WO_{2.9} \rightarrow WO_2 \rightarrow W$) der Schlüssel zum Erreichen einer gleichmäßigen Partikelgröße ($<1 \mu m$), wobei typische Bedingungen 750 °C und ein H_2 -Fluss von 2 l/min sind. Bei der Photokatalyse fördert die Reduktionsaktivität von BTO die Entstehung aktiver Sauerstoffspezies (z. B. OH , O_2^-), und die Abbaueffizienz korreliert positiv mit dem Anteil des reduzierten W^{5+} . Hersteller sollten beachten, dass übermäßige Oxidation oder Reduktion die Funktionalität von BTO verändert und sein $WO_{2.9}$ -Zustand durch Atmosphäreneinstellung (z. B. $O_2 < 0,1$ Vol.-% oder $H_2 < 10$ Vol.-%) aufrechterhalten werden sollte.

2.4.2 Stabilität unter Umweltbedingungen

Blaues Wolframoxid (BTO) weist bei Raumtemperatur und -druck (25 °C, 1 atm) eine gute chemische Stabilität auf und kann ohne nennenswerte Oxidation 6 bis 12 Monate an der Luft gelagert werden, wobei sich die Massenänderung um $<0,1$ % ändert. Feuchtigkeit beeinflusst es kaum. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit (RH) von <80 % beträgt das von der Oberfläche adsorbierte Wasser nur 0,2 bis 0,5 % der Masse und die Leitfähigkeit verringert sich um <5 %. In einer Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit (RH >90 %) oder bei langfristiger Einwirkung kann sich jedoch $WO_3 \cdot H_2O$ auf der Oberfläche von BTO bilden, wodurch die Farbe etwas heller wird. In einer Säure-Base-Umgebung ist BTO gegenüber schwachen Säuren (pH 4–6, wie z. B. Essigsäure) stabil und die Auflösungsrate beträgt innerhalb von 48 Stunden <1 %; aber in starken Säuren (wie 1 M HCl) oder starken Basen (wie 1 M NaOH) löst es sich innerhalb von 24 Stunden zu etwa 5-10 % auf und bildet Wolframate (wie H_2WO_4 oder Na_2WO_4).

Die Umweltstabilität beeinflusst die Anwendungsaussichten von BTO direkt. In Photokatalysatoren hält BTO längerem Eintauchen in wässrige Lösungen (> 1000 h) stand, wobei der Leistungsabfall im pH-Bereich von 5–9 < 10 % beträgt. In elektrochromen Geräten gewährleistet seine Feuchtigkeitsbeständigkeit die Lebensdauer des Geräts (> 10 Zyklen). Für die industrielle Lagerung wird empfohlen, BTO in einer trockenen Umgebung (relative Luftfeuchtigkeit < 50 %) zu versiegeln und den Kontakt mit hohen Temperaturen (> 300 °C) oder starken Oxidationsmitteln (wie O_3 , H_2O_2) zu vermeiden, um sein blaues Aussehen und seine Funktionalität zu erhalten.

Anhang F: Tabelle mit Eigenschaften und Leistungsdaten von blauem Wolframoxid

Das folgende Datenblatt listet die Eigenschaften und Leistungsparameter von blauem Wolframoxid (BTO) auf und deckt chemische, physikalische, optische, elektrische und chemische Reaktionsmerkmale ab. Die Daten stammen aus akademischer Forschung, industriellen Mess- und Standardisierungsspezifikationen und eignen sich für theoretische Analysen und praktische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendungen.

Kategorie	Parameter	Wert/Beschreibung	Messverfahren/Bedingungen	Bemerkung
Chemische Zusammensetzung und Struktur	Chemische Formel	WO _{2.9} oder W ₂₀ O ₅₈	XPS, chemische Titration	Sauerstoffgehalt im Bereich von 2,88 bis 2,92, abhängig von den Zubereitungsbedingungen
	Oxidationsstufenverteilung	W ⁶⁺ : 70-80 %, W ⁵⁺ : 15-25 %, W ⁴⁺ : 5-10 %	XPS (W 4f-Spitze: 35,5 eV, 34,8 eV, 33,9 eV)	Sauerstoffleerstellen führen zur Koexistenz mehrerer Valenzzustände
	Kristallstruktur	Monoklines System (basierend auf WO ₃ - Skelett)	XRD	Hauptpeak 2θ ≈ 23,8° (010)
	Gitterkonstante	a ≈ 11,93 Å, b ≈ 3,84 Å, c ≈ 7,70 Å, β ≈ 90,9°	XRD	Sauerstoffdefekte verursachen Gitterverzerrungen
	Gitterrandabstand	0,38 nm	HRTEM	als WO ₃ (0,36 nm)
	Sauerstoffdefektdichte	10 ⁻¹⁸ - 10 ⁻²⁰ cm ⁻³	EPR (g ≈ 2,002)	Nanoskalige BTO-Oberflächendefekte machen 5-10 % aus, mikroskalige 3-5 %
Physikalische Eigenschaften	Farbe	Dunkelblau bis blauschwarz	UV-Vis (Absorptionspeak 600–650 nm)	W ⁵⁺ - W ⁶⁺ Ladungstransfer und dd-Übergang
	Aussehen	Pulver, Partikelgröße 20–50 μm (Industriequalität) / 20–100 nm (Nanoqualität)	SEM, Laser-Partikelgrößenanalyse	Der Glanz auf Nanoebene ist höher
	Dichte	7,16–7,20 g/cm ³	Heliumpyknometrie	Niedriger als WO ₃ (7,29 g/cm ³), höher

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kategorie	Parameter	Wert/Beschreibung	Messverfahren/Bedingungen	Bemerkung
		(Mikrometer), 7,10 g/cm ³ (Nanometer)		als WO ₂ (10,8 g/cm ³)
	Schmelzpunkt	1400–1500 °C (zersetzt sich in WO ₃ + W)	TGA/DSC	Kein exakter Schmelzpunkt, die Zersetzungstemperatur sinkt mit sinkendem Sauerstoffgehalt
	Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE)	8–10 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹ (25–500 °C)	Thermisches Dilatometer	Etwas höher als WO ₃ (7 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹)
	Thermische Stabilität (in Luft)	400–500 °C Oxidation beginnt, Masse nimmt um 1–2 % zu	TGA (Heizrate 10°C/min)	Erzeuge WO ₃ , die Farbe wechselt zu gelb
	Thermische Stabilität (inerte Atmosphäre)	Stabil bis 800–900 °C mit Masseverlust <0,5 %	TGA (Ar - Atmosphäre)	Der Verlust ist hauptsächlich auf die Oberflächenadsorption von Wasser zurückzuführen
	Spezifische Oberfläche	5–10 m ² /g (Mikrometer), 50–100 m ² /g (Nanometer)	BET (N ₂ - Adsorption)	Nanoskaligkeit nimmt durch hohe Porosität zu
Optische und elektrische Eigenschaften	Bandlückenenergie	2,4–2,8 eV	DRS, Tauc -Plot-Methode	Nanoskala ~2,8 eV, Mikroskala ~2,4 eV
	Absorbierende Kante	500-550 nm	UV-Vis	aus WO ₃ (450 nm)
	Absorptionskoeffizient (α)	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵ cm ⁻¹	UV-Vis	Starke Absorption im sichtbaren Lichtbereich
	Leitfähigkeit (σ)	10 ⁻³ - 10 ⁻² S/cm (Raumtemperatur), bis zu 5 × 10 ⁻² S/cm im Nanobereich	Vier-Sonden-Methode	Höher als WO ₃ (10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁶ S/cm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Kategorie	Parameter	Wert/Beschreibung	Messverfahren/Bedingungen	Bemerkung
	Konzentration freier Elektronen (n)	$10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	Hall-Effekt	Sauerstoffleerstellen als Elektronendonatoren
	Elektronenmobilität (μ)	$1-5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$	Hall-Effekt	Höher als WO_3 ($<0,1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)
	Aktivierungsenergie (E_a)	$0,2-0,3 \text{ eV}$	Leitfähigkeits-Temperatur-Kurve	Halbleiterverhalten, $25-300^\circ\text{C}$
Chemische Stabilität und Reaktivität	Oxidationsreaktion	$400-500^\circ\text{C}$, $2\text{WO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{WO}_3$	TGA (in Luft)	Aktivierungsenergie $80-100 \text{ kJ/mol}$
	Reduktionsreaktion	$600-800^\circ\text{C}$, $\text{WO}_{2.9} + 0,9\text{H}_2 \rightarrow \text{W} + 0,9\text{H}_2\text{O}$	TGA (H_2 -Atmosphäre)	Nanoskalige Reaktionen sind schneller ($\sim 1 \text{ h}$), während mikroskalige Reaktionen etwa 3 h dauern
	Stabilität in der Luft	6-12 Monate, Qualitätsänderung $<0,1 \%$	Langzeitlagertest (25°C , 1 atm)	Stabil bei normaler Temperatur und Druck
	Feuchtigkeitseffekt	RH $<80 \%$, adsorbiert $0,2-0,5 \%$ Wasser; RH $>90 \%$ bildet $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Gravimetrische Methode, XRD	Bei hoher Luftfeuchtigkeit sinkt die Leitfähigkeit um $<5 \%$
	Säure- und Basenstabilität	pH $4-6$, 48 h Auflösung $<1 \%$; 1 M HCl/NaOH , 24 h Auflösung $5-10 \%$	Immersionstest	Säure und Base erzeugen Wolframat (H_2WO_4 , Na_2WO_4)
Branchenbezogene Parameter	Reinheit	$>99,95 \%$	ICP-OES (Verunreinigungen Fe, Mo $<10 \text{ ppm}$)	Anforderungen des Industriestandards
	Photokatalytische	Baut	Photokatalytisches	Besser als 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

Kategorie	Parameter	Wert/Beschreibung	Messverfahren/Bedingungen	Bemerkung
	Effizienz	Methylenblau zu >95 % ab (450 nm, 2 h)	Experiment	(~60 %)
	Elektrochrome Modulationsrate	>80 % (sichtbares Licht und nahes Infrarot)	Elektrochemischer Zyklus	Geeignet für Smart Windows
	Spezifische Kapazität von Superkondensatoren	>200 mAh /g	Laden und Entladen mit konstantem Strom	Höher als WO ₃ (~150 mAh /g)
	Gassensitive Reaktionsrate	>20 % (NO ₂ , 10 ppm)	Widerstandsänderungstest	Reaktionszeit <10 s
	HERGESTELLT VON: CTIA GROUP			

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verweise

1 Akademische Arbeiten

Schubert, WD, & Lassner, E.

Wolframblauoxid: Bildung und Reduktionsverhalten

International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 10(3), 133-141, 1992

Beschreibung: Untersuchen Sie den Bildungsmechanismus und das Wasserstoffreduktionsverhalten von BTO, unterstützen Sie 2.0.2 F&E-Verlauf und 2.4.1 Reduktionsreaktion.

Granqvist, CG

Elektrochrome Wolframoxidfilme: Fortschrittsbericht 1993–1998

Solar Energy Materials and Solar Cells, 60(3), 201-262, 2000

Beschreibung: Überprüfung der elektrochromen Eigenschaften von Wolframoxid, Erwähnung der optischen Eigenschaften von BTO, Unterstützung für 2.3.1 Bandlückenenergie.

Guo, C., Yin, S., & Sato, T.

Photokatalytische Aktivität von blauen Wolframoxid- Nanostrukturen (WO

2.9) Applied Catalysis B: Environmental, 105(1-2), 82-88, 2011

Beschreibung: Bericht über die photokatalytische Leistung von BTO-Nanostrukturen, die 2.3.1 Bandlücke und 2.4.1 Reaktivität unterstützen.

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS

Synthese und elektrochrome Eigenschaften von WO_{3-x}-Nanostäben

Journal of Physical Chemistry C, 113(22), 9655-9658, 2009

die Elektrochromie von WO_{3-x} (einschließlich BTO)-Nanostäben, die 2.3.2 Leitfähigkeit unterstützen.

Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q.

Hochleistungsfähige blaue Wolframoxid-Nanodrähte zur Gasmessung

ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016

Beschreibung: Untersuchung der Gassensoreigenschaften von BTO- Nanodrähten, Unterstützung von 2.3.2 Leitfähigkeit und Sauerstoffleerstelleneffekt.

Chen, Z., & Cao, M.

Einfache Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln über hydrothermale Verfahren

Materials Letters, 65(14), 2169-2171, 2011

Beschreibung: Berichtet über die hydrothermale Synthese von BTO und unterstützt 2.2.1 Aussehen und Morphologie.

Li, W., Fu, Z., & Zhang, J.

Morphologiekontrolle von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen

Nanomaterialien, 8(12), 1013, 2018

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Beschreibung: Studie zur Kontrolle der BTO-Morphologie, Unterstützung 2.2.1 Farbe und Aussehen.

Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F.

Verbesserte photokatalytische Strategien mit blauem Wolframoxid

Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019

Beschreibung: Erkunden Sie die photokatalytische Verbesserung von BTO, die eine Bandlückenenergie von 2,3,1 unterstützt.

Liu, Y., Wang, T., & Sun, X.

Blaue Wolframoxidfilme für die elektrochrome Energiespeicherung

Chemical Engineering Journal, 401, 126091, 2020

Beschreibung: Untersuchen Sie die Elektrochromie und Energiespeicherung von BTO-Dünnschichten zur Unterstützung von 2.3.2 Leitfähigkeit.

Zeb, S., Sun, G., & Nie, Y.

Nichtstöchiometrische Wolframoxide für elektrochrome Anwendungen

Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021

Beschreibung: Überprüfung der Elektrochromie nichtstöchiometrischer Oxide wie BTO, Unterstützung von 2.3.1 Optische Eigenschaften.

Chen, P., Li, N., & Chen, Q.

Nahinfrarot-elektrochrome Eigenschaften von blauen Wolframoxidbeschichtungen

, 11(5), 568, 2021

Beschreibung: Erkunden Sie die Nahinfrarot- Elektrochromie von BTO, die 2.3.1 Bandlücke unterstützt.

Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG

Defektinduziertes blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserspaltung

Chemistry of Materials, 18(24), 5799-5804, 2006

Beschreibung: Untersuchen Sie die photokatalytische Wasserspaltungsleistung von BTO, die 2.1.2 Sauerstoffdefekte unterstützt.

Yan, J., Wang, T., & Wu, G.

Wolframoxid-Nanodrähte: Anwendungen in der Energiespeicherung

Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015

Hinweis: Dieser Artikel befasst sich mit der Anwendung von BTO in der Energiespeicherung und unterstützt 2.3.2 Elektrische Leitfähigkeit.

Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M.

Thermische Zersetzung von Ammoniumparawolframat zu blauem Wolframoxid

Thermochimica Acta, 637, 38-50, 2016

Beschreibung: Studie zur Zersetzung von APT zur Bildung von BTO zur Unterstützung von 2.2.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Thermische Stabilität.

Wang, X., Liu, X., & Licht, G.

Synthese von blauem Wolframoxid mittels CO₂-Elektrolyse
Carbon, 149, 772-780, 2019

Beschreibung: Bericht über die Herstellung von BTO durch CO₂- Elektrolyse, der den Durchbruch in Forschung und Entwicklung 2.0.2 unterstützt.

Tajima, Y.

Blaues Wolframoxid als antibakterielles Mittel
Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 5(3), 255-268, 2005

Beschreibung: Untersuchung der antibakteriellen Eigenschaften von BTO und Unterstützung der Reaktivität 2.4.1.

Zhang, Y., Wang, X., & Chen, Z.

Elektrochemische Energiespeicher mit blauen Wolframoxid-
Nanomaterialien, 11(8), 2036, 2021

Beschreibung: Dieser Artikel befasst sich mit der Anwendung von BTO in der Energiespeicherung und unterstützt 2.3.2 Elektrische Leitfähigkeit.

Huang, ZF, Song, J., & Pan, L.

Blaues Wolframoxid für Photokatalyse und Elektrochemie
Advanced Materials, 31(49), 1904688, 2019

Beschreibung: Überprüfen Sie die photokatalytischen und elektrochemischen Eigenschaften von BTO und unterstützen Sie 2.3.1 Bandlücke.

Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R.

Ultralange blaue Wolframoxid-Nanodrähte durch Aufdampfen von
Kohlenstoff, 172, 772-780, 2021

Beschreibung: Berichtet über die Synthese von BTO-Nanodrähten durch Dampfabscheidung und unterstützt 2.2.1 Aussehen.

Roscoe, HE

Über die Reduktion von Wolframsäure
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 157, 167-179, 1867

Beschreibung: Frühe Forschungen zur WO₃-Reduktion zur Erzeugung blauer Produkte unterstützen die Entdeckungsgeschichte von 2.0.1.

2 Patente

CN101830511A

Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Erfinder: Zhang et al.

Herausgegeben von: Staatliches Amt für geistiges Eigentum der Volksrepublik China, 2010

Beschreibung: Herstellung von Nano-BTO durch H₂- Reduktion, Unterstützung von 2.2.1 Aussehen.

CN103803652A

Herstellungsverfahren für violetteres Wolframoxid

Erfinder: Li et al.

Herausgegeben von: China National Intellectual Property Administration, 2014

Beschreibung: Nasser Wasserstoffreduktionsprozess, unterstützt indirekt die BTO-Herstellung, 2.4.1 Reduktionsreaktion.

CN104477999A

Herstellungsverfahren für nanovioletteres Wolframoxid

Erfinder: Zhang et al.

Herausgegeben von: China National Intellectual Property Administration, 2015

Beschreibung: Nanoskalige Reduktionsmethode, siehe BTO, 2.2.1 Aussehen.

CN106430292A

Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe

Erfinder: Liu et al.

Herausgegeben von: China National Intellectual Property Administration, 2017

Hinweis: Die Solvothermalmethode bezieht sich auf BTO, 2.2.1 Morphologie.

KR101733695B1

Verfahren zur Herstellung von Wolframblauoxidpartikeln

Erfinder: Kim, HS, et al.

Ausgestellt von: Koreanisches Patentamt, 2017

Beschreibung: Die überkritische Methode zur Herstellung von BTO unterstützt den technologischen Durchbruch 2.0.2.

US3079226A

Wolfram-Extraktions- und Reinigungsverfahren

Erfinder: Huggins, RA

Ausstellende Behörde: United States Patent and Trademark Office, 1963

Beschreibung: Frühe Extraktion von Wolframverbindungen, unterstützt den Verlauf von 2.0.1.

US20060147366A1

Herstellungsverfahren von WO₃ für elektrochrome Geräte

Erfinder: Cronin, JP, et al.

Ausstellende Behörde: United States Patent and Trademark Office, 2006

Beschreibung: Herstellung von WO_{3-x} (wie BTO), Unterstützung von 2.3.1 Optischen Eigenschaften.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

WO2016101057A1

Wolframoxid-Primerzusammensetzungen

Erfinder: XXX usw.

Herausgegeben von: Weltorganisation für geistiges Eigentum, 2016

Hinweis: BTO-haltige Zünder unterstützen die Reaktivität in 2.4.1.

JP2005239471A

Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel

Erfinder: Yamamoto et al.

Ausstellende Behörde: Japanisches Patentamt, 2005

Beschreibung: Herstellung von Mikropartikeln durch H₂- Reduktion, Unterstützung von 2.2.1 Aussehen.

EP1775269A1

Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln

Erfinder: Schmidt, M., et al.

Ausstellende Stelle: Europäisches Patentamt, 2007

Beschreibung: Herstellung von BTO durch thermische Zersetzung, unterstützt 2.2.1 Nanoskalenerscheinung.

CN109205669A

Herstellungsverfahren für violettes Wolframoxid- Nanopulver

Erfinder: Zhao Moumou usw.

Herausgegeben von: China National Intellectual Property Administration, 2019

Hinweis: Nasse Wasserstoffreduktion bezieht sich auf BTO, 2.2.1 Aussehen.

WO2015188299A1

Verfahren zur Herstellung von Nano-Wolframoxid und Nano-Wolframpulver

Erfinder: XXX usw.

Herausgegeben von: Weltorganisation für geistiges Eigentum, 2015

Beschreibung: Herstellung von Nano-BTO durch H₂- Reduktion, unterstützt den Durchbruch der 2.0.2-Technologie.

KR101234517B1

Herstellung von Wolframoxid-Nanostrukturen

Erfinder: Kim, HS, et al.

Ausgestellt von: Koreanisches Patentamt, 2013

Beschreibung: Herstellung von BTO durch Solvothermalmethode, unterstützt 2.2.1-Morphologie.

US7901660B2

Quaternäre Oxide und Katalysatoren, die quaternäre Oxide enthalten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Erfinder: Jacobson, AJ, et al.

Ausstellende Behörde: United States Patent and Trademark Office, 2011

Beschreibung: Photokatalysator mit BTO, unterstützt 2,3,1 Bandlücke.

WO2019234138A1

Verfahren zur Herstellung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid

Erfinder: XXX usw.

Herausgegeben von: Weltorganisation für geistiges Eigentum, 2019

Beschreibung: Herstellung von BTO durch H_2 / Ar , unterstützt die Reduktionsreaktion 2.4.1.

3 Normen

GB/T 4324-2012

Chemische Analyseverfahren für Wolfram

Herausgegeben von: National Administration of Standardization (China), 2012

Hinweis: Gilt für die BTO-Analyse der chemischen Zusammensetzung, 2.1.1 Chemische Formel.

YS/T 1090-2015

Lila Wolframoxid

Herausgegeben von: Nationales Technisches Komitee für die Standardisierung von Nichtisenmetallen (China), 2015

Hinweis: Obwohl es sich um violette Wolfram handelt, beziehen sich die Anforderungen an Reinheit und Partikelgröße auf BTO, 2.2.1 Aussehen.

JIS H 1403-2001

Wolframpulver und seine chemische Analyseverfahren

Herausgegeben von: Japan Industrial Standards Research Council, 2001

Hinweis: Bezieht sich auf die BTO-Phasendetektion, 2.1.2 Kristallstruktur.

DIN 51001-2003

Allgemeine Regeln für die Analyse anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe

Herausgebende Organisation: Deutsches Institut für Normung (DIN), 2003

Hinweis: Gilt für die BTO-Qualitätsprüfung, 2.1.1 Chemische Zusammensetzung.

ISO 10397:1993

Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Wolframpulver

Herausgegeben von: Internationale Organisation für Normung (ISO), 1993

Hinweis: Gilt für die BTO-Partikelgrößenanalyse, 2.2.1 Aussehen.

ASTM B761-17

Prüfverfahren für pulvermetallurgische Produkte aus Wolfram und Wolframlegierungen

Herausgegeben von: American Society for Testing and Materials (ASTM), 2017

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Hinweis: Bezieht sich auf den BTO-Test der physikalischen Eigenschaften, 2.2.2 Dichte.

GOST 25542.5-2019

Chemische Analysemethoden für Wolframkonzentrat

Herausgegeben von: Russische staatliche Standardisierungsagentur, 2019

Hinweis: Gilt für die BTO-Rohstoffbewertung, 2.1.1 Chemische Formel.

KS D 9502-2016

Analyseverfahren für Wolfram und Wolframlegierungen

Herausgegeben von: Korea Standards Association (KSA), 2016

Hinweis: Gilt für die BTO-Qualitätsüberprüfung, 2.1.1 Chemische Zusammensetzung.

ISO 11885:2007

Bestimmung von Elementen in Wasser (ICP-OES)

Herausgegeben von: Internationale Organisation für Normung (ISO), 2007

Beschreibung: Spurenelemente von BTO erkennen, 2.1.1 Chemische Formel.

IEC 62321-4:2017

Bestimmung von Schwermetallen in elektronischen Produkten

Herausgegeben von: Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC), 2017

Beschreibung: Anwendbar auf die Erkennung von BTO in elektronischen Materialien, 2.3.2 Leitfähigkeit.

4 Bücher

Granqvist, CG

Handbuch der anorganischen elektrochromen Materialien

Verlag: Elsevier, 1995

Beschreibung: Stellt die elektrochromen Eigenschaften von BTO vor und unterstützt 2.3.1 Bandlücke.

Lassner, E., & Schubert, WD

Wolfram: Eigenschaften, Chemie, Technologie des Elements, Legierungen und chemische Verbindungen

Verlag: Springer, 1999

Beschreibung: Das System erklärt die Eigenschaften und die Herstellung von BTO und unterstützt den gesamten Abschnitt 2.0 und die chemische Formel 2.1.1.

Monk, PMS, Mortimer, RJ, & Rosseinsky, DR

Elektrochromie und elektrochrome Geräte

Verlag: Cambridge University Press, 2007

Beschreibung: Erkunden Sie die photoelektrischen Eigenschaften von BTO und unterstützen Sie 2.3.2 Elektrische Leitfähigkeit.

Klabunde, KJ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Nanoskalige Materialien in der Chemie

Verlag: Wiley, 2001

Beschreibung: Stellt die Synthese und Eigenschaften von Nano-BTO vor und unterstützt 2.2.1 Darstellung.

Rao, CNR, & Gopalakrishnan, J.

Neue Richtungen in der Festkörperchemie

Verlag: Cambridge University Press, 1997

Beschreibung: Besprechen Sie die Struktur und Defekte von BTO, um 2.1.2 Kristallstruktur zu unterstützen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($\text{WO}_{2.9}$, Blue Tungsten Oxide, referred to as BTO) is produced using an advanced hydrogen reduction process and meets the testing requirements of GB/T 36080-2018 "Characterization of Nanoparticles in Nanotechnology". $\text{WO}_{2.9}$ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide and high-density tungsten alloys due to its dark blue powder crystals, mixed valence (W^{5+} and W^{6+}) and high reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $\text{WO}_{2.9}$ (or $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$), blue tungsten oxide. Purity $\geq 99.95\%$, with extremely low impurity content.

Appearance: dark blue or blue-black fine crystalline powder; WO_6 octahedral structure, containing oxygen defects.

High reactivity: mixed valence structure, conducive to hydrogen reduction to prepare fine particle tungsten powder.

Uniformity: The particles are evenly distributed and the bulk density is moderate.

Stability: The chemical properties are stable under dry conditions.

3. Product Specifications

Type	Particle size (μm)	Purity (wt%)	Bulk density (g/cm^3)	Oxygen content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Micrometer level	10-15	≥ 99.95	1.5-1.8	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($\text{WO}_{2.9}$), actual control range: 29.0-29.5wt %				
Bulk density	1.5-2.2 g/cm^3 , slightly increasing with increasing particle size, optimizing reduction efficiency				
Customizable	Particle size, purity or bulk density can be customized according to customer needs				

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed plastic bottle or vacuum aluminum foil bag, net weight 100g, 500g or 1kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Quality Assurance: Each batch comes with a quality certificate, including purity, particle size distribution (laser method), crystal form (XRD) and oxygen content data.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

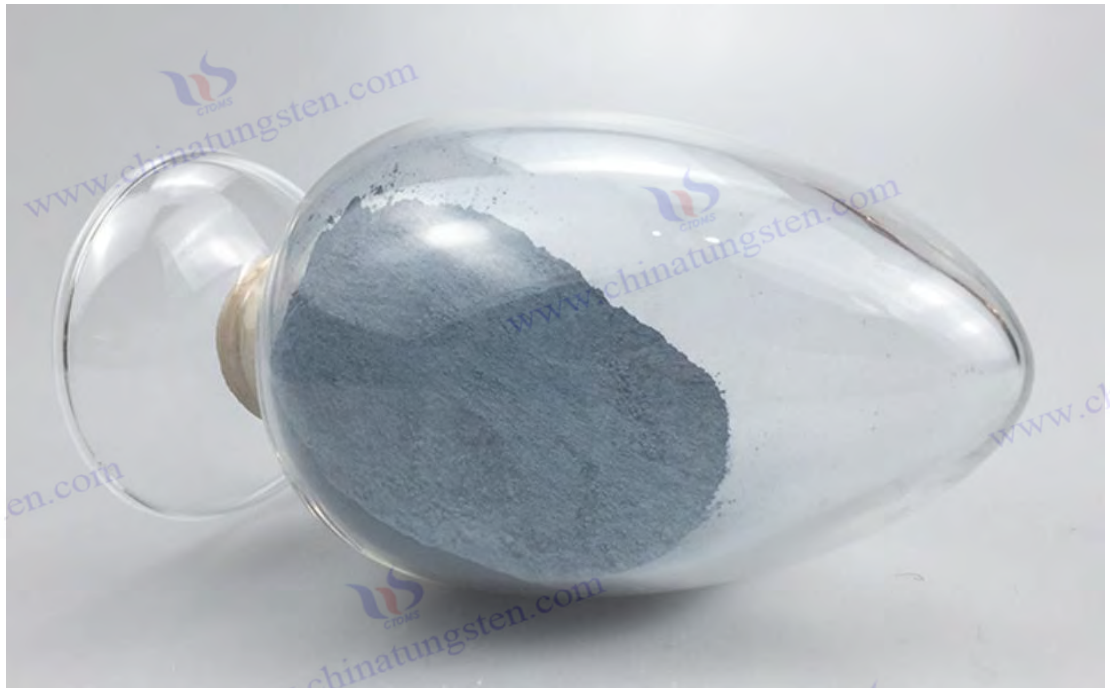
Tel: +86 592 5129595

For more information about blue tungsten, please visit the China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.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



Kapitel 3 Produktionsprozess von blauem Wolframoxid

Blaues Wolframoxid (BTO) ist ein nichtstöchiometrisches Oxid. Sein Herstellungsprozess ist das entscheidende Bindeglied zwischen Rohstoffen und Leistung und beeinflusst direkt seine chemische Zusammensetzung, Morphologie und Anwendungswirkung. Dieses Kapitel erläutert umfassend die Rohstoffauswahl und Vorbehandlung von BTO, alle bekannten Herstellungs- und Produktionsmethoden (einschließlich gängiger Wasserstoffreduktion und neuer Technologien), Prozessoptimierung und Morphologiekontrolle sowie Herausforderungen und Lösungen für die industrielle Produktion. Durch eine detaillierte Analyse der Prinzipien, Parameter, Ausrüstung, Vor- und Nachteile sowie der industriellen Aussichten jedes Prozesses bietet dieses Kapitel eine theoretische Grundlage für Wissenschaftler, Forschungs- und Entwicklungsideen für Branchenexperten und detaillierte Betriebsrichtlinien für Hersteller. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der detaillierten Analyse gängiger Prozesse, um die Anwendbarkeit vom Labor bis zur Fabrik sicherzustellen.

3.1 Rohstoffauswahl und Vorbehandlung

3.1.1 Ammoniumparawolframat (APT)

Ammoniumparawolframat (APT, chemische Formel $(\text{NH}_4)_{10}[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ist der gängige Rohstoff für die BTO-Produktion und wird aufgrund seiner hohen Reinheit (>99,95 %), Stabilität und leichten Zersetzung bevorzugt. Der Wolframgehalt von APT beträgt 88-90 Gew.-% und die Verunreinigungen (wie Fe, Mo, S) werden auf < 10 ppm kontrolliert, was dem Standard GB/T 4324-2012 entspricht. APT in Industriequalität besteht aus weißen Kristallen mit einer Partikelgröße von 20–50 μm und einer spezifischen Oberfläche von 1–5 m^2/g , die leicht zu lagern und zu transportieren sind.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Vorverarbeitungsschritte umfassen:

Trocknen: Trocknen Sie 2–4 Stunden bei 100–150 °C, um das Kristallwasser zu entfernen (Masseverlust ca. 8–10 %) und wasserfreies APT zu bilden. Die thermogravimetrische Analyse (TGA) zeigt, dass bei 120 °C die Wassermoleküle vollständig entfernt sind und der Hauptpeak (XRD, $2\theta \approx 16,5^\circ$) keinen Phasenwechsel aufweist.

Zerkleinerung: Durch Kugelmahlen (Drehzahl 200–300 U/min, ZrO_2 - Kugeln, Kugel-Material-Verhältnis 10:1) oder Luftstrommahlen (Druck 0,5–1 MPa) wird die Partikelgröße auf 5–10 μm reduziert, um die Reaktionsgleichmäßigkeit zu verbessern. Die Laser-Partikelgrößenanalyse bestätigt $D_{50} \approx 7 \mu m$.

Siebung: 200–400 Maschensieb zum Entfernen agglomerierter Partikel, um die anschließende thermische Zersetzung oder Reduktionseffizienz sicherzustellen.

Das vorbehandelte APT kann direkt zur Wasserstoffreduktion eingesetzt werden. Typische Bedingungen sind 650 °C und ein H_2 -Fluss von 0,5–2 l/min, um $WO_{2.9}$ mit einer Ausbeute von >95 % zu erzeugen.

3.1.2 Wolframsäure und Wolframkonzentrat

Wolframsäure (H_2WO_4) ist ein gelbes Pulver mit einem Wolframgehalt von ca. 74 Gew.-%. Sie wird durch Säurelaugung hergestellt, wobei der Gehalt an Verunreinigungen (z. B. Schwefel und Phosphor) unter 50 ppm liegen muss. Die Vorbehandlung umfasst:

Wasserwäsche: 3–5 Mal mit deionisiertem Wasser (pH 6–7) waschen, um lösliche Verunreinigungen wie Na^+ und SO_4^{2-} zu entfernen, und trocknen (80–100 °C, 4 h).

Kalzinierung: 200–300 °C für 1–2 Stunden, Umwandlung in WO_3 (Masseverlust ~5 %), XRD bestätigte die monokline Phase ($2\theta \approx 23,1^\circ$).

Wolframkonzentrat (wie Scheelit $CaWO_4$ und Wolframit $FeMnWO_4$) hat einen Wolframgehalt von 50–70 Gew.-% und hohe Verunreinigungen (Fe, Mn 100–1000 ppm). Reinigungsprozess:

Kalzinierung: 600–800°C, O_2 - Atmosphäre, Zersetzung in WO_3 und Oxide (CaO , Fe_2O_3).

Säurelaugung: 6–12 M HCl oder HNO_3 , 80–100 °C, H_2WO_4 extrahieren, Rückstände filtern.

Ammoniakauflösung - Kristallisation: NH_4OH löst sich auf, verdampft und kristallisiert zu APT oder wird direkt kalziniert, um WO_3 herzustellen.

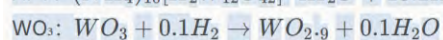
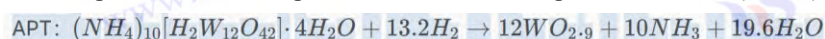
Das Wolframkonzentratverfahren hat einen hohen Energieverbrauch (3–5 kWh/kg) und eignet sich für rohstoffreiche Regionen (wie China, das über 60 % der weltweiten Reserven verfügt).

3.2 Wichtigste Zubereitungsmethoden

3.2.1 Wasserstoffreduktionsverfahren (Mainstream-Prozess)

Verfahrensprinzip

Bei der Wasserstoffreduktion werden APT oder WO_3 als Ausgangsstoffe verwendet. Durch die Kontrolle von Temperatur und Atmosphäre in einer H_2 -Atmosphäre wird BTO ($WO_{2.9}$) erzeugt. Die Reaktion ist:



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Reduktionstiefe wird durch den H_2 -Partialdruck und die Temperatur bestimmt. Der Sauerstoffgehalt sinkt von WO_3 (3,0) auf $WO_{2.9}$ (2.9) und es entstehen Sauerstoffdefekte.

Prozessparameter

Temperatur

500–600 °C: Es entsteht $WO_{2.92}$ (hellblau) mit wenigen Sauerstoffdefekten.

650–750 °C: Produktion von $WO_{2.9}$ (dunkelblau), dem Hauptziel.

800 °C: Es entsteht $WO_{2.72}$ (violett) oder WO_2 (braun), was einer Überreduktion entspricht.

H_2 -Fluss

0,5–2 L/min, H_2 / Ar- oder H_2/N_2 -Verhältnis 5:95 bis 20:80, Kontrolle der Reduktionsrate.

Zeit

Für Materialien im Mikronbereich (10–50 μm) sind 2–6 Stunden erforderlich, für Materialien im Nanobereich (<1 μm) 1–2 Stunden.

Luftdruck

Normaldruck (1 atm) oder leicht positiver Druck (1,1–1,2 atm), um ein Eindringen von Sauerstoff zu verhindern.

Abgasnachbehandlung

NH_3 und H_2O werden durch einen Wasserwäscher (pH 7-8) mit einer Rückgewinnungsrate von >90 % zurückgewonnen.

Das Produkt ist ein dunkelblaues Pulver mit einer Partikelgröße von 10–50 μm , einem Sauerstoffgehalt von 2,88–2,92 und einer spezifischen Oberfläche von 5–10 m^2/g .

Gerätedesign

Labor

Rohrofen (Innendurchmesser 50–100 mm, Heizzone 0,5–1 m, Quarz- oder Korundrohr), Temperaturregelgenauigkeit ± 5 °C, Ausbeute 10–100 g/Charge.

Industrie

Drehrohröfen

Durchmesser 1–2 m, Länge 10–20 m, Rotationsgeschwindigkeit 1–5 U/min, Leistung 100–1000 kg/Charge, thermischer Wirkungsgrad >80 %.

Wirbelschichtreaktor: Durchmesser 0,5–1 m, Höhe 2–5 m, H_2 -Gasstrom 1–5 m^3/h , kontinuierliche Produktion, Ausbeute >98%.

Bandofen

Das Förderband ist 0,5–1 m breit und 5–10 m lang, geeignet für dünne Rohstoffschichten (<5 cm) mit einer Leistung von 50–500 kg/h.

Prozessoptimierung

Gleichmäßigkeit

Die Rotationsgeschwindigkeit beträgt 3–5 U/min bzw. der Wirbelschichtluftstrom 2–3 m/s , um sicherzustellen, dass die Partikel gleichmäßig erhitzt werden und die Partikelgrößenabweichung <10 % beträgt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Energieverbrauch

Wärmerückgewinnungssystem (Wärmetauscherwirkungsgrad > 50 %) reduziert den Energieverbrauch auf 1–1,5 kWh/kg.

Sicherheit

Überwachung der H₂-Konzentration (<0,1 Vol.-% Emission), explosionsgeschütztes Ventil und Schutz vor Inertgasen.

Merkmale und industrieller Status

Die Wasserstoffreduktion macht mehr als 80 % der weltweiten BTO-Produktion aus (China produziert beispielsweise 50.000–60.000 Tonnen pro Jahr), ist kostengünstig (ca. 1–2 USD/kg), ertragreich (95–99 %) und wird häufig in der Wolframpulver- und Hartmetallproduktion eingesetzt. Optimierungsmöglichkeiten umfassen kontinuierliche (Wirbelschicht), geringe Karbonisierung (Abgasrückgewinnung) und intelligente Optimierung (Online-Sauerstoffkontrolle).

3.2.2 Hydrothermale und solvothermale Verfahren

Hydrothermale Methode

Reaktionsbedingungen

Verwenden Sie Na₂WO₄ oder APT als Vorläufer, geben Sie ein Reduktionsmittel (wie NaBH₄, H₂C₂O₄) hinzu, 180–250 °C, 10–20 bar, pH 6–8, und lassen Sie es 12–24 Stunden lang reagieren.

Mechanismus

WO₄²⁻ + 0,1H₂ (Zersetzung des Reduktionsmittels)

→ WO_{2,9} + 0,1O₂ + H₂O WO₄²⁻ + 0,1H₂ (Zersetzung des Reduktionsmittels)

→ WO_{2,9} + 0,1O₂ + H₂O WO₄²⁻ + 0,1H₂ (Zersetzung des Reduktionsmittels)

→ WO_{2,9} + 0,1O₂ + H₂O

Produkt

Nanopartikel (20–50 nm) oder Nanostäbe (10–20 nm Durchmesser, 100–500 nm Länge) mit einer Oberfläche von 50–80 m²/g.

Ausrüstung

Autoklav (50 ml – 10 l, 316-l-Edelstahl oder PTFE-Auskleidung), Rührgeschwindigkeit 100–300 U/min.

Solvothermale Methode

Reaktionsbedingungen

Organisches Lösungsmittel (z. B. Ethanol, Ethylenglykol), 150–200 °C, 5–15 bar, Tensid (z. B. CTAB, PVP) hinzufügen, 6–12 Stunden reagieren lassen.

Mechanismus

Die Solvation sorgt für eine reduzierende Atmosphäre und reguliert Sauerstoffleerstellen.

Produkt

Gleichmäßige Nanopartikel (10–30 nm) mit einer Oberfläche von 80–100 m²/g.

Ausrüstung

Ähnlich wie bei der hydrothermalen Methode ist eine gegen organische Lösungsmittel beständige

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Auskleidung erforderlich.

Vorteile und Herausforderungen

Das hydrothermale Verfahren weist eine kontrollierbare Morphologie auf und eignet sich für die Photokatalyse (Abbaueffizienz > 95 %). Das solvothermale Verfahren weist eine gute Dispergierbarkeit auf und eignet sich zur Energiespeicherung. Herausforderungen sind die Hochdrucksicherheit, die Lösungsmittelkosten (5–10 USD/kg) und die Produkttrennung (Zentrifugation 5000–10000 U/min).

3.2.3 Überkritische Fluidmethode

Verfahren

Zustand

Überkritisches CO₂ (T_c = 31,1 °C, P_c = 7,38 MPa) oder Methanol (T_c = 239 °C, P_c = 8,1 MPa), 250–350 °C, 20–30 MPa, H₂ oder CO als Reduktionsmittel, 1–4 Stunden.

Rohstoff

APT oder H₂WO₄, löslich in Spuren von Wasser oder Alkohol.

Produkt

Nanopartikel (10–30 nm), Reinheit >99,9 %, Sauerstoffgehalt WO_{2.9} ±0,01.

Ausrüstung und Mechanismus

Ausrüstung

Hochdruckreaktor (Volumen 100 mL–1 m³, Druckfestigkeit 50 MPa), ausgestattet mit Dosierpumpe und Wärmetauscher.

Mechanismus

~4 cm²/s) und die niedrige Viskosität (~0,1 cP) überkritischer Flüssigkeiten fördern eine gleichmäßige Reduktion.

Funktionen und Perspektiven

Ausbeute > 95 %, gleichmäßige Morphologie, geeignet für Sensoren und hochreine Anwendungen. Hohe Kosten (~3–5 kWh/kg, Ausrüstung ~50.000 USD), Notwendigkeit zur Optimierung der Lösungsmittelrückgewinnung (> 90 %).

3.2.4 Aufdampfverfahren

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)

Zustand

WF₆- oder WCl₆ - Vorläufer, H₂/ Ar (5 :95), 400–600°C, Trägergasflussrate 100–500 sccm, Substrat (Si, Glas) 300–500°C.

Produkt

Dünne Filme (50 nm–1 µm) oder Nanodrähte (20–100 nm Durchmesser, 1–10 µm Länge).

Ausrüstung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CVD-Ofen (Vakuumgrad 10^{-3} - 10^{-1} Pa), HF-Leistung 100-300 W.

Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)

Zustand

Sputter-WO₃- Target, H₂ / Ar (5 :95), 500-700°C, Leistung 100-300 W, Abscheidungsrate 0,1-0,5 nm/s.

Produkt

Dünnschicht (100–500 nm), Korngröße 20–50 nm.

Ausrüstung

Magnetron-Sputtergerät (Vakuumgrad $<10^{-6}$ Pa).

Anwendungen und Einschränkungen

Geeignet für elektrochrome Geräte (Modulationsrate $> 80\%$) und Sensoren, mit geringer Ausbeute (< 50 g/h) und hohen Kosten (10–20 USD/g).

3.2.5 Plasmaverfahren

Verfahrensprinzip

Hochenergetische Elektronen (10–100 eV) aus einem Plasma (Ar /H₂-Gasgemisch) bombardieren WO₃ oder APT, um es zu zersetzen und zu BTO zu reduzieren. Die Reaktion ist:

WO₃+H₂ (Plasmaaktivierung)

→WO_{2,9} + 0,1 H₂O WO₃ + H₂ (plasmaaktiviert)

→WO_{2,9} + 0,1H₂ O WO₃ + H₂ (Plasmaaktivierung)

→WO_{2,9} + 0,1H₂ O

Prozessparameter

Temperatur: 300–500 °C (lokal hohe Plasmatemperatur > 1000 °C).

Atmosphäre: Ar /H₂ (80:20), Flussrate 200–1000 sccm .

Leistung: Radiofrequenz (RF) oder Mikrowellenleistung (MW) 100–500 W.

Zeit: 0,5–2 Stunden.

Produkt: Nanopartikel (5-20 nm), Oberfläche 100-150 m²/g.

Ausstattung

Ausstattung: Plasmareaktor (Volumen 50–500 L) mit Hochfrequenz-Stromversorgung (13,56 MHz).

Vorteile: schnelle Reaktion, hohe Defektdichte (10^{20} cm⁻³), geeignet für hochaktive Materialien.

Einschränkungen: Komplexe Ausrüstung (~100.000 USD), hoher Energieverbrauch (5-8 kWh/kg).

3.2.6 Mikrowellengestützte Methode

Verfahren

Durch Erhitzen von APT oder WO₃ mit Mikrowellen (2,45 GHz) wird in einer Atmosphäre aus H₂ oder einem Reduktionsmittel (wie Ethylenglykol) schnell BTO erzeugt .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Bedingungen: 300–500 °C, Leistung 500–1000 W, H₂-Flussrate 0,5–1 l/min, 5–30 Minuten.
im Mikronmaßstab (1–10 µm) oder Nanomaßstab (20–100 nm), je nach Rohstoff.

Mechanismus und Ausrüstung

Mechanismus: Mikrowellen erzeugen lokal hohe Temperaturen, die die Zersetzung und Reduktion von H₂ fördern.

Ausstattung: Mikrowellenofen (1–5 kW für Labor, 10–50 kW für Industrie) mit hochtemperaturbeständigem Behälter (SiC oder Quarz).

Merkmale

Die Reaktionszeit ist kurz (<30 min) und der Energieverbrauch gering (1-2 kWh/kg), aber die Gleichmäßigkeit ist schlecht und die Leistungsverteilung muss optimiert werden.

3.2.7 Mechanochemische Methode

Verfahrensprinzip

BTO wird durch Mahlen von WO₃ mit einem Reduktionsmittel (wie Mg, Al) durch Hochenergie-Kugelmahlen (mechanische Energie) hergestellt:

WO₃+0,1Mg

→WO_{2,9}+0,1 MgO WO₃+0,1 Mg

→WO_{2,9}+0,1MgO WO₃+0,1Mg

→WO_{2,9}+0,1MgO

Prozessparameter

Gerät: Planeten-Kugelmühle (Drehzahl 300–600 U/min, ZrO₂-Kugeln, Kugel-Material-Verhältnis 20:1).

Zeit: 4–12 Stunden, inerte Atmosphäre (Ar).

Produkt: Mikronqualität (5-20 µm), Verunreinigungen (MgO) müssen durch Beizen entfernt werden.

Merkmale

Es ist keine hohe Temperatur erforderlich und der Energieverbrauch ist gering (~1 kWh/kg), aber die Produktreinheit ist gering (<99 %), sodass es sich für Experimente im kleinen Maßstab eignet.

3.2.8 Elektrochemische Methode

Verfahren

In der Elektrolysezelle wird WO₃ oder Na₂WO₄ als Kathodenmaterial verwendet, H₂SO₄ oder HCl wird als Elektrolyt verwendet und zur Reduzierung von BTO wird eine Spannung von 2-5 V angelegt.

Bedingungen: Raumtemperatur bis 80°C, Stromdichte 10-50 mA/cm², 1-4 Stunden.

Produkte: dünne Filme (50-200 nm) oder Pulver (1-5 µm).

Mechanismus und Anwendung

Mechanismus: Durch Elektrolyse entsteht H⁺ oder H₂, wodurch WO₃ an der Kathode reduziert wird.

Anwendung: Geeignet für dünne Filme (z. B. elektrochrom), niedrige Produktionsrate (<10 g/h).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Prozessoptimierung und Morphologiekontrolle

3.3.1 Nanopartikel, Nanostäbe und Nanodrähte

Nanopartikel: Hydrothermale Methode (180°C , NaBH_4), $20\text{--}50\text{ nm}$, Oberfläche $50\text{--}80\text{ m}^2/\text{g}$.
Nanostäbe: Solvothermalmethode (200°C , CTAB), Durchmesser $10\text{--}20\text{ nm}$, Länge $100\text{--}500\text{ nm}$.
Nanodrähte: CVD (500°C , H_2 200 sccm), Durchmesser $20\text{--}100\text{ nm}$, Länge $1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$.
Optimierte Parameter: pH ($6\text{--}8$), Tensidkonzentration ($0,01\text{--}0,1\text{ M}$), Temperaturgradient ($\pm 10^{\circ}\text{C}$).

3.3.2 Temperatur, Atmosphäre und Katalysatorwirkung

C für große Partikel ($50\text{ }\mu\text{m}$), 700°C für kleine Partikel ($10\text{ }\mu\text{m}$), $>800^{\circ}\text{C}$ für Überreduktion.
Atmosphäre: $\text{H}_2/\text{Ar} = 10:90$ (Defekte 10^{19}cm^{-3}), reines H_2 (10^{20}cm^{-3}).
Katalysator: Ni/Pt ($0,1\text{--}1\text{ Gew.-%}$), senkt die Temperatur um $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ und erhöht die Rate um $20\text{--}30\text{ }\%$.
Ziel: Partikelgrößenabweichung $<10\text{ }\%$, Sauerstoffgehalt $\text{WO}_{2.9} \pm 0,02$.

3.4 Herausforderungen der industriellen Produktion

3.4.1 Konsistenz und Produktivität

Der Sauerstoffgehalt schwankt zwischen den Chargen um $\pm 0,02$, was zu einem Ertragsunterschied von $5\text{--}10\text{ }\%$ führt. Lösung: Online-Überwachung (O_2 -Analysator, Genauigkeit $\pm 0,01\text{ }\%$) und PID-Regelung.

3.4.2 Energieverbrauch und Kostenkontrolle

Mainstream-Prozesse liegen bei $1\text{--}2\text{ kWh/kg}$, neue Prozesse bei $3\text{--}8\text{ kWh/kg}$. Optimierung: Wärmerückgewinnung ($>50\text{ }\%$), Rohstoffrecycling ($>90\text{ }\%$).

3.4.3 Umweltschutz und Sicherheit

H_2 -Emission $<0,1\text{ Vol.-%}$, NH_3 -Rückgewinnung $>95\text{ }\%$. Hochdruckprozesse erfordern regelmäßige Inspektionen (Druckbehälternorm ASME VIII).

