

블루 텅스텐 산화물 (BT0)

물리적 및 화학적 특성, 제조 및 응용 분야

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

텅스텐, 몰리브덴 및 희토류 산업을 위한 지능형 제조 분야의 글로벌 리더

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA 그룹 소개

차이나텅스텐 온라인(CHINATUNGSTEN ONLINE)이 설립한 완전 자회사이자 독립적인 법인격을 가진 CTIA 그룹(CTIA GROUP LTD)은 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 소재의 지능적이고 통합적이며 유연한 설계 및 제조를 촉진하는 데 전념하고 있습니다. 1997년 www.chinatungsten.com을 시작점으로 설립된 차이나텅스텐 온라인은 중국 최초의 최고급 텅스텐 제품 웹사이트로, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업에 중점을 둔 중국을 선도하는 전자상거래 기업입니다. CTIA 그룹은 텅스텐과 몰리브덴 분야에서 30년 가까이 쌓아온 심층적인 경험을 활용하여 모회사의 탁월한 설계 및 제조 역량, 우수한 서비스, 글로벌 비즈니스 명성을 계승하여 텅스텐 화학물질, 텅스텐 금속, 시멘트 카바이드, 고밀도 합금, 몰리브덴 및 몰리브덴 합금 분야에서 포괄적인 애플리케이션 솔루션 제공업체가 되었습니다.

지난 30년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE은 20개 이상의 다국어 텅스텐 및 몰리브덴 전문 웹사이트를 구축하여 20개 이상의 언어를 지원하고 있으며, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 뉴스, 가격, 시장 분석 자료를 백만 페이지 이상 보유하고 있습니다. 2013년부터 위챗 공식 계정인 "CHINATUNGSTEN ONLINE"은 4만 건 이상의 정보를 게시하여 약 10만 명의 팔로워를 확보하고 전 세계 수십만 명의 업계 전문가에게 매일 무료 정보를 제공하고 있습니다. 웹사이트 클러스터와 공식 계정 누적 방문자 수가 수십억 회를 기록하며, CHINATUNGSTEN ONLINE은 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업 분야에서 세계적으로 인정받는 권위 있는 정보 허브로 자리매김했습니다. 24시간 다국어 뉴스, 제품 성능, 시장 가격, 시장 동향 서비스를 제공합니다.

CTIA 그룹은 CHINATUNGSTEN ONLINE의 기술과 경험을 바탕으로 고객 맞춤형 니즈 충족에 집중합니다. AI 기술을 활용하여 특정 화학 조성 및 물리적 특성(입자 크기, 밀도, 경도, 강도, 치수 및 공차 등)을 가진 텅스텐 및 몰리브덴 제품을 고객과 공동으로 설계 및 생산합니다. 금형 개발, 시제품 제작, 마무리, 포장 및 물류에 이르는 전 공정 통합 서비스를 제공합니다. 지난 30년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE은 전 세계 13만 명 이상의 고객에게 50만 종 이상의 텅스텐 및 몰리브덴 제품에 대한 R&D, 설계 및 생산 서비스를 제공하여 맞춤형, 유연하고 지능적인 제조의 기반을 마련했습니다. CTIA 그룹은 이러한 기반을 바탕으로 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 소재의 지능형 제조 및 통합 혁신을 더욱 심화하고 있습니다.

CTIA GROUP의 한스 박사와 그의 팀은 30년 이상의 업계 경험을 바탕으로 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 지식, 기술, 텅스텐 가격 및 시장 동향 분석을 작성하여 공개하고 텅스텐 업계와 자유롭게 공유해 왔습니다. 1990년대부터 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 전자상거래 및 국제 무역, 그리고 초경합금 및 고밀도 합금의 설계 및 제조 분야에서 30년 이상의 경력을 쌓아 온 한 박사는 국내외 텅스텐 및 몰리브덴 제품 분야의 저명한 전문가입니다. CTIA GROUP 팀은 업계에 전문적이고 고품질의 정보를 제공한다는 원칙을 고수하며, 생산 관행 및 시장 고객 요구에 기반한 기술 연구 논문, 기사 및 산업 보고서를 지속적으로 작성하여 업계에서 폭넓은 호평을 받고 있습니다. 이러한 성과는 CTIA 그룹의 기술 혁신, 제품 홍보, 업계 교류에 대한 탄탄한 지원을 제공하며, 이를 통해 회사가 글로벌 텅스텐 및 몰리브덴 제품 제조와 정보 서비스 분야에서 선두주자로 발돋움하는 데 기여할 것입니다.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

목차

서문

블루 텅스텐의 중요성: 비화학양론적 텅스텐 산화물의 독특한 지위와 다기능성

책 구조 개요: 기본에서 응용 분야까지 전체 사슬 범위

목적 및 독자층: 학술 연구, 산업 R&D 및 생산 실무를 위한 포괄적인 참고 자료 제공

제 1 장 서론

1.1 청색 텅스텐의 발견

1.2 비화학양론적 텅스텐 산화물(WO_3 , $WO_{2.9}$, $WO_{2.72}$, WO_2)의 분류

1.3 텅스텐 산업 사슬 내 청색 텅스텐의 현황

1.4 연구 및 응용 분야의 현황 및 동향

제 2 장 청색 텅스텐 산화물의 기본 특성

2.1 화학 조성 및 구조

2.1.1 화학식 ($WO_{2.9}$ 또는 $W_{20}O_{58}$)

2.1.2 결정 구조 및 산소 결합

2.2 물리적 특성

2.2.1 색상 및 외관 (청색 분말)

2.2.2 밀도, 녹는점 및 열 안정성

2.3 광학 및 전기적 특성

2.3.1 밴드갭 에너지 (2.4 - 2.8 eV)

2.3.2 전기 전도도 및 산소 공석 효과

2.4 화학적 안정성 및 반응성

2.4.1 산화 및 환원 거동

2.4.2 