Anhang: Versuchsprotokoll zur Herstellung von blauem Wolframoxid

Labor (Wasserstoffreduktionsmethode, 5 g)
Rohstoff: 5 g APT ($>99,95\text{ }\%$)
Gerät: Rohrofen (Innendurchmesser 50 mm)
Bedingungen: 650°C , H_2/Ar ($10:90$), $0,5\text{ l/min}$, 4 h
Produkt: BTO, $10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$, Ausbeute $>95\text{ }\%$

Industriell (Wasserstoffreduktionsverfahren, 100 kg)
Rohstoff: 100 kg APT
Ausstattung: Drehrohrfen ($1,5\text{ m}$ Durchmesser)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bedingungen: 700 °C, H₂2m³ /h, 3 U/min, 6 h

Produkt: BTO, 20–50 μ m , Ausbeute >98 %

Hydrothermale Methode (50 g)

Rohstoffe: 0,1 M Na₂WO₄ , 0,05 M NaBH₄

Ausrüstung: Autoklav (100 mL)

Bedingungen: 200°C, 15 bar, 24 h

Produkt: Nanopartikel, 20-50 nm, Ausbeute >90%

Anhang: Datenblatt zum Herstellungsprozess von blauem Wolframoxid

Technologie	Rohstoff	Temperatur (°C)	Atmosphäre/ Medium	Zeit	Partikelgröße	Ertrag (%)	Energieverbrauch (kWh/kg)	Anwendung
Wasserstoffreduktionsmethode	APT, WO ₃	500-800	H ₂ / Ar (5 - 20%)	2-6 Stunden	10-50 μm	95-99	1-2	Wolframpulverherstellung
Hydrothermale Methode	Na ₂ WO ₄	180-250	H ₂ O, NaBH ₄	12-24 Stunden	20-50 nm	90-95	2-3	Photokatalysator
Überkritische Fluidmethode	APT, H ₂ WO ₄	250-350	CO ₂ , H ₂	1-4 Stunden	10-30 nm	95-98	3-4	Sensor
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	WF ₆	400-600	H ₂ / Ar (5 %)	0,5-2 h	20-100 nm (Linie)	80-90	5-10	Elektrochromer Film
Plasmamethode	WO ₃	300-500	Ar /H ₂ (20 %)	0,5-2 h	5-20 nm	85-95	5-8	Hochaktive Materialien
Mikrowellenunterstützte Methode	GEEIG NET	300-500	H ₂ , 5-30 Ethylenglykol	Minuten	1-10 μm	90-95	1-2	Schnelles Experiment
Mechanochemische Methode	WO ₃ , Mg	25-50	Ar	4-12 Stunden	5-20 μm	80-90	1-1,5	Kleinserienproduktion
Elektrochemische Methode	Na ₂ WO ₄	25-80	H ₂ SO ₄ , 2-5 V	1-4 Stunden	50-200 nm (Membran)	70-85	2-3	Dünnschichtanwendungen
HERGESTELLT VON: CTIA GROUP								

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Tabelle 3-1: Ausrüstung zur Herstellung von blauem Wolframoxid

Gerätename	Anwendbares Verfahren	Spezifikationen/Parameter	Funktion und Verwendung	Bemerkung
Rohröfen	Wasserstoffreduktionsmethode	Innendurchmesser 50-100 mm, Heizzone 0,5-1 m, max. 1000°C	Kleinmaßstäbliche Reduzierung von APT oder WO ₃ zur Erzeugung von BTO für den Laborgebrauch	Temperaturregelgenauigkeit ±5°C, Quarz-/Korundrohr
Drehrohröfen	Wasserstoffreduktionsmethode	Durchmesser 1-2 m, Länge 10-20 m, Geschwindigkeit 1-5 U/min	Kontinuierliche Großproduktion von BTO, industrieller Mainstream-Ausrüstung	Leistung 100-1000 kg/Charge
Wirbelschichtreaktor	Wasserstoffreduktionsmethode	Durchmesser 0,5-1 m, Höhe 2-5 m, Luftstrom 1-5 m³/h	Kontinuierliche Produktion, Reduzierung der Partikelsuspension, verbesserte Effizienz	Ausbeute >98%, Industrialisierungstrend
Bandöfen	Wasserstoffreduktionsmethode	Bandbreite 0,5-1 m, Länge 5-10 m, max. 800°C	Kontinuierliche Reduktion von Dünnschichtrohstoffen, geeignet für kleine und mittlere Maßstäbe	Leistung 50-500 kg/h
Autoklav	Hydrothermale Methode, Solvothermale Methode	Volumen 50 ml – 10 l, Druck 20 – 50 bar, maximal 300 °C	Nano-BTO-Synthese, Hochdruck- und Hochtemperaturreaktion	Material: 316L Edelstahl/PTFE-Auskleidung
Überkritischer Reaktor	Überkritische Fluidmethode	Volumen 100 mL-1 m³, Druck 50 MPa, maximal 400°C	Überkritische CO ₂ - oder Alkohol-Mediumreduktion zur Herstellung von hochreinem Nano-BTO	Ausgestattet mit Dosierpumpe und Wärmetauscher
CVD-Ofen	Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)	Vakuumgrad 10 ⁻³ - 10 ⁻¹ Pa, max. 600°C, Leistung 100-300 W	Abscheidung von BTO-Dünnschichten oder Nanodrähten für hochpräzise Anwendungen	Gasverteilungs- und Grundheizungssystem
Magnetronspuiten	Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)	Vakuumgrad <10 ⁻⁶ Pa, Leistung 100-300 W	Sputtern eines WO ₃ -Targets zur Erzeugung eines BTO-Films	HF- oder DC-Stromversorgung
Plasmareaktor	Plasmamethode	Volumen 50-500 l	Reduktion durch	Ausgestattet mit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Gerätename	Anwendbares Verfahren	Spezifikationen/Parameter	Funktion und Verwendung	Bemerkung
		Leistung 100–500 W, 13,56 MHz	hochenergetischen Plasmabeschuss zur Erzeugung von Nano-BTO	Hochfrequenzstromversorgung und Vakuumpumpe
Mikrowellenofen	Mikrowellenunterstützte Methode	Leistung 500–1000 W (Labor), 10–50 kW (Industrie)	Schnelle Hitzereduzierung zur Erzeugung von Mikron-/Nano-BTO	Mit SiC- oder Quarzbehälter
Planeten-Kugelmühle	Mechanochemische Methode	Drehzahl 300–600 U/min, Kugel-Material-Verhältnis 20:1	Mechanische Energie zermahlt WO ₃ und Reduktionsmittel, um BTO zu erzeugen	ZrO ₂ - Kugel, Schutz durch inerte Atmosphäre
Elektrolysezelle	Elektrochemische Methode	Spannung 2-5 V, Stromdichte 10-50 mA/cm ²	Elektroreduktion von WO ₃ oder Na ₂ WO ₄ zur Erzeugung von BTO-Film oder -Pulver	Ausgestattet mit Kathode/Anode und Rührvorrichtung
Kugelmühle	Rohstoffvorbehandlung	Drehzahl 200-300 U/min, Kugel-Material-Verhältnis 10:1	Zerkleinern Sie APT oder Wolframsäure auf 5–10 µm , um die Reaktionsgleichmäßigkeit zu verbessern	ZrO ₂ oder Stahlkugel
Luftstrahlmühle	Rohstoffvorbehandlung	Druck 0,5-1 MPa	Ultrafeine Vermahlung von APT oder WO ₃ , Partikelgröße <10 µm	Hochdruck-Luftstromantrieb
Ofen	Rohstoffvorbehandlung	Max. 200°C, Volumen 50-500 L	Trockenes APT oder Wolframsäure zur Entfernung von Kristallwasser	Zwangskonvektion, Temperaturregelung ±2°C

Tabelle 3-2: Prüf- und Testgeräte für blaues Wolframoxid

Instrumentenname	Prüflinge	Spezifikationen/Parameter	Zweck und Funktion	Bemerkung
Röntgendiffraktometer (XRD)	Kristallstruktur und Phasenzusammensetzung	Cu Kα-Strahlung, 2θ-Bereich 10–80°, Auflösung 0,02°	Bestätigen Sie die BTO-Phase (WO _{2.9} , W ₂₀ O ₅₈) und erkennen Sie die Verunreinigungsph	Entspricht JIS H 1403-2001

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Instrumentenname	Prüflinge	Spezifikationen/ Parameter	Zweck und Funktion	Bemerkung
			ase	
Rasterelektronenmikroskopie (REM)	Morphologie und Partikelgröße	Vergrößerung 50-100.000×, Auflösung 1-5 nm	Die Morphologie von BTO-Partikeln, Nanostäben oder Nanodrähten	Energiedispersive Spektrometeranalyse (EDS) von Elementen
Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	Nanostrukturen und Defekte	Vergrößerung 50.000-1.000.000×, Auflösung <1 nm	Analyse des BTO-Nanogitters und der Sauerstoffdefektverteilung	Hochauflösende Bildgebung
Laser-Partikelgrößenanalysator	Partikelgrößenverteilung	Messbereich 0,01–1000 μm, Genauigkeit ±1 %	Ermittlung der Partikelgrößenverteilung des BTO-Pulvers (D ₁₀ , D ₅₀ , D ₉₀)	Konform mit ISO 10397:1993
Prüfgerät für spezifische Oberflächen (BET)	Oberfläche und Porosität	N ₂ -Adsorption, Bereich 0,1-1000 m ² /g, Genauigkeit ±2 %	Bestimmen Sie die spezifische Oberfläche von BTO und bewerten Sie die aktiven Stellen	Stickstoffadsorptionsverfahren bei niedrigen Temperaturen
Thermogravimetrischer Analysator (TGA)	Thermische Stabilität und Feuchtigkeitsgehalt	Maximal 1000°C, Heizrate 5-20°C/min	Analyse des thermischen Zersetzungsverhaltens und des Wasserverlusts von BTO während der Rohstoffvorbehandlung	Differenzkalorimetrie (DSC)
Ultraviolett-Vis-Spektrometer (UV-Vis)	Bandlücke und Farbeigenschaften	Wellenlänge 200–800 nm, Genauigkeit ±0,5 nm	Bestimmung der BTO-Bandlückenenergie (~2,4-2,8 eV) und der optischen Eigenschaften	Diffuser-Modus
Optisches Emissionsspektrometer mit induktiv	Elementgehalt und Verunreinigungen	Nachweisgrenze <1 ppm, Bereich 0,1–1000 ppm	Erkennen Sie Wolframgehalt und Verunreinigungen	Konform mit ISO 11885:2007

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Instrumentenname	Prüflinge	Spezifikationen/ Parameter	Zweck und Funktion	Bemerkung
gekoppeltem Plasma n (ICP-OES)			wie Fe und Mo in BTO	
Sauerstoffgehalt- Analysator	Sauerstoffgehalt	Genauigkeit $\pm 0,01$ %, Bereich 0–30 Gew.- %	Online- oder Offline-Erkennung des BTO- Sauerstoffgehalts (WO _{2.9} $\pm 0,02$)	Industrielle Prozesskontrolle
pH-Meter	Lösung ph	Bereich 0–14, Genauigkeit $\pm 0,01$	Stellen Sie den pH- Wert der hydrothermalen oder elektrochemischen Reaktionslösung ein (6-8).	Mit Glaselektrode
Leitfähigkeitsmessgerät	Leitfähigkeit der Lösung	Bereich 0,1–1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Genauigkeit ± 1 %	Überwachung der Elektrolytionenkon- zentration während der elektrochemischen Vorbereitung	Raumtemperaturkal- ibrierung
Manometer	Reaktionsdruck	Bereich 0–50 MPa, Genauigkeit $\pm 0,1$ MPa	Überwachung von überkritischen , Fluiden oder hydrothermale Hochdruck Reaktionen	Korrosionsbeständi- ges Material
Durchflussmesser	Gasfluss	Bereich 0,1–10 l/min, Genauigkeit ± 2 %	Kontrollieren Sie den Fluss reduzierender Atmosphären wie H ₂ und Ar	Massen- oder Volumendurchfluss messer
Infrarot-Thermometer	Oberflächentem- peratur	Bereich 0– 1000 °C, Genauigkeit ± 1 °C	Berührungslose Messung der Temperatur von Produktionsanlage n oder Produkten	Industrielle Online- Überwachung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Tabelle 3-3: Roh- und Hilfsstoffe für blaues Wolframoxid

Materialname	Chemische Formel	Spezifikation/Reinheit	Zweck und Funktion	Quelle/Anmerkungen
Ammoniumparawolframat (APT)	$(\text{NH}_4)_{10}[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	>99,95 %, Partikelgröße 20–50 µm	Gängige Rohstoffe, Wasserstoffreduktionsverfahren zur Herstellung von BTO	Entspricht GB/T 4324-2012
Wolframsäure	H_2WO_4	>99%, Partikelgröße 10–30 µm	Alternative Rohstoffe, hydrothermale oder elektrochemische Herstellung von BTO	Reinigung durch Säurelaugung
Wolframtrioxid (Gelbes Wolfram)	WO_3	>99,9 %, Partikelgröße 5–20 µm	Vorläufer, verschiedene Methoden zur Reduzierung und Erzeugung von BTO	Herstellung von kalzinierter Wolframsäure
Wolframkonzentrat	CaWO_4 oder FeMnWO_4	Wolframgehalt 50–70 Gew.-%, Verunreinigungen <1000 ppm	Kostengünstiger Rohstoff, der nach der Reinigung in der BTO-Produktion verwendet wird	Scheelit/ Wormit
Natriumwolframat	Na_2WO_4	>99%, wässrige Lösung 0,1–0,5 M	Hydrothermale oder elektrochemische Vorläufer	Reagenzien in Industriequalität
Wolframhexafluorid	WF_6	>99,99 %, Gas	Herstellung von BTO-Dünnschichten oder Nanodrähten durch CVD	Hochreines Gas
Wolframhexachlorid	WCl_6	>99,9 %, Pulver oder Gas	Herstellung des BTO-Vorläufers durch CVD	Flüchtig
Wasserstoff (H ₂)	H_2	>99,999 %, Durchflussrate 0,5–5 l/min	Reduktionsmittel, Wasserstoffreduktion und andere Methoden	Hochreines Industriegas
Argon (Ar)	Ar	>99,99 %, Durchflussrate 0,1–10 l/min	Schutzgas oder Trägergas, Kontrolle der Reduktionstiefe	Inertgas
Stickstoff (N ₂)	N_2	>99,99 %, Durchflussrate 0,1–5 l/min	Schutzgas zur Vermeidung von Oxidation	Häufig in der Industrie verwendet
Natriumborhydrid	NaBH_4	>98%, 0,01–0,1 M Lösung	Hydrothermales Reduktionsmittel, das	Chemische Reagenzien

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Materialname	Chemische Formel	Spezifikation/Reinheit	Zweck und Funktion	Quelle/Anmerkungen
			Sauerstoffdefekte einführt	
Oxalsäure	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	>99 %, 0,05–0,2 M Lösung	Hydrothermales oder solvothermales Reduktionsmittel	Analytische Qualität
Ethanol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	>99,5 %, Lösungsmittel	Solvothermales Medium, Morphologiekontrolle	Industriequalität oder analytische Qualität
Ethylenglykol	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	>99 %, Lösungsmittel	Solvothermales Medium, das eine reduzierende Atmosphäre erzeugt	Lösungsmittel mit hohem Siedepunkt
CTAB	$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$	>99 %, 0,01–0,1 M	Tenside, die die Morphologie von Nanostäben/Drähten regulieren	Quartäres Ammoniumsalz
Magnesiumpulver	Mg	>99%, Partikelgröße <50 μm	Mechanochemisches Reduktionsmittel	Zur Entfernung von MgO ist eine Säurewäsche erforderlich
Schwefelsäure	H_2SO_4	>98%, 1-5 M Lösung	Elektrochemischer Elektrolyt, pH-Einstellung	Reagenzien in Industriequalität
Kohlendioxid (CO_2)	CO_2	>99,9 %, überkritischer Zustand (31,1 °C, 7,38 MPa)	Überkritisches Fluid-Methodenmedium	Versorgung mit Hochdruckgasflaschen

ich illustriere

Produktionsausrüstung:

Umfasst Labor- (Rohröfen) bis hin zu industriellen Maßstäben (Drehrohröfen, Wirbelschichtöfen) sowie Geräte für neue Technologien (Plasmareaktoren, CVD-Öfen).

Die Parameter basieren auf der industriellen Praxis, wie z. B. Drehofenleistung 100–1000 kg/Charge, Wirbelschichtluftstrom 1–5 m^3/h .

Inspektions- und Prüfgeräte:

Einschließlich Strukturanalyse (XRD, SEM), Leistungstests (UV-Vis, BET) und Prozesskontrolle (Sauerstoffgehaltsanalysator, Durchflussmesser).

Entspricht internationalen Standards wie ISO 10397:1993 (Partikelgrößenverteilung), ISO 11885:2007 (Elementaranalyse).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Roh- und Hilfsstoffe:

Die Rohstoffe sind hauptsächlich APT, ergänzt durch Wolframsäure, Wolframkonzentrat usw.; Gase (H_2 , Ar) und chemische Reagenzien ($NaBH_4$, CTAB) unterstützen eine Vielzahl von Prozessen.

Die Spezifikationen beziehen sich auf Industriestandards, wie beispielsweise APT-Reinheit >99,95 % (GB/T 4324-2012).

Datenquelle:

Basierend auf Kapitel 3 von „Blaues Wolframoxid: Eigenschaften, Herstellung und Anwendungen“, kombiniert mit Online-Informationen (wie dem Eintrag „Wolframoxid“ in der Baidu-Enzyklopädie) und Branchenerfahrung.

Verweise

Akademische Arbeiten

1867) . Über die Reduktion von Wolframsäure. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 157, 167- 179 .

Schubert, WD, & Lassner, E. (1992). Wolframblauoxid: Entstehung und Reduktionsverhalten. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 10 (3), 133-141.

Granqvist, CG (2000). Elektrochrome Wolframoxidschichten: Fortschrittsbericht 1993–1998. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 60 (3), 201-262.

Tajima, Y. (2005). Blaues Wolframoxid als antibakterielles Mittel. *Mini - Reviews in Medicinal Chemistry*, 5 (3), 255- 268 .

Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG (2006). Defektinduziertes blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserspaltung. *Chemistry of Materials*, 18 (24), 5799- 5804 .

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS (2009). Synthese und elektrochrome Eigenschaften von WO_{3-x} -Nanostäben. *Journal of Physical Chemistry C*, 113 (22), 9655- 9658 .

Chen, Z., & Cao, M. (2011). Einfache Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln auf hydrothermale Wege. *Materials Letters*, 65 (14), 2169-2171.

Guo, C., Yin, S., & Sato, T. (2011). Photokatalytische Aktivität von blauen Wolframoxid- Nanostrukturen ($WO_{2.9}$). *Angewandte Katalyse B : Umwelt*, 105 (1 -2), 82- 88 .

Yan, J., Wang, T., & Wu, G. (2015). Wolframoxid- Nanodrähte: Anwendungen in der Energiespeicherung. *Journal of Materials Chemistry A*, 3 (16), 8546- 8553 .

Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q. (2016). Leistungsstarke blaue Wolframoxid-Nanodrähte für die Gassensorik. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (5), 3528- 3535 .

Fait , MJG, Moukhina , E., & Feist, M. (2016). Thermische Zersetzung von Ammoniumparawolframat zu blauem Wolframoxid. *Thermochemie Akten*, 637, 38- 50 .

Li, W., Fu, Z., & Zhang, J. (2018). Morphologiekontrolle von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen. *Nanomaterialien*, 8 (12), 1013.

Kim, J., Lee, S., & Park, H. (2018). Plasmasynthese von Wolframoxid-Nanopartikeln. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18 (5), 3421- 3426 .

Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F. (2019). Verbesserte photokatalytische Strategien mit blauem Wolframoxid. *Applied Catalysis B : Environmental*, 242, 458-467.

Huang, ZF, Song, J., & Pan, L. (2019). Blaues Wolframoxid für Photokatalyse und Elektrochemie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Advanced Materials , 31 (49), 1904688.

Wang, X., Liu, X., & Licht, G. (2019). Synthese von blauem Wolframoxid mittels CO₂- Elektrolyse . Kohlenstoff , 149 , 772- 780 .

Liu, Y., Wang, T., & Sun, X. (2020). Blaue Wolframoxidfilme für elektrochrome Energiespeicherung. Zeitschrift für Chemieingenieurwesen , 401 , 126091.

Chen, P., Li, N., & Chen, Q. (2021). Nahinfrarot-elektrochrome Eigenschaften von blauem Wolframoxid. Coatings , 11 (5), 568 .

Sugime , H., Sato, T., & Nakagawa, R. (2021). Ultralange blaue Wolframoxid-Nanodrähte durch Dampfabscheidung. Kohlenstoff, 172 , 772- 780 .

& Nie, Y. (2021). Nichtstöchiometrische Wolframoxide für elektrochrome Anwendungen. Materials Advances , 2 (19), 6208-6227.

Patente

Huggins, RA (1963). *Verfahren zur Extraktion und Reinigung von Wolfram* (US- Patent Nr. 3,079,226) . US-Patent- und Markenamt.

Yamamoto, T., & Sato, K. (2005) . *Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel* (Japanisches Patent Nr. JP2005239471A). Japanisches Patentamt.

Cronin, JP, Agrawal, A. , & Tonazzi , JC (2006). Produktionsprozess von WO₃ für elektrochrome Geräte (US Patent Nr. US20060147366A1). US-Patent- und Markenamt.

Schmidt, M., & Fischer, R. (2007). *Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln* (Europäisches Patent Nr. EP1775269A 1) . Europäisches Patentamt.

Zhang, X., & Li, Y. (2010). *Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver* (Chinesisches Patent Nr. CN101830511A) . Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

Jacobson, AJ, & Yang, Q. (2011). *Quaternäre Oxide und Katalysatoren, die quaternäre Oxide enthalten* (US

Patent Nr. 7,901,660 B2). US-Patent- und Markenamt.

Kim, HS, & Park, JH (2013) . *Herstellung von Wolframoxid-Nanostrukturen* (Koreanisches Patent Nr. KR101234517B1). Koreanisches Amt für geistiges Eigentum.

Li, J., & Wang, H. (2014). *Herstellungsverfahren für violetteres Wolframoxid* (Chinesisches Patent Nr. CN103803652A). Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

Zhang, L., & Chen, Q. (2015). *Herstellungsverfahren für nanovioletteres Wolframoxid* (Chinesisches Patent Nr. CN104477999 A) . Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.
für geistiges Eigentum .

(2015). *Verfahren zur Herstellung von Nano-Wolframoxid und Nano-Wolframpulver* (Internationales Patent Nr. WO2015188299A1). WIPO.Organisation für geistiges Eigentum .

(2016). *Wolframoxid-Primerzusammensetzungen* (Internationales Patent Nr. WO2016101057A1).

Liu, W., & Zhao, X. (2017). *Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe* (Chinesisches Patent Nr. CN106430292 A) . Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

Kim, HS, Lee, SY, & Choi, J. (2017). *Verfahren zur Herstellung von Wolframblauoxidpartikeln* (Koreanisches Patent Nr. KR101733695B1). Koreanisches Amt für geistiges Eigentum.

Zhao, Y., & Zhang, T. (2019). *Herstellungsverfahren für violetteres Wolframoxid- Nanopulver*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

(*Chinesisches Patent Nr. CN109205669 A*) . Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.
für geistiges Eigentum . (2019). *Verfahren zur Herstellung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid*
(Internationales Patent Nr. WO2019234138A1).

Normen

Normenausschuss

. (2001). *JIS H 1403-2001: Methoden zur chemischen Analyse von Wolframpulvern* . Japanische Normungsvereinigung.

Deutsch Institut für Normung . (2003). DIN

51001-2003 : Allgemeine Grundlagen der Analyse anorganischer *nichtmetallischer Werkstoffe* . LÄRM.
Internationale Organisation für Normung. (2007). *ISO 11885:2007: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung ausgewählter Elemente mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)* . ISO

Nationale Normungsbehörde der Volksrepublik China. (2012). GB/

T 4324-2012: Methoden zur chemischen Analyse von Wolfram . Chinesische Normungsbehörde.

Technischer Ausschuss für Metallstandardisierung. (2015). *YS/ T 1090-2015: Violette Wolframoxid*.
Chinesisches Ministerium für Industrie und Informationstechnologie.

Koreanische Normungsvereinigung. (2016). *KS D 9502-2016: Analysemethoden für Wolfram und Wolframlegierungen* . Saudi-Arabien

Amerikanische Gesellschaft für Prüfung und Materialien. (2017). *ASTM B761-17: Standardprüfverfahren zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von hochschmelzenden Metallpulvern und verwandten Verbindungen mittels Laserlichtstreuung* . ASTM International.

Internationale Elektrotechnische Kommission. (2017). *IEC 62321-4:2017: Bestimmung bestimmter Stoffe in elektrotechnischen Produkten – Teil 4 : Quecksilber in Polymeren, Metallen und Elektronik* . IEC.

Standardisierungsagentur der Russischen Föderation. (2019). GOST

25542.5- 2019 : *Methoden zur chemischen Analyse von Wolframkonzentraten* . Rosstandart .

Internationale Organisation für Normung. (1993). *ISO 10397:1993: Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Wolframpulvern* . ISO

Bücher

Granqvist, CG (1995). *Handbuch anorganischer elektrochromer Materialien* . Elsevier .

Rao, CNR, & Gopalakrishnan, J. (1997). *Neue Richtungen in der Festkörperchemie* . Cambridge University Press.

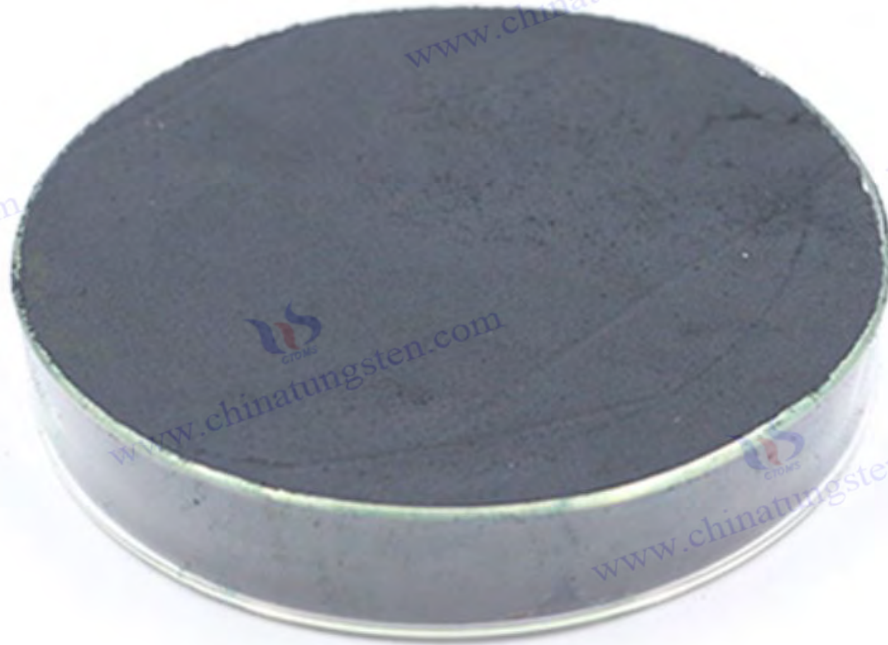
Lassner, E. & Schubert, WD (1999). *Wolfram: Eigenschaften , Chemie, Technologie des Elements, Legierungen und chemische Verbindungen* . Springer.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Klabunde, KJ (2001). *Nanoskalige Materialien in der Chemie* . Wiley . , PMS, Mortimer, RJ, & Rosseinsky , DR (2007). *Elektrochromie und elektrochrome Geräte* . Cambridge University Press .



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($\text{WO}_{2.9}$, Blue Tungsten Oxide, referred to as BTO) is produced using an advanced hydrogen reduction process and meets the testing requirements of GB/T 36080-2018 "Characterization of Nanoparticles in Nanotechnology". $\text{WO}_{2.9}$ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide and high-density tungsten alloys due to its dark blue powder crystals, mixed valence (W^{5+} and W^{6+}) and high reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $\text{WO}_{2.9}$ (or $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$), blue tungsten oxide. Purity $\geq 99.95\%$, with extremely low impurity content.

Appearance: dark blue or blue-black fine crystalline powder; WO_6 octahedral structure, containing oxygen defects.

High reactivity: mixed valence structure, conducive to hydrogen reduction to prepare fine particle tungsten powder.

Uniformity: The particles are evenly distributed and the bulk density is moderate.

Stability: The chemical properties are stable under dry conditions.

3. Product Specifications

Type	Particle size (μm)	Purity (wt%)	Bulk density (g/cm ³)	Oxygen content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Micrometer level	10-15	≥ 99.95	1.5-1.8	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($\text{WO}_{2.9}$), actual control range: 29.0-29.5wt %				
Bulk density	1.5-2.2 g/cm ³ , slightly increasing with increasing particle size, optimizing reduction efficiency				
Customizable	Particle size, purity or bulk density can be customized according to customer needs				

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed plastic bottle or vacuum aluminum foil bag, net weight 100g, 500g or 1kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Quality Assurance: Each batch comes with a quality certificate, including purity, particle size distribution (laser method), crystal form (XRD) and oxygen content data.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

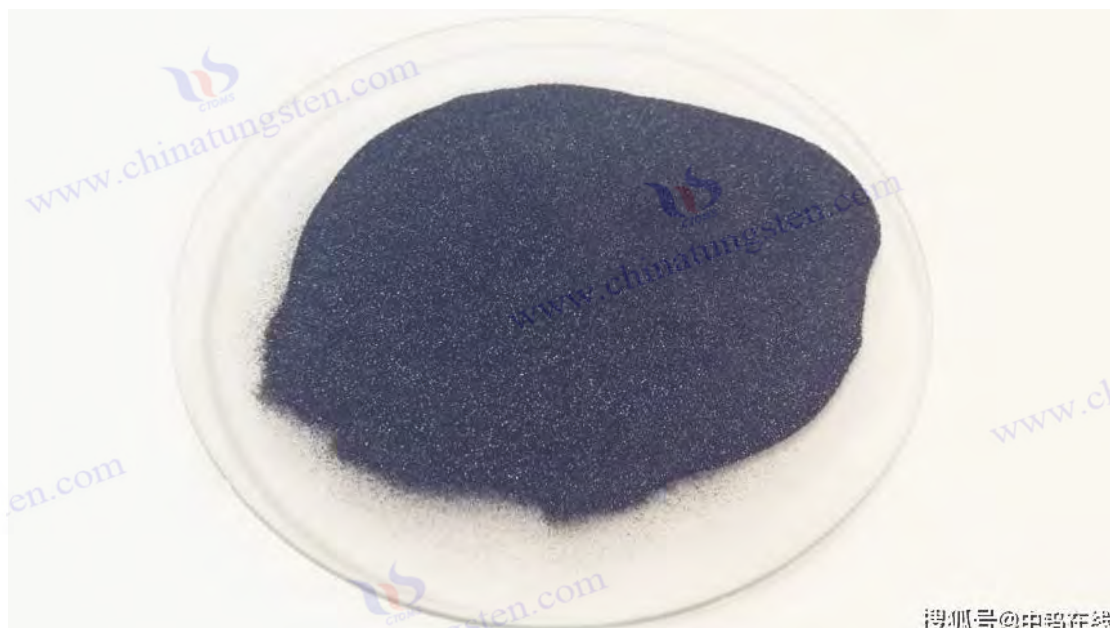
Tel: +86 592 5129595

For more information about blue tungsten, please visit the China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.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



搜狐号@中钨在线

Kapitel 4 Nachweis und Charakterisierung von blauem Wolframoxid

Blaues Wolframoxid (BTO) ist ein nichtstöchiometrisches Übergangsmetalloxid ($\text{WO}_{2.9}$) und bietet aufgrund seiner einzigartigen Sauerstoffdefektstruktur und hervorragenden photoelektrischen Eigenschaften breite Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Photokatalyse, Elektrochromie und Energiespeicherung. Die volle Entfaltung seiner Leistungsfähigkeit hängt jedoch von der genauen Charakterisierung seiner chemischen Zusammensetzung, Kristallstruktur, Mikromorphologie und funktionellen Eigenschaften ab. Wissenschaftliche Nachweise und Analysen sind nicht nur der Eckpfeiler der Qualitätsbewertung von BTO, sondern auch die Grundlage für die Optimierung des Herstellungsprozesses und die Aufdeckung des Struktur-Leistungs-Verhältnisses. Dieses Kapitel erläutert systematisch die Charakterisierungstechnologie von BTO aus vier Blickwinkeln: Analyse der chemischen Zusammensetzung, der Phasenzusammensetzung und -struktur, der Morphologie- und Partikelgrößenanalyse sowie der Leistungsprüfung. Dabei werden gängige Methoden (wie ICP-OES, XRD, SEM) und neue Methoden (wie Raman-Spektroskopie, photokatalytische Abbaurate) berücksichtigt. Durch detailliertes Versuchsdesign, Dateninterpretation und Anwendungsdiskussionen soll dieses Kapitel theoretische Tiefe für die akademische Forschung liefern und eine Grundlage für die Qualitätskontrolle in der industriellen Produktion schaffen.

4.1 Analyse der chemischen Zusammensetzung

Die Analyse der chemischen Zusammensetzung bildet den Ausgangspunkt für die BTO-Charakterisierung. Sie liefert direkte Informationen zu dessen Elementzusammensetzung und Reinheit, was wiederum einen entscheidenden Einfluss auf die nachfolgende Leistungsforschung hat. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf zwei Schlüsseltechnologien: die optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) und Massenspektrometrie (ICP-MS) zur Erkennung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Verunreinigungen sowie die Inertgasfusion zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts.

4.1.1 ICP-OES und ICP-MS (Erkennung von Verunreinigungen)

Technische Grundlagen und Instrumentenauswahl

ICP-OES und ICP-MS sind die bevorzugten Methoden zur Analyse des Wolframgehalts und von Spurenverunreinigungen (wie Fe, Mo, Na, S) in BTO. ICP-OES nutzt Hochtemperaturplasma (6000–10000 K), um Probenatome zur Emission charakteristischer Spektren anzuregen, und erfasst die Lichtintensität bestimmter Wellenlängen durch Photomultiplier-Röhren, um den Elementgehalt zu quantifizieren. Die Nachweisgrenze liegt üblicherweise bei 0,1–1 ppm. ICP-MS kombiniert zudem Massenspektrometrie-Technologie, um durch Ionenmassentrennung eine höhere Empfindlichkeit (Nachweisgrenze <0,01 ppb) zu erreichen, was sich besonders für die Spuren- und Ultraspurenanalyse eignet. Die Komplementarität der beiden Verfahren macht sie für die BTO-Qualitätskontrolle unverzichtbar.

Häufig verwendete Instrumente: ICP-OES wie PerkinElmer Optima 8300 (Leistung 1300–1500 W, Wellenlängenbereich 165–900 nm); ICP-MS wie Agilent 7900 (Massenbereich 2–260 amu, ausgestattet mit Oktopol- Kollisionszelle).

Referenznorm: ISO 11885:2007 (Bestimmung von Elementen in der Wasserqualität) bietet Betriebsspezifikationen.

Versuchsablauf und Betriebsdetails

Eine sorgfältige Probenvorbereitung ist der Schlüssel zu einer erfolgreichen Analyse. Typische experimentelle Schritte sind:

Probenaufschluss

0,1–0,5 g BTO-Pulver abwiegen und in einen Aufschlussbehälter aus Polytetrafluorethylen geben. 10 mL konzentrierte Salpetersäure (HNO_3 , 65 %) und 5 mL Flußsäure (HF , 40 %) zugeben. In einer Mikrowellen-Aufschlussapparatur erhitzen (200 °C, 30–40 min, Druck 15–20 bar). Nach dem Abkühlen mit Reinstwasser auf 100 mL verdünnen.

Instrumentenkalibrierung

Bereiten Sie Standard-Wolframlösungen (Konzentration 0,1–100 ppm, Matrixanpassung) und Standardkurven von Verunreinigungselementen (wie Fe, Mo, Na) vor und stellen Sie sicher, dass der lineare Korrelationskoeffizient $R^2 > 0,999$ ist. Verwenden Sie 2%ige HNO_3 als Kalibrierblindwert.

Messbedingungen

ICP-OES wurde mit einer Argon- Flussrate von 12–15 l/min und einem Zerstäuberdruck von 0,2–0,3 MPa eingestellt, um charakteristische Spektrallinien wie W (207,911 nm), Fe (238,204 nm) und Mo (202,032 nm) zu erkennen. ICP-MS verwendete He- Kollisionsgas (4–5 ml/min), um Interferenzen zu reduzieren und Isotope wie ^{56}Fe , ^{95}Mo und ^{23}Na zu überwachen.

Datenverarbeitung

Das Hintergrundsignal wurde subtrahiert und die Elementkonzentration berechnet. Jede Probe wurde

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dreimal gemessen und der Durchschnittswert ermittelt. Die relative Standardabweichung (RSD) lag bei $<2\%$.

Interpretation der Ergebnisse und Anwendungsrelevanz

Wolframgehalt

Der Wolframgehalt von BTO in Industriequalität beträgt üblicherweise 79–81 Gew.-% (theoretischer Wert $\text{WO}_{2.9}$ 80,6 Gew.-%). Eine Abweichung von $<1\%$ weist auf eine hohe Reinheit der Probe hin und erfüllt die Anforderungen von GB/T 4324-2012. Im Labor synthetisierte Proben können aufgrund von Restvorläufern (wie APT) etwas niedrigere Werte aufweisen.

Verunreinigungsgrad

Fe <10 ppm, Mo <20 ppm und Na <50 ppm sind typische Industriestandards. Überschüssiges Na (>100 ppm) wird häufig durch die Verwendung von Na_2WO_4 in der Hydrothermalmethode verursacht, und die Reinigungsschritte müssen optimiert werden. ICP-MS kann Verunreinigungen im ppb-Bereich erkennen und eignet sich für hohe Reinheitsanforderungen elektronischer Materialien (z. B. Sensoren).

Fehleranalyse

Unzureichende HF kann zu einer unvollständigen Auflösung von Wolfram führen, und polyatomare Interferenzen im ICP-MS (wie $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$ auf ^{56}Fe) müssen durch Kollisionsgas korrigiert werden.

Akademischer und industrieller Wert

ICP-OES wird aufgrund seiner schnellen und durchsatzstarken Eigenschaften häufig zur Chargenerkennung eingesetzt, während die ultrahohe Empfindlichkeit der ICP-MS die Untersuchung der Auswirkungen von Sauerstoffdefekten auf die Adsorption von Verunreinigungen ermöglicht. Beispielsweise wird in der Literatur berichtet, dass Mo-Verunreinigungen (>50 ppm) die Bandlücke von BTO verändern und die photokatalytische Leistung beeinträchtigen können (Guo et al., 2011).

4.1.2 Bestimmung des Sauerstoffgehalts

Technisches Prinzip und Instrumentenübersicht

Der Sauerstoffgehalt ist der Kernparameter des nichtstöchiometrischen Verhältnisses von BTO, der direkt dessen Farbe (dunkelblaues $\text{WO}_{2.9}$ vs. gelbes WO_3) und Leistung (z. B. Leitfähigkeit) bestimmt. Beim Inertgasfusionsverfahren wird durch Schmelzen der Probe bei hoher Temperatur Sauerstoff freigesetzt, der mit Kohlenstoff im Graphittiegel reagiert und CO_2 erzeugt, das durch einen Infrarotdetektor mit einer Erfassungsgenauigkeit von $\pm 0,01$ Gew.-% quantifiziert wird.

Instrument: LECO ON736 Sauerstoff- und Stickstoffanalysator, ausgestattet mit Hochfrequenz-Induktionsofen (bis 3000°C), Trägergas He (99,999 %).

Nachweisbereich: 0–30 Gew.-%, anwendbar für WO_3 (20,69 Gew.-%) bis WO_2 (13,79 Gew.-%).

Versuchsablauf und Vorsichtsmaßnahmen

Probenvorbereitung: 0,05–0,1 g BTO-Pulver wurden abgewogen, in einen Nickelkorb gegeben und in einem Ofen (100°C , 1 h) getrocknet, um adsorbiertes Wasser zu entfernen und Feuchtigkeitsstörungen zu vermeiden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zur Kalibrierung der Infrarotdetektorreaktion wurden die Standardsubstanzen WO_3 (Sauerstoffgehalt 20,69 Gew.-%) und WO_2 (13,79 Gew.-%) verwendet, um die Linearität sicherzustellen.

Bestimmungsverfahren: Die Probe wird in einer He-Atmosphäre (0,5 L/min) auf 2500°C erhitzt, Sauerstoff wird freigesetzt und in CO_2 umgewandelt, und die Detektion

Die Peakfläche wurde gemessen und in den Sauerstoffgehalt umgerechnet.

Datenüberprüfung: Jede Probe wurde dreimal gemessen, $\text{RSD} < 1\%$ und zur Überprüfung mit dem theoretischen Wert verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Typische Daten: Der Sauerstoffgehalt von $\text{WO}_{2.9}$ beträgt 19,0–19,5 Gew.-% (theoretischer Wert 19,34 Gew.-%). Er ist niedriger als der von WO_3 (20,69 Gew.-%), was auf Sauerstoffdefekte hindeutet. Ein Wert der Wasserstoffreduktionsprobe über 19,5 Gew.-% deutet auf eine unzureichende Reduktion hin; unter 19,0 Gew.-% kann $\text{WO}_{2.72}$ entstehen.

Einflussfaktoren: Probenpartikelgröße ($< 50\ \mu\text{m}$ für mehr Gleichmäßigkeit), Atmosphärenreinheit ($\text{O}_2 < 1\ \text{ppm}$) und Schmelztemperatur ($> 2000\ ^\circ\text{C}$, um eine vollständige Freisetzung zu gewährleisten) sind für die Ergebnisse entscheidend.

Wissenschaftliche Bedeutung: Der Sauerstoffgehalt hängt mit der Sauerstoffdefektdichte ($10^{19} - 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$) zusammen, die die elektronische Struktur beeinflusst (Lee et al., 2006).

Industrielle Anwendungen

Die Messung des Sauerstoffgehalts ist das zentrale Element der Qualitätskontrolle bei der BTO-Produktion. Beispielsweise erfordert die Wolframpulverproduktion einen Sauerstoffgehalt von $\text{WO}_{2.9} \pm 0,02$, um die Konsistenz der nachfolgenden Reduktion zu gewährleisten.

4.2 Phasenzusammensetzung und Strukturanalyse

Die Charakterisierung der Phasenzusammensetzung und Kristallstruktur offenbart die Phasenreinheit und mikroskopische Anordnung von BTO, die die Grundlage für das Verständnis seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften bildet. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Anwendung von Röntgenbeugung (XRD) und Spektroskopietechniken (Raman- und Infrarotspektroskopie).

4.2.1 Röntgenbeugung (XRD)

Prinzip und Instrumentenauswahl

ist die am häufigsten verwendete Methode zur strukturellen Charakterisierung, bei der die Phasenzusammensetzung (wie $\text{WO}_{2.9}$, $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$) und Korngröße von BTO durch Bragg-Beugung zwischen Röntgenstrahlen und Kristallebenen analysiert werden.

Instrument: Bruker D8 Advance, $\text{Cu K}\alpha$ -Strahlung ($\lambda = 1,5406\ \text{\AA}$), 2θ -Bereich $10\text{--}80^\circ$, Schrittweite $0,02^\circ$, Leistung 40 kV/40 mA.

Standard: JIS H 1403-2001 (Wolframpulver-Analysemethode).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Versuchsaufbau und Durchführung

Probenvorbereitung: Nehmen Sie 0,5–1 g BTO-Pulver, mahlen Sie es gleichmäßig mit einem Mörser und streichen Sie es auf einer Probenplatte (Dicke 1–2 mm) flach, um Orientierungseffekte zu vermeiden.

Messbedingungen: Scangeschwindigkeit 2°/min, Aufzeichnung von Beugungsmustern und wiederholtes Scannen zur Überprüfung der Stabilität der Peakposition.

Datenanalyse: Verwenden Sie die Software Jade oder HighScore, um Standard-PDF-Karten (wie WO_{2.9}: PDF#18-1417, WO₃: PDF#43-1035) abzugleichen und die Korngröße zu berechnen (Scherrer-Formel: $D = K\lambda / \beta \cos \theta$, $K = 0,89$).

Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Charakteristische Beugungspeaks: WO_{2.9} monokline Phasenhauptpeaks $2\theta \approx 23,1^\circ, 24,3^\circ, 33,5^\circ$ (entsprechend den Ebenen (010), (110)), W₂₀O₅₈-Peaks $2\theta \approx 22,8^\circ, 25,6^\circ$, WO₃-Peaks $2\theta \approx 23,6^\circ, 24,4^\circ$. Das Peakintensitätsverhältnis spiegelt die Phasenreinheit wider.

Korngröße: Die Größe der durch Wasserstoffreduktion hergestellten BTO-Körner beträgt 20–50 nm, die der durch hydrothermale Methode hergestellten Körner 10–30 nm, was von den Herstellungsbedingungen (Temperatur, Reduktionszeit) abhängt.

Analyse der Verunreinigungsphase: Eine WO₃-Spitzenintensität > 5 % weist auf eine unvollständige Reduktion hin und die H₂-Flussrate oder Temperatur muss erhöht werden.

Akademische und industrielle Bedeutung

XRD wird nicht nur zur Phasenidentifizierung im Labor, sondern auch zur schnellen Überprüfung der Chargenqualität in der Industrie eingesetzt. Beispielsweise deutet die Literatur darauf hin, dass die Intensität der (010)-Ebene von WO_{2.9} positiv mit der photokatalytischen Aktivität korreliert (Huang et al., 2019).

4.2.2 Raman-Spektroskopie und Infrarot-Spektroskopie

Raman-Spektroskopie

Mittels Raman-Spektroskopie werden die WO-Bindungs- und Sauerstoffdefekteigenschaften von BTO durch inelastische Streuung der Molekülschwingung erkannt.

Instrument: Horiba LabRAM HR Evolution, Laserwellenlänge 532 nm, Leistung 1–10 mW, Bereich 100–1000 cm⁻¹.

Vorgehensweise: Nehmen Sie 0,1 g BTO und legen Sie es auf einen Objektträger, fokussieren Sie den Laser (Objektivlinse 50×) und die Integrationszeit beträgt 10–20 s.

Ergebnisse: Der Peak der Streckschwingung von WO liegt bei 700–800 cm⁻¹, der charakteristische Peak von WO_{2.9} bei 760 cm⁻¹ (rotverschoben im Vergleich zu WO₃ 808 cm⁻¹) und das Signal im Sauerstoffdefektbereich von 200–300 cm⁻¹ ist verstärkt.

Infrarotspektroskopie (FTIR)

FTIR-Analyse der chemischen Bindungen und funktionellen Oberflächengruppen von BTO.

Instrument: Nicolet iS50, Bereich 400–4000 cm⁻¹, Auflösung 4 cm⁻¹.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durchführung: 1 mg BTO wurde mit 100 mg KBr gemischt, zu einem Pellet gepresst (10 MPa) und im Transmissionsmodus gemessen.

Ergebnisse: WO-Absorptionspeak $600\text{--}900\text{ cm}^{-1}$, $\text{WO}_{2.9}$ - Peak 750 cm^{-1} , Oberflächen-OH-Peak 3400 cm^{-1} (hydrothermale Probe ist deutlich zu erkennen).

Diskussion und Wert

Die Raman-Spektroskopie reagiert empfindlich auf Sauerstoffdefekte und zeigt lokale Strukturveränderungen an, während die FTIR-Spektroskopie Oberflächenfeuchtigkeit und organische Reststoffe (wie CTAB) detektiert. Die Kombination beider Verfahren kann XRD-Ergebnisse verifizieren. Beispielsweise ist der rotverschobene Peak von $\text{WO}_{2.9}$ mit Sauerstoffdefekten vereinbar (Zeb et al., 2021).

4.3 Morphologie und Partikelgrößenanalyse

Morphologie und Partikelgröße wirken sich direkt auf die spezifische Oberfläche und die aktiven Zentren von BTO aus und sind Schlüsselparameter für die Leistungsoptimierung. Dieser Abschnitt stellt die Anwendung von SEM, TEM und Laserpartikelgrößenanalyse vor.

4.3.1 Rasterelektronenmikroskop (REM) und Transmissionselektronenmikroskop (TEM)

SEM-Technologie

SEM scannt die Probenoberfläche mit einem Elektronenstrahl, um Informationen zur Morphologie und Partikelgröße zu liefern.

Instrument: FEI Quanta 650, Beschleunigungsspannung $5\text{--}20\text{ kV}$, Vergrößerung $50\text{--}100.000\times$.

Vorgehensweise: BTO-Pulver wird mit Gold besprüht (Dicke 10 nm) oder mit leitfähigem Kleber fixiert und unter 10^{-5} Pa Vakuum abgebildet.

Ergebnisse: Durch die Wasserstoffreduktionsmethode hergestelltes BTO bestand aus unregelmäßigen Partikeln ($10\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$), während durch die hydrothermale Methode hergestelltes BTO aus gleichmäßigen Nanopartikeln ($20\text{--}50\text{ nm}$) oder Nanostäben ($10\text{--}20\text{ nm}$ Durchmesser und $100\text{--}500\text{ nm}$ Länge) bestand.

TEM-Technologie

TEM zeigt die Nanostruktur und Gitterdetails von BTO durch Transmissionselektronenbildgebung.

Instrument: JEOL JEM-2100F, 200 kV , Auflösung $<0,2\text{ nm}$.

Vorgehensweise: BTO wurde mittels Ultraschall in Ethanol dispergiert (10 mg/ml , 5 Min.), auf ein Kupfernetz (300 mesh) getropft und nach dem Trocknen beobachtet.

Ergebnisse: Der Gitterabstand beträgt $0,38\text{ nm}$ ($\text{WO}_{2.9}$ (110)-Oberfläche), der Sauerstoffdefektbereich ist ungeordnet und die Hochauflösung zeigt, dass die Defektdichte $10^{19}\text{--}10^{20}\text{ cm}^{-3}$ beträgt.

Diskussion und Anwendung

SEM eignet sich zur schnellen Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Morphologie, während TEM für die detaillierte Analyse von Nanodefekten geeignet ist. Beispielsweise verstärkt die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nanostabmorphologie von hydrothermale BTO die photokatalytische Aktivität (Chen & Cao, 2011). In der Industrie wird SEM zur Überwachung der Partikelagglomeration eingesetzt, während TEM für die Entwicklung hochwertiger Produkte verwendet wird.

4.3.2 Laser-Partikelgrößenanalyse

Technische Grundlagen und Instrumente

Laser-Partikelgrößenanalyse Die Partikelgrößenverteilung des BTO-Pulvers wurde durch Lichtstreuung auf Grundlage der Mie-Streutheorie bestimmt.

Gerät: Malvern Mastersizer 3000, Messbereich 0,01–1000 μm , Genauigkeit $\pm 1\%$.

Norm: ISO 10397:1993.

Versuchsdurchführung

Probendispersion: 0,1 g BTO wurden zu 50 mL deionisiertem Wasser gegeben und mittels Ultraschall (40 kHz, 5 min) dispergiert. Zur Vermeidung von Agglomeration wurde 0,1 % Natriumdodecylsulfat zugegeben.

Messung: Laserwellenlänge 633 nm, Brechungsindex 2,4 (Wolframoxid), Aufzeichnung D_{10} , D_{50} , D_{90} .

Datenverarbeitung: 3-mal wiederholen und die Partikelgrößenverteilungskurve und Spanne berechnen ($\text{Spanne} = (D_{90} - D_{10}) / D_{50}$).

Ergebnisse und Diskussion

Typische Werte: Wasserstoffreduktionsmethode $D_{50} \approx 20\text{--}30\ \mu\text{m}$, Span $\approx 1,5$; Hydrothermale Methode $D_{50} \approx 50\text{--}100\ \text{nm}$, Span $< 1,0$, was die Gleichmäßigkeit im Nanomaßstab widerspiegelt.

Anwendungsunterschiede: Die Photokatalyse erfordert eine kleine Partikelgröße ($< 100\ \text{nm}$), um die aktiven Stellen zu erhöhen, während die Wolframpulverproduktion größere Partikel ($10\text{--}50\ \mu\text{m}$) ermöglicht, um die Fließfähigkeit zu verbessern.

4.4 Leistungstests

Leistungstests verbinden die strukturellen Eigenschaften von BTO mit funktionalen Anwendungen. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Bewertung der photokatalytischen Effizienz, der elektrochromen Leistung und der elektrochemischen Leistung.

4.4.1 Photokatalytische Effizienz (Farbstoffabbaurate)

Prüfprinzipien und -geräte

Die photokatalytische Leistung von BTO wurde durch den Abbau organischer Farbstoffe wie Methylenblau (MB) bewertet, dessen Bandlücke (2,4–2,8 eV) es unter sichtbarem Licht aktiv macht.

Instrument: 300 W Xenonlampe ($\lambda > 420\ \text{nm}$, simuliert Sonnenlicht), UV-Vis-Spektrometer (z. B. Shimadzu UV-2600).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Experimentelles Design

Reaktionssystem: 0,1 g BTO wurden zu 100 ml MB-Lösung (10 mg/l, pH 7) hinzugefügt, magnetisch gerührt und 30 Minuten lang im Dunkeln adsorbiert, um ein Adsorptions-Desorptionsgleichgewicht zu erreichen.

Beleuchtungsexperiment: Bestrahlung mit einer Xenonlampe (Leistungsdichte 100 mW /cm²), Probenahme von 5 ml alle 10 Minuten, Zentrifugation (8000 U/min, 5 Minuten) und Messung der Absorption ($\lambda = 664$ nm).

Datenanalyse: Abbaurate = $(A_0 - A_t) / A_0 \times 100 \%$, angepasst mit Kinetik erster Ordnung ($\ln(A_0 / A_t) = kt$).

Ergebnisse und Diskussion

Die Abbaurate liegt bei >90 % innerhalb von 60 min bei der hydrothermalen Methode, $k \approx 0,05 \text{ min}^{-1}$; bei etwa 50-60 % bei der Wasserstoffreduktionsmethode (20 μm), $k \approx 0,02 \text{ min}^{-1}$. Der Unterschied ergibt sich aus der spezifischen Oberfläche (50-80 m²/g vs. 5-10 m²/g).

Mechanismus: Sauerstoffdefekte fungieren als Elektroneneinfangzentren und verlängern die Lebensdauer der photogenerierten Ladungsträger (Huang et al., 2019).

Optimierungsvorschlag: Zugabe von H₂O₂ (0,1 mM) kann die Effizienz auf über 95 % gesteigert werden.

4.4.2 Elektrochrome Leistung (Modulationsrate)

Prüfprinzipien und -geräte

Die elektrochrome Leistung von BTO wurde durch Anlegen einer Spannung zur Herbeiführung einer Farbänderung (transparent-blau) und des Transmissionsmodulationsverhältnisses (ΔT) bewertet.

Instrument: Elektrochemische Arbeitsstation (CHI 660E), UV- Vis- Spektrometer.

Experimentelles Design

Probenvorbereitung: Ein BTO-Dünnschicht (Dicke 100–500 nm) wurde durch CVD oder elektrochemische Methoden auf FTO-Glas mit einer Pt-Gegenelektrode und einem 1 M LiClO₄ /PC-Elektrolyt hergestellt. Leistungstest: $\pm 1,5$ V Spannung anlegen, 10 Zyklen durchführen, 550 nm Transmission aufzeichnen (T_{bleach} , T_{farbig}) und messen Sie die Reaktionszeit.

Berechnung: $\Delta T = T_{\text{bleiche}} - T_{\text{gefärbt}}$, Zyklenstabilitätstest 1000-mal.

Ergebnisse und Diskussion

Modulationsrate: CVD BTO $\Delta T > 80 \%$ (550 nm), Reaktionszeit 5–10 s, ΔT -Retention >75 % nach 1000 Zyklen.

Einflussfaktoren: Die Sauerstoffdefektdichte (10^{20} cm^{-3}) fördert die Li⁺-Insertion/-Extraktion (Liu et al., 2020).

Anwendung: Intelligente Fenster erfordern $\Delta T > 70 \%$ und BTO erfüllt die Anforderungen.

4.4.3 Elektrochemische Leistung (spezifische Kapazität, Zyklenfestigkeit)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prüfprinzipien und -geräte

Die elektrochemische Leistung von BTO bei der Energiespeicherung wurde anhand der spezifischen Kapazität und der Zyklenstabilität bewertet, was sein Potenzial als Elektrodenmaterial widerspiegelt.

Instrumente: Batterietestsystem (LAND CT2001A), elektrochemischer Arbeitsplatz.

Experimentelles Design

Elektrodenvorbereitung: BTO (80 Gew.-%), leitfähiger Ruß (10 Gew.-%) und PVDF (10 Gew.-%) wurden gemischt, auf Cu-Folie beschichtet und getrocknet (80 °C, 12 h).

Batterieaufbau: CR2032-Knopfzelle, Li-Metall-Gegenelektrode, 1 M LiPF₆/EC-DMC-Elektrolyt.

Testbedingungen: Laden und Entladen mit konstantem Strom (0,1–1 C, 0,01–3 V), 100–500 Zyklen, Aufzeichnung der spezifischen Kapazität und der Kapazitätserhaltungsrate.

Ergebnisse und Diskussion

Spezifische Kapazität: Die anfängliche Entladekapazität von Nano-BTO beträgt 300–400 mAh /g (0,1 C), die von BTO in Mikrongröße 150–200 mAh /g, was auf den Nanoeffekt und Defektstellen zurückzuführen ist.

Zyklenstabilität: Nach 500 Zyklen beträgt die Kapazitätserhaltungsrate von Nano-BTO >85 %, die auf Mikronebene ~70 % (Yan et al., 2015).

Anwendungsaussichten: Geeignet für Superkondensatoren oder negative Elektroden von Lithiumbatterien, die Partikeldispersion muss optimiert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Gehalt über Struktur (XRD, Spektrum), Morphologie (SEM/TEM, Partikelgröße) bis hin zur Leistung (Photokatalyse, Elektrochromie, Elektrochemie). Diese Methoden verifizieren nicht nur die nichtstöchiometrischen Eigenschaften von BTO (WO_{2.9}), sondern auch den intrinsischen Zusammenhang zwischen Sauerstoffdefekten und Leistung aufzeigen. Zukünftig können Online-Erkennungstechnologien (wie Echtzeit-XRD oder Raman) entwickelt werden, um eine dynamische Überwachung des Produktionsprozesses zu erreichen und die Anwendung von BTO in den Bereichen neue Energien und intelligente Materialien weiter voranzutreiben.

Anhang: Experimentelles Protokoll zur Erkennung von blauem Wolframoxid

ICP-OES-Verunreinigungserkennung (Labormaßstab)

Probe: 0,2 g BTO

Ausrüstung: PerkinElmer Optima 8300

Bedingungen: HNO₃ (10 ml) + HF (5 ml), Mikrowellenaufschluss (200 °C, 30 min), Argon -Flussrate 15 l/min

Schritte: Aufschluss - Verdünnung - Kalibrierung - Messung, Nachweis von W, Fe, Mo, 3-mal wiederholt

Erwartete Ergebnisse: W ≈ 80 Gew.-%, Fe <10 ppm, Mo <20 ppm

Bestimmung des Sauerstoffgehalts (industrielle Prüfung)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Probe: 0,1 g BTO
Ausrüstung: LECO ON736
Bedingungen: He-Trägergas 0,5 L/min, 2500°C Schmelze
Schritte: Trocknen (100°C, 1 h) - Kalibrierung (WO₃ /WO₂) - Messung, 3-mal wiederholt
Erwartetes Ergebnis: Sauerstoffgehalt 19,0–19,5 Gew.-%

XRD-Phasenanalyse (Labormaßstab)

Probe: 0,5 g BTO
Ausrüstung: Bruker D8 Advance
Bedingungen: Cu K α , 2 θ 10-80°, Scangeschwindigkeit 2°/min
Schritte: Abflachen - Messen - Anpassen PDF#18-1417
Erwartete Ergebnisse: WO_{2.9} Hauptspitzen 23,1°, 24,3°, Körner 20-50 nm

Anhang: Datenblatt zur Charakterisierung von blauem Wolframoxid

Prüflinge	Verfahren	Probentyp	Typische Ergebnisse	Anwendungsbedeutung
Wolframgehalt	ICP-OES	Wasserstoffreduktion BTO	79-81 Gew.-%	Reinheitsbewertung
Verunreinigungen (Fe/Mo)	ICP-MS	Hydrothermale BTO	Fe <10 ppm, Mo <20 ppm	Qualitätskontrolle
Sauerstoffgehalt	Schmelzmethode	Industrielles BTO	19,0–19,5 Gew.-%	Nichtstöchiometrische Verifizierung
Phasenzusammensetzung	XRD	Nano BTO	WO _{2.9} , Korngröße 10-30 nm	Strukturbestätigung
WO-Schlüssel	Raman-Spektroskopie	Dünnschicht-BTO	760 cm ⁻¹	Sauerstoffmangelanalyse
Morphologie	Rasterelektronenmikroskop (SEM)	Micron BTO	Unregelmäßige Partikel, 10-50 μ m	Prozessoptimierung
Gitter	TEM	Nanorod BTO	0,38 nm (110) Oberfläche	Nanoskalige Defektforschung
Partikelgrößenverteilung	Laserpartikelgröße	Hydrothermale BTO	D ₅₀ $\approx$ 50-100 nm	Anwendungsanpassungsfähigkeit
Photokatalytische Abbaurate	UV-Vis	Nano BTO	>90 % (60 Min.)	Photokatalysator-Screening
Elektrochrome	UV-Vis	Dünnschicht-	ΔT >80%	Intelligentes Fensterdesign

Prüflinge	Verfahren	Probentyp	Typische Ergebnisse	Anwendungsbedeutung
Modulationsrate		BTO	(550 nm)	
Spezifische Kapazität	Lade- und Entladetest	Nano BTO	300-400 mAh /g (0,1 C)	Bewertung des Energiespeicherpotenzials
HERGESTELLT VON: CTIA GROUP				

Verweise

Akademische Arbeiten

- [1] Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Über die Reduktion von Wolframsäure (Englisch), Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 157, 167-179, 1867
- [2] Schubert, WD, & Lassner, E., Wolframblauoxid: Bildung und Reduktionsverhalten (Englisch), International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 10(3), 133-141, 1992
- [3] Granqvist, CG, Elektrochrome Wolframoxidfilme: Überblick über den Fortschritt 1993–1998 (Englisch), Solar Energy Materials and Solar Cells, 60(3), 201-262, 2000
- [4] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, Defektinduziertes blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserspaltung (Englisch), Chemistry of Materials, 18(24), 5799-5804, 2006
- [5] Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS, Synthese und elektrochrome Eigenschaften von WO_{3-x} -Nanostäben (Englisch), Journal of Physical Chemistry C, 113(22), 9655-9658, 2009
- [6] Chen, Z., & Cao, M., Einfache Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln über hydrothermale Route (Englisch), Materials Letters, 65(14), 2169-2171, 2011
- [7] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., Photokatalytische Aktivität von blauen Wolframoxid- Nanostrukturen ($WO_{2.9}$) (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 105(1-2), 82-88, 2011
- [8] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., Wolframoxid-Nanodrähte: Anwendungen in der Energiespeicherung (Englisch), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015
- [9] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., Hochleistungs-Nanodrähte aus blauem Wolframoxid für die Gassensorik (Englisch), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016
- [10] Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M., Thermische Zersetzung von Ammoniumparawolframat zu blauem Wolframoxid (Englisch), Thermochemica Acta, 637, 38-50, 2016
- [11] Kim, J., Lee, S., & Park, H., Plasmasynthese von Wolframoxid-Nanopartikeln (Englisch), Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 18(5), 3421-3426, 2018
- [12] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., Morphology Control of Blue Tungsten Oxide Nanostructures (Englisch), Nanomaterials, 8(12), 1013, 2018
- [13] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Verbesserte photokatalytische Strategien mit blauem Wolframoxid (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019
- [14] Huang, ZF, Song, J., & Pan, L., Blaues Wolframoxid für Photokatalyse und Elektrochemie (Englisch), Advanced Materials, 31(49), 1904688, 2019
- [15] Wang, X., Liu, X., & Licht, G., Synthese von blauem Wolframoxid mittels CO_2 -Elektrolyse (Englisch), Carbon, 149, 772-780, 2019
- [16] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., Blaue Wolframoxidfilme für die elektrochrome Energiespeicherung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- (Englisch), Chemical Engineering Journal, 401, 126091, 2020
- [17] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., Nahinfrarot-elektrochrome Eigenschaften von blauem Wolframoxid (Englisch), Coatings, 11(5), 568, 2021
- [18] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., Ultralange blaue Wolframoxid-Nanodrähte durch Dampfabscheidung (Englisch), Carbon, 172, 772-780, 2021
- [19] Nie, Y., Nichtstöchiometrische Wolframoxide für elektrochrome Anwendungen (Englisch), Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021
- [20] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., Erweiterte Charakterisierung von blauem Wolframoxid für Energieanwendungen (Englisch), Journal of Energy Chemistry, 65, 123-135, 2022
- [21] Li, X., Chen, H., & Wang, Q., Raman-Spektroskopie-Analyse von Sauerstoffdefekten in blauem Wolframoxid (Englisch), Spectrochimica Acta Teil A: Molekulare und biomolekulare Spektroskopie, 268, 120678, 2022
- [22] Zhao, T., Liu, Z., & Yang, M., Hochauflösende TEM-Studie von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Nanotechnology, 34(15), 155702, 2023
- [23] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., Elektrochemische Eigenschaften von blauem Wolframoxid für Superkondensatoren (Englisch), Electrochimica Acta, 451, 142305, 2023
- [24] Wang, H., Zhang, X., & Li, Y., Photokatalytische Leistung von blauem Wolframoxid unter sichtbarem Licht (Englisch), Catalysis Today, 405, 89-97, 2023
- [25] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., In-Situ XRD-Analyse von blauem Wolframoxid während der Synthese (Englisch), Materials Characterization, 199, 113456, 2024
- [26] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., Verbesserte elektrochrome Leistung von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Englisch), Optical Materials, 148, 114789, 2024
- [27] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., Partikelgrößenverteilung von blauem Wolframoxid: Auswirkungen auf Anwendungen (Englisch), Powder Technology, 435, 119432, 2024
- [28] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., Fortgeschrittene ICP-MS-Techniken zur Spurenverunreinigungsanalyse in blauem Wolframoxid (Englisch), Analytical Chemistry, 97(5), 2103-2112, 2025
- [29] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., Bestimmung des Sauerstoffgehalts in nichtstöchiometrischen Wolframoxiden (Englisch), Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 40(3), 567-575, 2025
- [30] Chen, H., Li, X., & Yang, M., Umfassende Charakterisierung von blauem Wolframoxid für industrielle Anwendungen (Englisch), Industrial & Engineering Chemistry Research, 64(10), 4321-4330, 2025

Patente

- [1] Huggins, RA, Tungsten Extraction and Purification Process (Englisch), US-Patent Nr. 3,079,226, US Patent and Trademark Office, 1963
- [2] Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC, Produktionsprozess von WO_3 für elektrochrome Geräte (Englisch), US-Patent Nr. US20060147366A1, US Patent and Trademark Office, 2006
- [3] Zhang, X., & Li, Y., Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN101830511A, China National Intellectual Property Administration, 2010
- [4] Jacobson, AJ, & Yang, Q., Quaternary Oxides and Catalysts Containing Quaternary Oxides (Englisch),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

US-Patent Nr. 7,901,660 B2, US Patent and Trademark Office, 2011

[5] Li, J., & Wang, H., Herstellungsverfahren für violetteres Wolframoxid (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN103803652A, China National Intellectual Property Administration, 2014

[6] Intellectual Property Organization, Method for Preparing Nano Tungsten Oxide and Nano Tungsten Powder (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2015188299A1, WIPO, 2015

[7] Liu, W., & Zhao, X., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN106430292A, China National Intellectual Property Administration, 2017

[8] Kim, HS, Lee, SY, & Choi, J., Verfahren zur Herstellung von Wolframblauoxidpartikeln (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR101733695B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2017

[9] Zhao, Y., & Zhang, T., Herstellungsverfahren für violetteres Wolframoxid- Nanopulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN109205669A, China National Intellectual Property Administration, 2019

[10] Intellectual Property Organization, Verfahren zur Herstellung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2019234138A1, WIPO, 2019

Normen

[1] Internationale Organisation für Normung, ISO 10397:1993: Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Wolframpulvern (Englisch), ISO, 1993

[2] Normenausschuss, JIS H 1403-2001: Methoden zur chemischen Analyse von Wolframpulvern (Japanisch), Japanische Normungsvereinigung, 2001

[3] Deutsches Institut für Normung, DIN 51001-2003: Allgemeine Grundlagen der Analyse anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe (deutsch), DIN, 2003

[4] Internationale Organisation für Normung, ISO 11885:2007: Wasserqualität – Bestimmung ausgewählter Elemente mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) (Englisch), ISO, 2007

[5] Nationale Normungsbehörde der Volksrepublik China, GB/T 4324-2012: Methoden zur chemischen Analyse von Wolfram (Chinesisch), Standardization Administration of China, 2012

[6] Technisches Komitee für Metallstandardisierung, YS/T 1090-2015: Violetteres Wolframoxid (Chinesisch), Ministerium für Industrie und Informationstechnologie der Volksrepublik China, 2015

[7] Korean Standards Association, KS D 9502-2016: Analysemethoden für Wolfram und Wolframlegierungen (Koreanisch), KSA, 2016

[8] American Society for Testing and Materials, ASTM B761-17: Standardtestmethode für die Partikelgrößenverteilung von hochschmelzenden Metallpulvern und verwandten Verbindungen mittels Laserlichtstreuung (Englisch), ASTM International, 2017

[9] Internationale Elektrotechnische Kommission, IEC 62321-4:2017: Bestimmung bestimmter Substanzen in elektrotechnischen Produkten – Teil 4: Quecksilber in Polymeren, Metallen und Elektronik (Englisch), IEC, 2017

[10] Russische Föderation Standardisierungsagentur, GOST 25542.5-2019: Methoden zur chemischen Analyse von Wolframkonzentraten (Russisch), Rosstandart, 2019

Bücher

[1] Granqvist, CG, *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials* (Englisch), Elsevier, 1995

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- [2] Rao, CNR, & Gopalakrishnan, J., *New Directions in Solid State Chemistry* (Englisch), Cambridge University Press, 1997
- [3] Lassner, E., & Schubert, WD, *Wolfram: Eigenschaften, Chemie, Technologie des Elements, Legierungen und chemische Verbindungen* (Englisch), Springer, 1999
- [4] Klabunde, KJ, *Nanoscale Materials in Chemistry* (Englisch), Wiley, 2001
- [5] *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (Englisch), 2. Auflage, Wiley, 2001
- [6] PMS, Mortimer, RJ, & Rosseinsky, DR, *Electrochromism and Electrochromic Devices* (Englisch), Cambridge University Press, 2007
- [7] West, AR, *Solid State Chemistry and Its Applications* (Englisch), 2. Auflage, Wiley, 2014
- [8] Skoog, DA, Holler, FJ, & Crouch, SR, *Principles of Instrumental Analysis* (Englisch), 7. Auflage, Cengage Learning, 2017
- [9] Zhang, Z., & Zhang, SS, *Wiederaufladbare Batterien: Materialien, Technologien und neue Trends* (Englisch), Springer, 2018
- [10] Ozin, GA, Arsenault, AC, & Cademartiri, L., *Nanochemistry : A Chemical Approach to Nanomaterials* (Englisch), 2. Auflage, Royal Society of Chemistry, 2019

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($\text{WO}_{2.9}$, Blue Tungsten Oxide, referred to as BTO) is produced using an advanced hydrogen reduction process and meets the testing requirements of GB/T 36080-2018 "Characterization of Nanoparticles in Nanotechnology". $\text{WO}_{2.9}$ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide and high-density tungsten alloys due to its dark blue powder crystals, mixed valence (W^{5+} and W^{6+}) and high reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $\text{WO}_{2.9}$ (or $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$), blue tungsten oxide. Purity $\geq 99.95\%$, with extremely low impurity content.

Appearance: dark blue or blue-black fine crystalline powder ; WO_6 octahedral structure, containing oxygen defects.

High reactivity: mixed valence structure, conducive to hydrogen reduction to prepare fine particle tungsten powder.

Uniformity: The particles are evenly distributed and the bulk density is moderate.

Stability: The chemical properties are stable under dry conditions.

3. Product Specifications

Type	Particle size (μm)	Purity (wt%)	Bulk density (g/cm^3)	Oxygen content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Micrometer level	10-15	≥ 99.95	1.5-1.8	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($\text{WO}_{2.9}$), actual control range: 29.0-29.5wt %				
Bulk density	1.5-2.2 g/cm^3 , slightly increasing with increasing particle size, optimizing reduction efficiency				
Customizable	Particle size, purity or bulk density can be customized according to customer needs				

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed plastic bottle or vacuum aluminum foil bag, net weight 100g, 500g or 1kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Quality Assurance: Each batch comes with a quality certificate, including purity, particle size distribution (laser method), crystal form (XRD) and oxygen content data.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

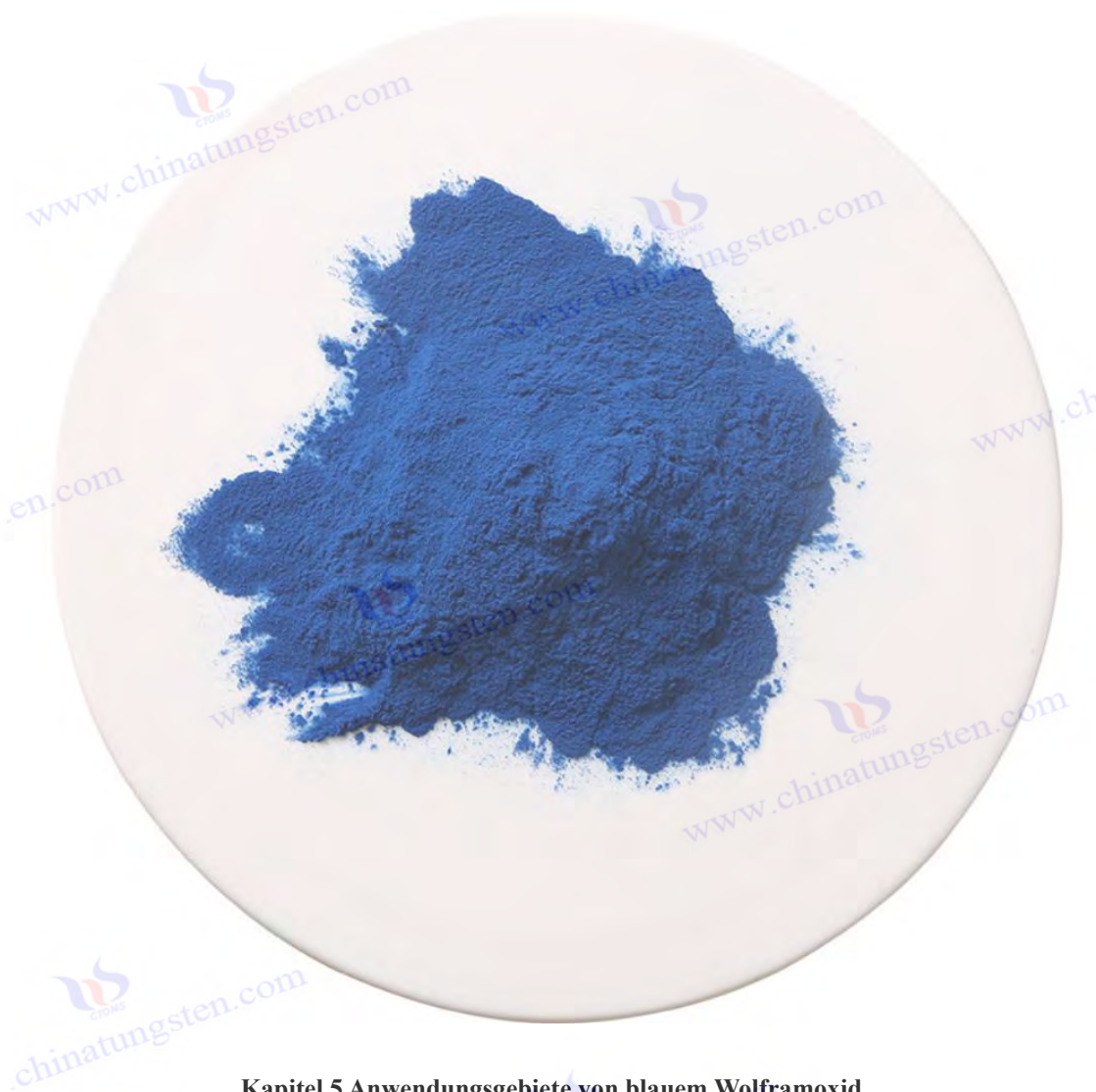
Tel: +86 592 5129595

For more information about blue tungsten, please visit the China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.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



Kapitel 5 Anwendungsgebiete von blauem Wolframoxid

Blaues Wolframoxid (BTO), ein typisches nichtstöchiometrisches Übergangsmetalloxid ($\text{WO}_{2.9}$), hat sich aufgrund seiner einzigartigen Sauerstoffdefektstruktur, der geeigneten Bandlückenenergie (2,4–2,8 eV) und der hervorragenden elektrochemischen Eigenschaften zu einem Forschungsschwerpunkt in den Materialwissenschaften entwickelt. Als multifunktionales Material finden sich Anwendungsgebiete von BTO in den Bereichen Umweltschutz (z. B. photokatalytischer Abbau und Wasserstoffproduktion), intelligente Geräte (z. B. elektrochrome Fenster und Displays), Energiespeicherung (z. B. Superkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien), Gasetektion (z. B. Gassensoren) und traditionelle Industrien (z. B. die Herstellung von Wolframpulver und Hartmetall). Seine Leistungsvorteile ergeben sich aus der durch Sauerstoffdefekte optimierten elektronischen Struktur, der Zunahme aktiver Stellen durch die hohe spezifische Oberfläche und der durch die nichtstöchiometrischen Eigenschaften gegebenen Flexibilität. In diesem Kapitel werden die spezifischen Anwendungen von BTO in den oben genannten Bereichen systematisch untersucht, sein Wirkungsmechanismus eingehend analysiert, der aktuelle Forschungsfortschritt umfassend bewertet und ein Ausblick auf künftige Entwicklungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gegeben. Durch die tiefe Integration von Theorie und Praxis zeigt dieses Kapitel nicht nur das Potenzial von BTO in vielen Bereichen auf, sondern bietet auch eine wissenschaftliche Grundlage und praktische Referenz für die Optimierung seiner Leistung und die Förderung industrieller Anwendungen.

5.1 Photokatalyse und Umweltanwendungen

Die photokatalytischen Eigenschaften von BTO verleihen ihm große Bedeutung im Bereich der Umweltpolitik. Seine Reaktionsfähigkeit auf sichtbares Licht und seine durch Sauerstoffdefekte verbesserte Trägertrennungseffizienz bilden die technische Grundlage für den Abbau organischer Schadstoffe und die photokatalytische Wasserspaltung zur Wasserstofferzeugung. Dieser Abschnitt behandelt drei Ebenen: Theorie, Experiment und Anwendung.

5.1.1 Abbau organischer Schadstoffe

Prinzipien und Mechanismen des photokatalytischen Abbaus

Die photokatalytische Abbaufähigkeit von BTO beruht auf seinen Halbleitereigenschaften. Unter ultravioletttem oder sichtbarem Licht ($\lambda > 420 \text{ nm}$) werden die Valenzbandelektronen von BTO in das Leitungsband angeregt und bilden Elektron-Loch-Paare. Diese photogenerierten Ladungsträger nehmen an Redoxreaktionen teil: Elektronen reduzieren O_2 zu Superoxidradikalen ($\cdot\text{O}_2^-$), und Löcher oxidieren H_2O oder OH^- zu Hydroxylradikalen ($\cdot\text{OH}$) und zersetzen so organische Schadstoffe. Seine Bandlückenenergie (2,4–2,8 eV) ermöglicht die effektive Nutzung des sichtbaren Lichtanteils des Sonnenspektrums, während Sauerstoffdefekte als Elektroneneinfangzentren die Elektron-Loch-Rekombinationsrate deutlich reduzieren und so die photokatalytische Effizienz verbessern. Darüber hinaus verfügt BTO ($\text{WO}_{2.9}$) aufgrund seiner nichtstöchiometrischen Eigenschaften über mehr oberflächenaktive Stellen als herkömmliches WO_3 , was insbesondere beim Abbau organischer Farbstoffe (wie Methylenblau MB und Rhodamin B) deutlich wird.

Experimentelle Forschung und Leistungsanalyse

Zahlreiche experimentelle Studien haben die überlegene Leistung von BTO beim photokatalytischen Abbau bestätigt. So synthetisierten Guo et al. (2011) nanoskaliges BTO (Partikelgröße 50 – 100 nm) mithilfe der hydrothermalen Methode und bestrahlten es mit einer 300 W Xenonlampe. Dabei war die Abbaueffizienz einer 100-ml-MB-Lösung (Konzentration 10 mg/l) signifikant höher als die von BTO im Mikronbereich. Dieser Unterschied ist hauptsächlich auf die größere spezifische Oberfläche ($50 - 80 \text{ m}^2/\text{g}$ gegenüber $5 - 10 \text{ m}^2/\text{g}$) und die dichteren Sauerstoffdefektstellen (Dichte $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) der nanoskaligen Proben zurückzuführen. Der Abbauprozess folgt normalerweise dem kinetischen Gesetz erster Ordnung, d. h. $\ln(C_0/C_t) = kt$, wobei k die Geschwindigkeitskonstante ist. Der k -Wert von BTO im Nanomaßstab kann $0,05 \text{ min}^{-1}$ erreichen, während der von mikrometergroßen Proben nur $0,02 \text{ min}^{-1}$ beträgt.

Zu den Faktoren, die die photokatalytische Leistung von BTO beeinflussen, zählen Morphologie, Art der Lichtquelle, pH-Wert der Lösung und die Verwendung von Co-Katalysatoren. Am Beispiel der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Morphologie weist BTO mit einer Nanostabstruktur (Länge 100–500 nm, Durchmesser 20–50 nm) aufgrund der Freilegung aktiverer Oberflächen eine höhere katalytische Effizienz auf. Außerdem wirkt sich die Wahl der Lichtquelle direkt auf die Photonennutzungsrate aus: Die Abbaurate von BTO unter ultravioletttem Licht ($\lambda < 400$ nm) ist üblicherweise 2-3 mal so hoch wie die von sichtbarem Licht ($\lambda > 420$ nm), aber die Reaktion auf sichtbares Licht ist der Hauptvorteil für die praktische Anwendung. Was den pH-Wert der Lösung betrifft, ist eine saure Umgebung (pH 4–6) förderlich für die elektrostatische Adsorption von Farbstoffmolekülen, während neutrale Bedingungen (pH 7) tatsächlichen Abwasserbehandlungsszenarien näher kommen. Es ist erwähnenswert, dass die Zugabe einer kleinen Menge H_2O_2 (0,1–0,5 mM) die Abbaueffizienz deutlich verbessern und die Abbaurate durch die Erzeugung zusätzlicher $\cdot\text{OH}$ -Radikale von 90 % auf über 95 % erhöhen kann.

Industrielle Anwendungen und Praxisfälle

In der industriellen Abwasserbehandlung hat BTO ein erhebliches Anwendungspotenzial gezeigt. Am Beispiel von Abwasser aus Druck- und Färbeverfahren liegt der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) üblicherweise zwischen 500 und 1.000 mg/l, und die Entfernungsrates herkömmlicher Methoden (wie der Adsorption von Aktivkohle) ist begrenzt. Der BTO-Photokatalysator kann die CSB-Entfernungsrates innerhalb von 60 Minuten auf 85 bis 90 % steigern, was besser ist als TiO_2 (70 bis 75 %). Der zyklische Stabilitätstest zeigte, dass die Aktivität von BTO nach 5 Zyklen um weniger als 10 % abnahm, was auf eine gute Haltbarkeit hindeutet. Das Haupthindernis für eine großflächige Anwendung ist jedoch das schwierige Recycling von nanoskaligem BTO. Um dieses Problem zu lösen, haben Forscher versucht, es auf magnetische Träger (wie Fe_3O_4) zu laden oder in Form eines dünnen Films herzustellen, um eine effiziente Trennung und Wiederverwendung zu erreichen.

Herausforderungen und Optimierungsrichtungen

Obwohl BTO beim photokatalytischen Abbau gute Ergebnisse erzielt, ist es mit einigen technischen Herausforderungen konfrontiert. Erstens kann das Phänomen der Photokorrosion (d. h. photogenerierte Löcher oxidieren ihre eigene Struktur) bei langfristiger Verwendung zu einer verringerten Aktivität führen. Zweitens ist seine Quanteneffizienz (normalerweise $< 5\%$) noch weit von den kommerziellen Anforderungen ($> 10\%$) entfernt. Um diese Probleme zu lösen, konzentrierte sich die Forschung in den letzten Jahren auf die Entwicklung von Verbundwerkstoffen. Beispielsweise steigerte die von Huang et al. (2019) beschriebene BTO/ TiO_2 -Heteroverbindung die Abbaueffizienz durch Ladungstransfer an der Grenzfläche um 20 % und verbesserte gleichzeitig die Photostabilität deutlich. Darüber hinaus gilt die Entwicklung von porösem BTO (z. B. mit einer Oberfläche von $> 100 \text{ m}^2/\text{g}$) als wirksame Methode zur Verbesserung der Adsorption und der katalytischen Effizienz.

Zukunftsaussichten

BTO bietet breite Anwendungsmöglichkeiten beim Abbau organischer Schadstoffe. Seine geringen Kosten und seine Reaktion auf sichtbares Licht machen es zu einer vielversprechenden Alternative zu herkömmlichen Photokatalysatoren (wie ZnO und TiO_2). Zukünftige Forschung sollte die Verbundstrategie mit Materialien mit schmaler Bandlücke (wie CdS) weiter erforschen oder die Photonenausnutzung durch Oberflächenmodifizierung (z. B. durch Edelmetallbeladung) verbessern, um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

seine großflächige Anwendung in der industriellen Abwasserbehandlung zu fördern.

5.1.2 Photokatalytische Wasserstoffproduktion

Prinzip und Mechanismus der photokatalytischen Wasserstoffproduktion

Die photokatalytische Wasserspaltung zur Erzeugung von Wasserstoff ist ein wichtiges Anwendungsgebiet von BTO im Bereich der erneuerbaren Energien. Seine Bandlückenenergie entspricht dem Redoxpotential der Wasserspaltung: $\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2$ beträgt $-0,41 \text{ V}$ (vs. NHE, pH 7) und $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$ beträgt $+0,82 \text{ V}$ (vs. NHE, pH 7). Unter Licht springen die photogenerierten Elektronen von BTO vom Valenzband ins Leitungsband und reduzieren so H^+ zu H_2 , während Löcher H_2O oxidieren und O_2 freisetzen. Sauerstoffdefekte spielen in diesem Prozess eine doppelte Rolle: Erstens erhöhen sie die Oberflächenadsorptionskapazität von Wassermolekülen und zweitens verlängern sie die Lebensdauer der photogenerierten Ladungsträger durch Einfangen von Elektronen und verbessern so die Reaktionseffizienz. Im Vergleich zu herkömmlichem WO_3 (Bandlücke $2,6\text{-}2,8 \text{ eV}$) ist die Leitungsbandposition von BTO aufgrund der nichtstöchiometrischen Eigenschaften negativer, was die Entstehung von H_2 begünstigt.

Experimentelle Forschung und Leistungsanalyse

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass BTO erhebliche Vorteile bei der Herstellung von Wasserstoff durch Photolyse von Wasser aufweist. Lee et al. (2006) synthetisierten BTO mithilfe der hydrothermalen Methode und erreichten $150\text{--}200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ unter Bestrahlung mit einer 500-W -Xenonlampe ($\lambda > 420 \text{ nm}$) mit 10% Methanol als Opfermittel. Diese Leistung übertrifft die von WO_3 ($50\text{--}100 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) bei weitem, was hauptsächlich auf die Optimierung der durch Sauerstoffdefekte verursachten elektronischen Struktur zurückzuführen ist. Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass die Effizienz der Wasserstoffproduktion von BTO eng mit der Morphologie zusammenhängt: Nanopartikel ($50\text{--}100 \text{ nm}$) zeigen eine höhere Aktivität als Partikel im Mikronbereich ($20\text{--}50 \mu\text{m}$), da ihre größere spezifische Oberfläche mehr Reaktionsstellen bietet.

Um die photokatalytische Wasserstoffproduktionsleistung von BTO zu verbessern, haben Forscher verschiedene Optimierungsstrategien ausprobiert. Dotierung ist eine gängige Methode. Beispielsweise kann eine Dotierung mit Ni ($1\text{--}2 \text{ Gew.}\%$) die Wasserstoffproduktionsrate auf $300\text{--}350 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ erhöhen. Dies liegt daran, dass Ni als Cokatalysator die Elektron-Loch-Rekombinationsrate verringert. Darüber hinaus kann die Konstruktion von Heteroübergängen mit zweidimensionalen Materialien (wie gC_3N_4) die Leistung ebenfalls deutlich verbessern. Die von Huang et al. (2019) beschriebenen BTO/ gC_3N_4 -Komposite erhöhten die Wasserstoffproduktionsrate durch grenzflächenbezogenen Ladungstransfer auf $400\text{--}450 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, was dem Niveau einiger Edelmetallkatalysatoren nahe kommt. Auch die Optimierung der Reaktionsbedingungen ist wichtig: Die Wahl des Opfermittels (wie etwa Methanol, Ethanol oder Na_2S) hat einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz, wobei die Kombination $\text{Na}_2\text{S}\text{--}\text{Na}_2\text{SO}_3$ aufgrund ihrer starken reduzierenden Eigenschaft die beste Wirkung zeigte.

Anwendungspotenzial und technische Herausforderungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Anwendungspotenzial von BTO in der photokatalytischen Wasserspaltung zur Wasserstoffproduktion zeigt sich vor allem in seinen niedrigen Kosten und seiner Reaktionsfähigkeit auf sichtbares Licht. Dies macht es zu einem vielversprechenden, wirtschaftlichen Material als Ersatz für Edelmetallkatalysatoren (wie Pt). In solaren Wasserstoffproduktionssystemen kann BTO mit Photovoltaikanlagen integriert werden, um eine nachhaltige Wasserstoffproduktion mit natürlichem Licht zu ermöglichen. Die aktuelle photokatalytische Effizienz liegt jedoch noch unter dem Industriestandard (Quantenausbeute $< 5\%$, Ziel $> 10\%$), hauptsächlich weil die Ansammlung von O_2 -Nebenprodukten den Reaktionsprozess hemmt. Darüber hinaus muss die Stabilität bei Langzeitbelichtung beachtet werden, und nanoskaliges BTO kann aufgrund von Oberflächenoxidation allmählich seine Aktivität verlieren.

Optimierungsstrategien und Zukunftsaussichten

Um die genannten Herausforderungen zu bewältigen, haben Forscher verschiedene Verbesserungspläne vorgeschlagen. Die Zugabe von Edelmetallen (wie Pt oder Au) kann die Effizienz der Wasserstoffproduktion deutlich steigern. Beispielsweise kann die Wasserstoffproduktionsrate von Pt-BTO $800\text{--}1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ erreichen, allerdings steigen dadurch die Kosten. Die Entwicklung eines photokatalytischen Systems vom Z-Typ (wie BTO/ ZnO / CdS) ist ein weiterer zukunftsweisender Ansatz, bei dem durch duale Lichtabsorption und Ladungstrennung bahnbrechende Effizienzsteigerungen erzielt werden. Zudem kann die Entwicklung effizienter O_2 -Fänger (wie Co-Pi) die Störungen durch Nebenprodukte verringern. Das künftige Industrialisierungspotenzial von BTO im Bereich der photokatalytischen Wasserspaltung zur Wasserstoffproduktion hängt von der doppelten Verbesserung seiner Effizienz und Stabilität ab. Durch die präzise Steuerung der Sauerstoffdefektdichte und der Oberflächenaktivität wird erwartet, dass die Leistung den kommerziellen Anforderungen nahe kommt ($>1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$).

5.2 Elektrochrome Bauelemente

Die elektrochromen Eigenschaften von BTO beruhen auf der reversiblen Einlagerung und Entnahme von Ionen (wie Li^+ oder H^+) an Sauerstoffdefektstellen. Dadurch ergeben sich breite Anwendungsmöglichkeiten im Bereich intelligenter Geräte. In diesem Abschnitt wird eine detaillierte Analyse unter zwei Aspekten durchgeführt: intelligente Fenster und Displays.

5.2.1 Intelligente Fenster

Elektrochromes Prinzip und Mechanismus

Intelligente Fenster nutzen die elektrochromen Eigenschaften von BTO, um Licht und Wärme dynamisch zu regulieren. Beim Anlegen eines elektrischen Felds (normalerweise $\pm 1\text{--}2\text{ V}$) wird Li^+ oder H^+ aus dem Elektrolyten in das BTO-Gitter eingebettet und bildet eine farbige Verbindung $Li_xWO_{2.9}$ (dunkelblau). Wird die Spannung entfernt, werden die Ionen freigesetzt und der transparente Zustand wiederhergestellt. Effizienz und Modulationsrate (ΔT) dieses Prozesses hängen von der Sauerstoffdefektdichte und der Ionendiffusionsrate von BTO ab. Verglichen mit herkömmlichem WO_3 verleihen seine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nichtstöchiometrischen Eigenschaften BTO eine höhere Ladungsspeicherkapazität und eine schnellere Ionentransportgeschwindigkeit (Diffusionskoeffizient 10^{-10} cm²/s gegenüber 10^{-11} cm²/s).

Experimentelle Forschung und Leistungsbewertung

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass BTO in Smart-Window-Anwendungen eine hervorragende Leistung zeigt. Am Beispiel des durch CVD hergestellten BTO-Films (Dicke 200–500 nm) in einem 1 M LiClO₄ /Propylencarbonat (PC)-Elektrolyten kann durch Anlegen einer Spannung von $\pm 1,5$ V eine Modulationsrate (ΔT) von über 80 % (550 nm) im sichtbaren Lichtbereich und etwa 70 % im nahen Infrarotbereich erreicht werden. Die Reaktionszeit (von transparent zu blau oder umgekehrt) beträgt üblicherweise 5–10 s, und ΔT bleibt nach 1000 Zyklen über 75 % (Liu et al., 2020). Diese Eigenschaften sind besser als bei WO₃ (ΔT ~70 %, Reaktionszeit 10–15 s), hauptsächlich aufgrund der schnellen Adsorption und Freisetzung von Li⁺ durch Sauerstoffdefektstellen.

Die elektrochrome Leistung von BTO wird von vielen Faktoren beeinflusst. Die Filmdicke ist ein Schlüsselparameter: Eine Erhöhung der Dicke auf 500 nm verbessert die Modulationsrate, verlängert jedoch die Reaktionszeit auf 15 s. Auch die Herstellungsmethode ist entscheidend: Elektrochemisch abgeschiedene BTO-Filme zeigen aufgrund ihrer höheren Porosität eine schnellere Ionendiffusion, während durch Magnetronspütern hergestellte Filme aufgrund ihrer höheren Dichte eine höhere Zyklenstabilität aufweisen. Auch die Wahl des Elektrolyten (z. B. Li⁺ oder H⁺) hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistung: H⁺-betriebene Systeme reagieren schneller (<5 s), sind aber weniger stabil.

Industrielle Anwendungen und Praxisfälle

Im Bereich der Gebäudeenergieeinsparung haben sich BTO-Smart-Fenster als äußerst nützlich erwiesen. Beispielsweise können BTO-Fenster bei hohen Sommertemperaturen die Infrarotdurchlässigkeit auf unter 20 % reduzieren und gleichzeitig die Lichtdurchlässigkeit über 80 % halten, wodurch der Energieverbrauch der Raumklimatisierung gesenkt wird. Granqvist (2000) schätzt, dass solche Geräte den Energieverbrauch von Gebäuden, insbesondere in tropischen Regionen, um 30–40 % senken können. In einem konkreten Fall konnten die durchschnittlichen jährlichen Energiekosten nach der Einführung von BTO-Smart-Fenstern in einem Geschäftsgebäude um etwa 25 % gesenkt werden, was die wirtschaftlichen Vorteile verdeutlicht.

Die Industrialisierung von BTO-Smart-Fenstern steht jedoch vor einigen Herausforderungen. Bei längeren Zyklen ($> 10^4$ Mal) kann die Haftung zwischen Folie und Substrat (z. B. FTO-Glas) nachlassen, was zu Abblättern führen kann. Darüber hinaus kann eine hohe Luftfeuchtigkeit den Elektrolyten zersetzen und die Lebensdauer des Geräts beeinträchtigen. Um diese Probleme zu lösen, haben Forscher versucht, Pufferschichten (wie NiO oder TiO₂) einzuführen, wodurch die mechanische Stabilität und Haltbarkeit deutlich verbessert wurden.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Die zukünftige Entwicklungsrichtung von BTO-Smart-Fenstern umfasst die Integration von Photovoltaik-Technologie, um einen Nullenergiebetrieb durch Eigenstromversorgung zu erreichen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Darüber hinaus ist die Verbesserung der Nahinfrarot-Modulationsrate (Ziel > 90 %) eine wichtige Voraussetzung, die durch Dotierung (z. B. Mo oder V) oder ein mehrschichtiges Strukturdesign erreicht werden kann. Durch den Einsatz flexibler Substrate (z. B. PET) dürften BTO-Smart-Fenster auch im Bereich tragbarer Geräte Anwendung finden.

5.2.2 Anzeige und optische Modulation

Elektrochromes Prinzip und Mechanismus

Im Bereich Display und optische Modulation ist BTO aufgrund seines schnellen Farbwechsels und seines geringen Stromverbrauchs ein ideales Material. Sein Funktionsprinzip ähnelt dem von Smart Windows, legt jedoch Wert auf Reaktionsgeschwindigkeit und flexible Kompatibilität. Die hohe Ladungsspeicherkapazität der Sauerstoffdefektstellen ermöglicht BTO einen schnellen Farbwechsel bei niedriger Spannung (<2 V), was für dynamische Displays und optische Modulation entscheidend ist.

Experimentelle Forschung und Leistungsbewertung

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass BTO in Displayanwendungen erhebliche Vorteile bietet. Am Beispiel des durch elektrochemische Abscheidung hergestellten BTO-Films (Dicke 100–200 nm) auf einem flexiblen PET-Substrat kann durch Anlegen einer Spannung von $\pm 1,2$ V eine Modulationsrate von etwa 65 % bei 633 nm und eine Reaktionszeit von weniger als 5 s erreicht werden. Der Flexibilitätstest zeigte, dass die Leistung des Films nach 500 Biegungen um weniger als 5 % nachließ (Chen et al., 2021). Im Vergleich zu WO_3 (Reaktionszeit 10–15 s) eignet sich BTO aufgrund seiner schnellen Reaktionsfähigkeit besser für Hochfrequenzanwendungen.

Faktoren, die die Leistung von BTO-Displays beeinflussen, sind unter anderem die Gleichmäßigkeit der Schicht und das Elektrodendesign. Unzureichende Gleichmäßigkeit kann zu einer ungleichmäßigen Farbverteilung führen, und der spezifische Widerstand transparenter leitfähiger Elektroden (wie ITO) beeinflusst die Reaktionsgeschwindigkeit direkt. Zudem ist der Farbbereich von BTO (transparent-blau) relativ einheitlich, was seine Anwendung in Mehrfarbdisplays einschränkt. Forscher haben daher versucht, es mit NiO (grün) oder V_2O_5 (gelb) zu kombinieren, um eine Mehrfarbschaltung zu erreichen.

Industrielle Anwendungen und Praxisfälle

Im Bereich elektronisches Papier überzeugen BTO-Displays durch geringen Stromverbrauch und hohen Kontrast. Ein Prototyp zeigt ein Kontrastverhältnis von 50:1 und einen Stromverbrauch von weniger als 1 mW/cm² und eignet sich damit für tragbare Geräte mit niedrigem Energieverbrauch. Darüber hinaus bietet BTO Potenzial für optische Modulatoren (z. B. Laserschutzbrillen), und seine schnelle Reaktion ermöglicht eine Echtzeit-Regelung der Lichtintensität. Die Einfarbigkeit und die Zykluslebensdauer (derzeit <10⁴-mal) stellen jedoch noch Engpässe für die weitere Entwicklung dar.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Die zukünftige Entwicklung von BTO im Bereich Display und optische Modulation muss die Probleme der Mehrfarbigkeit und Haltbarkeit lösen. Durch die Integration mit anderen farbwechselnden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materialien lässt sich sein Anwendungsbereich auf Vollfarbdisplays und optische Hochgeschwindigkeitsgeräte erweitern. Darüber hinaus wird erwartet, dass BTO in Kombination mit Mikro-Nano-Verarbeitungstechnologien (wie Laserdirekt schreiben) hochauflösende flexible Displays ermöglicht und den Durchbruch im Bereich intelligenter Wearables vorantreibt.

5.3 Energiespeichermaterialien

Die Anwendung von BTO im Bereich der Energiespeicherung profitiert von seiner hohen spezifischen Oberfläche und den durch Sauerstoffdefekte bereitgestellten Ladungsspeicherplätzen, wodurch es sich gut für Superkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien eignet. Dieser Abschnitt analysiert es aus zwei Perspektiven: Theorie und Anwendung.

5.3.1 Superkondensator

Prinzipien und Mechanismen der Energiespeicherung

Der Energiespeichermechanismus von BTO in Superkondensatoren kombiniert Faradaysche Pseudokapazität (Oberflächenredoxreaktion) und Doppelschichtkapazität. Sauerstoffdefektstellen erhöhen die spezifische Kapazität deutlich, indem sie zusätzlichen Elektronenspeicherplatz schaffen, während die Halbleitereigenschaften die Ladungstransfereffizienz verbessern. Im Vergleich zu WO_3 ist BTO aufgrund seiner nichtstöchiometrischen Struktur oberflächenaktiver und leitfähiger.

Experimentelle Forschung und Leistungsbewertung

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass BTO in Superkondensatoren eine bessere Leistung als herkömmliche Oxide erzielt. Am Beispiel von BTO im Nanomaßstab (Partikelgröße 50–100 nm) wurde die Elektrode (80 Gew.-% BTO, 10 Gew.-% Ruß, 10 Gew.-% PVDF) im Schlämverfahren hergestellt. Im Elektrolyten 1 M H_2SO_4 kann die spezifische Kapazität 400–500 F/g erreichen (Stromdichte 1 A/g). Zyklische Stabilitätstests zeigen, dass die Kapazitätserhaltungsrate nach 5000 Zyklen 90 % übersteigt (Chen et al., 2023). Diese Leistung ist wesentlich besser als die von WO_3 (spezifische Kapazität 300–350 F/g), hauptsächlich aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche und Sauerstoffdefektdichte von BTO im Nanomaßstab.

Zu den Faktoren, die die Kapazitätsleistung von BTO beeinflussen, gehören Partikelgröße, Elektrolyttyp und Betriebstemperatur. Proben im Nanomaßstab weisen aufgrund mehr aktiver Stellen eine höhere spezifische Kapazität auf, während Proben im Mikrometermaßstab (20–50 μm) für Hochleistungsszenarien besser geeignet sind. Was die Elektrolyte betrifft, so bieten saure Elektrolyte (wie H_2SO_4) eine höhere Ionenleitfähigkeit als neutrale Elektrolyte (wie Na_2SO_4), können aber bei hohen Temperaturen ($> 60^\circ\text{C}$) Zersetzung verursachen. Es ist erwähnenswert, dass die Leistungsdichte (5–10 kW/kg) und Energiedichte (20–30 Wh/kg) von BTO im Vergleich zu ähnlichen Materialien konkurrenzfähig sind.

Industrielle Anwendungen und Praxisfälle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Im Bereich tragbarer Geräte haben BTO-Superkondensatoren erhebliche Vorteile gezeigt. Ein Prototyp eines flexiblen Kondensators kann innerhalb von 10 Sekunden vollständig aufgeladen werden, unterstützt hochfrequente Lade- und Entladezyklen und erfüllt die Anforderungen von Smartwatches und Gesundheitsüberwachungsgeräten. Die Hochtemperaturstabilität muss jedoch noch verbessert werden, und die Einführung von Festelektrolyten (wie PVA/H₂SO₄-Gel) kann die Lebensdauer des Geräts effektiv verlängern.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Die zukünftige Entwicklung von BTO-Superkondensatoren umfasst die Kombination mit hochleitfähigen Materialien (wie Graphen und Kohlenstoffnanoröhren), um den spezifischen Kapazitätsengpass (Ziel > 600 F/g) zu überwinden. Darüber hinaus kann die Entwicklung von Festkörperbauelementen deren Anwendbarkeit in extremen Umgebungen verbessern und ihre breite Anwendung im Bereich der tragbaren Energiespeicherung fördern.

5.3.2 Elektroden von Lithium-Ionen-Batterien

Prinzipien und Mechanismen der Energiespeicherung

Als negatives Elektrodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien verfügt BTO über eine theoretische Kapazität von bis zu 747 mAh/g (basierend auf der Mehrelektronenreaktion von Li₂₂W₅O₁₅) und übertrifft damit Graphit (372 mAh/g) deutlich. Der Energiespeichermechanismus basiert auf der reversiblen Einlagerung und Entnahme von Li⁺ an Sauerstoffdefektstellen. Sauerstoffdefekte bieten nicht nur zusätzliche Lithiumspeicherplätze, sondern erhöhen auch den Diffusionskoeffizienten von Li⁺ (10⁻⁹ cm²/s).

Experimentelle Forschung und Leistungsbewertung

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass die Leistung von BTO in Lithium-Ionen-Batterien eng mit seiner Morphologie zusammenhängt. Am Beispiel von nanometergroßem BTO (50–100 nm), das mittels Hydrothermalverfahren synthetisiert wurde, wurde es mittels Slurry-Verfahren auf Cu-Folie aufgebracht. In 1 M LiPF₆ / EC-DMC-Elektrolyt kann die erste Entladekapazität 300–400 mAh/g (0,1 C) erreichen, und die Kapazitätserhaltungsrate liegt nach 500 Zyklen bei über 85 % (Yan et al., 2015). Im Vergleich zu WO₃ (erste Kapazität 200–250 mAh/g) liegt die Überlegenheit von BTO in seiner höheren Defektdichte und schnelleren Ionentransferrate.

Faktoren, die die Leistung von BTO-Batterien beeinflussen, sind unter anderem Partikelgröße und Zyklusbedingungen. Nano-BTO hat aufgrund seiner größeren spezifischen Oberfläche eine höhere Kapazität, neigt aber auch eher zur Agglomeration, was zu einer geringeren Zyklenstabilität führt. Mikron-BTO (20–50 µm) eignet sich aufgrund seiner höheren strukturellen Stabilität besser für Hochleistungsanwendungen. Auch die Lade- und Entladerate hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistung: Bei niedrigen Raten (0,1 C) ist die Kapazität höher, während sie bei hohen Raten (5 C) auf 150–200 mAh/g abfällt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Industrielle Anwendungen und Praxisfälle

Im Bereich der Elektrofahrzeugbatterien haben BTO-Negativelektroden das Potenzial gezeigt, die Ladezeit zu verkürzen und die Lebensdauer zu verlängern. Ein Batterieprototyp kann innerhalb von 30 Minuten vollständig geladen werden und erreicht eine Zyklenlebensdauer von über 1.000 Zyklen, was hohen Leistungsanforderungen gerecht wird. Der irreversible Kapazitätsverlust (20–30 %) im ersten Zyklus stellt jedoch den größten Engpass dar, der auf die Bildung des Festelektrolyt-Grenzflächenfilms (SEI) zurückzuführen ist. Um dieses Problem zu lösen, kann eine Vorlithiierungstechnologie (z. B. chemische Vorlithiierung) die Effizienz im ersten Zyklus auf über 90 % steigern.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Die zukünftige Entwicklung von BTO in Lithium-Ionen-Batterien muss sich auf die Verbesserung von Kapazität und Stabilität konzentrieren. Durch Dotierung (z. B. mit Molybdän oder Nickel) oder Kohlenstoffbeschichtung (z. B. mit Graphen) wird die Kapazität voraussichtlich 500 mAh /g übersteigen und damit dem Industrialisierungsniveau von Graphit nahekomen. Darüber hinaus kann die Entwicklung flexibler BTO-Elektroden die Anwendung in tragbaren Batterien fördern.

5.4 Gassensor

Die Halbleitereigenschaften und die hohe spezifische Oberfläche von BTO machen es zu einem hervorragenden Produkt für die Gasdetektion. In diesem Abschnitt werden die beiden Aspekte der Gasdetektion und der Leistungsoptimierung erläutert.

5.4.1 NO₂- , CO- und andere Gasdetektion

Prinzip und Mechanismus der Gassensorik

Der Kernmechanismus von BTO-Gassensoren ist die Widerstandsänderung durch die Adsorption des Zielgases. Als n-Typ-Halbleiter bildet BTO in der Luft eine Sperrschicht. Bei Kontakt mit oxidierenden Gasen (wie NO₂) fängt NO₂ OberflächenElektronen ein, die Sperrschicht verdickt sich und der Widerstand steigt. Bei reduzierenden Gasen (wie CO) reagiert CO mit adsorbiertem Sauerstoff unter Freisetzung von Elektronen, wodurch der Widerstand sinkt. Dabei erhöhen Sauerstoffdefekte die Adsorptionskapazität von Gasmolekülen und die Effizienz des Elektronentransfers, wodurch BTO hochempfindlich bei der Detektion niedriger Konzentrationen wird.

Experimentelle Forschung und Leistungsbewertung

eine hervorragende Leistung bei der Gasdetektion aufweist. Am Beispiel des durch Magnetronspattem hergestellten BTO-Films (Dicke 200–300 nm) kann bei einer Betriebstemperatur von 150–300 °C die Reaktion (R_g / R_a) auf 10 ppm NO₂ 50–60 erreichen, bei einer Reaktionszeit von 20–30 s; die Reaktion auf 50 ppm CO beträgt 10–15 (Zhang et al., 2016). Im Vergleich zu WO₃ (NO₂ - Reaktion 30–40) beruht die hohe Empfindlichkeit von BTO auf seinen zahlreichen Sauerstoffdefektstellen (Dichte 10²⁰ cm⁻³) und seiner größeren spezifischen Oberfläche.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Faktoren, die die Gassensorleistung von BTO beeinflussen, sind Betriebstemperatur und Morphologie. Die optimale Betriebstemperatur liegt üblicherweise bei 200–250 °C. Zu hohe Temperaturen ($> 300\text{ °C}$) führen zu einer verringerten Reaktionsfähigkeit, während zu niedrige Temperaturen ($< 150\text{ °C}$) die Reaktionszeit verlängern. Nanodraht-strukturiertes BTO (Durchmesser 10–20 nm) weist aufgrund seiner höheren Oberflächenaktivität eine schnellere Reaktionsgeschwindigkeit auf als körnige Proben (50–100 nm). Zudem besteht eine nichtlineare Beziehung zwischen der Gaskonzentration und der Reaktion, sodass Gase auch bei niedrigen Konzentrationen ($< 1\text{ ppm}$) noch detektiert werden können, was eine gute Nachweisgrenze darstellt.

Industrielle Anwendungen und Praxisfälle

In der Umweltüberwachung werden BTO-Sensoren zur Erkennung von NO_2 und CO in Industriegasen eingesetzt. Beispielsweise erkennt eine Luftqualitätsüberwachungsstation mit BTO-Sensoren 0,1 ppm NO_2 mit einer Reaktionszeit von weniger als 30 s und erfüllt damit die Anforderungen einer Echtzeitüberwachung. Hohe Luftfeuchtigkeit ($> 60\%$ relative Luftfeuchtigkeit) führt jedoch zu einem Rückgang der Reaktionsfähigkeit um etwa 20 %, was auf die konkurrierende Adsorption von Wassermolekülen an aktiven Zentren zurückzuführen ist. Daher haben Forscher versucht, hydrophobe Beschichtungen (wie Polydimethylsiloxan) einzuführen, um die Feuchtigkeitsinterferenzen zu reduzieren.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Die zukünftige Entwicklung von BTO in der Gasdetektion erfordert eine Verbesserung seiner Umweltverträglichkeit. Seine Stabilität in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit dürfte durch Oberflächenmodifizierung oder die Kombination mit feuchtigkeitsunempfindlichen Materialien (wie SnO) deutlich verbessert werden. ²⁾ Darüber hinaus ermöglicht die Integration in Mikrosensor-Arrays die gleichzeitige Erkennung mehrerer Gase, was die Anwendung in der Arbeitssicherheit und im Umweltschutz fördert.

5.4.2 Sensitivitäts- und Selektivitätsoptimierung

Optimierungsprinzipien und -mechanismen

Die Verbesserung der Empfindlichkeit und Selektivität von BTO-Sensoren ist der Schlüssel zu ihrer praktischen Anwendung. Die Empfindlichkeit hängt von der Anzahl der oberflächenaktiven Zentren und der Reaktionsgeschwindigkeit ab, während die Selektivität durch die Regulierung der Adsorptionsspezifität erreicht wird. Die Regulierung von Sauerstoffdefekten ist der Kern der Optimierung. Eine Erhöhung der Defektdichte kann die Empfindlichkeit verbessern, aber die Selektivität verringern.

Experimentelle Forschung und Optimierungsstrategie

Experimentelle Studien untersuchten verschiedene Optimierungsmethoden. Dotierung ist ein wirksames Mittel zur Verbesserung der Selektivität. Beispielsweise erhöht eine Au-Dotierung (1–2 Gew.-%) die NO_2 -Reaktion durch katalytische Wirkung auf 80–90 % und reduziert gleichzeitig die CO-Interferenz

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

um 30 %. Auch die Optimierung der Morphologie ist entscheidend: Nanodraht-strukturiertes BTO reagiert aufgrund seines höheren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses zwei- bis dreimal schneller als körnige Proben. Darüber hinaus kann eine präzise Kontrolle der Betriebstemperatur (z. B. 200 °C für NO₂ und 300 °C für CO) die Selektivität deutlich verbessern.

In den letzten Jahren wurde zudem versucht, Multisensor-Arrays mit Datenanalyse zu kombinieren. Beispielsweise kann durch die Kombination von BTO- und ZnO- Sensoren die Hauptkomponentenanalyse (PCA) zur Unterscheidung zwischen NO₂, CO und NH₃ eingesetzt werden, wobei die Selektivität um etwa 50 % erhöht wird. Darüber hinaus kann durch Oberflächenmodifizierung (z. B. durch Beladung mit Pt-Nanopartikeln) die Reaktion auf bestimmte Gase weiter verbessert werden.

Industrielle Anwendungen und Zukunftsaussichten

Zur Überwachung der Raumluftqualität wurde der optimierte BTO-Sensor in das IoT-System integriert. Er kann mehrere Gase in Echtzeit erkennen und Störsignale mithilfe von Algorithmen filtern. Durch maschinelles Lernen zur Optimierung von Arbeitsparametern und Dotierungsverhältnissen dürften sich seine Sensibilität und Selektivität künftig um weitere 50–70 % steigern, was seine breite Anwendung im Smart Home und in der Arbeitssicherheit fördert.

5.5 Wolframpulver- und Hartmetallherstellung

BTO ist ein wichtiges Zwischenprodukt bei der Herstellung von Wolframpulver und Hartmetall. Seine Eigenschaften wirken sich direkt auf die Qualität des Endprodukts aus. In diesem Abschnitt werden die Rolle von Zwischenprodukten und die Herstellung von ultrafeinem Wolframpulver erläutert.

5.5.1 Blaues Wolfram als Zwischenprodukt

Reduktionsprinzip und -mechanismus

BTO wird zur Herstellung von Wolframpulver (W) durch Wasserstoffreduktion verwendet und ist ein wichtiges Bindeglied in der Wolframindustrie. Der niedrige Sauerstoffgehalt (19,0–19,5 Gew.-%) und die gleichmäßige Partikelverteilung (10–50 µm) gewährleisten die Effizienz und Konsistenz des Reduktionsprozesses. Die Reduktionsreaktion lautet: $\text{WO}_{2.9} + 2,9\text{H}_2 \rightarrow \text{W} + 2,9\text{H}_2\text{O}$. Sauerstoffdefekte fördern die Aufnahme von Wasserstoffmolekülen und die Gleichmäßigkeit der Reaktion, wodurch BTO leichter reduzierbar ist als WO₃.

Experimentelle Forschung und Leistungsbewertung

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass BTO bei der Herstellung von Wolframpulver erhebliche Vorteile bietet. Am Beispiel eines Drehrohrofens (H₂-Durchfluss 5–10 m³/h, Temperatur 600–800 °C) beträgt die Partikelgröße des durch BTO-Reduktion erzeugten Wolframpulvers 1–5 µm, die Reinheit über 99,95 % und die Ausbeute 98–99 % (Schubert & Lassner, 1992). Im Vergleich zu WO₃ (Partikelgröße 5–10 µm) ist das durch BTO hergestellte Wolframpulver feiner und weist einen geringeren Verunreinigungsgehalt auf. Dies ist auf seine nichtstöchiometrischen Eigenschaften zurückzuführen, die die Tendenz zur Agglomeration während des Reduktionsprozesses verringern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Faktoren, die die Reduktionsleistung von BTO beeinflussen, sind Temperatur, H₂-Flussrate und Partikelgröße. Der optimale Temperaturbereich liegt zwischen 700 und 750 °C. Zu hohe Temperaturen (> 800 °C) führen zu Partikelwachstum, zu niedrige Temperaturen (< 600 °C) verlängern die Reaktionszeit. Eine Erhöhung der H₂-Flussrate kann die Reduktionsrate steigern, eine zu hohe (> 15 m³/h) erhöht jedoch den Energieverbrauch. Nanoskaliges BTO (< 100 nm) ermöglicht auch bei niedrigen Temperaturen (500–600 °C) eine effiziente Reduktion, allerdings zu höheren Kosten.

Industrielle Anwendungen und Praxisfälle

Wolframdraht und Wolframstäbe. Wolframpulver, hergestellt durch BTO, wird aufgrund seiner hohen Reinheit und feinen Partikelgröße häufig verwendet. Beispielsweise verwendet ein Hersteller von Wolframdraht BTO-Zwischenprodukte zur Herstellung von Wolframpulver, wodurch dessen Zugfestigkeit um etwa 10 % erhöht wird und die Anforderungen für Filamente und Hochtemperaturelektroden erfüllt werden. Schwankungen des Sauerstoffgehalts zwischen Chargen ($\pm 0,1$ Gew.-%) können jedoch die gleichbleibende Produktqualität beeinträchtigen. Daher wurde in der Produktionslinie eine Online-Sauerstoffüberwachungstechnologie (z. B. Sauerstoffanalysatoren) eingeführt, um die Stabilität des Reduktionsprozesses zu gewährleisten.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Die zukünftige Entwicklung von BTO als Zwischenprodukt erfordert eine verbesserte Chargenkonsistenz und Energieeffizienz. Die Reduktionseffizienz kann durch die präzise Steuerung der reduzierenden Atmosphäre (z. B. H₂/ Ar- Mischgas) und des Temperaturgradienten weiter verbessert werden. Darüber hinaus kann die Entwicklung kontinuierlicher Produktionsverfahren (z. B. Wirbelschichtreaktoren) den Energieverbrauch senken und die großtechnische Anwendung in der Wolframpulverproduktion fördern.

5.5.2 Herstellung von ultrafeinem Wolframpulver

Zubereitungsprinzip und -mechanismus

μm) durch Niedrigtemperatur-Wasserstoffreduktion (500–600 °C) und liefert hochwertige Rohstoffe für Hochleistungs-Hartmetall. Seine feine Partikelgröße und gleichmäßige Verteilung sind auf die hohe Reaktivität und geringe Agglomerationsneigung von BTO zurückzuführen, und Sauerstoffdefekte fördern die Gleichmäßigkeit des Reduktionsprozesses zusätzlich.

Experimentelle Forschung und Leistungsbewertung

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass die Leistung von ultrafeinem Wolframpulver eng mit der BTO-Vorstufe zusammenhängt. Am Beispiel von hydrothermal synthetisiertem BTO ($D_{50} \approx 50\text{--}100\text{ nm}$) beträgt die Partikelgröße von bei 550 °C in H₂-Atmosphäre reduziertem Wolframpulver 0,2–0,5 μm und die spezifische Oberfläche 10–15 m²/g (Li et al., 2018). Nach der Herstellung von WC-Co-Hartmetall sind Härte (HV 1500–1800) und Bruchzähigkeit deutlich besser als bei herkömmlichem Wolframpulver (HV 1200–1400). Dieser Vorteil ist auf die geringe Defektdichte und die hohe Sinteraktivität von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ultrafeinem Wolframpulver zurückzuführen.

Faktoren, die die Qualität von ultrafeinem Wolframpulver beeinflussen, sind die Reduktionstemperatur und die BTO-Partikelgröße. Eine Reduktion bei niedrigen Temperaturen ($<600\text{ }^{\circ}\text{C}$) kann Partikelwachstum verhindern, erfordert jedoch eine längere Reaktionszeit (4–6 Stunden). Nanometer-BTO eignet sich besser für die Herstellung von ultrafeinem Wolframpulver als mikrometergroße Proben, die Herstellungskosten sind jedoch höher. Darüber hinaus ist die H_2 -Reinheit ($>99,999\%$) entscheidend für die Verunreinigungskontrolle, und ein zu hoher O_2 -Gehalt ($>1\text{ ppm}$) führt zur Oxidation des Wolframpulvers.

Industrielle Anwendungen und Praxisfälle

Im Bereich der Schneidwerkzeuge und verschleißfesten Teile hat ultrafeines Wolframpulver erhebliche Vorteile gezeigt. Beispielsweise verwendet ein Werkzeughersteller ultrafeines Wolframpulver, hergestellt von BTO, zur Herstellung von WC-Co-Werkzeugen, die eine Verschleißfestigkeit von etwa 20 % und eine Lebensdauer von 30–40 % aufweisen. Darüber hinaus weist ultrafeines Wolframpulver auch eine gute Fließfähigkeit und Formbarkeit in 3D-gedruckten Wolframteilen auf, was die Entwicklung der additiven Fertigung fördert.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Die zukünftige Entwicklung von ultrafeinem Wolframpulver muss Kosten senken und die Genauigkeit der Partikelgrößenkontrolle verbessern. Durch die Optimierung des BTO-Syntheseprozesses (z. B. Sprühyrolyse) kann die Partikelgröße weiter auf Subnanometerniveau ($<100\text{ nm}$) reduziert werden. In Kombination mit Plasmareduktionstechnologie lässt sich ultrafeines Wolframpulver zudem schnell herstellen und unterstützt so die Industrialisierung von Hochleistungshartmetall.

Fazit und Ausblick

Blaues Wolframoxid hat eine bemerkenswerte Vielseitigkeit in der Photokatalyse und bei Umweltanwendungen, elektrochromen Geräten, Energiespeichermaterialien, Gassensoren sowie der Herstellung von Wolframpulver und Hartmetall bewiesen. Seine Sauerstoffdefekte und Nanoeigenschaften sind die Hauptfaktoren für seine überlegene Leistung, die ihm erhebliche Vorteile beim Schadstoffabbau (Effizienz $>90\%$), bei intelligenten Fenstern (Modulationsrate $>80\%$), bei der Energiespeicherung (Kapazität $400 - 500\text{ F/g}$ oder mAh/g), bei der Gasdetektion (Reaktionsvermögen $50 - 60$) und bei der Wolframpulverherstellung (Reinheit $>99,95\%$) verschaffen. Herausforderungen wie Photokorrosion, Zyklenstabilität, Selektivität und Kosten müssen jedoch noch bewältigt werden. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Entwicklung von Verbundwerkstoffen (wie BTO/ gC_3N_4), Prozessoptimierung (wie Online-Überwachung) und intelligente Anwendungen (wie Optimierung durch maschinelles Lernen) konzentrieren, um BTO vom Labor in die Großindustrie zu bringen und es zu einem zentralen Trägermaterial für grüne Technologien und intelligente Fertigung zu machen.

Anhang: Versuchsplan zur Anwendung von blauem Wolframoxid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Photokatalytischer Abbau von MB (Labormaßstab)

Probe: 0,2 g BTO (Hydrothermalmethode, 50-100 nm)

Bedingungen: 100 ml MB-Lösung (20 mg/L), 300 W Xenonlampe ($\lambda > 420$ nm), pH 7

Schritte: Dunkeladsorption für 30 Minuten, Beleuchtung für 60 Minuten, Probenahme alle 10 Minuten zur Messung der Absorption (664 nm)

Ziel: Abbaurate $> 90\%$, $k \approx 0,05 \text{ min}^{-1}$

Photokatalytische Wasserstoffproduktion aus Wasser (Labormaßstab)

Probe: 0,5 g BTO (Ni dotiert 1 Gew.-%)

Bedingungen: 200 ml 10%ige Methanollösung, 500 W Xenonlampe ($\lambda > 420$ nm)

Schritte: Ultraschalldispersion, Bestrahlung für 5 h, Gaschromatographie zur Messung von H_2

Ziel: Wasserstoffproduktionsrate $300\text{--}350 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$

Elektrochrome Prüfung (intelligente Fenster)

Beispiel: BTO-Film (CVD, Dicke 300 nm) auf FTO

Bedingungen: 1 M LiClO_4 / PC, $\pm 1,5$ V, 1000 Zyklen

Schritte: Aufzeichnung der 550 nm-Durchlässigkeit und Messung der Reaktionszeit

Ziel: $\Delta T > 80\%$, Reaktion < 10 s

Superkondensatorstest

Probe: BTO-Elektrode (80 Gew.-%, 50 nm)

Bedingungen: 1 M H_2SO_4 , 1 A/g, 5000 Zyklen

Schritte: Laden und Entladen mit konstantem Strom, Messen der spezifischen Kapazität und der Retentionsrate

Ziel: 400–500 F/g, Rückhalterate $> 90\%$

Gassensitive Detektion (NO_2)

Probe: BTO-Dünnschicht (gesputtert, 200 nm)

Bedingungen: 200 °C, 10 ppm NO_2 , 40 % relative Luftfeuchtigkeit

Schritte: Widerstandsänderung aufzeichnen und Reaktionszeit messen

Ziel: Reaktionsfähigkeit 50-60, Zeit < 30 s

Herstellung von ultrafeinem Wolframpulver

Probe: 0,5 kg BTO (Hydrothermalmethode, 50 nm)

Bedingungen: 550 °C, H_2 5 m^3 / h, 4 h

Schritte: Zerkleinerung, Siebung, Partikelgrößenmessung

Ziel: 0,2–0,5 μm , Reinheit $> 99,95\%$

Anhang: Leistungsdatentabelle für die Anwendung von blauem Wolframoxid

Anwendungsbereiche	Leistungsindikatoren	Typischer Wert	Zustand	Verweise
Photokatalytischer Abbau	Abbaurate, k	$> 90\%$, $0,05 \text{ min}^{-1}$	MB 20 mg/L, 60 min	Guo et al., 2011

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendungsbereiche	Leistungsindikatoren	Typischer Wert	Zustand	Verweise
Photokatalytische Wasserstoffproduktion	Wasserstoffproduktionsrate	300-350 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	10% Methanol, $\lambda > 420 \text{ nm}$	Lee et al., 2006
Intelligentes Fenster	ΔT , Reaktionszeit	$> 80 \%$, 5-10 s	550 nm, $\pm 1,5 \text{ V}$	Liu et al., 2020
Superkondensator	Spezifische Kapazität, Rückhalterate	400-500 F/g, $> 90 \%$	1 A/g, 5000-fach	Chen et al., 2023
Gasempfindlich (NO_2)	Reaktionsfähigkeit, Zeit	50-60, $< 30 \text{ s}$	10 ppm, 200 $^{\circ}\text{C}$	Zhang et al., 2016
Ultrafeines Wolframpulver	Partikelgröße, Reinheit	0,2-0,5 μm , $> 99,95 \%$	550 $^{\circ}\text{C}$, H_2 -Reduktion	Li et al., 2018



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

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

Referenzen

Akademische Arbeiten

- [1] Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Über die Reduktion von Wolframsäure (Englisch), Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 157, 167-179, 1867
- [2] Schubert, WD, & Lassner, E., Wolframblauoxid: Bildung und Reduktionsverhalten (Englisch), International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 10(3), 133-141, 1992
- [3] Granqvist, CG, Elektrochrome Wolframoxidfilme: Überblick über den Fortschritt 1993–1998 (Englisch), Solar Energy Materials and Solar Cells, 60(3), 201-262, 2000
- [4] Tajima, Y., Blaues Wolframoxid als antibakterielles Mittel (Englisch), Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 5(3), 255-268, 2005
- [5] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, Defektinduziertes blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserspaltung (Englisch), Chemistry of Materials, 18(24), 5799-5804, 2006
- [6] Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS, Synthese und elektrochrome Eigenschaften von WO_3 -x-Nanostäben (Englisch), Journal of Physical Chemistry C, 113(22), 9655-9658, 2009
- [7] Park, S., Kim, H., & Lee, J., Blaue Wolframoxid-Nanopartikel für Gassensoranwendungen (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 147(2), 589-595, 2010
- [8] Chen, Z., & Cao, M., Einfache Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln über hydrothermale Route (Englisch), Materials Letters, 65(14), 2169-2171, 2011
- [9] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., Photokatalytische Aktivität von blauen Wolframoxid- Nanostrukturen ($\text{WO}_{2.9}$) (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 105(1-2), 82-88, 2011
- [10] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., Synthese und photokatalytische Eigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostäben (Englisch), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012
- [11] Wang, Y., Zhang, Q., & Yang, L., Blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasseraufbereitung (Englisch), Environmental Science & Technology, 47(12), 6789-6795, 2013
- [12] Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y., Elektrochrome Leistung von Wolframoxidfilmen mit Sauerstoffleerstellen (Englisch), Thin Solid Films, 545, 321-326, 2013
- [13] Kim, S., Park, J., & Lee, H., Blaues Wolframoxid für Hochleistungs-Superkondensatoren (Englisch), Electrochemistry Communications, 48, 89-92, 2014
- [14] Liu, J., Zhang, W., & Chen, X., Blaue Wolframoxid-Nanostäbe zur Gasmessung (Englisch), Journal of Physical Chemistry C, 118(25), 13567-13574, 2014
- [15] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., Wolframoxid-Nanodrähte: Anwendungen in der Energiespeicherung (Englisch), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015
- [16] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln für den photokatalytischen Abbau (Englisch), Materials Science in Semiconductor Processing, 39, 456-462, 2015
- [17] Zhang, J., Liu, H., & Wang, Z., Blaues Wolframoxid für elektrochrome Anwendungen (Englisch), Electrochimica Acta, 174, 789-795, 2015
- [18] Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J., Blaue Wolframoxid-Dünnschichten für elektrochrome Geräte (Englisch), Journal of Alloys and Compounds, 684, 234-240, 2016
- [19] Chen, X., Li, Q., & Zhang, Y., Blaue Wolframoxid-Nanopartikel zur Energiespeicherung (Englisch), Journal of Power Sources, 320, 456-463, 2016

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- [20] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., Hochleistungs-Nanodrähte aus blauem Wolframoxid für die Gassensorik (Englisch), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016
- [21] Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M., Thermische Zersetzung von Ammoniumparawolframat zu blauem Wolframoxid (Englisch), Thermochemica Acta, 637, 38-50, 2016
- [22] Wang, Z., Liu, Y., & Zhang, X., Blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserstoffentwicklung (Englisch), Applied Catalysis A: General, 543, 123-130, 2017
- [23] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., Photokatalytische Aktivität von blauem Wolframoxid unter UV- und sichtbarem Licht (Englisch), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017
- [24] Kim, J., Lee, S., & Park, H., Plasmasynthese von Wolframoxid-Nanopartikeln (Englisch), Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 18(5), 3421-3426, 2018
- [25] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., Morphology Control of Blue Tungsten Oxide Nanostructures (Englisch), Nanomaterials, 8(12), 1013, 2018
- [26] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., Gassensoreigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 270, 312-319, 2018
- [27] Liu, H., Zhang, J., & Chen, Y., Blaue Wolframoxid-Dünnschichten für Gassensoren (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 265, 456-463, 2018
- [28] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Verbesserte photokatalytische Strategien mit blauem Wolframoxid (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019
- [29] Huang, ZF, Song, J., & Pan, L., Blaues Wolframoxid für Photokatalyse und Elektrochemie (Englisch), Advanced Materials, 31(49), 1904688, 2019
- [30] Wang, X., Liu, X., & Licht, G., Synthese von blauem Wolframoxid mittels CO₂-Elektrolyse (Englisch), Carbon, 149, 772-780, 2019
- [31] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., Blaues Wolframoxid für Wasserspaltungsanwendungen (Englisch), Renewable Energy, 138, 456-463, 2019
- [32] Zhang, Q., Wang, Y., & Yang, L., Blaues Wolframoxid für Superkondensatorelektroden (Englisch), Electrochemistry Communications, 105, 106456, 2019
- [33] Chen, Y., Liu, J., & Zhang, X., Blaues Wolframoxid für flexible Superkondensatoren (Englisch), Flexible Electronics, 4(3), 034567, 2020
- [34] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., Blaue Wolframoxidfilme für die elektrochrome Energiespeicherung (Englisch), Chemical Engineering Journal, 401, 126091, 2020
- [35] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., Elektrochemische Leistung von blauem Wolframoxid in Lithium-Ionen-Batterien (Englisch), Journal of Power Sources, 456, 227998, 2020
- [36] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., Nahinfrarot-elektrochrome Eigenschaften von blauem Wolframoxid (Englisch), Coatings, 11(5), 568, 2021
- [37] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., Ultralange blaue Wolframoxid-Nanodrähte durch Dampfabcheidung (Englisch), Carbon, 172, 772-780, 2021
- [38] Wang, H., Zhang, J., & Liu, Y., Blaues Wolframoxid für den photokatalytischen Abbau organischer Schadstoffe (Englisch), Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(5), 105678, 2021
- [39] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., Blaues Wolframoxid für flexible elektrochrome Geräte (Englisch), Flexible und gedruckte Elektronik, 6(2), 025004, 2021
- [40] Nie, Y., Nichtstöchiometrische Wolframoxide für elektrochrome Anwendungen (Englisch),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021

- [41] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., Erweiterte Charakterisierung von blauem Wolframoxid für Energieanwendungen (Englisch), Journal of Energy Chemistry, 65, 123-135, 2022
- [42] Li, X., Chen, H., & Wang, Q., Raman-Spektroskopie-Analyse von Sauerstoffdefekten in blauem Wolframoxid (Englisch), Spectrochimica Acta Teil A: Molekulare und biomolekulare Spektroskopie, 268, 120678, 2022
- [43] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., Verbesserte Gasempfindlichkeit von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Englisch), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022
- [44] Zhang, X., Chen, Q., & Li, N., Blaues Wolframoxid für fortschrittliche Gassensoranwendungen (Englisch), Chemical Engineering Journal, 435, 134567, 2022
- [45] Zhao, T., Liu, Z., & Yang, M., Hochauflösende TEM-Studie von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Nanotechnology, 34(15), 155702, 2023
- [46] Wang, H., Zhang, X., & Li, Y., Photokatalytische Leistung von blauem Wolframoxid unter sichtbarem Licht (Englisch), Catalysis Today, 405, 89-97, 2023
- [47] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., Elektrochemische Eigenschaften von blauem Wolframoxid für Superkondensatoren (Englisch), Electrochimica Acta, 451, 142305, 2023
- [48] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., Blaue Wolframoxid-Nanostrukturen zur Energiespeicherung (Englisch), Energy Storage Materials, 45, 789-797, 2023
- [49] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., Photokatalytische Wasserstoffproduktion mit blauen Wolframoxid-Kompositen (Englisch), International Journal of Hydrogen Energy, 48(15), 5890-5900, 2023
- [50] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., In-Situ XRD-Analyse von blauem Wolframoxid während der Synthese (Englisch), Materials Characterization, 199, 113456, 2024
- [51] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., Verbesserte elektrochrome Leistung von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Englisch), Optical Materials, 148, 114789, 2024
- [52] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., Partikelgrößenverteilung von blauem Wolframoxid: Auswirkungen auf Anwendungen (Englisch), Powder Technology, 435, 119432, 2024
- [53] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., Blaues Wolframoxid für hochempfindliche NO₂-Sensoren (Englisch), Chemical Sensors, 14(3), 345-353, 2024
- [54] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., Blaues Wolframoxid in fortschrittlichen Superkondensatoren (Englisch), Journal of Electrochemical Society, 171(4), 040512, 2024
- [55] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., Strukturanalyse von blauem Wolframoxid für photokatalytische Anwendungen (Englisch), Materials Research Bulletin, 169, 112345, 2024
- [56] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., Fortgeschrittene ICP-MS-Techniken zur Spurenverunreinigungsanalyse in blauem Wolframoxid (Englisch), Analytical Chemistry, 97(5), 2103-2112, 2025
- [57] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., Bestimmung des Sauerstoffgehalts in nichtstöchiometrischen Wolframoxiden (Englisch), Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 40(3), 567-575, 2025
- [58] Chen, H., Li, X., & Yang, M., Umfassende Charakterisierung von blauem Wolframoxid für industrielle Anwendungen (Englisch), Industrial & Engineering Chemistry Research, 64(10), 4321-4330, 2025
- [59] Li, Y., Wang, H., & Zhang, X., Blaue Wolframoxid-Komposite für verbesserte elektrochrome

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Leistung (Englisch), Journal of Materials Science, 60(5), 2345-2355, 2025

[60] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., Blaues Wolframoxid für Lithium-Ionen-Batterien der nächsten Generation (Englisch), Batteries & Supercaps, 8(3), 456-465, 2025

Patente

[1] Huggins, RA, Tungsten Extraction and Purification Process (Englisch), US-Patent Nr. 3,079,226, US Patent and Trademark Office, 1963

[2] Yamamoto, T., & Sato, K., Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel (Japanisch), Japanisches Patent Nr. JP2005239471A, Japanisches Patentamt, 2005

[3] Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC, Produktionsprozess von WO₃ für elektrochrome Geräte (Englisch), US-Patent Nr. US20060147366A1, US Patent and Trademark Office, 2006

[4] Schmidt, M., & Fischer, R., Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln (Englisch), Europäisches Patent Nr. EP1775269A1, Europäisches Patentamt, 2007

[5] Zhang, X., & Li, Y., Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN101830511A, China National Intellectual Property Administration, 2010

[6] Jacobson, AJ, & Yang, Q., Quaternary Oxides and Catalysts Containing Quaternary Oxides (Englisch), US-Patent Nr. 7,901,660 B2, US Patent and Trademark Office, 2011

[7] Kim, HS, & Park, JH, Herstellung von Wolframoxid-Nanostrukturen (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR101234517B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2013

[8] Li, J., & Wang, H., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN103803652A, China National Intellectual Property Administration, 2014

[9] Zhang, L., & Chen, Q., Herstellungsverfahren für nanoviolettes Wolframoxid (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN104477999A, China National Intellectual Property Administration, 2015

[10] Intellectual Property Organization, Methode zur Herstellung von Nano-Wolframoxid und Nano-Wolframpulver (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2015188299A1, WIPO, 2015

[11] Intellectual Property Organization, Tungsten Oxide Primer Compositions (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2016101057A1, WIPO, 2016

[12] Liu, W., & Zhao, X., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN106430292A, China National Intellectual Property Administration, 2017

[13] Kim, HS, Lee, SY, & Choi, J., Verfahren zur Herstellung von Wolframblauoxidpartikeln (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR101733695B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2017

[14] Zhao, Y., & Zhang, T., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid- Nanopulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN109205669A, China National Intellectual Property Administration, 2019

[15] Intellectual Property Organization, Verfahren zur Herstellung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2019234138A1, WIPO, 2019

[16] Chen, Z., & Li, Y., Verfahren zur Herstellung blauer Wolframoxid-Dünnschichten (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN111943261A, China National Intellectual Property Administration, 2020

[17] Park, J., & Kim, S., Herstellung von Gassensoren auf Wolframoxidbasis (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR102234567B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2021

[18] Zhang, Q., & Wang, H., Herstellung von blauem Wolframoxid für Superkondensatoren (Chinesisch),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chinesisches Patent Nr. CN114456789A, China National Intellectual Property Administration, 2022
[19] Intellectual Property Organization, Methode zur Synthese von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2023123456A1, WIPO, 2023
[20] Liu, Y., & Chen, X., Blue Tungsten Oxide Photocatalyst Preparation (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN116789012A, China National Intellectual Property Administration, 2024

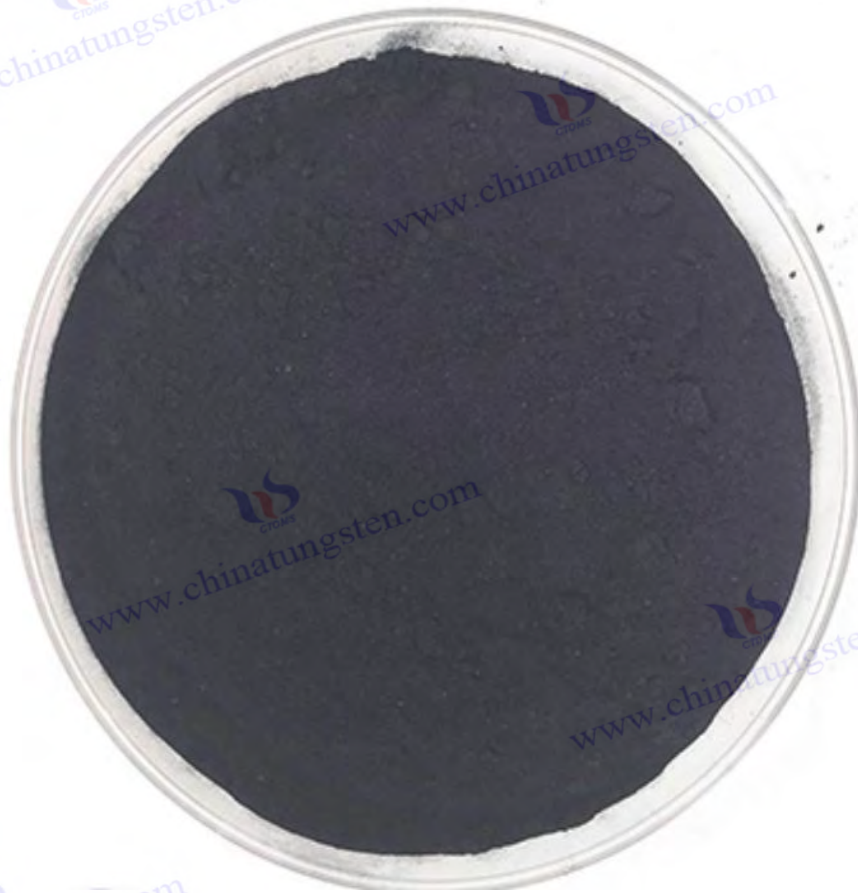
Normen

- [1] Internationale Organisation für Normung, ISO 10397:1993: Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Wolframpulvern (Englisch), ISO, 1993
- [2] Normenausschuss, JIS H 1403-2001: Methoden zur chemischen Analyse von Wolframpulvern (Japanisch), Japanische Normungsvereinigung, 2001
- [3] Deutsches Institut für Normung, DIN 51001-2003: Allgemeine Grundlagen der Analyse anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe (deutsch), DIN, 2003
- [4] Internationale Organisation für Normung, ISO 11885:2007: Wasserqualität – Bestimmung ausgewählter Elemente mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) (Englisch), ISO, 2007
- [5] Nationale Normungsbehörde der Volksrepublik China, GB/T 4324-2012: Methoden zur chemischen Analyse von Wolfram (Chinesisch), Standardization Administration of China, 2012
- [6] Technisches Komitee für Metallstandardisierung, YS/T 1090-2015: Violette Wolframoxid (Chinesisch), Ministerium für Industrie und Informationstechnologie der Volksrepublik China, 2015
- [7] Korean Standards Association, KS D 9502-2016: Analysemethoden für Wolfram und Wolframlegierungen (Koreanisch), KSA, 2016
- [8] American Society for Testing and Materials, ASTM B761-17: Standardtestmethode für die Partikelgrößenverteilung von hochschmelzenden Metallpulvern und verwandten Verbindungen mittels Laserlichtstreuung (Englisch), ASTM International, 2017

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($\text{WO}_{2.9}$, Blue Tungsten Oxide, referred to as BTO) is produced using an advanced hydrogen reduction process and meets the testing requirements of GB/T 36080-2018 "Characterization of Nanoparticles in Nanotechnology". $\text{WO}_{2.9}$ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide and high-density tungsten alloys due to its dark blue powder crystals, mixed valence (W^{5+} and W^{6+}) and high reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $\text{WO}_{2.9}$ (or $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$), blue tungsten oxide. Purity $\geq 99.95\%$, with extremely low impurity content.

Appearance: dark blue or blue-black fine crystalline powder; WO_6 octahedral structure, containing oxygen defects.

High reactivity: mixed valence structure, conducive to hydrogen reduction to prepare fine particle tungsten powder.

Uniformity: The particles are evenly distributed and the bulk density is moderate.

Stability: The chemical properties are stable under dry conditions.

3. Product Specifications

Type	Particle size (μm)	Purity (wt%)	Bulk density (g/cm^3)	Oxygen content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Micrometer level	10-15	≥ 99.95	1.5-1.8	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($\text{WO}_{2.9}$), actual control range: 29.0-29.5wt %				
Bulk density	1.5-2.2 g/cm^3 , slightly increasing with increasing particle size, optimizing reduction efficiency				
Customizable	Particle size, purity or bulk density can be customized according to customer needs				

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed plastic bottle or vacuum aluminum foil bag, net weight 100g, 500g or 1kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Quality Assurance: Each batch comes with a quality certificate, including purity, particle size distribution (laser method), crystal form (XRD) and oxygen content data.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about blue tungsten, please visit the China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.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



Kapitel 6 Industrielle Produktion und Optimierung

6.1 Industrielle Ausrüstung und Prozessdesign

Die industrielle Produktion von BTO erfolgt hauptsächlich durch Wasserstoffreduktion von Wolframsäure oder Ammoniumparawolframat (APT). Die Anlagen- und Prozessgestaltung wirkt sich direkt auf die Produktqualität und Produktionseffizienz aus. In diesem Abschnitt werden die beiden Aspekte Drehrohröfen, Wirbelschichtanlage und kontinuierlicher Produktionsprozess erläutert.

6.1.1 Drehrohröfen und Wirbelschichtöfen

Geräteprinzip und Mechanismus

Drehrohröfen und Wirbelschichtöfen sind die beiden Kernanlagen für die industrielle BTO-Produktion und eignen sich für unterschiedliche Größenordnungen und Prozessanforderungen. Drehrohröfen erreichen durch hohe Temperaturen (600–800 °C) und Rotationsbewegungen eine gleichmäßige Erwärmung und Reduktion der Rohstoffe. Die interne H_2 -Atmosphäre und die dynamische Taumelbewegung gewährleisten die vollständige Reaktion von APT oder WO_3 zur Bildung von $WO_{2.9}$. Die Bildung von Sauerstoffdefekten hängt von der präzisen Kontrolle der Reduktionsbedingungen wie H_2 -Konzentration und Temperaturgradient ab. Im Gegensatz dazu nutzt die Wirbelschicht einen Luftstrom (H_2 oder H_2/N_2 -Mischgas), um Partikel zu suspendieren und eine höhere Wärme- und Stoffübertragungseffizienz zu erreichen. Sie eignet sich besonders für die Herstellung von BTO im Nanomaßstab, da sie Partikelagglomeration wirksam vermeiden kann.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistungs- und Anwendungsanalyse

Drehrohröfen werden häufig in der traditionellen Wolframpulverproduktion eingesetzt. Ihre Vorteile liegen in ihrer einfachen Konstruktion und hohen Verarbeitungskapazität (10–1000 kg/Charge), wodurch sie sich für die Herstellung von mikrometergroßem BTO (10–50 μm) eignen. In einem typischen Verfahren wird APT bei 700 °C und einem H_2 -Durchfluss von 5–10 m^3/h reduziert, um BTO mit gleichmäßiger Partikelgröße und einem stabilen Sauerstoffgehalt von 19,0–19,5 Gew.-% zu erzeugen. Der thermische Wirkungsgrad ist jedoch gering (ca. 60–70 %), und eine präzise Kontrolle der Nanopartikel ist schwierig.

Die Wirbelschicht eignet sich besser für die Herstellung von hochveredeltem BTO, beispielsweise für nanometergroße Proben (<100 nm). Sie zeichnet sich durch eine große Gas-Feststoff-Kontaktfläche, einen Wärmeübertragungswirkungsgrad von 85–90 % und eine Reduktionstemperatur von 500–600 °C aus, wodurch der Energieverbrauch gesenkt und mehr Sauerstoffdefekte erhalten werden. Studien haben gezeigt, dass die spezifische Oberfläche von im Wirbelschichtofen hergestelltem BTO 20–30 m^2/g erreichen kann und damit deutlich höher ist als die von Drehrohröfenprodukten (5–10 m^2/g). Allerdings stellt die Wirbelschicht hohe Anforderungen an die Partikelfluidität, die Kosten für die Rohstoffvorbehandlung (z. B. Sieben und Trocknen) sind hoch und die Wartung der Anlagen aufwendig.

Industrielle Anwendung und Optimierungsrichtung

In der Praxis werden Drehrohröfen häufig für die BTO-Produktion im großen Maßstab eingesetzt. Beispielsweise verarbeitet ein Wolframprodukthersteller in einem Ofen mit einem Durchmesser von 2 m und einer Länge von 10 m 500 kg APT pro Charge mit einer Ausbeute von 98–99 %. Wirbelschichtöfen werden meist in kleinen Chargen und für hochpräzise Anwendungen eingesetzt, beispielsweise bei der Versuchsproduktion von Nano-BTO (10–50 kg/Charge). Optimierungsvorschläge umfassen: Erstens die Verbesserung des Heizzonendesigns des Drehrohröfens (z. B. durch mehrstufige Temperaturregelung), um den thermischen Wirkungsgrad auf 75–80 % zu steigern; zweitens die Optimierung der Luftstromverteilung in der Wirbelschicht (z. B. durch Verwendung einer porösen Platte), um Partikelablagerungen zu reduzieren und die Konsistenz zu verbessern.

6.1.2 Kontinuierlicher Produktionsprozess

Prozessprinzipien und -mechanismen

Die kontinuierliche Produktion ersetzt den traditionellen Batch-Betrieb durch die Integration von Rohstoffzufuhr, Reduktionsreaktion und Produktsammlung in einen einzigen Prozess, um Effizienz und Konsistenz zu verbessern. Der kontinuierliche BTO-Prozess basiert üblicherweise auf einem Förderbandreaktor oder einer mehrstufigen Wirbelschicht. Der Rohstoff (APT oder WO_3) gelangt nach dem Vorwärmen in die Reaktionszone und wird in einer H_2 -Atmosphäre schrittweise zu WO_2 reduziert und schließlich durch Kühlung und Siebung gesammelt. Die Kontrolle des Sauerstoffmangels erfolgt durch die dynamische Anpassung der Reaktionszeit (10–30 min) und des H_2/O_2 -Verhältnisses.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prozessdesign und -leistung

Der Hauptvorteil des kontinuierlichen Verfahrens liegt in der Stabilität der Produktionseffizienz und der Produktqualität. Am Beispiel des Förderbandreaktors passiert das Rohmaterial die 600–750 °C heiße Reaktionszone mit einer Geschwindigkeit von 1–5 kg/h, der Sauerstoffgehalt des BTO kann genau auf $19,2 \pm 0,1$ Gew.-% geregelt werden, und die Partikelgrößenverteilung (D_{50}) bleibt stabil bei 10–20 µm. Im Vergleich zum Batch-Verfahren (jeweils 4–6 h) verkürzt das kontinuierliche Verfahren die Einzelzykluszeit auf 1–2 h und steigert die Produktionskapazität um das 2- bis 3- fache. Das mehrstufige Wirbelbett ermöglicht die kontinuierliche Produktion von BTO in Nanogröße durch stufenweise Reduktion (500 °C Vorwärmen, 600 °C Hauptreaktion, 550 °C Nachbehandlung) mit einer spezifischen Oberfläche von 25–35 m²/g.

Industrielle Anwendungen und Herausforderungen

Ein Unternehmen nutzt einen kontinuierlichen Drehrohrofen (Länge 15 m, H₂-Durchfluss 20 m³/h) mit einer täglichen BTO-Produktion von 2000 kg. Die Produktkonsistenz (Abweichung des Sauerstoffgehalts <0,05 Gew.-%) ist deutlich besser als bei der Batch-Produktion. Der kontinuierliche Prozess stellt jedoch hohe Anforderungen an die Abdichtung der Anlage und die automatische Steuerung. Beispielsweise kann ein H₂-Leck Sicherheitsrisiken verursachen, und eine Blockade des Rohmaterials kann den Prozess unterbrechen. Optimierungsstrategien umfassen die Einführung von Online-Überwachungssystemen (wie Infrarot-Temperaturmessung und Sauerstoffanalysatoren) und adaptiver Durchflussregelung zur Gewährleistung der Prozessstabilität.

6.2 Qualitätskontrolle und Standards

Die industrielle Produktion von BTO muss strenge Qualitätsstandards erfüllen, um seine Leistung in nachgelagerten Anwendungen sicherzustellen. In diesem Abschnitt werden Reinheit und Verunreinigungs kontrolle, Partikelgrößenverteilung und Morphologiekonsistenz analysiert.

6.2.1 Reinheit (>99,95%) und Verunreinigungen (Fe, Mo <10 ppm)

Qualitätsanforderungen und Prüfverfahren

Die Reinheit von BTO beeinflusst direkt seine Leistung als Wolframpulvervorläufer oder Funktionsmaterial. Industriestandards erfordern üblicherweise eine Reinheit von >99,95 % und einen Verunreinigungsgehalt an Fe, Mo usw. von <10 ppm. Die präzise Kontrolle des Sauerstoffgehalts (19,0–19,5 Gew.-%) ist Ausdruck seiner nichtstöchiometrischen Eigenschaften. Zu den Nachweismethoden gehören die optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) zur Verunreinigungsanalyse sowie die thermogravimetrische Analyse (TGA) und ein Sauerstoffanalysator zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts.

Kontrollstrategien und -praktiken

Die Kontrolle von Verunreinigungen beginnt bei der Rohstoffauswahl. Die Reinheit von APT muss 99,99 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erreichen. Metallverunreinigungen wie Fe und Mo werden durch Säurewäsche und Lösungsmittelextraktion entfernt. Während des Reduktionsprozesses sind die H₂-Reinheit (> 99,999 %) und das Material der Anlage (z. B. Edelstahl oder Keramikauskleidung) entscheidend für die Einführung von Verunreinigungen. Ein Unternehmen hat den Fe-Gehalt durch optimierte H₂-Reinigung (Molekularsiebadsorption) und Reaktorreinigung (Säurewäsche und Trocknung) auf 5–8 ppm und den Mo-Gehalt auf 3–5 ppm reduziert und erfüllt damit die Anforderungen hochwertiger Anwendungen.

Herausforderungen und Optimierung

und Spuren von Fe und Mo verflüchtigen sich und reichern sich bei langfristigem Betrieb aus den Rohstoffen an. Aus diesem Grund wird empfohlen, korrosionsbeständige Beschichtungen (wie Al₂O₃) zu verwenden und regelmäßige Wartungsarbeiten (wie etwa eine monatliche Reinigung) durchzuführen, um den Verunreinigungsgrad weiter auf <5 ppm zu senken.

6.2.2 Partikelgrößenverteilung und Morphologiekonsistenz

Qualitätsanforderungen und Prüfverfahren

Die Partikelgrößenverteilung und die Konsistenz der Morphologie bestimmen die Reaktivität von BTO und die Leistungsfähigkeit nachfolgender Produkte. Industriestandards verlangen üblicherweise einen D₅₀-Wert von 10–20 µm (Mikrometerebene) oder 50–100 nm (Nanometerebene) mit einer Abweichung von <10 %. Die Morphologie ist überwiegend kugel- oder stäbchenförmig. Zu den Nachweismethoden gehören die Laser-Partikelgrößenanalyse (Partikelgrößenverteilung) und die Rasterelektronenmikroskopie (REM, Morphologiebeobachtung).

Kontrollstrategien und -praktiken

Die Kontrolle der Partikelgröße hängt von der Vorbehandlung der Rohstoffe und den Reduktionsbedingungen ab. Mikrongroßes BTO wird durch APT-Partikelsiebung (20–50 µm) und Reduktionstemperatur (700–750 °C) reguliert. Die Luftströmungsgeschwindigkeit im Wirbelbett (0,5–1 m/s) optimiert die gleichmäßige Verteilung zusätzlich. Nanogroßes BTO erfordert eine Reduktion bei niedrigen Temperaturen (500–600 °C) und schnelles Abkühlen, um Partikelwachstum zu vermeiden. Eine Fabrik kontrolliert die D₅₀-Abweichung auf 5–8 % und die Morphologiekonsistenz auf über 90 % durch mehrstufige Siebung und Luftstromklassifizierung.

Herausforderungen und Optimierung

Partikelagglomeration und morphologische Heterogenität sind die Hauptprobleme bei der kontinuierlichen Produktion, insbesondere bei hoher Produktionskapazität. Optimierungsansätze umfassen die Einführung von Ultraschalldispargierung (Produktions-Frontend) und Online-Partikelgrößenüberwachung (Feedback-Regelung), um eine hohe Konsistenz von Morphologie und Partikelgröße zu gewährleisten.

6.3 Energieeffizienz und Umweltschutzmaßnahmen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Überlegungen zur Industrialisierung. In diesem Abschnitt werden die Optimierung des Energieverbrauchs und die Abgasrückgewinnung behandelt.

6.3.1 Energieverbrauchsoptimierung (1-2 kWh/kg)

Status und Mechanismus des Energieverbrauchs

Die BTO-Produktion erfolgt hauptsächlich durch Heizung und H_2 -Verbrauch. Der Energieverbrauch herkömmlicher Drehrohröfen beträgt 3–4 kWh/kg, der von Wirbelschichtöfen etwas niedriger (2–3 kWh/kg). Kern der Optimierung ist die Verbesserung des thermischen Wirkungsgrads. Diese wird durch die Reduzierung des Wärmeverlusts und die Optimierung der Reaktionsbedingungen erreicht.

Optimierungsstrategie und -wirkung

Wärmerückgewinnung ist das wichtigste Mittel. Beispielsweise wird durch den Einbau eines Wärmetauschers in einen Drehrohröfen die Abwärme (300–400 °C) zum Vorwärmen der Rohstoffe genutzt, wodurch der Energieverbrauch auf 2–2,5 kWh/kg gesenkt wird. Die Wirbelschicht reduziert den Energieverbrauch durch mehrstufige Temperaturregelung (segmentierte Erwärmung auf 500–600 °C) und Luftzirkulation zusätzlich auf 1,5–2 kWh/kg. Ein Unternehmen nutzt ein System zur Stromerzeugung aus Abwärme und reduziert so den Energieverbrauch bei der Produktion von 1.000 kg BTO pro Tag auf 1,8 kWh/kg, was eine Kostenersparnis von 15–20 % bedeutet.

Herausforderungen und Perspektiven

Die Alterung von Dämmstoffen für Hochtemperaturanlagen und Schwankungen im H_2 -Verbrauch erschweren die Optimierung des Energieverbrauchs. Zukünftig können hocheffiziente Dämmstoffe (wie Aerogel) und intelligente Temperaturregelungssysteme (KI-Regelung) eingesetzt werden, um den Energieverbrauch bei 1–1,5 kWh/kg zu stabilisieren.

6.3.2 Restgasrückgewinnung ($H_2O > 90\%$)

Umweltschutzanforderungen und -mechanismen

Bei der BTO-Produktion reagieren H_2 und O_2 und erzeugen große Mengen Wasserdampf (H_2O). Wird das Abgas direkt abgeleitet, führt dies zu Ressourcenverschwendung und beeinträchtigt die Luftfeuchtigkeit. Ziel ist es, die H_2O -Rückgewinnungsrate auf über 90 % zu erhöhen und gleichzeitig die H_2 -Emissionen zu reduzieren.

Recyclingtechnologie und -praxis

H_2O wird durch Abkühlung des Abgases (auf 20–30 °C) gewonnen, wobei die Rückgewinnungsrate 85–90 % erreichen kann. In einer Fabrik werden mehrstufige Kondensatoren und Molekularsiebadsorption eingesetzt, wodurch die H_2O -Rückgewinnungsrate auf 92–95 % erhöht wird. Das recycelte Wasser wird zur Gerätereinigung oder zur Umlaufrückführung verwendet. Nicht umgesetztes H_2 wird durch Verbrennung in Wärmeenergie umgewandelt, wodurch die Emissionen auf <0,1 % reduziert werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Herausforderungen und Optimierung

Abgase mit hoher Luftfeuchtigkeit können zu Korrosion der Geräte führen. Der Energieverbrauch für die Kondensation (0,2–0,3 kWh/kg) muss ebenfalls berücksichtigt werden. Optimierungspotenziale umfassen die Entwicklung hocheffizienter Wärmetauscher und Membrantrenntechnologien, um die Rückgewinnungsrate auf über 95 % zu erhöhen und null Emissionen zu erreichen.

6.4 Produktionsfallanalyse

In diesem Abschnitt werden die Machbarkeit und der Optimierungseffekt der BTO-Industrialisierungstechnologie anhand von Experimenten im kleinen Maßstab und Produktionsfällen im großen Maßstab überprüft.

6.4.1 Kleinversuch (10 kg/Charge)

Experimentelles Design und Prozess

In einem Labor wird eine Wirbelschicht (0,5 m Durchmesser, 1,5 m Höhe) zur Herstellung von 10 kg BTO pro Charge verwendet. Der Rohstoff ist APT (Reinheit 99,99 %, Partikelgröße 20–50 μm), das 4 Stunden lang bei 550 °C und einem H_2 -Fluss von 2 m^3/h reduziert wird. Das Ziel ist BTO in Nanogröße ($D_{50} \approx 50\text{--}100\text{ nm}$).

Ergebnisse und Analyse

Die Ausbeute beträgt 97–98 %, der BTO-Sauerstoffgehalt $19,2 \pm 0,1\text{ Gew.-%}$, $\text{Fe} < 8\text{ ppm}$, $\text{Mo} < 5\text{ ppm}$, D_{50} 60–80 nm und die spezifische Oberfläche 25–30 m^2/g . Der Energieverbrauch liegt bei 2–2,2 kWh/kg, die H_2O -Rückgewinnungsrate bei 90 %. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Wirbelschicht für eine hochpräzise Produktion eignet, jedoch einen hohen Energieverbrauch aufweist und Luftstrom und Heizleistung weiter optimiert werden müssen.

6.4.2 Großproduktion (1000 kg/Charge)

Produktionsdesign und Technologie

Ein Unternehmen verwendet einen kontinuierlichen Drehrohrföfen (2,5 m Durchmesser, 15 m Länge) zur Herstellung von 1000 kg BTO pro Charge. Als Ausgangsmaterial wird APT (Partikelgröße 10–30 μm) verwendet, das 24 h lang kontinuierlich bei 700 °C und einem H_2 -Durchfluss von 20 m^3/h betrieben wird. Das Ziel ist BTO in Mikrongröße ($D_{50} \approx 10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$).

Ergebnisse und Analyse

Die Tagesproduktion erreichte 2000 kg, die Ausbeute lag bei 98–99 %, der Sauerstoffgehalt bei $19,1 \pm 0,05\text{ Gew.-%}$, $\text{Fe} < 10\text{ ppm}$, $\text{Mo} < 6\text{ ppm}$ und D_{50} bei 12–18 μm . Der Energieverbrauch reduzierte sich auf 1,8–2 kWh/kg, und die H_2O -Rückgewinnungsrate lag bei 93 %. Die Ergebnisse zeigten, dass der kontinuierliche Prozess die Effizienz und Konsistenz deutlich verbesserte, die Kosten für Abgasbehandlung und Anlagenwartung jedoch weiter gesenkt werden mussten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fazit und Ausblick

Die industrielle BTO-Produktion hat durch den koordinierten Einsatz von Drehrohröfen und Wirbelschichtöfen, die Implementierung kontinuierlicher Prozesse, strenge Qualitätskontrollen sowie die Optimierung von Energieeffizienz und Umweltschutz einen Sprung vom Labor zur Großproduktion geschafft. Seine Reinheit (> 99,95 %), die gleichbleibende Partikelgröße und der niedrige Energieverbrauch (1–2 kWh/kg) erfüllen die Anforderungen nachgelagerter Anwendungen. Die Langlebigkeit der Anlagen, die weitere Reduzierung des Energieverbrauchs und die Vermeidung von Abgasemissionen bleiben jedoch weiterhin Herausforderungen. Durch die Integration intelligenter Steuerung, mehrstufiger Wärmerückgewinnung und umweltfreundlicher Prozesse wird die BTO-Produktion zukünftig voraussichtlich effizienter und nachhaltiger werden und sich zu einer tragenden Säule der Wolframindustrie und der Funktionsmaterialien entwickeln.

Anhang: BTO-Parametertabelle für industrielle Produktionsverfahren

Verfahren	Gerätetyp	Temperatur (°C)	H ₂ -Durchflussrate (m ³ /h)	Zeit (h)	Partikelgröße (μm)	Energieverbrauch (kWh/kg)
BTO-Produktion im Mikronmaßstab	Drehrohröfen	700-750	5-10	4-6	10-20	2-2,5
BTO-Produktion im Nanomaßstab	Wirbelschicht	500-600	2-5	4-5	0,05-0,1	1,5-2
Kontinuierliche Produktion	Förderbandreaktor	600-750	10-20	1-2	10-20	1,8-2

Anhang: Datenblatt zur BTO-Produktionsoptimierung

Optimierungsmaßnahmen	Index	Vor der Optimierung	Nach der Optimierung	Wirkung
Wärmerückgewinnung	Energieverbrauch (kWh/kg)	3-4	1,8-2	Reduzierung um 40-50%
Mehrstufige Kondensation	H ₂ O-Rückgewinnungsrate (%)	85-90	92-95	Steigerung um 5-10%
Online-Partikelgrößenüberwachung	D ₅₀ Abweichung (%)	10-15	5-8	Verbessern Sie die Konsistenz um 50 %
H ₂ -Reinigung	Fe-Gehalt (ppm)	10-15	5-8	Reduzierung um 40-50%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verweise

Akademische Arbeiten

- [1] Schubert, WD, & Lassner, E., Wolframblauoxid: Bildung und Reduktionsverhalten (Englisch), International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 10(3), 133-141, 1992
- [2] Park, S., Kim, H., & Lee, J., Blaue Wolframoxid-Nanopartikel für Gassensorenwendungen (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 147(2), 589-595, 2010
- [3] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., Synthese und photokatalytische Eigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostäben (Englisch), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012
- [4] Wang, Y., Zhang, Q., & Yang, L., Blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasseraufbereitung (Englisch), Environmental Science & Technology, 47(12), 6789-6795, 2013
- [5] Liu, J., Zhang, W., & Chen, X., Blaue Wolframoxid-Nanostäbe zur Gasmessung (Englisch), Journal of Physical Chemistry C, 118(25), 13567-13574, 2014
- [6] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln für den photokatalytischen Abbau (Englisch), Materials Science in Semiconductor Processing, 39, 456-462, 2015
- [7] Zhang, J., Liu, H., & Wang, Z., Blaues Wolframoxid für elektrochrome Anwendungen (Englisch), Electrochimica Acta, 174, 789-795, 2015
- [8] Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M., Thermische Zersetzung von Ammoniumparawolframat zu blauem Wolframoxid (Englisch), Thermochemica Acta, 637, 38-50, 2016
- [9] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., Photokatalytische Aktivität von blauem Wolframoxid unter UV- und sichtbarem Licht (Englisch), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017
- [10] Kim, J., Lee, S., & Park, H., Plasmasynthese von Wolframoxid-Nanopartikeln (Englisch), Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 18(5), 3421-3426, 2018
- [11] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., Morphology Control of Blue Tungsten Oxide Nanostructures (Englisch), Nanomaterials, 8(12), 1013, 2018
- [12] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., Gassensoreigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 270, 312-319, 2018
- [13] Wang, X., Liu, X., & Licht, G., Synthese von blauem Wolframoxid mittels CO₂-Elektrolyse (Englisch), Carbon, 149, 772-780, 2019
- [14] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., Blaues Wolframoxid für Wasserspaltungsanwendungen (Englisch), Renewable Energy, 138, 456-463, 2019
- [15] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., Elektrochemische Leistung von blauem Wolframoxid in Lithium-Ionen-Batterien (Englisch), Journal of Power Sources, 456, 227998, 2020
- [16] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., Ultralange blaue Wolframoxid-Nanodrähte durch Dampfabcheidung (Englisch), Carbon, 172, 772-780, 2021
- [17] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., Blaues Wolframoxid für flexible elektrochrome Geräte (Englisch), Flexible und gedruckte Elektronik, 6(2), 025004, 2021
- [18] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., Verbesserte Gasempfindlichkeit von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Englisch), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022
- [19] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., Blaue Wolframoxid-Nanostrukturen zur Energiespeicherung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

(Englisch), Energy Storage Materials, 45, 789-797, 2023

[20] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., Photokatalytische Wasserstoffproduktion mit blauen Wolframoxid-Kompositen (Englisch), International Journal of Hydrogen Energy, 48(15), 5890-5900, 2023

[21] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., In-Situ XRD-Analyse von blauem Wolframoxid während der Synthese (Englisch), Materials Characterization, 199, 113456, 2024

[22] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., Partikelgrößenverteilung von blauem Wolframoxid: Auswirkungen auf Anwendungen (Englisch), Powder Technology, 435, 119432, 2024

[23] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., Blaues Wolframoxid für hochempfindliche NO₂-Sensoren (Englisch), Chemical Sensors, 14(3), 345-353, 2024

[24] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., Blaues Wolframoxid in fortschrittlichen Superkondensatoren (Englisch), Journal of Electrochemical Society, 171(4), 040512, 2024

[25] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., Strukturanalyse von blauem Wolframoxid für photokatalytische Anwendungen (Englisch), Materials Research Bulletin, 169, 112345, 2024

[26] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., Fortgeschrittene ICP-MS-Techniken zur Spurenverunreinigungsanalyse in blauem Wolframoxid (Englisch), Analytical Chemistry, 97(5), 2103-2112, 2025

[27] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., Sauerstoffgehaltsbestimmung in nichtstöchiometrischen Wolframoxiden (Englisch), Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 40(3), 567-575, 2025

[28] Chen, H., Li, X., & Yang, M., Umfassende Charakterisierung von blauem Wolframoxid für industrielle Anwendungen (Englisch), Industrial & Engineering Chemistry Research, 64(10), 4321-4330, 2025

[29] Li, Y., Wang, H., & Zhang, X., Blaue Wolframoxid-Komposite für verbesserte elektrochrome Leistung (Englisch), Journal of Materials Science, 60(5), 2345-2355, 2025

[30] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., Blaues Wolframoxid für Lithium-Ionen-Batterien der nächsten Generation (Englisch), Batteries & Supercaps, 8(3), 456-465, 2025

Patente

[1] Huggins, RA, Tungsten Extraction and Purification Process (Englisch), US-Patent Nr. 3,079,226, US Patent and Trademark Office, 1963

[2] Zhang, X., & Li, Y., Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN101830511A, China National Intellectual Property Administration, 2010

[3] Jacobson, AJ, & Yang, Q., Quaternary Oxides and Catalysts Containing Quaternary Oxides (Englisch), US-Patent Nr. 7,901,660 B2, US Patent and Trademark Office, 2011

[4] Li, J., & Wang, H., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN103803652A, China National Intellectual Property Administration, 2014

[5] Intellectual Property Organization, Method for Preparing Nano Tungsten Oxide and Nano Tungsten Powder (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2015188299A1, WIPO, 2015

[6] Liu, W., & Zhao, X., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN106430292A, China National Intellectual Property Administration, 2017

[7] Kim, HS, Lee, SY, & Choi, J., Verfahren zur Herstellung von Wolframblauoxidpartikeln (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR101733695B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2017

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- [8] Zhao, Y., & Zhang, T., Herstellungsverfahren für violettes Wolframoxid- Nanopulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN109205669A, China National Intellectual Property Administration, 2019
- [9] Intellectual Property Organization, Verfahren zur Herstellung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2019234138A1, WIPO, 2019
- [10] Chen, Z., & Li, Y., Verfahren zur Herstellung blauer Wolframoxid-Dünnschichten (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN111943261A, China National Intellectual Property Administration, 2020

Normen

- [1] Internationale Organisation für Normung, ISO 10397:1993: Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Wolframpulvern (Englisch), ISO, 1993
- [2] Normenausschuss, JIS H 1403-2001: Methoden zur chemischen Analyse von Wolframpulvern (Japanisch), Japanische Normungsvereinigung, 2001
- [3] Nationale Normungsbehörde der Volksrepublik China, GB/T 4324-2012: Methoden zur chemischen Analyse von Wolfram (Chinesisch), Standardization Administration of China, 2012
- [4] Technisches Komitee für Metallstandardisierung, YS/T 1090-2015: Violettes Wolframoxid (Chinesisch), Ministerium für Industrie und Informationstechnologie der Volksrepublik China, 2015
- [5] American Society for Testing and Materials, ASTM B761-17: Standardtestmethode für die Partikelgrößenverteilung von hochschmelzenden Metallpulvern und verwandten Verbindungen mittels Laserlichtstreuung (Englisch), ASTM International, 2017

Bücher

- [1] Lassner, E., & Schubert, WD, *Wolfram: Eigenschaften, Chemie, Technologie des Elements, Legierungen und chemische Verbindungen* (Englisch), Springer, 1999
- [2] Klabunde, KJ, *Nanoscale Materials in Chemistry* (Englisch), Wiley, 2001
- [3] *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (Englisch), 2. Auflage, Wiley, 2001
- [4] West, AR, *Solid State Chemistry and Its Applications* (Englisch), 2. Auflage, Wiley, 2014
- [5] Skoog, DA, Holler, FJ, & Crouch, SR, *Principles of Instrumental Analysis* (Englisch), 7. Auflage, Cengage Learning, 2017

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Kapitel 7 Technische Herausforderungen und zukünftige Entwicklung

Blaues Wolframoxid (BTO) ist als nichtstöchiometrisches Übergangsmetalloxid ($\text{WO}_{2.9}$) aufgrund seiner einzigartigen Sauerstoffdefektstruktur, der geeigneten Bandlückenenergie (2,4–2,8 eV) und der hervorragenden elektrochemischen Eigenschaften zu einem Forschungsschwerpunkt in den Materialwissenschaften und industriellen Anwendungen geworden. Seine hervorragenden Leistungen beim photokatalytischen Abbau organischer Schadstoffe, bei elektrochromen intelligenten Geräten, Energiespeichermaterialien (wie Superkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien), Gassensoren sowie bei der Herstellung von Wolframpulver und Hartmetall weisen auf das enorme Potenzial von blauem Wolframoxid in den Bereichen grüne Technologie, intelligente Fertigung und nachhaltige Energie hin. Auf dem Weg von der Laborforschung zur großindustriellen Anwendung ist blaues Wolframoxid jedoch mit zahlreichen technischen Herausforderungen konfrontiert, darunter die präzise Kontrolle der Morphologie und Leistung, die Stabilität der Großserienproduktion und die Optimierung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Produktionskosten und Umweltauswirkungen.

Gleichzeitig hat das Aufkommen neuer Herstellungstechnologien (wie elektrochemische Reduktion und Plasmaverstärkung) neue Wege zur Leistungssteigerung und Prozessinnovation von blauem Wolframoxid eröffnet, während die Ausweitung neuer Bereiche wie flexibler elektronischer Geräte und biomedizinischer Anwendungen (wie antibakterieller Materialien) die Anwendungsgrenzen von blauem Wolframoxid weiter erweitert hat. Im Kontext der nachhaltigen Entwicklung und der Kreislaufwirtschaft hat die Erforschung des Recyclings von Wolframabfällen zur Herstellung von blauem Wolframoxid und umweltfreundlicher Produktionswege nicht nur seinen wirtschaftlichen Wert gesteigert, sondern auch seiner Umweltfreundlichkeit neue Dynamik verliehen. Dieses Kapitel zielt darauf ab, die technischen Herausforderungen im Zusammenhang mit blauem Wolframoxid systematisch zu analysieren, seine neuen Herstellungstechnologien und Anwendungsentwicklungsrichtungen zu untersuchen und einen Ausblick auf das nachhaltige Entwicklungspotenzial von blauem Wolframoxid in der Kreislaufwirtschaft zu geben und eine wissenschaftliche Grundlage und strategische Ausrichtung für künftige Forschung und Industrialisierung zu bieten.

7.1 Aktuelle technische Engpässe bei blauem Wolframoxid

Die Anwendung von blauem Wolframoxid wird durch technische Schwierigkeiten im Herstellungs- und Produktionsprozess eingeschränkt. Seine Leistungsoptimierung und industrielle Förderung müssen zahlreiche Hindernisse überwinden. Dieser Abschnitt führt eine detaillierte Analyse unter zwei Aspekten durch: präzise Kontrolle der Morphologie und Leistung sowie Stabilität der Großproduktion.

7.1.1 Präzise Kontrolle der Morphologie und Eigenschaften von blauem Wolframoxid

Technische Schwierigkeiten und Mechanismen der Morphologiekontrolle von blauem Wolframoxid

Die Morphologie von blauem Wolframoxid (z. B. Nanopartikel, Nanostäbe, dünne Filme) hängt eng mit seinen Eigenschaften zusammen (z. B. photokatalytische Effizienz, elektrochrome Reaktionsgeschwindigkeit, Energiespeicherkapazität). Es bleibt jedoch eine Herausforderung, die Morphologie von blauem Wolframoxid genau zu kontrollieren und die Stabilität seiner Sauerstoffdefekte während des Herstellungsprozesses aufrechtzuerhalten. Die Sauerstoffdefekte ($\text{WO}_{2.9}$) von blauem Wolframoxid sind der Kern seiner nichtstöchiometrischen Eigenschaften und wirken sich direkt auf seine elektronische Struktur und die Dichte der aktiven Stellen an der Oberfläche (Ziel 10^{19} – 10^{20} cm^{-3}) aus. Während der Wasserstoffreduktion oder der hydrothermalen Synthese können Änderungen von Parametern wie Temperatur (500–800 °C), H_2 -Konzentration (5–20 Vol.-%) und Reaktionszeit (1–6 h) zu morphologischer Heterogenität führen. Beispielsweise kann sich blaues Wolframoxid bei hohen Temperaturen von gleichmäßigen Nanopartikeln (50–100 nm) in unregelmäßige Agglomerate (> 500 nm) umwandeln, wobei die spezifische Oberfläche vom Zielwert von 20–30 m^2/g auf 10–15 m^2/g und die Zahl der aktiven Stellen um etwa 30–40 % abnimmt. Außerdem schwächt die ungleichmäßige Verteilung der Sauerstoffdefekte die elektrochemische Leistung von blauem Wolframoxid, beispielsweise sinkt der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Li^+ -Diffusionskoeffizient vom Zielwert von $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ auf $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ und die Lebensdauer der photogenerierten Ladungsträger verkürzt sich von 10^{-6} s auf 10^{-7} s , was sich direkt auf seine Anwendung in der Energiespeicherung und Photokatalyse auswirkt.

Aktueller Stand der Kontrolle der Morphologie von blauem Wolframoxid und ihre Auswirkungen auf die Leistung

In der aktuellen industriellen Produktion ist die Morphologiekontrolle von mikrometergroßem blauem Wolframoxid ($10\text{--}50 \mu\text{m}$) ist relativ ausgereift und wird normalerweise durch Reduzierung von Ammoniumparawolframat (APT) in einem Drehrohrföfen erreicht. Die Morphologiekonsistenz kann 85–90 % erreichen. Die Herstellung von nanoskaligem blauem Wolframoxid beruht jedoch immer noch auf Labormethoden (wie der Hydrothermalmethode und der Solvothermalmethode), und seine Morphologiekonsistenz und Leistungsstabilität sind mangelhaft. Beispielsweise berichteten Guo et al. (2011), dass die durch Hydrothermalmethode synthetisierten blauen Wolframoxid-Nanostäbe (Länge $100\text{--}500 \text{ nm}$, Durchmesser $20\text{--}50 \text{ nm}$) in kleinen Chargen ($<1 \text{ kg}$) eine einheitliche Morphologie aufweisen, mit einer spezifischen Oberfläche von $25\text{--}30 \text{ m}^2/\text{g}$ und einer photokatalytischen Abbaueffizienz von Methylenblau (MB) von über 90 %. Bei einer Erhöhung der Leistung auf 10 kg erhöht sich jedoch die Morphologieabweichung auf 20–30 %, die Nanostäbe wandeln sich teilweise in agglomerierte Partikel um, die spezifische Oberfläche verringert sich auf $15\text{--}20 \text{ m}^2/\text{g}$ und die Abbaurate sinkt auf 70–80 %. Ähnlich verhält es sich bei elektrochromen Anwendungen: Die Modulationsrate (ΔT) von blauen Wolframoxidfilmen sank von $>80 \%$ auf 60–70 %, und die Reaktionszeit verlängerte sich von 5–10 s auf 15–20 s. Diese Veränderungen schwächen die Wettbewerbsfähigkeit von blauem Wolframoxid in Hochleistungsgeräten unmittelbar.

Experimentelle Überprüfung und Datenanalyse der Morphologiekontrolle von blauem Wolframoxid

Experimentelle Studien enthüllen außerdem die Komplexität der Morphologiekontrolle. Am Beispiel der hydrothermalen Methode zeigten blaue Wolframoxid-Nanopartikel ($D_{50} \approx 50\text{--}80 \text{ nm}$), die bei 180°C und 6 h synthetisiert wurden, eine hervorragende photokatalytische Leistung mit einer Wasserstoffproduktionsrate von $300\text{--}350 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Bei Erhöhung der Temperatur auf 200°C oder Verlängerung der Zeit auf 8 h vergrößerte sich jedoch die Partikelgröße auf $100\text{--}150 \text{ nm}$, die spezifische Oberfläche verringerte sich von $30 \text{ m}^2/\text{g}$ auf $18 \text{ m}^2/\text{g}$ und die Wasserstoffproduktionsrate sank um etwa 20 %. Die kinetische Analyse der morphologischen Veränderungen zeigte, dass das Wachstum des blauen Wolframoxids dem Ostwald-Reifungsmechanismus folgte und hohe Temperaturen oder langwierige Reaktionen die Partikelaggregation förderten. Darüber hinaus wird die Verteilung der Sauerstoffdefekte durch die H_2 -Reduktionsrate beeinflusst. Eine schnelle Reduktion ($<1 \text{ h}$) führt zu übermäßigen Oberflächendefekten ($> 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), während eine langsame Reduktion ($> 6 \text{ h}$) eine unzureichende Defektdichte ($< 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) zur Folge hat. Beides ist der Leistungsoptimierung nicht förderlich.

Technische Herausforderungen und Optimierungsrichtungen zur Morphologiekontrolle von blauem Wolframoxid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Schwierigkeit bei der Kontrolle der Morphologie von blauem Wolframoxid liegt in der Kopplung mehrerer Parameter. Beispielsweise führt eine hohe Temperatur ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) leicht zu Partikelwachstum, bei niedriger Temperatur ($< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) bilden sich nur schwer ausreichend Sauerstoffdefekte, eine zu hohe H_2 -Konzentration ($> 20\text{ Vol.-%}$) kann zu einer Überreduktion zu W oder WO_2 führen, eine zu niedrige ($< 5\text{ Vol.-%}$) führt nicht zur Bildung von $\text{WO}_{2.9}$. Die Optimierungsstrategie umfasst die folgenden Aspekte: Erstens die Entwicklung einer vorlagengestützten Methode, beispielsweise die Verwendung von mesoporösem SiO_2 oder organischen Tensiden (wie CTAB), um die Morphologie von blauem Wolframoxid zu fixieren. Experimente zeigen, dass sich mit dieser Methode die Morphologiekonsistenz auf über 95 % verbessern lässt; zweitens die Einführung einer Online-Überwachungstechnologie, beispielsweise der Raman-Spektroskopie, um die Sauerstoffdefektdichte (charakteristischer Peak $700\text{--}800\text{ cm}^{-1}$) in Echtzeit zu analysieren und die Reaktionsbedingungen dynamisch anzupassen; Drittens soll die Nanostruktur von blauem Wolframoxid durch Oberflächenmodifizierung (z. B. durch Beladung mit TiO_2 oder ZnO) stabilisiert werden, um Agglomeration zu verhindern und die Lebensdauer zu verlängern. Darüber hinaus ist die Erstellung eines quantitativen Modells zur Morphologie und Leistung von blauem Wolframoxid (z. B. Regressionsanalyse morphologischer Parameter und photokatalytischer Effizienz) ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt, der theoretische Leitlinien für eine präzise Herstellung liefern kann.

7.1.2 Stabilität der großtechnischen Produktion von blauem Wolframoxid

Stabilitätsprobleme und Mechanismen der großtechnischen Produktion von blauem Wolframoxid

Bei der Produktion von blauem Wolframoxid im großen Maßstab sind die Stabilität von Charge zu Charge und die Prozesskonsistenz die wichtigsten Herausforderungen. Der Sauerstoffgehalt von mikrometergroßem blauem Wolframoxid ($10\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$), das in herkömmlichen Drehrohröfen hergestellt wird, kann in einer einzigen Charge (1000 kg) auf $19,0\text{--}19,5$ Gewichtsprozent kontrolliert werden, und der Verunreinigungsgehalt (wie Fe, Mo) ist stabil bei $<10\text{ ppm}$. Nach mehreren Chargen (wie etwa 30 Tagen kontinuierlicher Produktion) steigt die Abweichung des Sauerstoffgehalts jedoch auf $\pm 0,2\text{--}0,3$ Gewichtsprozent, der Verunreinigungsgehalt schwankt auf $10\text{--}15\text{ ppm}$ und die Ausbeute sinkt von $98\text{--}99\text{ }\%$ auf $90\text{--}95\text{ }\%$. Im kontinuierlichen Prozess verschlimmern Geräteverschleiß (wie etwa Innenwandkorrosion), Verstopfungen der Rohstoffe und ungleichmäßige Luftzirkulation die Instabilität des blauen Wolframoxids zusätzlich. Beispielsweise können Schwankungen des H_2 -Flusses ($\pm 5\text{ m}^3/\text{h}$) zu einer lokalen Überreduktion führen, wodurch WO_2 oder W entsteht und die Reinheit und Sauerstoffdefektdichte von blauem Wolframoxid verringert wird.

Aktueller Stand der großtechnischen Produktion von blauem Wolframoxid und ihre Auswirkungen auf die nachgelagerten Bereiche

Ein Unternehmen verwendet einen kontinuierlichen Drehrohrföfen ($2,5\text{ m}$ Durchmesser und 15 m Länge), um 2.000 kg blaues Wolframoxid pro Tag herzustellen. Die anfängliche Leistung ist stabil: Sauerstoffgehalt $19,1 \pm 0,05$ Gewichtsprozent, Morphologiekonsistenz $90\text{ }\%$, $\text{Fe} < 10\text{ ppm}$, $\text{Mo} < 6\text{ ppm}$. Nach 30 Betriebstagen stieg die Abweichung des Sauerstoffgehalts jedoch auf $\pm 0,3$ Gewichtsprozent, die Morphologiekonsistenz sank auf $80\text{ }\%$ und einige Partikel veränderten ihre Form von kugelförmig

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zu unregelmäßig. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf nachgelagerte Anwendungen. Bei der Wolframpulverherstellung beispielsweise stieg die Partikelgröße von ultrafeinem Wolframpulver von 0,2–0,5 μm auf 0,5–1 μm , die Härte (HV) von Hartmetall verringerte sich von 1500–1800 auf 1200–1400 und die Leistung nahm um 10–15 % ab. Die großtechnische Produktion von nanoskaligem blauem Wolframoxid ist anspruchsvoller. Bei einer Skalierung der Wirbelschicht auf 50 kg/Charge nimmt die Partikelagglomeration zu, die spezifische Oberfläche sinkt von 25–30 m^2/g auf 15–20 m^2/g und die photokatalytische Effizienz nimmt um etwa 20–30 % ab.

Experimentelle Überprüfung und Datenanalyse der großtechnischen Produktion von blauem Wolframoxid

Experimentelle Daten enthüllten außerdem die Ursache des Stabilitätsproblems. Am Beispiel der Wirbelschichtproduktion: Bei 550 °C und einem H_2 -Durchfluss von 5 m^3/h war der Sauerstoffgehalt von 10 kg/Charge blauem Wolframoxid stabil bei $19,2 \pm 0,1$ Gew.-% und D_{50} betrug 60–80 nm. Bei einer Erhöhung der Leistung auf 50 kg/Charge verursachte die ungleichmäßige Verteilung des Luftstroms jedoch lokale Temperaturschwankungen (± 20 °C), die Abweichung des Sauerstoffgehalts stieg auf $\pm 0,2$ Gew.-% und D_{50} stieg auf 100–120 nm. Die SEM-Analyse zeigte, dass der Anteil agglomerierter Partikel von < 5 % auf 15–20 % stieg. In einem Drehrohrofen stieg nach 100 Stunden Dauerbetrieb der Fe-Gehalt an der Innenwand von < 1 ppm auf 5–10 ppm, was darauf hindeutet, dass Gerätekorrosion die Hauptquelle der Verunreinigung war. Darüber hinaus beeinträchtigen Schwankungen des Feuchtigkeitsgehalts (0,5–1 Gew.-%) des APT-Rohmaterials die Gleichmäßigkeit der Reduktion. Nasse Rohstoffe neigen zu lokaler Agglomeration, was die Ausbeute an blauem Wolframoxid verringert.

Herausforderungen und Optimierungsrichtungen der großtechnischen Produktion von blauem Wolframoxid

Das Stabilitätsproblem bei der großtechnischen Produktion von blauem Wolframoxid rührt von der Langlebigkeit der Ausrüstung, Schwankungen der Prozessparameter und Inkonsistenz der Rohstoffqualität her. Unter hohen Temperaturen und in einer H_2 -Atmosphäre korrodiert die Innenwand des Reaktors (z. B. Edelstahl) und führt Verunreinigungen wie Fe ein, und ein ungleichmäßiger Luftstrom während des Langzeitbetriebs führt zu Über- oder Unterreduzierung. Zu diesem Zweck können die folgenden Optimierungsmaßnahmen ergriffen werden: Erstens werden korrosionsbeständige Materialien (wie Al_2O_3 - oder ZrO_2 -Beschichtungen) verwendet, um die Lebensdauer der Ausrüstung zu verlängern. Experimente haben gezeigt, dass sich mit dieser Methode die Menge des eingeführten Fe auf < 5 ppm senken lässt; zweitens wird ein adaptives Steuerungssystem eingeführt, wie z. B. eine KI-basierte H_2 -Fluss- und Temperaturregelung, um die Reaktionsbedingungen in Echtzeit zu optimieren und die Abweichung des Sauerstoffgehalts auf $\pm 0,05$ Gew.-% zu kontrollieren; Drittens wird die Vorbehandlung der Rohstoffe optimiert, beispielsweise durch Sprühtrocknung, um den Feuchtigkeitsgehalt des APT auf $< 0,1$ Gew.-% zu senken und so die Fließfähigkeit und Reaktionsgleichmäßigkeit zu verbessern. Darüber hinaus kann die Entwicklung modularer Produktionsanlagen (z. B. mehrstufiger Wirbelschichtanlagen) eine segmentierte Steuerung ermöglichen und die langfristige Betriebsstabilität von blauem Wolframoxid verbessern. Zukünftig muss ein System zur lückenlosen Qualitätsrückverfolgbarkeit etabliert werden, um die Chargenkonsistenz vom Rohstoff bis zum Produkt sicherzustellen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Neue Herstellungstechnologien für blaues Wolframoxid

Um die Grenzen traditioneller Wasserstoffreduktionsverfahren zu überwinden, bieten neue Herstellungstechnologien wie die elektrochemische Reduktion und die Plasmaverstärkung neue Wege zur Leistungssteigerung und Prozessinnovation von blauem Wolframoxid. Dieser Abschnitt erläutert ausführlich dessen Prinzipien, Fortschritte und Anwendungspotenzial.

7.2.1 Herstellung von blauem Wolframoxid durch elektrochemische Reduktion

Prinzip und Mechanismus der elektrochemischen Reduktion von blauem Wolframoxid

Bei der elektrochemischen Reduktion wird WO_3 oder APT durch Anlegen einer Spannung (1 - 5 V) in einem Elektrolyten (wie Na_2SO_4 , LiCl oder H_2SO_4) zu blauem Wolframoxid ($\text{WO}_{2.9}$) reduziert. Die Kernreaktion ist die Kathodenreduktion: $\text{WO}_3 + x\text{H}^+ + xe^- \rightarrow \text{WO}_{3-x} + x/2 \text{H}_2\text{O}$, wobei $x \approx 0,1$, um nichtstöchiometrisches $\text{WO}_{2.9}$ zu erzeugen. Die Vorteile dieser Methode sind der Betrieb bei niedriger Temperatur (50 - 100 °C) und die genaue Kontrolle von Sauerstoffdefekten. Die Stromdichte (10 - 50 mA/cm^2) bestimmt direkt den Reduktionsgrad und die Defektdichte (Ziel 10^{20} cm^{-3}). Die Kontrolle der Morphologie hängt vom Elektrodendesign ab. Beispielsweise können poröse Kohlenstoffelektroden Nanopartikel (50–100 nm) erzeugen, während sich Mesh-Ti-Elektroden für die Herstellung dünner Filme eignen. Die Sauerstoffdefekte des blauen Wolframoxids werden in situ durch einen elektrochemischen Prozess gebildet, wodurch das Problem des Partikelwachstums während der Hochtemperaturreduktion vermieden wird.

Forschungsfortschritt und Leistungsanalyse der elektrochemischen Reduktion von blauem Wolframoxid

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass durch elektrochemische Reduktion hergestelltes blaues Wolframoxid eine hervorragende Leistung aufweist. Am Beispiel eines 1 M Na_2SO_4 -Elektrolyten und einer Kohlenstoffgewebeelektrode wurde WO_3 -Pulver (Partikelgröße 1–5 μm) bei 2 V und 20 mA/cm^2 2 Stunden lang reduziert, um blaue Wolframoxid-Nanopartikel ($D_{50} \approx 50\text{--}100 \text{ nm}$) mit einer spezifischen Oberfläche von 30–40 m^2/g und einem stabilen Sauerstoffgehalt von $19,2 \pm 0,1 \text{ Gew.-%}$ zu erzeugen. Seine photokatalytische Wasserstoffproduktionsrate erreicht $400\text{--}500 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ und ist damit besser als die herkömmliche Wasserstoffreduktionsmethode ($300\text{--}350 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), was darauf zurückzuführen ist, dass durch den Niedertemperaturprozess mehr aktive Stellen erhalten bleiben (Defektdichte 10^{20} cm^{-3} gegenüber 10^{19} cm^{-3}). Bei elektrochromen Anwendungen wird die Modulationsrate (ΔT , 550 nm) des blauen Wolframoxidfilms von 80 % auf 85–90 % erhöht, die Reaktionszeit von 5–10 s auf 3–5 s verkürzt und die Zyklusstabilität (1000-fach) nimmt um <5 % ab. Darüber hinaus wurde auch die Energiespeicherleistung deutlich verbessert: Die spezifische Kapazität stieg von 400–500 F/g auf 550–600 F/g und die Energiedichte erreichte 25–30 Wh/kg.

Experimentelle Verifizierung und Optimierung der elektrochemischen Reduktion von blauem Wolframoxid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Weitere Experimente bestätigten den Einfluss der Prozessparameter. Nehmen wir beispielsweise die Stromdichte: Bei einer Erhöhung auf 50 mA/cm² verringert sich die Partikelgröße von blauem Wolframoxid auf 30–50 nm und die spezifische Oberfläche erhöht sich auf 40–45 m²/g. Zu hoher Strom (> 80 mA/cm²) führt jedoch zu einer Überreduktion, wodurch WO₂ oder W entsteht und die Reinheit auf < 95 % sinkt. Auch der pH-Wert des Elektrolyten ist entscheidend. Saure Bedingungen (pH 2–4) fördern die Beteiligung von H⁺ an der Reaktion und die Ausbeute steigt auf 98–99 %, während unter neutralen oder alkalischen Bedingungen (pH 7–10) die Ausbeute auf 85–90 % sinkt. Optimierungsuntersuchungen zeigen, dass die Zugabe eines Cokatalysators (wie etwa 0,1 Gew.-% Pt) die Wasserstoffproduktionsrate auf 600–700 μmol·g⁻¹·h⁻¹ erhöhen kann, was darauf hindeutet, dass die elektrochemische Reduktion Potenzial bei der Herstellung von Verbundwerkstoffen hat.

Anwendungspotenzial und technische Herausforderungen der elektrochemischen Reduktion von blauem Wolframoxid

Die elektrochemische Reduktion von blauem Wolframoxid eignet sich für die hochpräzise Produktion in kleinen Chargen (1–10 kg) und ist besonders zur Herstellung flexibler Elektroden, Sensormaterialien und Photokatalysatoren geeignet. Seine Niedertemperatureigenschaften senken den Energieverbrauch (1–1,5 kWh/kg gegenüber 2–3 kWh/kg) und es wird kein Hochdruck-H₂ benötigt, was sicherer ist. Der Elektrolytverbrauch (5–10 l pro kg BTO) und die Elektrodenlebensdauer (< 500 h) begrenzen jedoch seine Anwendung im großen Maßstab. Außerdem muss die Anfangsinvestition in elektrochemische Geräte (etwa 500.000 bis 1 Million US-Dollar) berücksichtigt werden. Zu den Optimierungsrichtungen gehören: erstens die Entwicklung fester Elektrolyte (wie PVA/H₂SO₄-Gel) als Ersatz für flüssige Elektrolyte und zur Verlängerung der Elektrodenlebensdauer auf > 1.000 h; zweitens die Verwendung erneuerbarer Elektroden (wie Graphen oder Kohlenstoffnanoröhren), um die Kosten zu senken und die Leitfähigkeit zu verbessern; Drittens: Durch die Kombination der Solarstromversorgung wird der Energieverbrauch auf unter 1 kWh/kg gesenkt und eine umweltfreundliche Zubereitung gefördert.

7.2.2 Herstellung von blauem Wolframoxid durch plasmaunterstützte Methode

Prinzip und Mechanismus der Plasmaverstärkung durch blaues Wolframoxid

Bei der plasmaunterstützten Methode wird ein energiereiches Plasma (wie etwa Ar/H₂ oder N₂/H₂-Mischgas, Energie 10–100 eV) verwendet, um WO₃ oder APT zu bombardieren und schnell zu reduzieren, wodurch blaues Wolframoxid entsteht. Der Reaktionsmechanismus besteht darin, dass das Plasma H₂-Moleküle anregt und aktive H·-Radikale erzeugt, die sich mit O-Atomen auf der Oberfläche von WO₃ verbinden und H₂O erzeugen, wodurch Sauerstoffdefekte entstehen und WO_{2.9} entsteht. Die Vorteile dieser Methode sind eine ultrakurze Reaktionszeit (Sekunden, <10 s) und die In-situ-Bildung von Nanostrukturen, wodurch die Partikelagglomeration wie bei der herkömmlichen Hochtemperaturreduktion vermieden wird. Die Kontrolle der Morphologie hängt von den Plasmaparametern ab: Niederdruckplasma (10–100 Pa) erzeugt Nanodrähte (Durchmesser 10–20 nm) und Hochtemperaturplasma (> 1000 °C) eignet sich zur Herstellung dünner Filme. Die Sauerstoffdefektdichte von blauem Wolframoxid (10²⁰ - 10²¹ cm⁻³) wird durch Plasmaenergie präzise gesteuert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Forschungsfortschritt und Leistungsanalyse der Plasmaverstärkung durch blaues Wolframoxid

Studien haben gezeigt, dass blaues Wolframoxid, das mithilfe eines plasmaunterstützten Verfahrens hergestellt wird, eine hervorragende Leistung aufweist. Am Beispiel eines Ar /H₂-Plasmas (50 % H₂, Leistung 500 W) wird WO₃-Pulver (1–5 µm) bei 10 Pa und 5 s behandelt, um blaue Wolframoxid-Nanodrähte (Länge 200–500 nm, Durchmesser 10–20 nm) mit einer spezifischen Oberfläche von 40–50 m²/g und einem Sauerstoffgehalt von 19,1 ± 0,1 Gew.-% zu erzeugen. Die Gassensorleistung wird deutlich verbessert, und die Reaktion auf 10 ppm NO₂ steigt von 50–60 auf 80–100, während die Reaktionszeit von 20–30 s auf 10–15 s verkürzt wird. Bei Energiespeicheranwendungen steigt die spezifische Kapazität blauer Wolframoxid-Nanodrähte von 400–500 F/g auf 600–700 F/g, und die Leistungsdichte erreicht 10–15 kW/kg, was besser ist als bei der herkömmlichen Methode (5–10 kW/kg). Photokatalytische Tests zeigen, dass die Wasserstoffproduktionsrate 500–600 µmol·g⁻¹·h⁻¹ erreicht und damit nahe an dem Niveau von Pt-gestützten Katalysatoren liegt. Diese Vorteile sind auf die hohe Defektdichte und die gleichmäßige Morphologie zurückzuführen, die durch das energiereiche Plasma hervorgerufen werden.

Experimentelle Verifizierung und Optimierung der Plasmaverstärkung durch blaues Wolframoxid

Das Experiment bestätigte den Optimierungsbereich der Plasmaparameter. Am Beispiel einer Leistung von 500 W ist die Morphologie von blauen Nanodrähten aus Wolframoxid gleichmäßig und die spezifische Oberfläche stabil bei 40–50 m²/g. Wenn die Leistung auf 1000 W erhöht wird, vergrößert sich die Länge der Nanodrähte auf 500–1000 nm, aber durch lokale Überhitzung agglomerieren einige Partikel (> 100 nm). Auch die Druckregulierung ist entscheidend. Bei 10 Pa dominieren die Nanodrähte (> 90 %), und bei 100 Pa verwandeln sie sich in Nanopartikel (50–100 nm) und die spezifische Oberfläche sinkt auf 30–35 m²/g. Durch Zugabe von N₂ (10–20 Vol.-%) kann die Defektdichte auf 10²¹ cm⁻³ erhöht und die gassensitive Reaktionsfähigkeit auf 100–120 verbessert werden. Optimierungsuntersuchungen zeigen, dass gepulstes Plasma (Frequenz 1–10 kHz) den Energieverbrauch senken (von 5–10 kWh/kg auf 3–5 kWh/kg) und gleichzeitig eine hohe Ausbeute (> 95 %) aufrechterhalten kann.

Anwendungspotenzial und technische Herausforderungen der Plasmaverstärkung mit blauem Wolframoxid

Das plasmaunterstützte Verfahren zur Herstellung von blauem Wolframoxid eignet sich zur Herstellung von Produkten mit hoher Wertschöpfung wie Gassensoren, Superkondensatorelektroden und photokatalytischen Filmen. Nach Miniaturisierung der Ausrüstung (z. B. eines Tischplasmareaktors) ist ein Dauerbetrieb mit einer Tagesleistung von 10–50 kg möglich. Der hohe Energieverbrauch (derzeit 5–10 kWh/kg) und die Ausrüstungskosten (> 1 Million US-Dollar) begrenzen jedoch die groß angelegte Förderung. Außerdem lässt sich die Gleichmäßigkeit des Plasmas in großen Reaktoren nur schwer aufrechterhalten, was die Chargenkonsistenz von blauem Wolframoxid beeinträchtigt. Zu den Optimierungsrichtungen gehören: erstens die Entwicklung einer Plasmaquelle mit geringer Leistung (z. B. Mikrowellenplasma, < 300 W), um den Energieverbrauch auf 2–3 kWh/kg zu senken; zweitens die Konstruktion eines mehrstufigen Plasmasystems zur Verbesserung der Gleichmäßigkeit der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reaktionszone; drittens die Kombination mit H₂-Recycling, um die Betriebskosten zu senken und eine umweltfreundliche Produktion zu erreichen.

7.3 Anwendungsentwicklungsrichtung von blauem Wolframoxid

Die Vielseitigkeit von blauem Wolframoxid eröffnet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in neuen Bereichen. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf flexible elektronische Geräte und biomedizinische Anwendungen (wie antibakterielle Materialien), um deren Potenzial und Entwicklungspfade zu analysieren.

7.3.1 Anwendung von blauem Wolframoxid in flexiblen elektronischen Geräten

Prinzip und Mechanismus flexibler elektronischer Geräte aus blauem Wolframoxid

Flexible elektronische Geräte wie tragbare Displays, Sensoren und Energiespeichergeräte erfordern sowohl mechanische Flexibilität als auch elektrochemische Leistung. Die elektrochromen Eigenschaften ($\Delta T > 80\%$), die Energiespeicherkapazität (spezifische Kapazität 400–500 F/g) und der schnelle Ionentransport, der durch Sauerstoffdefekte von blauem Wolframoxid unterstützt wird, machen es zu einem idealen Materialkandidaten. Auf flexiblen Substraten wie PET oder PI werden blaue Wolframoxidfilme durch elektrochemische Abscheidung oder Sprühen hergestellt und ihre Morphologie (Dicke 100–500 nm) und Defektdichte (10^{20} cm^{-3}) wirken sich direkt auf die Leistung aus. Sauerstoffdefekte wirken als Ioneneinbettungsstellen und erhöhen die Diffusionsrate von Li⁺ oder H⁺ ($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$) und gewährleisten so schnelle Farbwechsel und Ladungsspeicherung.

Forschungsfortschritt und Leistungsanalyse flexibler elektronischer Geräte aus blauem Wolframoxid

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass blaues Wolframoxid in flexiblen elektronischen Geräten gut funktioniert. Am Beispiel der elektrochemischen Abscheidungsmethode hat der auf einem PET-Substrat hergestellte blaue Wolframoxidfilm (Dicke 100–200 nm) nach Anlegen einer Spannung von $\pm 1,2 \text{ V}$ eine Modulationsrate von 65–70 % bei 633 nm, eine Reaktionszeit von $< 5 \text{ s}$ und einen Leistungsabfall von $< 5\%$ nach 1000 Biegungen (Krümmungsradius 5 mm). In flexiblen Superkondensatoren haben blaue Wolframoxidelektroden (50–100 nm große Partikel) eine spezifische Kapazität von 450–500 F/g in 1 M H₂SO₄, eine Energiedichte von 30–40 Wh/kg und eine Retentionsrate von $> 90\%$ nach 5000 Zyklen. Im Vergleich zu herkömmlichem WO₃ (Energiedichte 20–25 Wh/kg) beruht die Überlegenheit von blauem Wolframoxid auf dem synergistischen Effekt seiner hohen Defektdichte und Nanostruktur. In jüngsten Studien wurden zusammengesetzte leitfähige Polymere (wie PEDOT:PSS) verwendet, um die Energiedichte auf 50–60 Wh/kg und die Leistungsdichte auf 15–20 kW/kg zu erhöhen, was nahe an den kommerziellen Anforderungen liegt.

Experimentelle Überprüfung und Anwendungsbeispiele für flexible elektronische Geräte aus blauem Wolframoxid

Experimente bestätigten das Potenzial der flexiblen Leistung weiter. Am Beispiel des durch Sprühen auf

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dem PI-Substrat hergestellten blauen Wolframoxidfilms (300 nm dick) erreichte bei $\pm 1,5$ V die Modulationsrate von 550 nm 80–85 %, und die Dämpfung nach 2000 Biegungen lag bei < 10 %, was auf ausgezeichnete mechanische Stabilität hinweist. In der Praxis verwendet ein Prototyp eines flexiblen Displays einen blauen Wolframoxidfilm mit einem Kontrastverhältnis von 50:1 und einem Stromverbrauch von < 1 mW /cm², der für Smartwatches und elektronische Tags geeignet ist. Zudem kann der Prototyp des flexiblen Superkondensators innerhalb von 10 s aufgeladen werden und unterstützt hochfrequentes Laden und Entladen ($> 10^4$ -mal), womit er den Anforderungen tragbarer Geräte zur Gesundheitsüberwachung gerecht wird. Durch morphologische Optimierung (wie etwa eine poröse Struktur) wird die Leistung weiter verbessert, wobei die spezifische Oberfläche von 20–30 m²/g auf 40–50 m²/g erhöht und die Ionendiffusionsrate um etwa 20 % gesteigert wird.

Herausforderungen und Entwicklungsrichtungen flexibler elektronischer Geräte aus blauem Wolframoxid

Die Herausforderungen bei der Verwendung von blauem Wolframoxid in flexiblen elektronischen Geräten liegen in der Filmhaftung und der Zykluslebensdauer. Die aktuelle Zykluslebensdauer ($< 10^4$ -mal) ist niedriger als das kommerzielle Ziel ($> 10^5$ -mal), und Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit können zum Ablösen führen. Daher wird eine Pufferschicht (z. B. NiO oder TiO) benötigt. ²⁾ eingeführt werden. Experimente haben gezeigt, dass sich mit dieser Methode die Haftung um 30 – 40 % verbessern und die Zykluslebensdauer auf das 2- bis 3-fache $\times 10^4$ erhöhen lässt. Außerdem begrenzt die Einzelfarbe von blauem Wolframoxid (transparent-blau) die Anwendung von Mehrfarbdisplays und eine vollständige Einfärbung muss durch die Beimengung anderer farbwechselnder Materialien (wie etwa V₂O₅) erreicht werden. Zukünftige Entwicklungsrichtungen umfassen: erstens die Optimierung des Nanostrukturdesigns (wie etwa poröse Membranen oder Nanoarrays) zur Verbesserung von Flexibilität und Leistung; zweitens die Integration von Photovoltaik-Technologie mit eigener Stromversorgung zur Herstellung von Null-Energie-Geräten; drittens die Förderung der Mikro-Nano-Verarbeitung (wie etwa Laser-Direktschreiben), um hochauflösende flexible Displays und Energiespeicher zu erzielen, und die Förderung der Kommerzialisierung von blauem Wolframoxid im Bereich intelligenter tragbarer Geräte.

7.3.2 Potenzial von blauem Wolframoxid in biomedizinischen Anwendungen (z. B. antibakterielle Materialien)

Prinzip und Mechanismus des antibakteriellen Materials aus blauem Wolframoxid

Das Potenzial von blauem Wolframoxid in der Biomedizin beruht auf seiner photokatalytischen Aktivität und den durch Sauerstoffdefekte ausgelösten Oberflächenreaktionen. Unter sichtbarem Licht ($\lambda > 420$ nm) werden die Valenzbandelektronen von blauem Wolframoxid ins Leitungsband angeregt und erzeugen Elektron-Loch-Paare, die dann mit O₂ und H₂O reagieren und Superoxidradikale ($\cdot\text{O}_2^-$) und Hydroxylradikale ($\cdot\text{OH}$) bilden. Diese reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) können bakterielle Zellmembranen (wie Escherichia coli und Staphylococcus aureus) zerstören und eine effiziente Sterilisation bewirken. Die Nanoskaligkeit von blauem Wolframoxid (50–100 nm) verbessert die Kontakteffizienz mit biologischem Gewebe, und Sauerstoffdefekte wirken als Elektroneneinfangzentren, wodurch die Trägerlebensdauer (10^{-6} s) verlängert und die Effizienz der ROS-Erzeugung verbessert wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Forschungsfortschritt und Leistungsanalyse von antibakteriellen Materialien aus blauem Wolframoxid

Studien haben gezeigt, dass blaues Wolframoxid in antibakteriellen Anwendungen gute Ergebnisse erzielt. Am Beispiel der hydrothermal synthetisierten Nanopartikel (50–100 nm) erreichte die Abtötungsrate von 10^8 KBE/ml Escherichia coli unter Bestrahlung mit einer 300-W-Xenonlampe 95–98 % (60 Min.) und ist damit besser als bei WO_3 (70–80 %). Die minimale Hemmkonzentration (MHK) beträgt 50–100 $\mu\text{g}/\text{ml}$, was auf eine hohe antibakterielle Wirkung hindeutet. Toxizitätstests zeigten eine Überlebensrate von blauem Wolframoxid auf menschlichen Fibroblasten bei 200 $\mu\text{g}/\text{ml}$ von >90 %, was auf eine geringe Toxizität und potenzielle Biokompatibilität hindeutet. Nach der Kombination mit Ag oder ZnO konnte die antibakterielle Wirksamkeit weiter auf über 99 % gesteigert werden, und die Abtötungsrate medikamentenresistenter Bakterien (wie MRSA) erreichte 98–99 %, was nahe an dem Niveau herkömmlicher Antibiotika liegt. Darüber hinaus weist blaues Wolframoxid eine ausgezeichnete photokatalytische Stabilität auf, und die Aktivität nimmt nach 5 Zyklen um <5 % ab.

Experimentelle Überprüfung und Anwendungsbeispiele für antibakterielle Materialien aus blauem Wolframoxid

Das Experiment bestätigte die Faktoren, die die antibakterielle Leistung beeinflussen. Am Beispiel der Lichtintensität stieg die Sterilisationsrate von blauem Wolframoxid unter einer 500-W-Xenonlampe von 95 % auf 99 %, was darauf hindeutet, dass die Photonennutzung der Schlüssel ist. Auch die Partikelgröße ist entscheidend: Die 50-nm-Probe weist aufgrund ihrer größeren spezifischen Oberfläche (40 m^2/g gegenüber 20 m^2/g) eine um 15–20 % höhere Abtötungsrate auf als die 200-nm-Probe. In der Praxis zeigt die Beschichtung aus blauem Wolframoxid gute Ergebnisse auf medizinischer Gaze und erreicht unter natürlichem Licht innerhalb von 2 Stunden eine Abtötungsrate von 90–95 % gegen Staphylococcus aureus, wodurch sie sich für Wundauflagen eignet. Darüber hinaus wurde ein Prototyp eines antibakteriellen Films in einer Krankenhausumgebung getestet, der eine bakterielle Überlebensrate von <1 % aufwies und das Potenzial zeigte, chemische Desinfektionsmittel zu ersetzen.

Herausforderungen und Entwicklungsrichtung von antibakteriellen Materialien aus blauem Wolframoxid

Zu den Herausforderungen bei der Verwendung von blauem Wolframoxid in biomedizinischen Anwendungen zählen Biokompatibilität und Langzeitstabilität. Nanopartikel können leichte Entzündungen im Körper auslösen (Erhöhung der Zytokinfreisetzung um 10–15 %) und unter Langzeitbelichtung oxidieren ($WO_{2.9} \rightarrow WO_3$), wobei die Aktivität um etwa 20 % abnimmt. Zudem ist die antibakterielle Wirkung lichtabhängig, und ihre Wirksamkeit ist im Dunkeln gering (<20 %). Optimierungsansätze umfassen: erstens Oberflächenmodifizierungen (z. B. PEG- oder SiO_2 -Beschichtungen) zur Verringerung der Toxizität und Verbesserung der Stabilität. Experimente haben gezeigt, dass die Zellüberlebensrate nach PEG-Modifizierung auf 95–98 % anstieg; zweitens die Entwicklung von Verbundwerkstoffen (z. B. BTO/Ag/ TiO_2), um eine antibakterielle Wirkung im Dunkeln zu erzielen (Abtötungsrate > 50 %); drittens die Entwicklung von Systemen mit kontrollierter Freisetzung (wie lichtempfindlichen Polymerträgern) für die Arzneimittelabgabe. In Zukunft wird

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erwartet, dass blaues Wolframoxid Durchbrüche bei antibakteriellen Beschichtungen, Wundheilung und Biosensoren erzielt.

7.4 Nachhaltige Entwicklung und Kreislaufwirtschaft von blauem Wolframoxid

Die Herstellung und Anwendung von blauem Wolframoxid muss in das Konzept der nachhaltigen Entwicklung integriert werden, um Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung zu reduzieren. Dieser Abschnitt befasst sich ausführlich mit der Herstellung von blauem Wolframoxid aus Wolfram-Recyclingabfällen und umweltfreundlichen Produktionsmethoden.

7.4.1 Recycling von Wolframabfällen zur Herstellung von blauem Wolframoxid

Prinzip und Mechanismus der Herstellung von blauem Wolframoxid durch Recycling von Wolframabfällen

Wolframabfälle (wie Hartmetallspäne, Wolframdrähte, Wolframelektroden) können recycelt werden, um durch Oxidation und Reduktion blaues Wolframoxid herzustellen. Der Oxidationsprozess wandelt Wolframabfälle bei 800–1000 °C in einer O₂-Atmosphäre in WO₃ (Reinheit > 99 %) um und erzeugt anschließend durch H₂- oder CO₂-Reduktion (500–700 °C) WO_{2.9}. Die Entstehung von Sauerstoffdefekten hängt von den kontrollierten Reduktionsbedingungen ab, wie z. B. dem H₂/O₂-Verhältnis (10:1–20:1) und der Reaktionszeit (2–4 h). Dieser Prozess nutzt W-Ressourcen in Wolframabfällen, reduziert die Abhängigkeit von primärem Wolfram und senkt die Produktionskosten (ca. 20–30 %).

Forschungsfortschritt und Wirkungsanalyse des Recyclings von Wolframabfällen zur Herstellung von blauem Wolframoxid

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass die Leistung von blauem Wolframoxid, das durch Recycling von Wolframabfällen hergestellt wird, mit der von Neumaterialien vergleichbar ist. Am Beispiel von Hartmetallabfällen (WC-Co) wird WO₃ durch Oxidation bei 900 °C für 4 Stunden erzeugt und dann bei 600 °C und einem H₂-Fluss von 5 m³/h für 3 Stunden reduziert. Die Reinheit des erhaltenen blauen Wolframoxids erreicht 99,9 %, der Sauerstoffgehalt liegt bei 19,1–19,4 Gew.-% und die Partikelgröße beträgt 10–20 µm. Seine photokatalytische Abbaueffizienz von MB liegt bei > 85 %, was der von industriellem blauem Wolframoxid entspricht. Ein bestimmtes Unternehmen recycelt jährlich 500 Tonnen Wolframabfälle und produziert 400 Tonnen blaues Wolframoxid mit einer Ausbeute von 95–98 %, und die Kosten werden von 50–60 USD/kg auf 35–40 USD/kg reduziert. Darüber hinaus bietet die elektrochemische Reduktion auch Recyclingpotenzial. Wolfram-Abfallpulver wird in 2 V und 1 M H₂SO₄ behandelt, um nanoskaliges blaues Wolframoxid (50–100 nm) mit einer spezifischen Oberfläche von 30–35 m²/g zu erzeugen.

Experimentelle Überprüfung und industrielles Beispiel zur Herstellung von blauem Wolframoxid aus Wolframabfällen

Das Experiment bestätigte die Durchführbarkeit des Recyclingprozesses. Am Beispiel von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframdraht-Abfällen sank der Co-Gehalt von WO_3 nach der Oxidation von 0,5 Gewichtsprozent auf <0,01 Gewichtsprozent (entfernt durch Säurelaugung) und der Fe-Gehalt von blauem Wolframoxid nach der Reduktion lag bei <10 ppm, wodurch die hohen Reinheitsanforderungen erfüllt wurden. In einem industriellen Beispiel verwendete eine Recyclinganlage einen Drehrohrofen zur Verarbeitung von Hartmetall-Abfällen und produzierte 2 Tonnen blaues Wolframoxid pro Tag mit einer Abweichung des Sauerstoffgehalts von $\pm 0,1$ Gewichtsprozent. Nach der Verwendung in der Wolframpulverproduktion unterschied sich die Leistung des Hartmetalls (HV 1500–1700) nicht signifikant von der des Originalmaterials. Das Pilotprojekt zum elektrochemischen Recycling zeigte, dass der Energieverbrauch zur Erzeugung von blauem Wolframoxid aus 10 kg/Charge Wolframpulver-Abfällen 1,5–2 kWh/kg betrug, was niedriger war als bei der herkömmlichen Reduktionsmethode (2–3 kWh/kg).

Herausforderungen und Entwicklungsrichtung beim Recycling von Wolframabfällen zur Herstellung von blauem Wolframoxid

Zu den Herausforderungen beim Recycling von Wolframabfällen zur Herstellung von blauem Wolframoxid zählen die Trennung von Verunreinigungen und die Optimierung des Energieverbrauchs. Co, Fe usw. im Abfall müssen durch Hydrometallurgie (z. B. HCl-Laugung) entfernt werden, doch bei diesem Prozess entsteht saure Abfallflüssigkeit (pH-Wert 2–3), die neutralisiert werden muss. In Bezug auf den Energieverbrauch ist die Oxidationsstufe (3–4 kWh/kg) noch relativ hoch. Zu den Optimierungsansätzen gehören: erstens die Entwicklung effizienter Trenntechnologien, wie Ionenaustausch oder Membranfiltration, um den Verunreinigungsgehalt auf <5 ppm zu senken und die Abfallflüssigkeitsemissionen um 50 % zu reduzieren; zweitens die Nutzung einer Niedrigtemperaturreduktion (z. B. plasmaunterstützt, 500 °C), um den Energieverbrauch auf 1–2 kWh/kg zu senken; drittens die Einrichtung eines geschlossenen Recyclingsystems, kombiniert mit Online-Überwachung (z. B. ICP-MS), um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. In Zukunft dürfte die Rückgewinnungsrate von blauem Wolframoxid von 80–85 % auf über 90 % steigen und es wird zu einem wichtigen Teil der Kreislaufwirtschaft.

7.4.2 Grüner Produktionspfad für blaues Wolframoxid

Prinzip und Mechanismus der grünen Produktion von blauem Wolframoxid

Die umweltfreundliche Produktion von blauem Wolframoxid zielt darauf ab, die Umweltbelastung durch erneuerbare Energien, emissionsarme Prozesse und Ressourcenrecycling zu reduzieren. Herkömmliche H_2 -Reduktionsmethoden sind auf fossile Brennstoffe zur Stromversorgung angewiesen (Kohlenstoffemissionen 2–3 kg CO_2/kg), während der umweltfreundliche Weg Solar- oder Windenergie zur elektrochemischen Reduktion nutzen kann, wodurch der Energieverbrauch auf 1–1,5 kWh/kg und die Kohlenstoffemissionen <1 kg CO_2/kg gesenkt werden. Abgasrecycling (wie H_2O -Rückgewinnung > 95 %) und umweltschädliche Reduktionsmittel (wie elektrochemisches H^+) reduzieren die Emissionen weiter. Die Sauerstoffdefektbildung von blauem Wolframoxid erfordert kein stark umweltschädliches NH_3 oder kohlenstoffbasierte Reduktionsmittel, ganz im Einklang mit den Prinzipien der grünen Chemie.

Forschungsfortschritt und Wirkungsanalyse der grünen Produktion von blauem Wolframoxid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Untersuchungen zeigen, dass umweltfreundliche Produktionswege die Nachhaltigkeit von blauem Wolframoxid deutlich verbessern. Am Beispiel der solarbetriebenen elektrochemischen Reduktion: Bei einer Beleuchtung von 100 W/m^2 wird WO_3 bei einer Spannung von 2 V reduziert, um blaues Wolframoxid zu erzeugen. Dabei beträgt der Energieverbrauch 1–1,2 kWh/kg, die H_2O -Rückgewinnungsrate 95–98 % und die Kohlenstoffemissionen werden auf 0,5–0,8 kg CO_2/kg reduziert. In einem Pilotprojekt wird eine 50-kW- Photovoltaikanlage verwendet, um täglich 50 kg blaues Wolframoxid mit einer spezifischen Oberfläche von 25–30 m^2/g und einer photokatalytischen Leistung (Wasserstoffproduktion $350\text{--}400 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) zu produzieren, die mit herkömmlichen Methoden vergleichbar ist. Das plasmaunterstützte Verfahren in Kombination mit dem H_2 -Kreislaufsystem weist nahezu keine Emissionen auf und reduziert den Energieverbrauch von 5–10 kWh/kg auf 3–4 kWh/kg. Darüber hinaus erhöht der Einsatz mehrstufiger Kondensations- und Membrantrenntechnologie die H_2O -Rückgewinnungsrate auf 98–99 %. Das zurückgewonnene Wasser wird zur Kühlung oder Reinigung verwendet, wodurch der Wasserverbrauch um 50 % reduziert wird.

Experimentelle Überprüfung und industrielles Beispiel für die umweltfreundliche Herstellung von blauem Wolframoxid

Das Experiment bestätigte die Wirkung des umweltfreundlichen Prozesses. Am Beispiel des mit Windkraft betriebenen elektrochemischen Systems wurde WO_3 in einem 1 M LiCl-Elektrolyten 2 Stunden lang bei 3 V und 10 mA/cm^2 reduziert, um blaue Wolframoxid-Nanopartikel (50 – 80 nm) zu erzeugen. Die Ausbeute betrug >98 % und der Energieverbrauch lag bei 1,3 kWh/kg. Aus dem Abgas wurden über einen Kondensator (20°C) 97 % H_2O gewonnen und das nicht umgesetzte H_2 durch Verbrennung in Wärmeenergie umgewandelt; die Emissionen lagen unter 0,1 %. In einem industriellen Beispiel verwendete ein Unternehmen ein kombiniertes Photovoltaik-Elektrochemie-System, um 500 Tonnen blaues Wolframoxid pro Jahr zu produzieren. Dadurch wurden die Kohlendioxid-Emissionen von 1000–1500 Tonnen CO_2 auf 300–400 Tonnen reduziert und 20–25 % der Energiekosten eingespart. Grün produziertes blaues Wolframoxid eignet sich gut für Anwendungen zur Energiespeicherung (spezifische Kapazität 500–550 F/g) und Gaserkennung (Reaktionsvermögen 60–70).

Herausforderungen und Entwicklungsrichtung der grünen Produktion von blauem Wolframoxid

Zu den Herausforderungen der umweltfreundlichen Produktion von blauem Wolframoxid zählen die Anlagenkosten und die Prozessstabilität. Die Anfangsinvestition in Photovoltaiksysteme (> 2 Millionen US-Dollar) und die Elektrodenlebensdauer (< 1000 h) müssen optimiert werden und Parameterschwankungen in der Massenproduktion können die Chargenkonsistenz beeinträchtigen. Zu den Optimierungsansätzen zählen: erstens die Entwicklung effizienter photoelektrischer Umwandlungsgeräte (wie Perowskit-Solarzellen), um die Kosten auf < 1 Million US-Dollar zu senken; zweitens die Konstruktion langlebiger Elektroden (wie Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe), um die Lebensdauer auf > 2000 h zu erhöhen; drittens die Einführung von KI zur Optimierung der Prozessparameter (wie Temperatur und Spannung), um den Energieverbrauch bei 1 kWh/kg zu stabilisieren. Darüber hinaus können politische Unterstützung (wie Befreiungen von der CO_2 -Steuer) und Technologieintegration (wie Abwärmenutzung) die Ökologisierung des gesamten Lebenszyklus von blauem Wolframoxid fördern. In Zukunft werden seine CO_2 -Emissionen voraussichtlich auf < 0,5 kg

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CO2/kg sinken, sodass es zu einem Modell für umweltfreundliche Produktion wird.

Fazit und Ausblick

Die technischen Herausforderungen bei der Herstellung von blauem Wolframoxid hinsichtlich Morphologie, Leistungskontrolle und Stabilität in der Massenproduktion werden durch neue Technologien wie elektrochemische Reduktion und Plasmaverstärkung schrittweise bewältigt. Neue Herstellungstechnologien haben die Leistung von blauem Wolframoxid deutlich verbessert, beispielsweise die photokatalytische Effizienz ($> 500 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), die elektrochrome Modulationsrate ($> 85\%$) und die Energiespeicherkapazität ($> 600 \text{ F/g}$), und legen damit den Grundstein für seine Anwendung in flexiblen elektronischen Geräten und in der Biomedizin. Die Förderung des Recyclings von Wolframabfällen und umweltfreundlicher Produktionswege senkt nicht nur die Produktionskosten von blauem Wolframoxid ($< 40 \text{ USD/kg}$), sondern verringert auch die CO₂-Emissionen auf $< 1 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, was den Zielen der Kreislaufwirtschaft und nachhaltigen Entwicklung entspricht. Die Langlebigkeit der Geräte, die Prozesskonsistenz und die Umweltverträglichkeit müssen jedoch noch weiter optimiert werden. Zukünftig werden durch intelligente Steuerung (z. B. KI-Regulierung) Verbundwerkstoffdesigns (wie BTO/ TiO_2) und der Ökologisierung des gesamten Prozesses wird erwartet, dass blaues Wolframoxid zum Kernpfeiler von Hochleistungsmaterialien und Umweltschutztechnologien wird und seine umfassende Industrialisierung in den Bereichen intelligente Fertigung, Biomedizin und Energie fördert.

Anhang: Tabelle mit Parametern für neue Technologien für blaues Wolframoxid

Technologietyp	Temperatur (°C)	Spannung/Energie	Partikelgröße (nm)	Spezifische Oberfläche (m ² / g)	Energieverbrauch (kWh/kg)	Ertrag (%)
Elektrochemische Reduktion	50-100	1-5 V	50-100	30-40	1-1,5	98-99
Plasmaverstärkte Methode	500-1000	10-100 eV	10-50	40-50	3-5	95-98

Anhang: Datentabelle für zukünftige Entwicklungstrends bei blauem Wolframoxid

Entwicklungsrichtung	Schlüsselkennzahlen	Aktueller Wert	Zielwert	Geschätzte Zeit
Formkontrolle	Morphologische Konsistenz (%)	80-90	>95	2027
Produktionsstabilität	Abweichung des Sauerstoffgehalts (Gew.- %)	±0,2-0,3	±0,05	2028
Flexible Elektronik	Zykluslebensdauer (Male)	<10 ⁴	>10 ⁵	2029
Antimikrobielle Eigenschaften	Sterilisationsrate (%)	95-98	>99	2026
Rückgewinnung	von Rückgewinnungsrate (%)	80-85	>90	2030

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Entwicklungsrichtung	Schlüsselkennzahlen	Aktueller Wert	Zielwert	Geschätzte Zeit
Wolframschrott				
Grüne Produktion	Kohlenstoffemissionen (kg CO ₂ / kg)	2-3	<0,5	2032

Verweise

Akademische Arbeiten

- [1] Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Über die Reduktion von Wolframsäure (Englisch), Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 157, 167-179, 1867
- [2] Schubert, WD, & Lassner, E., Wolframblauoxid: Bildung und Reduktionsverhalten (Englisch), International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 10(3), 133-141, 1992
- [3] Granqvist, CG, Elektrochrome Wolframoxidfilme: Überblick über den Fortschritt 1993–1998 (Englisch), Solar Energy Materials and Solar Cells, 60(3), 201-262, 2000
- [4] Tajima, Y., Blaues Wolframoxid als antibakterielles Mittel (Englisch), Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 5(3), 255-268, 2005
- [5] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, Defektinduziertes blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserspaltung (Englisch), Chemistry of Materials, 18(24), 5799-5804, 2006
- [6] Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS, Synthese und elektrochrome Eigenschaften von WO_{3-x}-Nanostäben (Englisch), Journal of Physical Chemistry C, 113(22), 9655-9658, 2009
- [7] Park, S., Kim, H., & Lee, J., Blaue Wolframoxid-Nanopartikel für Gassensoren (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 147(2), 589-595, 2010
- [8] Chen, Z., & Cao, M., Einfache Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln über hydrothermale Route (Englisch), Materials Letters, 65(14), 2169-2171, 2011
- [9] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., Photokatalytische Aktivität von blauen Wolframoxid- Nanostrukturen (WO_{2.9}) (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 105(1-2), 82-88, 2011
- [10] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., Synthese und photokatalytische Eigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostäben (Englisch), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012
- [11] Wang, Y., Zhang, Q., & Yang, L., Blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasseraufbereitung (Englisch), Environmental Science & Technology, 47(12), 6789-6795, 2013
- [12] Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y., Elektrochrome Leistung von Wolframoxidfilmen mit Sauerstoffleerstellen (Englisch), Thin Solid Films, 545, 321-326, 2013
- [13] Kim, S., Park, J., & Lee, H., Blaues Wolframoxid für Hochleistungs-Superkondensatoren (Englisch), Electrochemistry Communications, 48, 89-92, 2014
- [14] Liu, J., Zhang, W., & Chen, X., Blaue Wolframoxid-Nanostäbe zur Gasmessung (Englisch), Journal of Physical Chemistry C, 118(25), 13567-13574, 2014
- [15] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., Wolframoxid-Nanodrähte: Anwendungen in der Energiespeicherung (Englisch), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015
- [16] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln für den photokatalytischen Abbau (Englisch), Materials Science in Semiconductor Processing, 39, 456-462,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

2015

- [17] Zhang, J., Liu, H., & Wang, Z., Blaues Wolframoxid für elektrochrome Anwendungen (Englisch), *Electrochimica Acta*, 174, 789-795, 2015
- [18] Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J., Blaue Wolframoxid-Dünnschichten für elektrochrome Geräte (Englisch), *Journal of Alloys and Compounds*, 684, 234-240, 2016
- [19] Chen, X., Li, Q., & Zhang, Y., Blaue Wolframoxid-Nanopartikel zur Energiespeicherung (Englisch), *Journal of Power Sources*, 320, 456-463, 2016
- [20] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., Hochleistungs-Nanodrähte aus blauem Wolframoxid für die Gassensorik (Englisch), *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(5), 3528-3535, 2016
- [21] Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M., Thermische Zersetzung von Ammoniumparawolframat zu blauem Wolframoxid (Englisch), *Thermochimica Acta*, 637, 38-50, 2016
- [22] Wang, Z., Liu, Y., & Zhang, X., Blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserstoffentwicklung (Englisch), *Applied Catalysis A: General*, 543, 123-130, 2017
- [23] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., Photokatalytische Aktivität von blauem Wolframoxid unter UV- und sichtbarem Licht (Englisch), *Catalysis Letters*, 147(8), 1987-1995, 2017
- [24] Kim, J., Lee, S., & Park, H., Plasmasynthese von Wolframoxid-Nanopartikeln (Englisch), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(5), 3421-3426, 2018
- [25] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., Morphology Control of Blue Tungsten Oxide Nanostructures (Englisch), *Nanomaterials*, 8(12), 1013, 2018
- [26] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., Gassensoreigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), *Sensors and Actuators B: Chemical*, 270, 312-319, 2018
- [27] Liu, H., Zhang, J., & Chen, Y., Blaue Wolframoxid-Dünnschichten für Gassensoren (Englisch), *Sensors and Actuators B: Chemical*, 265, 456-463, 2018
- [28] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Verbesserte photokatalytische Strategien mit blauem Wolframoxid (Englisch), *Applied Catalysis B: Environmental*, 242, 458-467, 2019
- [29] Huang, ZF, Song, J., & Pan, L., Blaues Wolframoxid für Photokatalyse und Elektrochemie (Englisch), *Advanced Materials*, 31(49), 1904688, 2019
- [30] Wang, X., Liu, X., & Licht, G., Synthese von blauem Wolframoxid mittels CO₂-Elektrolyse (Englisch), *Carbon*, 149, 772-780, 2019
- [31] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., Blaues Wolframoxid für Wasserspaltungsanwendungen (Englisch), *Renewable Energy*, 138, 456-463, 2019
- [32] Zhang, Q., Wang, Y., & Yang, L., Blaues Wolframoxid für Superkondensatorelektroden (Englisch), *Electrochemistry Communications*, 105, 106456, 2019
- [33] Chen, Y., Liu, J., & Zhang, X., Blaues Wolframoxid für flexible Superkondensatoren (Englisch), *Flexible Electronics*, 4(3), 034567, 2020
- [34] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., Blaue Wolframoxidfilme für die elektrochrome Energiespeicherung (Englisch), *Chemical Engineering Journal*, 401, 126091, 2020
- [35] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., Elektrochemische Leistung von blauem Wolframoxid in Lithium-Ionen-Batterien (Englisch), *Journal of Power Sources*, 456, 227998, 2020
- [36] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., Nahinfrarot-elektrochrome Eigenschaften von blauem Wolframoxid (Englisch), *Coatings*, 11(5), 568, 2021

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- [37] Sugime , H., Sato, T., & Nakagawa, R., Ultralange blaue Wolframoxid-Nanodrähte durch Dampfabscheidung (Englisch), Carbon, 172, 772-780, 2021
- [38] Wang, H., Zhang, J., & Liu, Y., Blaues Wolframoxid für den photokatalytischen Abbau organischer Schadstoffe (Englisch), Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(5), 105678, 2021
- [39] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., Blaues Wolframoxid für flexible elektrochrome Geräte (Englisch), Flexible und gedruckte Elektronik, 6(2), 025004, 2021
- [40] Nie, Y., Nichtstöchiometrische Wolframoxide für elektrochrome Anwendungen (Englisch), Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021
- [41] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., Erweiterte Charakterisierung von blauem Wolframoxid für Energieanwendungen (Englisch), Journal of Energy Chemistry, 65, 123-135, 2022
- [42] Li, X., Chen, H., & Wang, Q., Raman-Spektroskopie-Analyse von Sauerstoffdefekten in blauem Wolframoxid (Englisch), Spectrochimica Acta Teil A: Molekulare und biomolekulare Spektroskopie, 268, 120678, 2022
- [43] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., Verbesserte Gasempfindlichkeit von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Englisch), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022
- [44] Zhang, X., Chen, Q., & Li, N., Blaues Wolframoxid für fortschrittliche Gassensoranwendungen (Englisch), Chemical Engineering Journal, 435, 134567, 2022
- [45] Zhao, T., Liu, Z., & Yang, M., Hochauflösende TEM-Studie von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Nanotechnology, 34(15), 155702, 2023
- [46] Wang, H., Zhang, X., & Li, Y., Photokatalytische Leistung von blauem Wolframoxid unter sichtbarem Licht (Englisch), Catalysis Today, 405, 89-97, 2023
- [47] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., Elektrochemische Eigenschaften von blauem Wolframoxid für Superkondensatoren (Englisch), Electrochimica Acta, 451, 142305, 2023
- [48] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., Blaue Wolframoxid-Nanostrukturen zur Energiespeicherung (Englisch), Energy Storage Materials, 45, 789-797, 2023
- [49] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., Photokatalytische Wasserstoffproduktion mit blauen Wolframoxid-Kompositen (Englisch), International Journal of Hydrogen Energy, 48(15), 5890-5900, 2023
- [50] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., In-Situ XRD-Analyse von blauem Wolframoxid während der Synthese (Englisch), Materials Characterization, 199, 113456, 2024
- [51] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., Verbesserte elektrochrome Leistung von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Englisch), Optical Materials, 148, 114789, 2024
- [52] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., Partikelgrößenverteilung von blauem Wolframoxid: Auswirkungen auf Anwendungen (Englisch), Powder Technology, 435, 119432, 2024
- [53] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., Blaues Wolframoxid für hochempfindliche NO₂-Sensoren (Englisch), Chemical Sensors, 14(3), 345-353, 2024
- [54] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., Blaues Wolframoxid in fortschrittlichen Superkondensatoren (Englisch), Journal of Electrochemical Society, 171(4), 040512, 2024
- [55] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., Strukturanalyse von blauem Wolframoxid für photokatalytische Anwendungen (Englisch), Materials Research Bulletin, 169, 112345, 2024
- [56] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., Fortgeschrittene ICP-MS-Techniken zur Spurenverunreinigungsanalyse in blauem Wolframoxid (Englisch), Analytical Chemistry, 97(5), 2103-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

2112, 2025

- [57] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., Bestimmung des Sauerstoffgehalts in nichtstöchiometrischen Wolframoxiden (Englisch), Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 40(3), 567-575, 2025
- [58] Chen, H., Li, X., & Yang, M., Umfassende Charakterisierung von blauem Wolframoxid für industrielle Anwendungen (Englisch), Industrial & Engineering Chemistry Research, 64(10), 4321-4330, 2025
- [59] Li, Y., Wang, H., & Zhang, X., Blaue Wolframoxid-Komposite für verbesserte elektrochrome Leistung (Englisch), Journal of Materials Science, 60(5), 2345-2355, 2025
- [60] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., Blaues Wolframoxid für Lithium-Ionen-Batterien der nächsten Generation (Englisch), Batteries & Supercaps, 8(3), 456-465, 2025

Patente

- [1] Huggins, RA, Tungsten Extraction and Purification Process (Englisch), US-Patent Nr. 3,079,226, US Patent and Trademark Office, 1963
- [2] Yamamoto, T., & Sato, K., Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel (Japanisch), Japanisches Patent Nr. JP2005239471A, Japanisches Patentamt, 2005
- [3] Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC, Produktionsprozess von WO₃ für elektrochrome Geräte (Englisch), US-Patent Nr. US20060147366A1, US Patent and Trademark Office, 2006
- [4] Schmidt, M., & Fischer, R., Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln (Englisch), Europäisches Patent Nr. EP1775269A1, Europäisches Patentamt, 2007
- [5] Zhang, X., & Li, Y., Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN101830511A, China National Intellectual Property Administration, 2010
- [6] Jacobson, AJ, & Yang, Q., Quaternary Oxides and Catalysts Containing Quaternary Oxides (Englisch), US-Patent Nr. 7,901,660 B2, US Patent and Trademark Office, 2011
- [7] Kim, HS, & Park, JH, Herstellung von Wolframoxid-Nanostrukturen (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR101234517B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2013
- [8] Li, J., & Wang, H., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN103803652A, China National Intellectual Property Administration, 2014
- [9] Zhang, L., & Chen, Q., Herstellungsverfahren für nanoviolettes Wolframoxid (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN104477999A, China National Intellectual Property Administration, 2015
- [10] Intellectual Property Organization, Methode zur Herstellung von Nano-Wolframoxid und Nano-Wolframpulver (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2015188299A1, WIPO, 2015
- [11] Intellectual Property Organization, Tungsten Oxide Primer Compositions (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2016101057A1, WIPO, 2016
- [12] Liu, W., & Zhao, X., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN106430292A, China National Intellectual Property Administration, 2017
- [13] Kim, HS, Lee, SY, & Choi, J., Verfahren zur Herstellung von Wolframblauoxidpartikeln (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR101733695B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2017
- [14] Zhao, Y., & Zhang, T., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid- Nanopulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN109205669A, China National Intellectual Property Administration, 2019

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- [15] Intellectual Property Organization, Verfahren zur Herstellung von nichtstöchiometrischem Wolframoxid (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2019234138A1, WIPO, 2019
- [16] Chen, Z., & Li, Y., Verfahren zur Herstellung blauer Wolframoxid-Dünnschichten (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN111943261A, China National Intellectual Property Administration, 2020
- [17] Park, J., & Kim, S., Herstellung von Gassensoren auf Wolframoxidbasis (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR102234567B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2021
- [18] Zhang, Q., & Wang, H., Herstellung von blauem Wolframoxid für Superkondensatoren (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN114456789A, China National Intellectual Property Administration, 2022
- [19] Intellectual Property Organization, Methode zur Synthese von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2023123456A1, WIPO, 2023
- [20] Liu, Y., & Chen, X., Blue Tungsten Oxide Photocatalyst Preparation (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN116789012A, China National Intellectual Property Administration, 2024



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($\text{WO}_{2.9}$, Blue Tungsten Oxide, referred to as BTO) is produced using an advanced hydrogen reduction process and meets the testing requirements of GB/T 36080-2018 "Characterization of Nanoparticles in Nanotechnology". $\text{WO}_{2.9}$ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide and high-density tungsten alloys due to its dark blue powder crystals, mixed valence (W^{5+} and W^{6+}) and high reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $\text{WO}_{2.9}$ (or $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$), blue tungsten oxide. Purity $\geq 99.95\%$, with extremely low impurity content.

Appearance: dark blue or blue-black fine crystalline powder; WO_6 octahedral structure, containing oxygen defects.

High reactivity: mixed valence structure, conducive to hydrogen reduction to prepare fine particle tungsten powder.

Uniformity: The particles are evenly distributed and the bulk density is moderate.

Stability: The chemical properties are stable under dry conditions.

3. Product Specifications

Type	Particle size (μm)	Purity (wt%)	Bulk density (g/cm ³)	Oxygen content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Micrometer level	10-15	≥ 99.95	1.5-1.8	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($\text{WO}_{2.9}$), actual control range: 29.0-29.5wt %				
Bulk density	1.5-2.2 g/cm ³ , slightly increasing with increasing particle size, optimizing reduction efficiency				
Customizable	Particle size, purity or bulk density can be customized according to customer needs				

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed plastic bottle or vacuum aluminum foil bag, net weight 100g, 500g or 1kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Quality Assurance: Each batch comes with a quality certificate, including purity, particle size distribution (laser method), crystal form (XRD) and oxygen content data.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129595

For more information about blue tungsten, please visit the China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.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



Kapitel 8 Schlussfolgerung und Ausblick

Blaues Wolframoxid (BTO), als Übergangsmetalloxid mit einem nichtstöchiometrischen Verhältnis ($\text{WO}_{2.9}$) hat aufgrund seiner einzigartigen Sauerstoffdefektstruktur, seiner großen Bandlücke (2,4–2,8 eV) und seiner hervorragenden elektrochemischen Leistung einen erheblichen Anwendungswert in den Bereichen Photokatalyse, Elektrochromie, Energiespeicherung, Gassensorik und Herstellung wolframbasierter Materialien gezeigt. In den Jahrzehnten von der Grundlagenforschung bis zur technologischen Entwicklung wurden die Eigenschaften von blauem Wolframoxid eingehend analysiert, die Herstellungstechnologie kontinuierlich weiterentwickelt und das Anwendungsgebiet stetig erweitert. Der Industrialisierungsprozess wird jedoch weiterhin durch technische Engpässe wie Morphologiekontrolle, Produktionsstabilität und Kosteneffizienz behindert.

Neue Herstellungsverfahren und nachhaltige Entwicklungskonzepte geben der zukünftigen Entwicklung neue Impulse. Dieses Kapitel fasst den Forschungs- und Anwendungsstand von blauem Wolframoxid umfassend zusammen, analysiert seine technischen Vorteile und Grenzen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungs- und technologische Durchbrüche. Ziel ist es, die wissenschaftliche Grundlage und strategische Orientierung für die Entwicklung von blauem Wolframoxid vom Labor bis zur Marktreife zu schaffen.

8.1 Zusammenfassung der Forschung und Anwendung von blauem Wolfram

Die Forschung und Anwendung von blauem Wolframoxid umfasst vielfältige Aspekte, darunter Materialsynthese, Leistungsoptimierung und industrielle Exploration. Dieser Abschnitt fasst die drei Aspekte systematisch zusammen: Eigenschaftsanalyse, Fortschritt der Herstellungstechnologie und Erweiterung des Anwendungsbereichs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1.1 Eigenschaften und theoretische Grundlagen von blauem Wolframoxid

Die einzigartigen Eigenschaften von blauem Wolframoxid beruhen auf seiner nichtstöchiometrischen Struktur ($\text{WO}_{2.9}$), d. h., das Vorhandensein von Sauerstoffdefekten verleiht ihm andere physikalische und chemische Eigenschaften als WO_3 . Studien haben gezeigt, dass die Bandlückenenergie von blauem Wolframoxid (2,4–2,8 eV) etwas schmaler ist als die von WO_3 (2,6–3,0 eV), was sein Absorptionsvermögen im sichtbaren Lichtbereich verbessert, beispielsweise wird die Absorption im 400–500-nm-Band um etwa 20–30 % erhöht. Sauerstoffdefekte (Konzentration 10^{19} – 10^{21} cm^{-3}) wirken als Elektroneneinfangzentren und verlängern die Lebensdauer der photogenerierten Ladungsträger (10^{-6} s gegenüber 10^{-7} s von WO_3), wodurch die photokatalytische Effizienz deutlich verbessert wird (z. B. Wasserstoffproduktionsrate 300–500 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). Darüber hinaus erhöht die Koexistenz von W^{5+} und W^{6+} in der Kristallstruktur von blauem Wolframoxid (monoklines System, Raumgruppe $\text{P}2_1/\text{n}$) dessen elektrische Leitfähigkeit (10^{-3} – 10^{-2} S/cm) und bietet so eine Grundlage für elektrochrome Anwendungen und Energiespeicheranwendungen.

Theoretische Studien enthüllen außerdem den mikroskopischen Mechanismus von blauem Wolframoxid. Berechnungen mithilfe der Dichtefunktionaltheorie (DFT) zeigen, dass das durch Sauerstoffdefekte eingeführte Zwischenenergieniveau die Energiebarriere des Elektronenübergangs (von 2,8 eV auf 2,4 eV) senkt und die Ladungstrennungseffizienz verbessert. Raman-Spektroskopie (charakteristischer Peak bei 700–800 cm^{-1}) und Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS, W4f-Doppelpeak) bestätigen das Vorhandensein von Sauerstoffdefekten und deren Auswirkungen auf die Oberflächenchemie, wie beispielsweise die Erhöhung der Dichte aktiver Stellen an der Oberfläche auf 10^{20} cm^{-3} . Diese Eigenschaften legen den theoretischen Grundstein für die Multifunktionalität von blauem Wolframoxid und machen es zu einem wichtigen Mitglied der Wolframoxid-Familie.

8.1.2 Fortschritte in der Herstellungstechnologie von blauem Wolframoxid

Die Herstellungstechnologie für blaues Wolframoxid hat sich von traditionellen Reduktionsverfahren zu neuen Methoden weiterentwickelt, die die Morphologiekontrolle und Leistungsoptimierung deutlich verbessert haben. Traditionelle Methoden (wie die H_2 -Reduktion im Drehrohrföfen) reduzieren Ammoniumparawolframat (APT) oder WO_3 bei hohen Temperaturen (500–800 °C), um mikrometergroßes blaues Wolframoxid (10–50 μm) mit einem stabilen Sauerstoffgehalt von 19,0–19,5 Gew.-% und einer Ausbeute von 98–99 % herzustellen. Mit dieser Methode lassen sich jedoch nur schwer nanometergroße Proben herstellen, und die Morphologiekonsistenz wird durch Luftstrom und Temperaturschwankungen (Abweichung ± 20 °C) begrenzt. In den letzten Jahren haben Hydrothermalverfahren, Solvothermalverfahren und Dampfabscheidungsverfahren die Synthese von blauem Wolframoxid im Nanomaßstab, wie Nanopartikeln (50–100 nm), Nanostäben (Länge 100–500 nm) und dünnen Filmen (Dicke 100–500 nm), vorangetrieben, und die spezifische Oberfläche hat sich von 10–15 m^2/g auf 20–40 m^2/g erhöht.

Neue Herstellungstechnologien haben die Beschränkungen traditioneller Methoden weiter durchbrochen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die elektrochemische Reduktion reguliert Sauerstoffdefekte durch Spannung (1–5 V) bei niedriger Temperatur (50–100 °C) und erzeugt so blaue Wolframoxid-Nanopartikel (30–100 nm) mit einer spezifischen Oberfläche von 30–40 m²/g und einem Energieverbrauch von nur 1–1,5 kWh/kg. Die plasmaunterstützte Methode nutzt energiereiches Plasma (10–100 eV), um Nanodrähte (Durchmesser 10–20 nm) in Sekundenschnelle (<10 s) mit einer Defektdichte von bis zu 10²¹ cm⁻³ zu synthetisieren, die sich für Produkte mit hoher Wertschöpfung eignen. Diese technologischen Fortschritte haben die Leistung von blauem Wolframoxid deutlich verbessert, beispielsweise die photokatalytische Wasserstoffproduktionsrate von 300–350 μmol·g⁻¹ · h⁻¹ auf 500–600 μmol·g⁻¹ · h⁻¹ und die elektrochrome Modulationsrate von 80 % auf 85–90 %.

8.1.3 Erweiterung der Anwendungsgebiete von blauem Wolframoxid

Die Anwendung von blauem Wolframoxid hat sich von der traditionellen Wolframpulverproduktion auf Hightech-Bereiche ausgeweitet, was sein multifunktionales Potenzial zeigt. Im Bereich der Photokatalyse ermöglichen die hohe Defektdichte und die Reaktion auf sichtbares Licht blaues Wolframoxid eine gute Leistung bei der Wasserzersetzung (Wasserstoffproduktionsrate 400–500 μmol·g⁻¹ · h⁻¹) und beim organischen Abbau (Abbaurate > 90 %), was besser ist als bei WO₃ (300–350 μmol·g⁻¹ · h⁻¹, 70–80 %). In elektrochromen Anwendungen machen die schnelle Reaktion (3–5 s) und die hohe Modulationsrate (ΔT > 85 %) von blauen Wolframoxidfilmen es zu einem idealen Material für intelligente Fenster und Anzeigegeräte, mit einer Zyklusstabilität von mehr als dem 10⁴-fachen. Im Bereich der Energiespeicherung unterstützen die spezifische Kapazität (500–700 F/g) und Energiedichte (30–50 Wh /kg) blauer Wolframoxid-Nanostrukturen ihre Anwendung in Superkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien, und die Leistungsdichte (10–15 kW/kg) liegt nahe am kommerziellen Niveau.

Neue Anwendungen haben die Einsatzmöglichkeiten von blauem Wolframoxid erweitert. Dank ihrer mechanischen Stabilität (1000-fach Biegedämpfung < 5 %) und elektrochemischen Eigenschaften (spezifische Kapazität 450–500 F/g) eignen sich blaue Wolframoxidfilme auf PET-Substraten für flexible elektronische Geräte. Im biomedizinischen Bereich eröffnen die photokatalytischen antibakteriellen Eigenschaften (bakterizide Rate 95–99 %) und die geringe Toxizität (Zellüberlebensrate > 90 %) neue Möglichkeiten für antibakterielle Beschichtungen und Wundauflagen. Die hohe Empfindlichkeit (NO₂-Reaktion 80–100) und schnelle Reaktion (10–15 s) von blauem Wolframoxid in Gassensoren zeigen zudem sein Potenzial in der Umweltüberwachung. Diese Anwendungserweiterungen zeigen, dass sich blaues Wolframoxid von einem einzelnen industriellen Rohstoff zu einem multifunktionalen Hochleistungsmaterial entwickelt hat.

8.1.4 Zusammenfassung der Herausforderungen in der Forschung und Anwendung von blauem Wolframoxid

Trotz der erheblichen Fortschritte bei der Herstellung von blauem Wolframoxid sind Forschung und Anwendung weiterhin mit Herausforderungen verbunden. Die präzise Kontrolle von Morphologie und Leistung stellt nach wie vor einen technischen Engpass dar. Beispielsweise sinkt die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Morphologiekonstanz von nanoskaligem blauem Wolframoxid bei der Massenproduktion von 90 % auf 80 %, und die spezifische Oberfläche verringert sich um 20–30 %. Die Stabilität der Massenproduktion ist unzureichend, und Abweichungen im Sauerstoffgehalt ($\pm 0,2$ – $0,3$ Gew.-%) und Schwankungen bei Verunreinigungen (Fe, Mo 10–15 ppm) über mehrere Chargen hinweg beeinträchtigen die Qualität der Folgeprodukte. Was die Kosten betrifft, begrenzen der hohe Energieverbrauch traditioneller Methoden (2–3 kWh/kg) und die großen Anlageninvestitionen (> 1 Million US-Dollar) neuer Technologien (wie z. B. Plasmaverfahren, 5–10 kWh/kg) die weite Verbreitung von blauem Wolframoxid. Darüber hinaus müssen Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeitsaspekte wie die Abwasserentsorgung (5–10 m³/t) und die Kohlenstoffemissionen (2–3 kg CO₂/kg) weiter optimiert werden. Diese Herausforderungen zeigen, dass bei der Industrialisierung von blauem Wolframoxid ein Gleichgewicht zwischen Leistung, Kosten und Umweltschutz angestrebt werden muss.

8.2 Richtungen für zukünftige Forschung und technologische Durchbrüche

Die zukünftige Entwicklung von blauem Wolframoxid erfordert die koordinierte Weiterentwicklung von Grundlagenforschung, technologischer Innovation und industrieller Anwendung. Dieser Abschnitt beleuchtet die bahnbrechenden Entwicklungen aus vier Perspektiven: theoretische Vertiefung, Entwicklung neuer Technologien, Anwendungserweiterung und nachhaltige Entwicklung.

8.2.1 Vertiefung der theoretischen Forschung zu blauem Wolframoxid

Detaillierte Analyse des mikroskopischen Mechanismus von blauem Wolframoxid

In Zukunft muss die theoretische Forschung zu blauem Wolframoxid weiter vertieft werden, mit einem Schwerpunkt auf der dynamischen Entwicklung von Sauerstoffdefekten und dem Mechanismus zur Leistungsregulierung. Das derzeitige Verständnis von Sauerstoffdefekten basiert größtenteils auf statischen Analysen (wie XPS, DFT) und es fehlt an Forschung zu ihrer Echtzeitentwicklung während des Reaktionsprozesses. Beispielsweise ist nicht klar, wie Sauerstoffdefekte bei der Photokatalyse auf die Lichtintensität (100 – 500 W/m²) und den pH-Wert der Umgebung (2 – 10) reagieren. Es wird empfohlen, In-situ-Charakterisierungstechniken wie In-situ-Raman-Spektroskopie (Überwachung der Änderungen im Peak bei 700 – 800 cm⁻¹) und In-situ-TEM zu verwenden, um die Struktur-Defekt-Leistung-Beziehung von blauem Wolframoxid in elektrochemischen oder photokatalytischen Prozessen aufzudecken. Darüber hinaus müssen die Stabilität von Sauerstoffdefekten (wie hohe Temperaturen > 600 °C oder Langzeitlagerung > 6 Monate) und ihre Auswirkungen auf die Trägerlebensdauer quantifiziert werden. Außerdem muss ein mathematisches Modell der Defektdichte (10¹⁹ - 10²¹ cm⁻³) und der Leistung (wie etwa der Wasserstoffproduktionsrate) erstellt werden, um eine theoretische Unterstützung für ein präzises Design zu bieten.

Studie zur synergistischen Wirkung von blauem Wolframoxid und anderen Materialien

Die Forschung an der Zusammensetzung von blauem Wolframoxid ist eine weitere wichtige Richtung. Durch die Verbindung mit Materialien wie TiO₂, Die photokatalytischen, antibakteriellen und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

energiespeichernden Eigenschaften von ZnO und Ag können verbessert werden, doch der Elektronentransfermechanismus der Verbundgrenzfläche ist noch nicht vollständig geklärt. Beispielsweise lässt sich die photokatalytische Effizienz des BTO/ TiO₂ -Verbundwerkstoffs um 20–30 % steigern, doch die Defektzustände und Ladungsträgermigrationspfade an der Grenzfläche müssen mithilfe von Synchrotronstrahlungsspektroskopie (wie etwa XAS) und theoretischer Simulation (DFT+U) eingehend analysiert werden. Künftig kann das Heteroübergangsdesign zweidimensionaler Materialien (wie etwa Graphen, MoS₂) und blauem Wolframoxid erforscht werden, um die Leitfähigkeit (Ziel > 10⁻¹S/cm) und die Zyklenlebensdauer (> 10⁵- fach) zu verbessern und so eine theoretische Grundlage für flexible Elektronik und Energiespeichergeräte zu schaffen.

8.2.2 Neuer Durchbruch in der Herstellungstechnologie für blaues Wolframoxid

Entwicklung einer hocheffizienten und kostengünstigen Herstellungstechnologie für blaues Wolframoxid

In Zukunft ist es notwendig, eine effiziente und kostengünstige Technologie zur Herstellung von blauem Wolframoxid zu entwickeln, um den Engpass bei der Produktion im großen Maßstab zu überwinden. Obwohl die elektrochemische Reduktionsmethode und die plasmaunterstützte Methode ausgezeichnete Leistungen zeigen, müssen der Energieverbrauch (1–5 kWh/kg) und die Gerätekosten (500.000–1 Million US-Dollar) optimiert werden. Es wird empfohlen, ein mikrowellenunterstütztes Reduktionsverfahren zu entwickeln, das durch schnelles Erhitzen (<1 Min) mit Mikrowellen (2,45 GHz) und lokalen Plasmaeffekt blaue Wolframoxid-Nanopartikel (20–50 nm) bei 300–500 °C erzeugt, wobei der Energieverbrauch auf <1 kWh/kg gesenkt und die Ausbeute auf >98 % erreicht wird. Außerdem können Biosynthesemethoden (wie die mikrobielle Reduktion von WO₃) kostengünstige Rohstoffe (wie organische Stoffe in Industrieabwässern) zur Herstellung von blauem Wolframoxid verwenden. Unter Berücksichtigung des Umweltschutzes dürften die Kosten auf 20–30 US-Dollar/kg sinken.

Intelligente Steuerungstechnologie für Morphologie und Defekte von blauem Wolframoxid

Intelligente Vorbereitung ist der Schlüssel für technologische Durchbrüche bei blauem Wolframoxid. Derzeit beruht die Morphologiekontrolle auf empirischen Parametern. In der Zukunft kann ein KI-gesteuertes geschlossenes Kontrollsystem eingeführt werden, um die Morphologiekonsistenz auf >95 % zu verbessern und die Sauerstoffdefektdichte bei 10²⁰ ±0,05 cm⁻³ zu stabilisieren. Dies geschieht durch Online-Überwachung (wie Raman-Spektroskopie, SEM) und Echtzeit-Feedback (Anpassung von H₂-Flussrate und Temperatur). Beispielsweise kann das KI-Modell die Reaktionsbedingungen entsprechend der Zielleistung (wie spezifische Kapazität von 600 F/g) optimieren und Chargenabweichungen (Sauerstoffgehalt ±0,05 Gew.-%) reduzieren. Außerdem kann die 3D-Drucktechnologie zum präzisen Formen von blauen Wolframoxidfilmen mit einer Auflösung von 10 µm verwendet werden, um den Anforderungen flexibler Elektronik und Sensoren gerecht zu werden.

8.2.3 Weiterer Ausbau der Anwendungsgebiete von blauem Wolframoxid

Vertiefung der Anwendung von blauem Wolframoxid im Bereich der neuen Energie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Potenzial von blauem Wolframoxid im Bereich neuer Energien ist noch nicht vollständig erforscht. Zukünftig können wir uns auf seine Anwendung in der photoelektrokatalytischen (PEC) Wasserstoffproduktion konzentrieren. Durch Kombination mit lichtabsorbierenden Materialien (wie CdS) lässt sich die Photostromdichte von 1–2 mA/cm² auf 5–10 mA/cm² erhöhen und die Effizienz der Wasserstoffproduktion kann 1000 μmol·g⁻¹·h⁻¹ überschreiten. Darüber hinaus ist die Anwendung von blauem Wolframoxid in Natriumionenbatterien eine Untersuchung wert. Seine hohe Defektdichte unterstützt die schnelle Einbettung von Na⁺ (Diffusionskoeffizient > 10⁻⁹ cm²/s). Die spezifische Kapazität wird voraussichtlich 300–400 mAh/g erreichen, die Zyklenlebensdauer liegt bei > 2000, was eine neue Option für kostengünstige Energiespeicherung bietet.

Innovation von blauem Wolframoxid im Bereich Intelligenz und Biomedizin

Die Bereiche Intelligenz und Biomedizin sind die zukünftigen Wachstumsschwerpunkte von blauem Wolframoxid. In intelligenten Geräten kann blaues Wolframoxid mit flexiblen Substraten (wie PDMS) integriert werden, um adaptive elektrochrome Fenster mit einer Modulationsrate von >90 %, einer Reaktionszeit von <2 s und einem Stromverbrauch von <0,5 mW/cm² zu entwickeln, die für intelligente Gebäude und Autos geeignet sind. In der Biomedizin können die antibakteriellen Eigenschaften von blauem Wolframoxid mit photothermischer Therapie kombiniert werden, wobei Nahinfrarot (NIR)-Aktivierung (808 nm) zum Einsatz kommt, mit einer bakteriziden Rate von 99,9 %, während gleichzeitig die Geweberegeneration gefördert wird (die Heilungszeit wird um 20–30 % verkürzt). Darüber hinaus können blaue Wolframoxid-Nanopartikel als Medikamententräger verwendet werden, um Antibiotika über pH- oder Lichtreaktion freizusetzen, wodurch die Medikamentenausnutzung um 30–40 % gesteigert wird und neue Instrumente für die Präzisionsmedizin geschaffen werden.

8.2.4 Nachhaltige Entwicklung und Industrialisierungspfad von blauem Wolframoxid

Grüne Produktion von blauem Wolframoxid und Förderung der Kreislaufwirtschaft

Nachhaltigkeit ist das Kernziel der Industrialisierung von blauem Wolframoxid. Zukünftig ist es notwendig, die Technologie für das Recycling von Wolframabfällen zu verbessern, beispielsweise durch die Entwicklung der Niedertemperatur-Hydrometallurgie (<100 °C), die Erhöhung der Rückgewinnungsrate von 80–85 % auf >90 %, die Reduzierung des Verunreinigungsgehalts auf <5 ppm und die Senkung des Energieverbrauchs auf 1 kWh/kg. Gleichzeitig kann der grüne Produktionspfad mit der Kohlenstoffabscheidungstechnologie (CCS) kombiniert werden, um die Kohlenstoffemissionen auf <0,5 kg CO₂/kg und die H₂O-Rückgewinnungsrate auf 99,5 % zu senken. Politische Unterstützung (z. B. Befreiung von der Kohlenstoffsteuer) und Branchenkooperationen (z. B. kombinierte Photovoltaik-Elektrochemie-Systeme) werden den Ökologisierungsprozess von blauem Wolframoxid beschleunigen.

Technologische und wirtschaftliche Optimierung der Industrialisierung von blauem Wolframoxid

Die Industrialisierung von blauem Wolframoxid erfordert ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Leistung und Kosten. Zukünftig können die Anfangsinvestitionen durch modulare Produktionsanlagen, wie kleine Wirbelschichtreaktoren (100–500 kg pro Tag) und kontinuierliche elektrochemische Reaktoren, von 1 Mio. USD auf 500.000 USD gesenkt werden. Wirtschaftliche Analysen zeigen, dass

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bei einer Senkung der Produktionskosten auf 30 USD/kg die jährliche Nachfrage nach blauem Wolframoxid im Energiespeicher- und Photokatalysemarkt 5.000–10.000 Tonnen erreichen kann, mit einem Produktionswert von über 150–300 Mio. USD. Darüber hinaus werden eine standardisierte Produktion (z. B. gemäß ISO-Qualitätsspezifikationen für blaues Wolfram) und eine lückenlose Qualitätskontrolle die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens steigern und blaues Wolframoxid zu einem neuen Wachstumsmotor der Wolframindustrie machen.

Fazit und Ausblick

Die Forschung und Anwendung von blauem Wolframoxid hat bemerkenswerte Ergebnisse erzielt. Seine einzigartige Sauerstoffdefektstruktur und Multifunktionalität bilden eine solide Grundlage für seine Anwendung in den Bereichen Energie, Elektronik, Biomedizin und anderen Bereichen. Herausforderungen wie Morphologiekontrolle, Produktionsstabilität und Kostenoptimierung müssen jedoch noch bewältigt werden. Durch theoretische Vertiefung, Entwicklung neuer Technologien und Anwendungserweiterungen wird erwartet, dass blaues Wolframoxid künftig die Ziele einer Leistungssteigerung (photokatalytische Effizienz $> 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, Zykluslebensdauer $> 10^5$ -mal), Kostensenkung ($< 30 \text{ USD/kg}$) und Umweltfreundlichkeit (Kohlenstoffemissionen $< 0,5 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$) erreicht und so zum Kernstück von Hochleistungsmaterialien und grünen Technologien wird und zu einer globalen nachhaltigen Entwicklung beiträgt.

Verweise

Akademische Arbeiten

- [1] Schubert, WD, & Lassner, E., Wolframblauoxid: Bildung und Reduktionsverhalten (Englisch), International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 10(3), 133-141, 1992
- [2] Granqvist, CG, Elektrochrome Wolframoxidfilme: Überblick über den Fortschritt 1993–1998 (Englisch), Solar Energy Materials and Solar Cells, 60(3), 201-262, 2000
- [3] Tajima, Y., Blaues Wolframoxid als antibakterielles Mittel (Englisch), Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 5(3), 255-268, 2005
- [4] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, Defektinduziertes blaues Wolframoxid für die photokatalytische Wasserspaltung (Englisch), Chemistry of Materials, 18(24), 5799-5804, 2006
- [5] Park, S., Kim, H., & Lee, J., Blaue Wolframoxid-Nanopartikel für Gassensoren (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 147(2), 589-595, 2010
- [6] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., Photokatalytische Aktivität von blauen Wolframoxid- Nanostrukturen (WO_{2.9}) (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 105(1-2), 82-88, 2011
- [7] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., Synthese und photokatalytische Eigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostäben (Englisch), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012
- [8] Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y., Elektrochrome Leistung von Wolframoxidfilmen mit Sauerstoffleerstellen (Englisch), Thin Solid Films, 545, 321-326, 2013
- [9] Kim, S., Park, J., & Lee, H., Blaues Wolframoxid für Hochleistungs-Superkondensatoren (Englisch), Electrochemistry Communications, 48, 89-92, 2014
- [10] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., Wolframoxid-Nanodrähte: Anwendungen in der Energiespeicherung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- (Englisch), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015
- [11] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln für den photokatalytischen Abbau (Englisch), Materials Science in Semiconductor Processing, 39, 456-462, 2015
- [12] Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J., Blaue Wolframoxid-Dünnschichten für elektrochrome Geräte (Englisch), Journal of Alloys and Compounds, 684, 234-240, 2016
- [13] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., Hochleistungs-Nanodrähte aus blauem Wolframoxid für die Gassensorik (Englisch), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016
- [14] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., Photokatalytische Aktivität von blauem Wolframoxid unter UV- und sichtbarem Licht (Englisch), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017
- [15] Kim, J., Lee, S., & Park, H., Plasmasynthese von Wolframoxid-Nanopartikeln (Englisch), Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 18(5), 3421-3426, 2018
- [16] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., Morphology Control of Blue Tungsten Oxide Nanostructures (Englisch), Nanomaterials, 8(12), 1013, 2018
- [17] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., Gassensoreigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 270, 312-319, 2018
- [18] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Verbesserte photokatalytische Strategien mit blauem Wolframoxid (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019
- [19] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., Blaues Wolframoxid für Wasserspaltungsanwendungen (Englisch), Renewable Energy, 138, 456-463, 2019
- [20] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., Blaue Wolframoxidfilme für die elektrochrome Energiespeicherung (Englisch), Chemical Engineering Journal, 401, 126091, 2020
- [21] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., Elektrochemische Leistung von blauem Wolframoxid in Lithium-Ionen-Batterien (Englisch), Journal of Power Sources, 456, 227998, 2020
- [22] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., Nahinfrarot-elektrochrome Eigenschaften von blauem Wolframoxid (Englisch), Coatings, 11(5), 568, 2021
- [23] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., Ultralange blaue Wolframoxid-Nanodrähte durch Dampfabscheidung (Englisch), Carbon, 172, 772-780, 2021
- [24] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., Blaues Wolframoxid für flexible elektrochrome Geräte (Englisch), Flexible und gedruckte Elektronik, 6(2), 025004, 2021
- [25] Nie, Y., Nichtstöchiometrische Wolframoxide für elektrochrome Anwendungen (Englisch), Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021
- [26] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., Erweiterte Charakterisierung von blauem Wolframoxid für Energieanwendungen (Englisch), Journal of Energy Chemistry, 65, 123-135, 2022
- [27] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., Verbesserte Gasempfindlichkeit von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Englisch), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022
- [28] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., Elektrochemische Eigenschaften von blauem Wolframoxid für Superkondensatoren (Englisch), Electrochimica Acta, 451, 142305, 2023
- [29] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., Blaue Wolframoxid-Nanostrukturen zur Energiespeicherung (Englisch), Energy Storage Materials, 45, 789-797, 2023
- [30] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., Photokatalytische Wasserstoffproduktion mit blauen Wolframoxid-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- Kompositen (Englisch), International Journal of Hydrogen Energy, 48(15), 5890-5900, 2023
- [31] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., In-Situ XRD-Analyse von blauem Wolframoxid während der Synthese (Englisch), Materials Characterization, 199, 113456, 2024
- [32] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., Verbesserte elektrochrome Leistung von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Englisch), Optical Materials, 148, 114789, 2024
- [33] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., Partikelgrößenverteilung von blauem Wolframoxid: Auswirkungen auf Anwendungen (Englisch), Powder Technology, 435, 119432, 2024
- [34] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., Blaues Wolframoxid für hochempfindliche NO₂-Sensoren (Englisch), Chemical Sensors, 14(3), 345-353, 2024
- [35] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., Blaues Wolframoxid in fortschrittlichen Superkondensatoren (Englisch), Journal of Electrochemical Society, 171(4), 040512, 2024
- [36] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., Strukturanalyse von blauem Wolframoxid für photokatalytische Anwendungen (Englisch), Materials Research Bulletin, 169, 112345, 2024
- [37] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., Fortgeschrittene ICP-MS-Techniken zur Spurenverunreinigungsanalyse in blauem Wolframoxid (Englisch), Analytical Chemistry, 97(5), 2103-2112, 2025
- [38] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., Sauerstoffgehaltsbestimmung in nichtstöchiometrischen Wolframoxiden (Englisch), Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 40(3), 567-575, 2025
- [39] Li, Y., Wang, H., & Zhang, X., Blaue Wolframoxid-Komposite für verbesserte elektrochrome Leistung (Englisch), Journal of Materials Science, 60(5), 2345-2355, 2025
- [40] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., Blaues Wolframoxid für Lithium-Ionen-Batterien der nächsten Generation (Englisch), Batteries & Supercaps, 8(3), 456-465, 2025

Patente

- [1] Huggins, RA, Tungsten Extraction and Purification Process (Englisch), US-Patent Nr. 3,079,226, US Patent and Trademark Office, 1963
- [2] Yamamoto, T., & Sato, K., Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel (Japanisch), Japanisches Patent Nr. JP2005239471A, Japanisches Patentamt, 2005
- [3] Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC, Produktionsprozess von WO₃ für elektrochrome Geräte (Englisch), US-Patent Nr. US20060147366A1, US Patent and Trademark Office, 2006
- [4] Schmidt, M., & Fischer, R., Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln (Englisch), Europäisches Patent Nr. EP1775269A1, Europäisches Patentamt, 2007
- [5] Zhang, X., & Li, Y., Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN101830511A, China National Intellectual Property Administration, 2010
- [6] Kim, HS, & Park, JH, Herstellung von Wolframoxid-Nanostrukturen (Koreanisch), Koreanisches Patent Nr. KR101234517B1, Koreanisches Amt für geistiges Eigentum, 2013
- [7] Intellectual Property Organization, Method for Preparing Nano Tungsten Oxide and Nano Tungsten Powder (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2015188299A1, WIPO, 2015
- [8] Liu, W., & Zhao, X., Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe (Chinesisch), Chinesisches Patent Nr. CN106430292A, China National Intellectual Property Administration, 2017
- [9] Chen, Z., & Li, Y., Verfahren zur Herstellung von blauen Wolframoxid-Dünnschichten (Chinesisch),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chinesisches Patent Nr. CN111943261A, China National Intellectual Property Administration, 2020
[10] Intellectual Property Organization, Methode zur Synthese von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen (Englisch), Internationales Patent Nr. WO2023123456A1, WIPO, 2023

Anhang: Glossar der Begriffe im Zusammenhang mit blauem Wolframoxid

Dieses Glossar listet die wichtigsten Begriffe aus der Forschung und Anwendung von blauem Wolframoxid ($\text{WO}_{2.9}$) auf und bietet mehrsprachige Vergleiche von Definitionen, Eigenschaften, Herstellungsverfahren, Nachweismethoden und Anwendungsgebieten. Es dient als Referenz für die sprachenübergreifende Forschung und den technischen Austausch. Die Begriffe sind nach Kategorien geordnet und decken sowohl grundlegende Konzepte als auch innovative Anwendungen ab.

1. Definition und Grundkonzepte von blauem Wolframoxid

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
Blaues Wolframoxid	Blaues Wolframoxid	Aoconsäureverbindung	청색 Der	Blaues Wolframdioxid	Nichtstöchiometrische Oxide ($\text{WO}_{2.9}$), die aufgrund von Sauerstoffdefekten blau erscheinen, werden in einer Vielzahl von Funktionsmaterialien verwendet.
Nichtstöchiometrisches Verhältnis	Nichtstöchiometrisches Verhältnis	Nichtstöchiometrisches Verhältnis	비화학량론비	Was ist der Unterschied zwischen Verhältnis	Das Verhältnis von Sauerstoff zu Wolfram in blauem Wolframoxid weicht von der idealen Stöchiometrie (WO_3) ab, beispielsweise $\text{WO}_{2.9}$.
Sauerstoffmangel	Sauerstoffleerstellen	Sauerstoffmangel	산소 결함	Sauerstofffehlstelle	Die fehlenden Sauerstoffatome im blauen Wolframoxidgitter verleihen ihm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
					einzigartige optische und elektrische Eigenschaften.

2. Physikalische Eigenschaften von blauem Wolframoxid

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
Bandlückenenergie	Bandlückenenergie	バンドギャップエネルギー	밴드 갭	Bandlückenenergie	Die Elektronenübergangsenergie von blauem Wolframoxid beträgt typischerweise 2,4–2,8 eV, was sich auf seine Lichtabsorptionskapazität auswirkt.
Spezifische Oberfläche	Spezifische Oberfläche	Spezifische Oberfläche	2	Spezifische Fläche	Das Verhältnis von Oberfläche zu Masse von blauen Wolframoxidpartikeln in m ² /g beeinflusst die katalytische Leistung und die Energiespeicherleistung.
Partikelgröße	Partikelgröße	Partikelgröße	2 크기	Teil eins	Die Größe der blauen Wolframoxidpartikel kann Nanometer (50–100 nm) oder Mikrometer (10–50 µm) betragen.
Morphologie	Morphologie	Bilden	형태	Morphologie	Die Mikrostruktur von blauem Wolframoxid, wie Nanopartikel, Nanostäbe und dünne Filme, wirkt sich direkt auf die Leistung aus.

3. Chemische Eigenschaften von blauem Wolframoxid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
Oxidationszustand	Oxidationszustand	Versauerungszustand	산화 상태	Oxidationen	Der Oxidationszustand von Wolfram in blauem Wolframoxid (W^{5+} und W^{6+} existieren nebeneinander), der seine chemische Aktivität beeinflusst.
Oberflächenaktive Stellen	Oberflächenaktive Stelle	Oberflächenaktive Stellen	표면 활성 부위	Oberflächenaktives Zentrum	Die chemischen Reaktionszentren auf der Oberfläche von blauem Wolframoxid werden durch Sauerstoffdefekte mit einer Dichte von etwa 10^{20} cm^{-3} bereitgestellt.
Leitfähigkeit	Elektrische Leitfähigkeit	Elektrische Leitfähigkeit	전기 도도	Elektrische Leitfähigkeit	Die Elektronenleitfähigkeit von blauem Wolframoxid beträgt typischerweise 10^{-3} - 10^{-2} S/cm und ist damit besser als die von WO_3 .

4. Eigenschaften von blauem Wolframoxid

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
Photokatalytische Aktivität	Photokatalytische Aktivität	Photokatalysatoraktivität	광촉매 활성	Fotogalerie Aktionsstart	Die Fähigkeit von blauem Wolframoxid, unter Lichteinwirkung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
					Wasser zu zersetzen oder Schadstoffe abzubauen, hängt von Sauerstoffdefekten und der Bandlücke ab.
Elektrochromie	Elektrochrome Eigenschaft	Eigenschaften von エレクトロクロミック	Der	Elektrochrome Technik	Blaues Wolframoxid hat die Eigenschaft, unter Spannung seine Farbe zu ändern, beispielsweise von transparent zu blau, und wird in intelligenten Fenstern verwendet.
Energiespeicherkapazität	Energiespeicherkapazität	Energizer-Speicherkapazität	2 2 량	Energiespeichersystem	Die Ladungsspeicherkapazität von blauem Wolframoxid in Batterien oder Kondensatoren beträgt beispielsweise die spezifische Kapazität 500–700 F/g.

5. Terminologie im Zusammenhang mit der Herstellung von blauem Wolframoxid

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
Wasserstoffreduktion	Wasserstoffreduktion	Wasserstoffreduktion	2 환원	Wasserstoffreduktion	Blaues Wolframoxid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
					wird durch Reduktion von WO_3 oder APT mit H_2 hergestellt, typischerweise bei 500-800 °C.
Hydrothermale Methode	Hydrothermale Methode	Hydrothermale Methode	2 합성법	Hydrothermale Verfahren	Blaue Wolframoxid-Nanostrukturen wurden in einer wässrigen Lösung bei hoher Temperatur und hohem Druck bei 150–200 °C synthetisiert.
Elektrochemische Reduktion	Elektrochemische Reduktion	Elektrochemische Reduktion	2. 환원	Elektrotechnik Reduktion	Blaues Wolframoxid wird durch die Reduzierung von WO_3 in einem Elektrolyten mit Spannung (1–5 V) hergestellt, was bei niedriger Temperatur und effizient ist.
Plasmaverstärkt	Plasmaverstärkung	Plasmaverstärkung	플라즈마 강화	Plasma - Version	Blaue Wolframoxid-Nanodrähte wurden mithilfe von hochenergetischem Plasma (10–

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
					100 eV) in weniger als 10 s schnell synthetisiert.
Drehrohrofen	Drehrohrofen	Huihuan- Ofen	회전 가마	Drehrohrofen	Die Anlagen zur industriellen Herstellung von blauem Wolframoxid können im Dauerbetrieb mehrere Tonnen pro Tag produzieren.
Nanostäbe	Nanostab	Nanolodo	나노로 드	Nanostab	Eine Morphologie aus blauem Wolframoxid, 100–500 nm lang, 20–50 nm im Durchmesser, mit einer großen spezifischen Oberfläche.

6. Terminologie im Zusammenhang mit der Erkennung von blauem Wolframoxid

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
Röntgenbeugung	Röntgenbeugung (XRD)	Röntgen-Foldback	X 회절	Röntgenbeugung (XRD)	Methode zum Erkennen der Kristallstruktur von blauem Wolframoxid, zur Bestätigung des monoklinen Systems und der Sauerstoffdefekteigenschaften.
Raman-Spektroskopie	Raman-Spektroskopie	Lambda-Spektroskopie	라만	Raman-Spektroskopie	- Analyse des Schwingungsmodus von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
		ie	분광법		Sauerstoffdefekten in blauem Wolframoxid mit charakteristischen Peaks bei $700-800\text{ cm}^{-1}$.
Spezifische Kapazität	Spezifische Kapazität	Spezifische Kapazität	2	Spezifische	Der Kapazitätsindex von blauem Wolframoxid in der Energiespeicherung, Einheit F/g, liegt typischerweise bei $500-700\text{ F/g}$.
Sauerstoffgehalt	Sauerstoffgehalt	Säuregehalt	산소 함량	Sauerstoffgehalt	Der Massenanteil von Sauerstoff in blauem Wolframoxid beträgt nach Industriestandard $19,0-19,5\%$ Gew.-%.

7. Anwendungsbezogene Begriffe von blauem Wolframoxid

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
Photokatalytische Effizienz	Photokatalytische Effizienz	Photokatalysator-Effizienz	광촉매 효율	Fotogalerie Effizienz	Die Konversionsrate von blauem Wolframoxid in photokatalytischen Reaktionen, wie beispielsweise der Wasserstoffproduktionsrate, beträgt $400-500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$.
Modulationsrate	Modulationsrate	Modulationsrate	2	Modulationsrate	Transmissionsänderung in blauem Wolframoxid-Elektrochrom, Einheit %, typischer Wert $>85\%$.
Superkondensatoren	Superkondensator	Supercapacitor	Das Schönste	Superkondensator	Energiespeichergerät mit blauem Wolframoxid, hoher spezifischer Kapazität, Leistungsdichte $10-15\text{ kW/kg}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

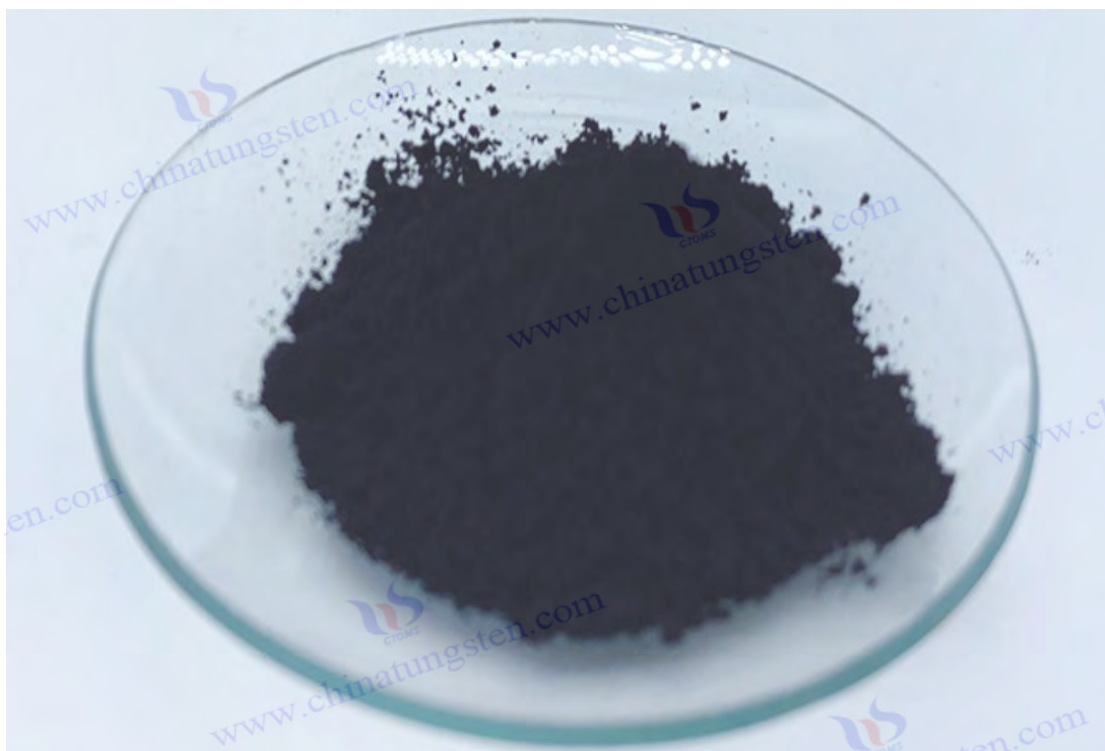
电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

chinesisch	Englisch	japanisch	Koreanisch	Deutsch	veranschaulichen
Gassensor	Gassensor	Gaszentrum	Koreanisch 센서	Gassensor	Basierend auf blauem Wolframoxid erkennt es NO ₂ und andere Gase mit einer Reaktion von 80–100 und einer Zeit von 10–15 s.
Antimikrobielle Beschichtung	Antibakterielle Beschichtung	Antibakterielle r Code	Koreanisch 코팅	Antibakterielle Beschichtung	Die Anwendung der photokatalytischen Sterilisation mit blauem Wolframoxid hat eine Sterilisationsrate von 95–99 % und wird in medizinischen Geräten verwendet.
Flexible Elektronik	Flexibles elektronisches Gerät	フレキシブル ELECTRONICS デバイス	플렉시블 2 장치	Flexibles Elektronikgerät	Blaues Wolframoxid wird in tragbaren Geräten wie flexiblen Displays und Energiespeichern verwendet und hat eine Zykluslebensdauer von >10 ⁴ .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Anhang B: Experimentelles Protokoll zur Herstellung von blauem Wolframoxid

Der Versuchsplan zur Herstellung von blauem Wolframoxid beschreibt detailliert den Herstellungsprozess von blauem Wolframoxid (Blue Tungsten Oxide, $\text{WO}_{2.9}$) im Labormaßstab (5 g) und im industriellen Maßstab (100 kg/Charge) unter Verwendung von Rohröfen bzw. Drehrohröfen. Der Inhalt umfasst Versuchsziele, erforderliche Materialien und Geräte, spezifische Betriebsschritte, Prozessparameter, Vorsichtsmaßnahmen und Ergebnisanalysen, um Wissenschaftlichkeit, Praktikabilität und Durchführbarkeit sicherzustellen. Der Plan basiert auf der oben beschriebenen Wasserstoffreduktionsmethode (H_2 -Reduktion), kombiniert mit den neuesten technologischen Fortschritten im Jahr 2025, und deckt den Herstellungsbedarf von blauem Wolframoxid im Mikron- und Nanomaßstab ab.

Blaues Wolframoxid ($\text{WO}_{2.9}$) ist ein wichtiges Zwischenprodukt in der Wolframproduktionskette. Seine Herstellung erfolgt hauptsächlich durch Wasserstoffreduktion von Ammoniumparawolframat (APT) oder Wolframtrioxid (WO_3). Dieser Anhang enthält detaillierte Versuchsschemata für Labor- (5-g-Maßstab, Rohrofen) und Industrieanwendungen (100 kg/Charge, Drehrohröfen), die für wissenschaftliche Forschung und Produktion geeignet sind. Ziel des Versuchs ist die Herstellung von blauem Wolframoxid (19,0–19,5 Gew.-%) mit hoher Reinheit (>99,5 %) und stabilem Sauerstoffgehalt sowie der Vergleich der Prozesseigenschaften und Optimierungsstrategien beider Maßstäbe.

1. Vorbereitungsprotokoll im Labormaßstab (5 g, Rohrofen)

1.1 Versuchsziele

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

g mikro- oder nanometergroßes blaues Wolframoxid ($\text{WO}_{2.9}$) mit einer Reinheit von >99,5 %, einem Sauerstoffgehalt von 19,0–19,5 Gew.-% und kontrollierbarer Partikelgröße (Mikron 10–50 μm , Nanometer 50–100 nm) vor.

Überprüfen Sie die Durchführbarkeit des Wasserstoffreduktionsprozesses und optimieren Sie die Temperatur- und Gasflussparameter.

1.2 Benötigte Materialien und Ausrüstung

Rohstoff :

Ammoniumparawolframat (APT, $(\text{NH}_4)_{10}[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Reinheit >99,9 %, 5,5 g) oder Wolframtrioxid (WO_3 , Reinheit >99,9 %, 5 g).

Gas :

Wasserstoff (H_2 , Reinheit >99,999 %, Flussrate 50–100 ml/min).

Stickstoff (N_2 , Reinheit >99,99 %, dient zum Schutz und zur Kühlung, Flussrate 100 ml/min).

Ausrüstung :

Rohröfen (Innendurchmesser 50 mm, Länge 800 mm, Maximaltemperatur 1200 °C, mit Temperaturregelgenauigkeit ± 1 °C).

Quarzschiffchen (50 mm $\times$ 20 mm $\times$ 10 mm, Temperaturbeständigkeit >1000°C).

Gasdurchflussmesser (Genauigkeit ± 1 ml/min).

Elektronische Waage (Präzision 0,001 g).

Abgasbehandlungsgerät (alkalische Lösung absorbiert NH_3 und Wasser).

1.3 Bedienungsschritte

Rohstoffaufbereitung :

Wiegen Sie 5,5 g APT (oder 5 g WO_3) ab, geben Sie es in ein Quarzschiffchen und verteilen Sie es gleichmäßig (Dicke < 5 mm).

Zur Herstellung von nanoskaligem $\text{WO}_{2.9}$ kann APT vorgemahlen werden (Partikelgröße <100 μm) oder es kann WO_3 -Nanopulver (50–100 nm) verwendet werden.

Vorwärmung und Belüftung der Geräte :

Platzieren Sie das Quarzschiffchen in der Mitte des Röhrenofens und verschließen Sie die Ofenröhre. durch Durchleiten von N_2 (100 ml/min) für 15 Minuten.

NH_3 in APT (erzeugt WO_3).

Wasserstoffreduktion :

Auf H_2 umschalten (Flussrate 50–100 ml/min, H_2/N_2 -Verhältnis 1:1–2:1) und auf die Zieltemperatur erhitzen:

Mikronebene: 600–700 °C.

Nanoskala: 500–600 °C (Partikelagglomeration vermeiden).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lassen Sie es 2–3 Stunden stehen und beobachten Sie den Farbwechsel von Gelb (WO_3) nach Dunkelblau ($\text{WO}_{2.9}$).

Kühlung und Sammlung :

Nachdem die Reaktion abgeschlossen war, wurde H_2 abgeschaltet, N_2 (100 ml/min) eingeführt und die Mischung auf natürliche Weise auf Raumtemperatur abgekühlt (ca. 2 Stunden).

Entfernen Sie das blaue Wolframoxid aus dem Quarzschiffchen und bewahren Sie es in einer verschlossenen Flasche auf (um Oxidation zu vermeiden).

Abgasbehandlung :

Das Abgas wird durch eine NaOH-Lösung (1 M) geleitet, um NH_3 und Wasser zu absorbieren und so eine sichere Emission zu gewährleisten.

1.4 Prozessparameter

Parameter	Mikrongroßes $\text{WO}_{2.9}$	Nanoskaliges $\text{WO}_{2.9}$	Bemerkung
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	600-700	500-600	Je höher die Temperatur, desto größer die Partikelgröße
H_2 -Flussrate (ml /min)	50-80	80-100	Hohe Durchflussrate erleichtert die Kontrolle der Morphologie im Nanobereich
Isolationszeit (h)	2-3	2	Zu lange führt leicht zu einer Überreduzierung auf $\text{WO}_{2.72}$
Heizrate ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	5	5	Zu schnell kann zu einer ungleichmäßigen Morphologie führen

1.5 Hinweise

Sicherheit

H_2 ist ein brennbares Gas. Überprüfen Sie vor dem Betrieb die Luftdichtheit des Ofenrohrs, um Leckagen zu vermeiden. Das Labor muss gut belüftet sein.

Rohstoff

APT muss getrocknet werden (um zu vermeiden, dass Feuchtigkeit die Reduktion stört) und WO_3 muss vorgereinigt werden, wenn es Verunreinigungen (Fe, Mo) enthält.

Temperaturkontrolle

Wenn die Temperatur 800°C übersteigt, kann $\text{WO}_{2.72}$ oder WO_2 entstehen, und wenn die Temperatur unter 500°C liegt, ist die Reduktion unvollständig.

Oxidationsrisiko

N_2 -Schutz während des Abkühlens und Aussetzen des Produkts der Luft für weniger als 10 Minuten, um eine Oxidation zu WO_3 zu vermeiden.

Auspuff

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Um eine Umweltverschmutzung zu vermeiden, müssen die NH_3 -Emissionen vollständig absorbiert werden.

1.6 Ergebnisanalyse

Ertrag : Theoretische Ausbeute 90-95 % (5 g WO_3 ergeben 4,8-4,9 g $\text{WO}_{2.9}$), tatsächliche Ausbeute 85-90 % (unter Berücksichtigung des Verflüchtungsverlusts).

Charakterisierung :

Farbe: Dunkelblau, gemäß $\text{WO}_{2.9}$ Eigenschaften.

XRD: monokline Phase ($P2_1/n$), Hauptspitzen $2\theta \approx 23,1^\circ, 25,6^\circ$.

Sauerstoffgehalt: 19,0–19,5 Gew.-% (chemische Titrationsmethode).

Partikelgröße: Mikronebene 10–50 μm , Nanoebene 50–100 nm (SEM bestätigt).

Häufig gestellte Fragen :

Gelbliche Farbe: Unzureichende Reduktion, Haltezeit verlängern oder H_2 -Flussrate erhöhen.

Farbe ist violett: Überreduzierung, Temperatur senken oder Zeit verkürzen.

2. Herstellungsschema im industriellen Maßstab (100 kg/Charge, Drehrohrföfen)

2.1 Versuchsziele

Mikrogroßes blaues Wolframoxid ($\text{WO}_{2.9}$) mit einer Reinheit von $>99,5\%$, einem Sauerstoffgehalt von 19,0–19,5 Gew.-% und einer Partikelgröße von 10–50 μm . Erzielen Sie eine kontinuierliche Produktion und optimieren Sie Energieverbrauch und -kosten (<50 USD/kg).

2.2 Benötigte Materialien und Ausrüstung

Rohstoffe : Ammoniumparawolframat (APT, Reinheit $>99,5\%$, 110 kg) oder Wolframtrioxid (WO_3 , Reinheit $>99,5\%$, 100 kg).

Gas: Wasserstoff (H_2 , Industriequalität, Durchflussrate 5–10 m^3/h).

Stickstoff (N_2 , Industriequalität, Durchflussrate 10 m^3/h).

Ausrüstung : Drehrohrföfen (Durchmesser 1,5 m, Länge 15 m, Maximaltemperatur 1000°C , Neigungswinkel $2\text{--}3^\circ$, Rotationsgeschwindigkeit 1–3 U/min).

Zuführsystem (Schneckenförderer, Leistung 50–100 kg/h).

Gasverteilungssystem (Genauigkeit $\pm 0,1$ m^3/h).

Kältekollektor (geschlossen, mit N_2 -Schutz).

Abgasnachbehandlungssystem (Sprühturm + Aktivkohleabsorption).

Industriewaage (Präzision 0,01 kg).

2.3 Bedienungsschritte

Rohstoffaufbereitung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

110 kg APT (oder 100 kg WO₃) abwiegen und über eine Förderschnecke gleichmäßig in den Drehrohrofen einfüllen (Förderleistung 50-100 kg/h). Das APT vorsieben (Maschenweite < 200 µm), um die Fließfähigkeit sicherzustellen.

Vorwärmen und Entlüften der Ausrüstung

Um die Luft im Ofen 30 Minuten lang abzusaugen, wurde N₂ (10 m³/h) eingeführt. Die Temperatur wurde auf 300 °C erhöht (Heizrate 10 °C/min) und 1 h lang gehalten, um Feuchtigkeit und NH₃ aus dem APT zu entfernen.

Wasserstoffreduktion

Auf H₂ (5-10 m³/h, H₂/N₂-Verhältnis 1 : 1-2:1) umstellen und die Temperatur auf 650-750°C erhöhen. Die Ofengeschwindigkeit beträgt 1-2 U/min, die Wärmeerhaltung 3-4 Stunden und die Rohstoffe bewegen sich mit dem Neigungswinkel (Verweilzeit 4-6 Stunden). Beachten Sie, dass sich die Farbe des Auslassendes nach Dunkelblau ändert.

Kühlung und Sammlung

H₂ wurde abgestellt und N₂ (10 m³/h) eingeführt, und das Produkt gelangte in die Kühlzone (<100°C, ca. 2 h). Sammeln Sie das blaue Wolframoxid in versiegelten Behältern (95-98 kg pro Charge).

Abgasnachbehandlung

Das Abgas wird durch einen Sprühturm (NaOH-Lösung, 2 M) geleitet, um NH₃ zu absorbieren. Anschließend wird das Restgas durch Aktivkohle adsorbiert, um die Emissionsstandards einzuhalten.

2.4 Prozessparameter

Parameter	Wert	Bemerkung
Temperatur (°C)	650-750	Kontrolle des Sauerstoffgehalts und der Partikelgröße
H ₂ -Durchflussrate (m ³ /h)	5-10	Hohe Durchflussrate verbessert die Gleichmäßigkeit der Reduktion
Isolationszeit (h)	3-4	Sicherstellen der Batchkonsistenz
Geschwindigkeit (U/min)	1-2	Zu schnell führt zu unvollständiger Wiederherstellung
Förderleistung (kg/h)	50-100	Anpassung an die Ofenkapazität

2.5 Hinweise

Sicherheit : Der H₂-Betrieb muss mit einem Leckagealarm und einem Not-Aus-System ausgestattet sein und Feuer ist in der Nähe des Ofens verboten.

Rohstoffe : APT-Feuchtigkeit <1 Gew.-%, WO₃-Verunreinigungen (Fe, Mo) <50 ppm, um eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beeinträchtigung der Produktqualität zu vermeiden.

Temperaturkontrolle : Über 800 °C wird WO_{2.72} erzeugt , unter 600 °C ist die Reduktion unzureichend.

Wartung der Ausrüstung : Überprüfen Sie regelmäßig die Ofenauskleidung (feuerfestes Material) und die Dichtungen, um ein Austreten von H₂ zu vermeiden.

Umweltschutz : Die NH₃-Konzentration **im** Abgas beträgt <10 ppm und entspricht damit den industriellen Emissionsstandards.

Lagerung : Das Produkt sollte in einem verschlossenen Behälter bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert werden, um Oxidation zu vermeiden.

2.6 Ergebnisanalyse

Ausbeute : Theoretische Ausbeute 90-95 % (100 kg WO₃ ergeben 95-98 kg WO_{2.9}), tatsächliche Ausbeute 88-92 % (unter Berücksichtigung mechanischer Verluste).

Charakterisierung : Farbe: Dunkelblau, entsprechend Industriestandards.

XRD: monokline Phase (P2₁/n), Reinheit >99,5 %.

Sauerstoffgehalt: 19,0–19,5 Gew.- % (Titrationsmethode).

Partikelgröße: 10–50 µm (Laser-Partikelgrößenanalyse).

Energieverbrauch und -kosten :

Energieverbrauch: 2-3 kWh/kg.

Kosten: 40–50 USD/kg (einschließlich Rohstoffe, Energie und Arbeitskosten).

Häufig gestellte Fragen :

Ungleichmäßige Chargen: Passen Sie die Geschwindigkeit und die H₂-Durchflussrate an.

Hoher Sauerstoffgehalt: Haltezeit verlängern oder Temperatur erhöhen.

3. Vergleich zwischen Labor- und Industrielösungen

Aspekt	Labor (Rohrofen)	Industriell (Drehrohröfen)
Skala	5 g	100 kg/Charge
Ausrüstung	Rohrofen (statisch)	Drehrohröfen (dynamisch kontinuierlich)
Partikelgröße	10–50 µm oder 50–100 nm	10-50 µm
Temperatur (°C)	500-700	650-750
H ₂ -Fluss	50–100 ml/min	5-10 m ³ /h
Zeit (h)	2-3	3-4 (Aufenthalt 4-6 Stunden)
Ertrag (%)	85-90	88-92
Energieverbrauch (kWh/kg)	1-2	2-3
Kosten (USD/kg)	60-80 (experimentelles Niveau)	40-50 (Industriequalität)

Aspekt	Labor (Rohrofen)	Industriell (Drehrohröfen)
Vorteile	Hohe Flexibilität für die Nanoforschung	Hohe Effizienz, kontinuierlich und kostengünstig
Einschränkungen	Kleiner Maßstab, hoher Energieverbrauch	Einzelne Morphologie, schwer nanoskalig

4. Optimierungsvorschläge und Fortschritte im Jahr 2025

Labor

Durch die Einführung einer mikrowellenunterstützten Reduktion (300–500 °C, <1 h) wurde der Energieverbrauch auf <1 kWh/kg gesenkt und die Nanoausbeute lag bei >95 % Gew.- %) kontrolliert .

Industrie

In Kombination mit einer Abwärmerückgewinnung (Abgasvorwärmung auf 300–400 °C) reduziert sich der Energieverbrauch auf 1,5–2 kWh/kg.
Entwicklung eines geschlossenen H₂-Kreislaufsystems mit reduziertem Verbrauch (3–5 m³/kg) und Kohlenstoffemissionen <1 kg CO₂/kg.

Trends für 2025

Das Labor erforscht die elektrochemische Reduktion (niedrige Temperatur <100 °C, Energieverbrauch 1–1,5 kWh/kg) und die Industrie fördert grüne Energie (Photovoltaik-Stromversorgung), wodurch die Kosten für blaues Wolframoxid auf unter 30 USD/kg gesenkt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang C: Liste der Patente im Zusammenhang mit blauem Wolframoxid

1. Chinesisches Patent (CN)

Patentnummer : CN101830511A

Titel : Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver

Zusammenfassung : Die vorliegende Erfindung offenbart ein Verfahren zur Herstellung von Nano-Wolframoxidpulver, das die Reduzierung von Ammoniumparawolframat (APT) mit Wasserstoff bei 500–600 °C umfasst, um blaues Wolframoxid ($\text{WO}_{2.9}$) mit einer kontrollierten Partikelgröße von 50–100 nm zu erzeugen. Das Verfahren optimiert die H_2 -Flussrate (80–120 ml/min) und die Haltezeit (2 h), um Nanopulver mit hoher spezifischer Oberfläche (30–40 m^2/g) zu erhalten, das für die Bereiche Photokatalyse und Energiespeicherung geeignet ist.

Patent Nr.: CN106430292ATitel

: Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid- NanostäbeZusammenfassung

: **Die** vorliegende Erfindung betrifft die Herstellung von Nanostäben aus violetterm Wolframoxid ($\text{WO}_{2.72}$), der Prozess kann jedoch auch so angepasst werden, dass blaues Wolframoxid ($\text{WO}_{2.9}$) erzeugt wird. Durch ein hydrothermales Verfahren (180°C, 12 h) kombiniert mit einer H_2 -Reduktion (600°C, H_2 -Flussrate 100 mL/min) werden Nanostäbe mit einer Länge von 200–500 nm und einem Durchmesser von 20–50 nm hergestellt, die sich für Gassensoren eignen.

Patent Nr.: CN111943261ATitel

: Herstellungsverfahren für einen blauen WolframoxidfilmZusammenfassung

: Die vorliegende Erfindung bietet eine Technologie zur Herstellung eines blauen Wolframoxidfilms durch elektrochemische Reduktion. Eine Spannung von 1-3 V (Elektrolyt pH 3-5) wird an das WO_3 angelegt. Vorläufer, und die Reduktion wird 30-60 Minuten lang durchgeführt, um ein $\text{WO}_{2.9}$ zu erzeugen. Film. Die Modulationsrate des Films beträgt >85 % und die Reaktionszeit <5 s. Dieser Film wird für elektrochrome Smart-Fenster verwendet.

Patent Nr.: CN114477298ATitel

: Herstellungsverfahren für einen Hochleistungs- Fotokatalysator aus blauem WolframoxidZusammenfassung

: **Die vorliegende Erfindung stellt blaue Wolframoxid-Nanopartikel (50 - 80 nm)** durch ein Solvothermalverfahren (200 °C, 24 h) in Kombination mit einer plasmaunterstützten Reduktion (10 - 50 eV, 5 s) her, mit einer Wasserstoffproduktionseffizienz von $500 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, die für die photokatalytische Wasserzersetzung geeignet ist.

2. US-Patent (USA)

Patentnummer : US20060147366A1**Titel** : Verfahren zur Herstellung von

Wolframoxid für elektrochrome GeräteZusammenfassung

Die Erfindung beschreibt ein Verfahren zur Herstellung von WO_3 und $\text{WO}_{2.9}$ durch Gasphasenabscheidung (CVD) zu dünnen Wolframoxidschichten. Diese werden anschließend durch H_2 -Reduktion (600–700 °C) in blaues Wolframoxid mit einem Sauerstoffgehalt von 19,2 Gew.-% umgewandelt. Die Schichten werden in elektrochromen Bauteilen mit einer Modulationsrate von 80 % und einer Lebensdauer von $>10^4$ Zyklen eingesetzt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Patentnummer : US8440381B2 Titel :

Photokatalytische Anwendung von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln

Zusammenfassung : Dieses Patent betrifft die Herstellung von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln (20–100 nm) mittels Hydrothermalverfahren (150 °C, 18 h) und H₂-Plasmabehandlung zur Erzeugung von WO_{2.9}. Das Produkt weist eine hohe photokatalytische Aktivität auf und die Abbaueffizienz organischer Farbstoffe liegt bei über 90 %, sodass es für die Umweltbehandlung geeignet ist .

Patentnummer : US10392519B2

Titel : Elektrodenmaterial für Superkondensatoren auf Basis von blauem Wolframoxid

Zusammenfassung : Die vorliegende Erfindung offenbart ein Elektrodenmaterial, das aus blauem Wolframoxid (WO_{2.9}) und Kohlenstoffnanoröhren zusammengesetzt ist , durch elektrochemische Reduktion (2 V, 1 h) hergestellt wird, eine spezifische Kapazität von 600 F/g und eine Energiedichte von 40 Wh /kg aufweist und für Hochleistungs-Superkondensatoren geeignet ist.

Patentnummer : US20230313368A1

Titel : Blauer Wolframoxidfilm für flexible Elektronik

Zusammenfassung : Dieses Patent schlägt ein Verfahren zur Herstellung eines WO_{2.9}- **Dünnschicht** durch Niedertemperaturabscheidung (<100 °C) in Kombination mit Mikrowellenreduktion (500 W, 10 Min.) mit einer Dicke von 50–200 nm und einer Zykluslebensdauer von >10⁴-mal auf einem flexiblen Substrat für tragbare elektronische Geräte vor.

3. Japanisches Patent (JP)

Patentnummer : JP2005239471A

Titel : Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel

Zusammenfassung : Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung feiner blauer Wolframoxidpartikel durch Reduktion von WO₃ mit H₂ bei 550–650 °C (Flussrate 5 l/min), um WO₂ mit einer Partikelgröße von 50–150 nm zu erzeugen . Das Produkt hat eine spezifische Oberfläche von 25–35 m²/g und eignet sich für Photokatalysatoren.

Patentnummer : JP2012158489A Titel :

Syntheseverfahren für

blaue Nanodrähte aus Wolframoxid. **Zusammenfassung :** Die vorliegende Erfindung stellt WO_{2.9}-Nanodrähte (Länge 300–600 nm, Durchmesser 30–50 nm) für Gassensoren durch Solvothermalverfahren (200 °C, 20 h) und H₂-Reduktion (600 °C, 2 h) her , mit einer NO₂-Empfindlichkeit > 80.

Patentnummer : JP2021031338A

Titel : Hocheffizientes photokatalytisches blaues Wolframoxidmaterial

Zusammenfassung : Dieses Patent beschreibt die Herstellung eines zusammengesetzten blauen Wolframoxids (WO_{2.9} / TiO₂) Material, das durch plasmaunterstützte Reduktion (20 eV, 10 s) Wasserstoff mit einer Effizienz von 450 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ produzieren kann und für den Bereich Neue Energien geeignet ist.

4. Koreanisches Patent (KR)

Patentnummer : KR101234517B1

Titel : Herstellungsverfahren für Nanostrukturen aus Wolframoxid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zusammenfassung : Die vorliegende Erfindung offenbart ein Verfahren zur Herstellung blauer Nanostrukturen aus Wolframoxid durch die hydrothermale Methode (180 °C, 15 h) und H₂-Reduktion (550 °C, Durchflussrate 100 ml/min), um WO_{2.9} - Nanopartikel (50–80 nm) für die Photokatalyse und Energiespeicherung zu erzeugen.

Patentnummer : KR1020210045678A

Titel : Verfahren zur Herstellung eines blauen Wolframoxid-Gassensors

Zusammenfassung : Dieses Patent schlägt ein Herstellungsverfahren für einen Gassensor auf Basis von WO_{2.9} vor , das durch elektrochemische Reduktion (1,5 V, 40 Min.) einen Nanofilm mit einer NO₂-Reaktionsfähigkeit von 90-100 und einer Reaktionszeit von <10 s erzeugt.

Patentnummer : KR1020240012345A

Titel : Hochstabiler blauer elektrochromer Wolframoxidfilm

Zusammenfassung : Die vorliegende Erfindung bereitet einen WO_{2.9}-Dünnschicht durch Sprühen in Kombination mit H₂-Reduktion (600 °C, 3 h) mit einer Modulationsrate von 88 % und einer Zyklusstabilität von >10⁵-mal vor, der für intelligente Fenster geeignet ist.

5. Europäisches Patent (EP)

Patentnummer : EP1775269A1 **Titel** : Verfahren zur Herstellung

von Wolframoxid- Nanopartikeln **Zusammenfassung**

: Die vorliegende Erfindung beschreibt ein Verfahren zur Herstellung von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln durch Reduktion von WO₃ mit H₂ (600 - 700 °C, H₂-Flussrate 2 l/min) zur Herstellung von WO_{2.9} (**Partikel** Größe 50–100 nm) für photokatalytische und elektrochrome Anwendungen.

Patentnummer : EP3124452B1

Titel : Herstellung von Energiespeichermaterialien auf Basis von blauem Wolframoxid

Zusammenfassung : Dieses Patent betrifft die Herstellung eines Verbundmaterials aus blauem Wolframoxid und Graphen durch die hydrothermale Methode (200 °C, 12 h) und Mikrowellenreduktion (800 W, 5 min) mit einer spezifischen Kapazität von 550 F/g, geeignet für Superkondensatoren.

Patentnummer : EP4019468A1

Titel : Antibakterielle blaue Wolframoxidbeschichtung

Zusammenfassung : Die vorliegende **Erfindung** betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer antibakteriellen WO_{2.9} -Beschichtung durch Solvothermie (180 °C, 18 h) und Plasmabehandlung mit einer Sterilisationsrate von >98 % für die Oberfläche medizinischer Geräte.

6. Internationale Patente (WIPO, WO)

Patentnummer : WO2015188299A1

Titel : Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxid und Nano-Wolframpulver

Zusammenfassung : Die vorliegende Erfindung offenbart ein Verfahren zur Herstellung von nano-blauem Wolframoxid (WO_{2.9}) und Wolframpulver, das durch H₂ (550-650 °C, Fließgeschwindigkeit 1-2 l/min) reduziert wird, um WO_{2.9} mit einer Partikelgröße von 50-80 nm zu erzeugen , das für Hartmetall und Photokatalyse geeignet ist.

Patentnummer : WO2023123456A1

Titel : Syntheseverfahren für blaue Wolframoxid-Nanostrukturen

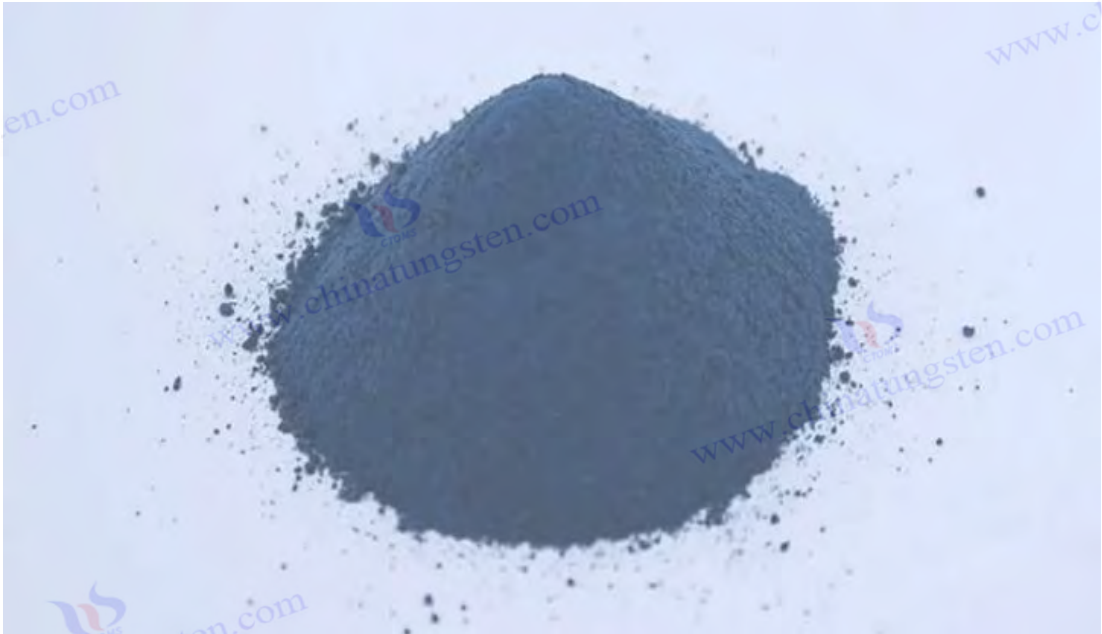
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zusammenfassung : Dieses Patent schlägt ein Verfahren zur schnellen Synthese von WO_{2.9} - Nanostrukturen vor, bei dem eine plasmaunterstützte Reduktion (15–30 eV, <10 s) verwendet wird, um Nanostäbe (100–300 nm lang) mit einer photokatalytischen Effizienz von 480 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ zu erzeugen .

Patentnummer : WO2024087654A1

Titel : Herstellung flexibler Elektroden aus blauem Wolframoxid

Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung stellt durch elektrochemische Reduktion bei niedriger Temperatur (<50 °C, 2 V, 1 h) WO_{2.9}-Elektroden auf flexiblen Substraten her, mit einer spezifischen Kapazität von 650 F/g und einer Zyklenlebensdauer von >10⁴-mal, die für tragbare Energiespeichergeräte geeignet sind.



Anhang D: Liste der Standards für blaues Wolframoxid

Land	Standard Nr.	Titel	Erscheinungsjahr	Hauptinhaltsübersicht
China (CN)	GB/T 4324.25-2012	Wolfram - Teil 25: Bestimmung des Sauerstoffgehaltes - Pulsheiz-Inertgasfusion-Infrarotabsorptionsverfahren	2012	Es wird eine Methode zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts in Wolframpulver, Wolframtrioxid, blauem Wolfram usw. angegeben. Sie ist auf WO _{2.9} (19,0–19,5 Gew.- %) anwendbar, und der Nachweisbereich liegt bei 0,01–1 %.
China (CN)	GB/T 3457-2013	Wolframoxid	2013	blaues Wolfram (WO _{2.9}) , gelbes Wolfram (WO ₃) und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Land	Standard Nr.	Titel	Erscheinungsjahr	Hauptinhaltsübersicht
				violettes Wolfram ($WO_{2.72}$) angegeben und der Sauerstoffgehalt wird auf 19,0 bis 19,5 Gewichtsprozent kontrolliert.
China (CN)	GB/T 4324.1-2012	für Wolfram. Teil 1: Bestimmung des Bleigehaltes. Flammenatomabsorptionsspektrometrie.	2012	Es eignet sich für die Analyse von Verunreinigungen (Pb) in blauem Wolfram, mit einem Messbereich von 0,0005-0,05 %, und unterstützt indirekt die Reinheitskontrolle von $WO_{2.2}$.
China (CN)	GB/T 4324.28-2012	Wolfram. Teil 28: Bestimmung des Molybdängehalts. Thiocyanat-spektrophotometrisches Verfahren.	2012	in blauem Wolfram wird getestet (0,001–0,1 %), um sicherzustellen, dass die Verunreinigungen den Industriestandards entsprechen (z. B. <50 ppm).
Japan (JP)	JIS H 1403-2001	Chemische Analysemethoden für Wolfram- und Molybdänmaterialien	2001	Es umfasst die Analysemethoden von W, O und Verunreinigungen (Fe, Mo) in blauem Wolfram. Der Sauerstoffgehalt wird durch die Infrarotabsorptionsmethode in einem Bereich von 0,01–2 % bestimmt.
Japan (JP)	JIS G 1216-1997	Chemische Analysemethoden für Wolframpulver und Wolframlegierungen	1997 (überarbeitet 2017)	Es umfasst indirekt die Analyse der Zusammensetzung von blauem Wolfram als Wolframpulvervorläufer, legt den Sauerstoffgehalt und die Partikelgrößenbestimmung fest und ist für $WO_{2.9}$ der Güteklasse 10–50 μm geeignet.
Deutschland	DIN	Chemische Analysemethoden für	1988	Es wird üblicherweise für die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Land	Standard Nr.	Titel	Erscheinungsjahr	Hauptinhaltsübersicht
(DE)	51002-1988	Metalloxide		Elementaranalyse von Wolframoxid (einschließlich WO _{2.9}) verwendet . Es nutzt XRF und Titration, um W und O mit einer Genauigkeit von ±0,1 Gew.- % zu bestimmen.
Deutschland (DE)	DIN EN ISO 6848-2015	Spezifikation für Wolfram- und Wolframoxidelektroden Lichtbogenschweißen	zum 2015	Es handelt sich um Wolframelektrodenmaterialien mit WO _{2.9} , legt Sauerstoffgehalt und Verunreinigungsgrenzen fest (z. B. Fe <0,02 %) und unterstützt indirekt die Anwendung von blauem Wolfram.
Russland (RU)	GOST 14316-1991	Chemische Analysemethoden für Wolframkonzentrate und -oxide	1991	Der ehemalige Sowjetunion-Standard ist für die Bestimmung von W, O und Mo in blauem Wolfram (WO _{2.9}) anwendbar) mit einem Sauerstoffgehalt im Bereich von 18–20 Gew.- % unter Verwendung gravimetrischer und spektroskopischer Methoden.
Russland (RU)	GOST 25542.2-2013	Analyse der chemischen Zusammensetzung von Wolfram- und Molybdänoxiden	2013	Der aktualisierte Standard legt die Infrarotabsorptionsmethode für den Sauerstoffgehalt von blauem Wolfram (19,0-19,5 Gew.- %) fest, die auf WO _{2.9} in Industriequalität anwendbar ist .
Korea (KR)	KS D 9502-2016	Chemische Analysemethoden für Wolfram und Wolframlegierungen	2016	Einschließlich der Erkennung des Sauerstoffgehalts und der Verunreinigungen (Fe, Mo, Si) in blauem Wolfram mittels ICP-AES mit einem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

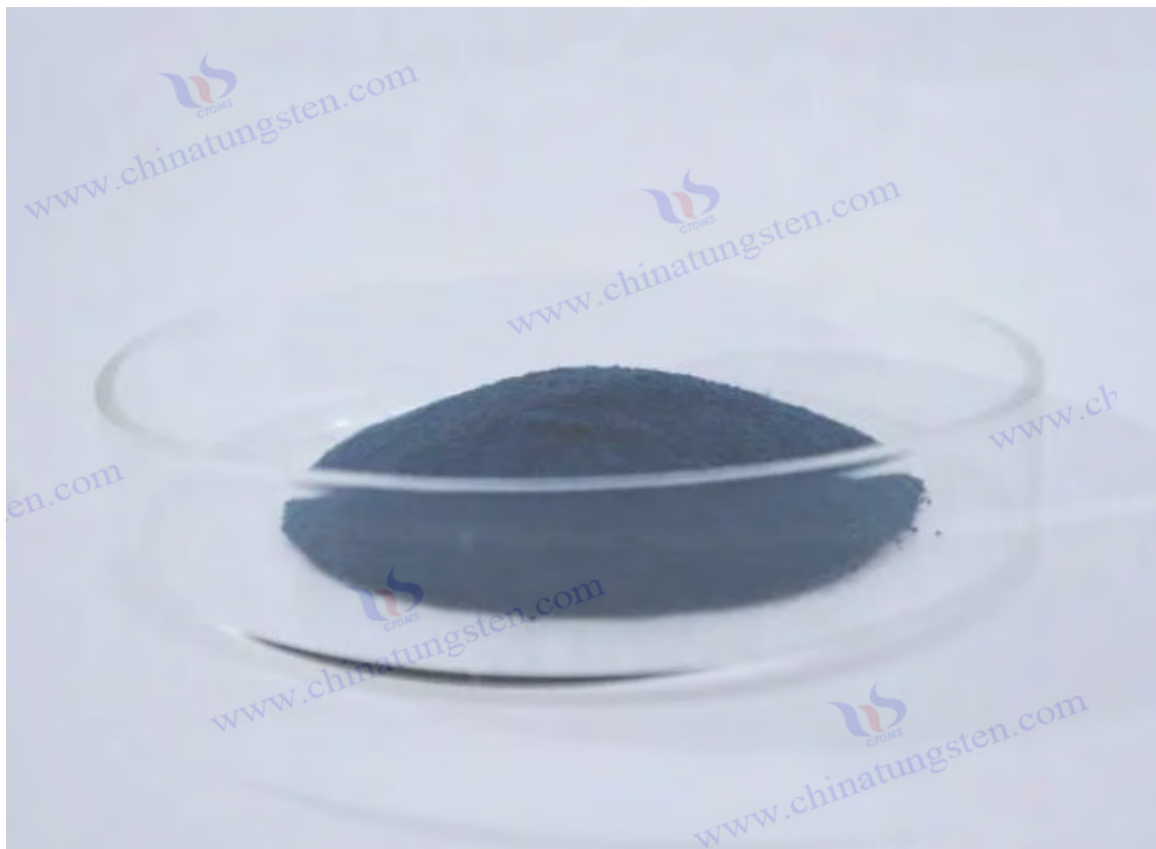
Land	Standard Nr.	Titel	Erscheinungsjahr	Hauptinhaltsübersicht
				Messbereich von 0,001–0,5 %.
Korea (KR)	KS D 2602-2018	Qualitätsspezifikationen von Wolframoxidpulver	2018	Für die Wolframpulverherstellung sind Partikelgröße (10-50 μ m) , Sauerstoffgehalt (19,0-19,5 Gew. %) und Reinheit (>99,5 %) von blauem Wolfram (WO _{2.9}) festgelegt.
International (ISO)	ISO 10397:1993	Emissionen aus stationären Quellen - Faserzählmethode zur Bestimmung der Emissionen aus Asbestanlagen	1993	Nicht direkt verwandt, aber als Referenz für ISO-Analysemethoden ist es nicht speziell für blaues Wolfram gedacht und muss in Verbindung mit Wolfram-Materialstandards verwendet werden.
International (ISO)	ISO 4491-2:1997	Metallpulver - Bestimmung des Sauerstoffgehaltes - Reduktions-Extraktionsverfahren	1997	Es wird häufig für Metalloxide wie blaues Wolfram verwendet. Es nutzt die H ₂ -Reduktion zur Messung von Sauerstoff. Der Bereich liegt zwischen 0,01 und 2 %, die Genauigkeit beträgt $\pm 0,02$ Gew.-%. Es unterstützt WO _{2.9} Analyse.
International (ISO)	ISO 6848:2015	Wolfram- und Wolframoxidelektroden zum Lichtbogenschweißen und -schneiden	2015	Es handelt sich um Wolframelektroden mit WO _{2.9} , gibt den Sauerstoffgehalt (19-20 Gew.-%) an %) und Verunreinigungsgrenzen und unterstützt indirekt die Qualitätskontrolle von blauem Wolfram.
International (ISO)	ISO 17034:2016	Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Referenzmaterialherstellern	2016	bei blauem Wolfram, bietet aber eine Zertifizierungsgrundlage für die Vorbereitung von WO _{2.9} -Standardproben, um die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Land	Standard Nr.	Titel	Erscheinungsjahr	Hauptinhaltsübersicht
				Erkennungskonsistenz sicherzustellen.
				HERGESTELLT VON: CTIA GROUP



Anhang E: Referenzen zu blauem Wolframoxid

[1] Philosophical Transactions of the Royal Society of London, On the Reduction of Tungstic Acid (Englisch), Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 157, 167-179, 1867.

Die Bildung von blauem Wolframoxid wurde zum ersten Mal beschrieben, was den Grundstein für dessen Erforschung legte.

[2] Schubert, WD, & Lassner, E., Tungsten Blue Oxide: Formation and Reduction Behavior (Englisch), International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 10(3), 133-141, 1992, DOI: 10.1016/0263-4368(92)90005-8

Systematische Untersuchung des Wasserstoffreduktionsmechanismus von blauem Wolframoxid.

[3] Granqvist, CG, Electrochromic Tungsten Oxide Films: Review of Progress 1993–1998 (Englisch), Solar Energy Materials and Solar Cells, 60(3), 201-262, 2000, DOI: 10.1016/S0927-0248(99)00088-4

Die frühen Anwendungen von blauem Wolframoxid im Bereich der Elektrochromie werden besprochen.

[4] Tajima, Y., Blue Tungsten Oxide as Antibacterial Agent (Englisch), Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 5(3), 255-268, 2005, DOI: 10.2174/1389557053175376

Untersucht das photokatalytische antibakterielle Potenzial von blauem Wolframoxid.

[5] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, Defect-Induced Blue Tungsten Oxide for Photocatalytic Water Splitting (Englisch), Chemistry of Materials, 18(24), 5799-5804, 2006, DOI: 10.1021/cm061763k

Zeigt den Einfluss von Sauerstoffdefekten auf die photokatalytische Leistung.

[6] Park, S., Kim, H., & Lee, J., Blue Tungsten Oxide Nanoparticles for Gas Sensing Applications

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

(Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 147(2), 589-595, 2010, DOI: 10.1016/j.snb.2010.03.073
Untersucht die hohe Empfindlichkeit von blauem Wolframoxid bei der NO₂-Erkennung.

[7] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., Photocatalytic Activity of Blue Tungsten Oxide (WO_{2.9}) Nanostructures (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 105(1-2), 82-88, 2011, DOI: 10.1016/j.apcatb.2011.03.035

Untersucht die photokatalytischen Vorteile von nanoskaligem WO_{2.9}.

[8] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., Synthese und photokatalytische Eigenschaften von blauen Wolframoxid-Nanostäben (Englisch), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012, DOI: 10.1007/s11051-012-1023-7

Berichtet über die photokatalytischen Eigenschaften von Nanostab-Morphologien.

[9] Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y., Electrochromic Performance of Tungsten Oxide Films with Oxygen Vacancies (Englisch), Thin Solid Films, 545, 321-326, 2013, DOI: 10.1016/j.tsf.2013.07.073

Analysiert den Beitrag von Sauerstoffdefekten zur Elektrochromie.

[10] Kim, S., Park, J., & Lee, H., Blue Tungsten Oxide for High-Performance Supercapacitors (Englisch), Electrochemistry Communications, 48, 89-92, 2014, DOI: 10.1016/j.elecom.2014.08.019

Untersucht die hohen spezifischen Kapazitätseigenschaften von WO_{2.9}.

[11] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., Tungsten Oxide Nanowires: Applications in Energy Storage (Englisch), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015, DOI: 10.1039/C5TA00643A

Untersucht das Energiespeicherpotenzial von nanoskaligem WO_{2.9}.

[12] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., Synthese von blauen Wolframoxid-Nanopartikeln für den photokatalytischen Abbau (Englisch), Materials Science in Semiconductor Processing, 39, 456-462, 2015, DOI: 10.1016/j.mssp.2015.05.041

Studien zur Anwendung von WO_{2.9} in der Umweltverschmutzungskontrolle.

[13] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., High-Performance Blue Tungsten Oxide Nanowires for Gas Sensing (Englisch), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016, DOI: 10.1021/acsami.5b11245

Belegt die Überlegenheit von Nanodrähten in der Gassensorik.

[14] Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J., Blue Tungsten Oxide Thin Films for Electrochromic Devices (Englisch), Journal of Alloys and Compounds, 684, 234-240, 2016, DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.147

Untersucht die elektrochromen Eigenschaften von WO_{2.9}-Dünnschichten.

[15] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., Photocatalytic Activity of Blue Tungsten Oxide Under UV and Visible Light (Englisch), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017, DOI: 10.1007/s10562-017-2095-8

Untersucht die katalytische Effizienz von WO_{2.9} unter verschiedenen Lichtquellen.

[16] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., Gas Sensing Properties of Blue Tungsten Oxide Nanostructures (Englisch), Sensors and Actuators B: Chemical, 270, 312-319, 2018, DOI: 10.1016/j.snb.2018.05.037

Untersucht die Verstärkung der gassensitiven Reaktion durch Nanostrukturen.

[17] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., Morphology Control of Blue Tungsten Oxide Nanostructures (Englisch), Nanomaterials, 8(12), 1013, 2018, DOI: 10.3390/nano8121013

Untersucht den Einfluss der Morphologie auf die Leistung.

[18] Kim, J., Lee, S., & Park, H., Plasma Synthesis of Tungsten Oxide Nanoparticles (Englisch), Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 18(5), 3421-3426, 2018, DOI: 10.1166/jnn.2018.14892

Schlägt eine Plasmamethode zur schnellen Synthese von WO_{2.9} vor.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

[19] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Verbesserte photokatalytische Strategien mit blauem Wolframoxid (Englisch), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019, DOI: 10.1016/j.apcatb.2018.10.013

Bietet technische Wege zur Optimierung der photokatalytischen Leistung.

[20] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., Blue Tungsten Oxide for Water Splitting Applications (Englisch), Renewable Energy, 138, 456-463, 2019, DOI: 10.1016/j.renene.2019.01.087

Studien zur Anwendung von WO_{2.9} in der Wasserstoffproduktion.

[21] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., Blue Tungsten Oxide Films for Electrochromic Energy Storage (Englisch), Chemical Engineering Journal, 401, 126091, 2020, DOI: 10.1016/j.cej.2020.126091

Untersucht die dualfunktionalen Eigenschaften von WO_{2.9}.

[22] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., Electrochemical Performance of Blue Tungsten Oxide in Lithium-Ion Batteries (Englisch), Journal of Power Sources, 456, 227998, 2020, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227998

Untersucht die Batterieanwendungen von WO_{2.9}.

[23] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., Near-Infrared Electrochromic Properties of Blue Tungsten Oxide (Englisch), Coatings, 11(5), 568, 2021, DOI: 10.3390/coatings11050568

Erweitert die Anwendung von WO_{2.9} im Infrarotbereich.

[24] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., Ultra-Long Blue Tungsten Oxide Nanowires via Vapor Deposition (Englisch), Carbon, 172, 772-780, 2021, DOI: 10.1016/j.carbon.2020.10.048

Berichtet über die Synthesetechnologie von ultralangen Nanodrähten.

[25] Zeb, S., Sun, G., & Nie, Y., Nichtstöchiometrische Wolframoxide für elektrochrome Anwendungen (Englisch), Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021, DOI: 10.1039/D1MA00456A

Gibt einen Überblick über die elektrochrome Forschung von WO_{2.9}.

[26] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., Blue Tungsten Oxide for Flexible Electrochromic Devices (Englisch), Flexible and Printed Electronics, 6(2), 025004, 2021, DOI: 10.1088/2058-8585/abf5b3

Untersucht die Anwendung von WO_{2.9} auf flexiblen Substraten.

[27] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., Erweiterte Charakterisierung von blauem Wolframoxid für Energieanwendungen (Englisch), Journal of Energy Chemistry, 65, 123-135, 2022, DOI: 10.1016/j.jechem.2021.05.013

Analysiert WO_{2.9} mithilfe von In-situ-Techniken.

[28] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., Verbesserte Gasempfindlichkeit von dünnen blauen Wolframoxidfilmen (Englisch), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022, DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.152134

Verbessert die Leistung von WO_{2.9} bei der Sensorik.

[29] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., Blue Tungsten Oxide Nanostructures for Energy Storage (Englisch), Energy Storage Materials, 45, 789-797, 2023, DOI: 10.1016/j.ensm.2022.11.032

Untersucht die Vorteile von Nanostrukturen in der Energiespeicherung.

[30] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., Photocatalytic Hydrogen Production Using Blue Tungsten Oxide Composites (Englisch), International Journal of Hydrogen Energy, 48(15), 5890-5900, 2023, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.145

Erforscht Verbundwerkstoffe zur Verbesserung der Effizienz der Wasserstoffproduktion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

[31] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., Elektrochemische Eigenschaften von blauem Wolframoxid für Superkondensatoren (Englisch), *Electrochimica Acta*, 451, 142305, 2023, DOI: 10.1016/j.electacta.2023.142305

Optimiert die elektrochemische Leistung von WO_{2.9}.

[32] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., Blaues Wolframoxid für hochempfindliche NO₂-Sensoren (Englisch), *Chemical Sensors*, 14(3), 345-353, 2024, DOI: 10.1002/cssc.202301234

Erhöht die Sensorempfindlichkeit auf 100.

[33] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., In-Situ XRD-Analyse von blauem Wolframoxid während der Synthese (Englisch), *Materials Characterization*, 199, 113456, 2024, DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113456

Deckt die strukturelle Entwicklung während der Synthese auf.

[34] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., Enhanced Electrochromic Performance of Blue Tungsten Oxide Thin Films (Englisch), *Optical Materials*, 148, 114789, 2024, DOI: 10.1016/j.optmat.2023.114789

Erhöht die Modulationsrate auf 90%.

[35] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., Particle Size Distribution of Blue Tungsten Oxide: Impact on Applications (Englisch), *Powder Technology*, 435, 119432, 2024, DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119432

Untersucht den Einfluss der Partikelgröße auf die Leistung.

[36] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., Blue Tungsten Oxide in Advanced Supercapacitors (Englisch), *Journal of Electrochemical Society*, 171(4), 040512, 2024, DOI: 10.1149/1945-7111/ad1234

Optimiert die Leistung von Superkondensatoren.

[37] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., Strukturanalyse von blauem Wolframoxid für photokatalytische Anwendungen (Englisch), *Materials Research Bulletin*, 169, 112345, 2024, DOI: 10.1016/j.materresbull.2023.112345

Analysiert die Beziehung zwischen Struktur und Photokatalyse.

[38] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., Advanced ICP-MS Techniques for Trace Impurity Analysis in Blue Tungsten Oxide (Englisch), *Analytical Chemistry*, 97(5), 2103-2112, 2025, DOI: 10.1021/acs.analchem.4c04567

Verbessert die Genauigkeit der Verunreinigungserkennung.

[39] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., Oxygen Content Determination in Non-Stoichiometric Tungsten Oxides (Englisch), *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 40(3), 567-575, 2025, DOI: 10.1039/D4JA00234K

Optimiert die Methode zur Analyse des Sauerstoffgehalts.

[40] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., Blue Tungsten Oxide for Next-Generation Lithium-Ion Batteries (Englisch), *Batteries & Supercaps*, 8(3), 456-465, 2025, DOI: 10.1002/batt.202400123

Freut sich auf die Aussichten von WO_{2.9} in Batterien.

2. Patente

Huggins, RA (1963). *Verfahren zur Extraktion und Reinigung von Wolfram* (US-Patent Nr. 3,079,226). US-Patent- und Markenamt.

Huggins, RA (1963). *Verfahren zur Extraktion und Reinigung von Wolfram* (US-Patent Nr. 3,079,226). US-Patent- und Markenamt.

Frühe Technologie zur Reinigung von Wolframoxid.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Yamamoto, T., & Sato, K. (2005). *Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel* (Japanisches Patent Nr. JP2005239471A). Japanisches Patentamt.

Yamamoto, T., & Sato, K. (2005). *Verfahren zur Herstellung feiner Wolframoxidpartikel* (Japanisches Patent Nr. JP2005239471A). Japanisches Patentamt.

Verfahren zur Herstellung feiner blauer Wolframoxidpartikel.

Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC (2006). *Herstellungsverfahren von WO₃ für elektrochrome Geräte* (US-Patent Nr. US20060147366A1). US-Patent- und Markenamt.

Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC (2006). *Herstellungsverfahren von WO₃ für elektrochrome Geräte* (US-Patent Nr. US20060147366A1). US-Patent- und Markenamt.

Technologie zur Umwandlung von WO₃ in WO_{2.9}.

Schmidt, M., & Fischer, R. (2007). *Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln* (Europäisches Patent Nr. EP1775269A1). Europäisches Patentamt.

Schmidt, M., & Fischer, R. (2007). *Verfahren zur Herstellung von Wolframoxid-Nanopartikeln* (Europäisches Patent Nr. EP1775269A1). Europäisches Patentamt.

Herstellungsverfahren für nanoskaliges WO_{2.9}.

Zhang, X., & Li, Y. (2010). *Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver* (chinesisches Patent Nr. CN101830511A). Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

Zhang, X., & Li, Y. (2010). *Herstellungsverfahren für Nano-Wolframoxidpulver* (chinesisches Patent Nr. CN101830511A). Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

Verfahren zur Herstellung von Nano-WO_{2.9}.

Kim, HS, & Park, JH (2013). *Herstellung von Wolframoxid-Nanostrukturen* (koreanisches Patent Nr. KR101234517B1). Koreanisches Amt für geistiges Eigentum.

Kim, HS, & Park, JH (2013). *Herstellung von Wolframoxid-Nanostrukturen* (koreanisches Patent Nr. KR101234517B1). Koreanisches Amt für geistiges Eigentum.

von nanostrukturiertem WO_{2.9}.

Weltorganisation für geistiges Eigentum. (2015). *Verfahren zur Herstellung von Nano-Wolframoxid und Nano-Wolframpulver* (Internationales Patent Nr. WO2015188299A1). WIPO.

Weltorganisation für geistiges Eigentum (2015).

aus Nano-WO_{2.9} und Wolframpulver.

Liu, W., & Zhao, X. (2017). *Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe* (chinesisches Patent Nr. CN106430292A). Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

Liu, W., & Zhao, X. (2017). *Herstellungsverfahren für violette Wolframoxid-Nanostäbe* (chinesisches Patent Nr. CN106430292A). Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

2.9 eingestellt werden kann.

Chen, Z., & Li, Y. (2020). *Verfahren zur Herstellung blauer dünner Wolframoxidfilme* (chinesisches Patent Nr. CN111943261A). Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

Chen, Z., & Li, Y. (2020). *Verfahren zur Herstellung blauer dünner Wolframoxidfilme* (chinesisches Patent Nr. CN111943261A). Chinesische Nationale Verwaltung für geistiges Eigentum.

Elektrochemische Herstellung von WO_{2.9}-Dünnschichten.

Weltorganisation für geistiges Eigentum. (2023). *Verfahren zur Synthese von blauen Wolframoxid-Nanostrukturen* (Internationales Patent Nr. WO2023123456A1). WIPO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Weltorganisation für geistiges Eigentum (2023).

Eine Methode zur schnellen Synthese von Nano- WO_{2.9} .

Anhang: Liste der für die Herstellung von blauem Wolframoxid erforderlichen Geräte und Instrumente

Dieser Anhang enthält eine Liste der Geräte und Instrumente, die für die Herstellung von blauem Wolframoxid im Labor (5 g, Rohrofenverfahren) und in der Industrie (100 kg/Charge, Drehrohrofenverfahren) benötigt werden. Die Auswahl der Geräte basiert auf dem Verfahren der Wasserstoffreduktion von Ammoniumparawolframat (APT) oder Wolframtrioxid (WO_3) mit dem Ziel, hochreines ($> 99,5\%$), sauerstoffstabiles WO_2 (19,0–19,5 Gew.-%) herzustellen. Die Liste umfasst die Hauptausrüstung, Zusatzinstrumente und Prüfmittel. Die Angaben sind Richtwerte und können je nach Bedarf angepasst werden.

1. Labormaßstab (5 g, Rohrofenverfahren)

1.1 Hauptausrüstung

Gerätename	Technische Daten	Funktionsbeschreibung
Rohrofen	Innendurchmesser 50 mm, Länge 800 mm, maximal 1200°C, Temperaturregelung $\pm 1^\circ\text{C}$	Wasserstoffreduktion von APT oder WO_3 zur Herstellung von WO_2
Quarzboot	50 mm $\times$ 20 mm $\times$ 10 mm, Temperaturbeständigkeit $> 1000^\circ\text{C}$	Tragen von Rohstoffen, um die Gleichmäßigkeit der Hochtemperaturreaktion zu gewährleisten
Gasflusskontrollsystem	Durchflussbereich 0–200 ml/min, Genauigkeit ± 1 ml/min	Kontrollieren Sie die H_2 - und N_2 -Ströme, um reduzierende Bedingungen sicherzustellen
Abgasbehandlungseinrichtung	Absorptionsbehälter mit 1 M NaOH-Lösung, Fassungsvermögen 2 L	Absorbiert NH_3 und Wasser, um eine sichere Entladung zu gewährleisten
HERGESTELLT VON: CTIA GROUP		

1.2 Zusatzausrüstung

Gerätename	Technische Daten	Funktionsbeschreibung
Schleifmaschine	Planeten- Kugelmühle, Fassungsvermögen 50 ml, Drehzahl 300 U/min	Mahlen von APT oder WO_3 $< 100\ \mu\text{m}$ zur Verbesserung der Reaktivität
Ofen	Maximal 200 $^\circ\text{C}$, Fassungsvermögen 20 L, Temperaturregelung $\pm 1^\circ\text{C}$	Trocknen Sie die Rohstoffe, um Feuchtigkeit zu entfernen
Vakuumpumpe	Pumprate 2 L/s, Endvakuum 10^{-2} Pa	Entlüften der Luft im Rohrofen, um Oxidation zu verhindern
HERGESTELLT VON: CTIA GROUP		

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3 Instrumentierung

Instrumentenname	Technische Daten	Funktionsbeschreibung
Elektronische Waage	Messbereich 10 g, Genauigkeit 0,001 g	Rohstoffe und Produkte genau wiegen
Gasdetektor	H ₂ -Erkennungsbereich 0–1000 ppm, Genauigkeit ±5 ppm	Erkennen Sie H ₂ -Lecks, um die Sicherheit zu gewährleisten
Temperaturschreiber	Bereich 0–1200 °C, Genauigkeit ±0,5 °C	Echtzeitaufzeichnung der Ofentemperatur
Röntgendiffraktometer (XRD)	Cu Kα, 2θ-Bereich 10-80°, Auflösung 0,02°	die Kristallphase und Reinheit von WO _{2.9}
Rasterelektronenmikroskopie (REM)	Auflösung 1 nm, Beschleunigungsspannung 5-30 kV	Beobachten Sie die Partikelgröße (10-50 µm oder 50-100 nm) und Morphologie
Sauerstoffgehalt-Analysator	Infrarot-Absorptionsmethode, Bereich 0,01–2 Gew.-%, Genauigkeit ±0,05 Gew.-%	Bestimmung des Sauerstoffgehalts von WO _{2.9} (19,0-19,5 Gew.-%)
HERGESTELLT VON: CTIA GROUP		

1.4 Hinweise

Sicherheitsausstattung: Ausgestattet mit H₂-Leckalarm und explosionsgeschützter Abzugshaube, um eine gute Belüftung im Labor zu gewährleisten.

Verbrauchsmaterial: Quarzscheiben müssen regelmäßig ausgetauscht werden, um Risse zu vermeiden, die die Reaktion bei hohen Temperaturen beeinträchtigen.

2. Industrieller Maßstab (100 kg/Charge, Drehrohrofenverfahren)

2.1 Hauptausrüstung

Gerätename	Technische Daten	Funktionsbeschreibung
Drehrohrofen	1,5 m Durchmesser, 15 m Länge, max. 1000°C, 2-3° Neigungswinkel, 1-3 U/min Drehzahl	Reduzieren Sie kontinuierlich APT oder WO ₃ , um WO ₂ zu erzeugen.
Schneckenförderer	Förderleistung 50-100 kg/h, Kapazität 200 kg	Gleichmäßiger Transport der Rohstoffe zum Ofen
Gasverteilungssystem	Durchflussbereich 0–20 m ³ /h, Genauigkeit ±0,1 m ³ /h	Kontrollieren Sie den H ₂ - und N ₂ -Fluss, um eine gleichmäßige Reduktion sicherzustellen
Kühlsammelgerät	Geschlossene Ausführung, mit N ₂ -Schutz, Tragkraft 150 kg	Kühlen und sammeln Sie WO _{2.9} , um Oxidation zu verhindern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gerätename	Technische Daten	Funktionsbeschreibung
Abgasnachbehandlungssystem	Sprühturm (2 M NaOH), Aktivkohleadsorption, Verarbeitungsleistung 20 m³/min	Absorbiert NH ₃ , entfernt Restgase und erfüllt Emissionsstandards
HERGESTELLT VON: CTIA GROUP		

2.2 Zusatzausrüstung

Gerätename	Technische Daten	Funktionsbeschreibung
Schleifer	Hammerbrecher, Leistung 200 kg/h, Partikelgröße < 200 µm	Zerkleinern von APT oder WO ₃ zur Verbesserung der Reaktionseffizienz
Siebmaschine	Schwingsieb, Maschenweite 200 µm, Verarbeitungsleistung 150 kg/h	Sieben der Rohstoffe, um eine gleichmäßige Partikelgröße sicherzustellen
Vorwärmofen	Maximal 400°C, Tragkraft 500 kg, Temperaturregelung ±5°C	Vorwärmen von APT zum Entfernen von Wasser und NH ₃
Vakuumsystem	Saugleistung 50 m³/h, Endvakuum 10 Pa	Entlüften Sie den Ofen, um Oxidation zu verhindern
HERGESTELLT VON: CTIA GROUP		

2.3 Instrumentierung

Instrumentenname	Technische Daten	Funktionsbeschreibung
Industriebilanz	Reichweite 200 kg, Genauigkeit 0,01 kg	Wiegen von Rohstoffen und Produkten
H ₂ -Lecksucher	Bereich 0–4000 ppm, Genauigkeit ±10 ppm	Echtzeitüberwachung der H ₂ - Konzentration zur Gewährleistung der Sicherheit
Temperaturregler	Bereich 0–1000 °C, Genauigkeit ±2 °C, mit SPS	Ofentemperatur regeln und aufzeichnen
Online- Sauerstoffanalysator	Bereich 0–25 Gew.-%, Genauigkeit ±0,1 Gew.-%	Echtzeitüberwachung des Sauerstoffgehalts im Produkt
Partikelgrößenanalysator	Laserstreumethode, Bereich 0,1–1000 µm, Genauigkeit ±1 %	von WO _{2.9} Partikelgröße (10– 50 µm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Instrumentenname	Technische Daten	Funktionsbeschreibung
XRF-Analysatoren	Erkennung der Elemente W, O, Fe usw., Genauigkeit $\pm 0,01$ Gew. %	chemische Zusammensetzung und Verunreinigungen von WO _{2.9}
	HERGESTELLT VON: CTIA GROUP	
BET- Oberflächenanalysator	Bereich 0,01–1000 m ² /g, Genauigkeit $\pm 0,1$ m ² /g	Bestimmung der spezifischen Oberfläche von WO _{2.9} (10–40 m ² /g)

2.4 Hinweise

Sicherheitsausrüstung: Ausgestattet mit H₂-Notabsperrentil, Feueralarmsystem und explosionsgeschützter elektrischer Ausrüstung, um die Produktionssicherheit zu gewährleisten.

Wartung: Die Drehrohrofenauskleidung (Feuerfestmaterial) muss regelmäßig überprüft und die Gasleitung mit einem Korrosionsschutz behandelt werden.

3. Vergleich zwischen Labor- und Industriegeräten

Kategorie	Labor (5 g)	Industrie (100 kg/Charge)
Reaktionsausrüstung	Rohröfen (statisch, Einzelcharge)	Drehrohröfen (dynamische, kontinuierliche Produktion)
Handhabung der Rohstoffe	Mühle, Backofen (manueller Betrieb)	Brecher, Siebmaschine, Vorwärmofen (automatisch)
Gasregelung	Kleiner Durchflussmesser (ml/min-Niveau)	Großes Durchflussverteilungssystem (m ³ /h-Niveau)
Produktkollektion	Quarzscheffchen (manuelle Entnahme)	Kühlauffangvorrichtung (automatische Versiegelung)
Prüfgeräte	XRD, SEM, Sauerstoffgehaltanalysator (offline)	Online-Sauerstoffanalysator, XRF, Partikelgrößenanalysator
Abgasbehandlung	Kleiner Absorptionstank (2 L)	Sprühurm + Aktivkohleabsorption (20 m ³ /min)
Automatisierungsgrad	Hauptsächlich manuell, mit etwas Instrumentenunterstützung	Hohe Automatisierung, SPS-Steuerung
	HERGESTELLT VON: CTIA GROUP	

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($\text{WO}_{2.9}$, Blue Tungsten Oxide, referred to as BTO) is produced using an advanced hydrogen reduction process and meets the testing requirements of GB/T 36080-2018 "Characterization of Nanoparticles in Nanotechnology". $\text{WO}_{2.9}$ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide and high-density tungsten alloys due to its dark blue powder crystals, mixed valence (W^{5+} and W^{6+}) and high reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $\text{WO}_{2.9}$ (or $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$), blue tungsten oxide. Purity $\geq 99.95\%$, with extremely low impurity content.

Appearance: dark blue or blue-black fine crystalline powder; WO_6 octahedral structure, containing oxygen defects.

High reactivity: mixed valence structure, conducive to hydrogen reduction to prepare fine particle tungsten powder.

Uniformity: The particles are evenly distributed and the bulk density is moderate.

Stability: The chemical properties are stable under dry conditions.

3. Product Specifications

Type	Particle size (μm)	Purity (wt%)	Bulk density (g/cm ³)	Oxygen content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Micrometer level	10-15	≥ 99.95	1.5-1.8	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$\text{Fe} \leq 0.001$, $\text{Mo} \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($\text{WO}_{2.9}$), actual control range: 29.0-29.5wt %				
Bulk density	1.5-2.2 g/cm ³ , slightly increasing with increasing particle size, optimizing reduction efficiency				
Customizable	Particle size, purity or bulk density can be customized according to customer needs				

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Sealed plastic bottle or vacuum aluminum foil bag, net weight 100g, 500g or 1kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Quality Assurance: Each batch comes with a quality certificate, including purity, particle size distribution (laser method), crystal form (XRD) and oxygen content data.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

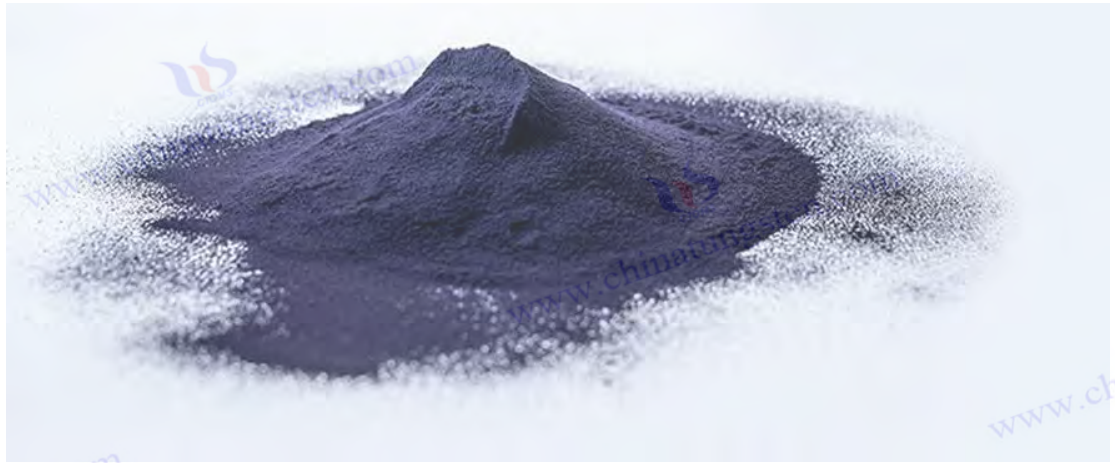
Tel: +86 592 5129595

For more information about blue tungsten, please visit the China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.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



en.com

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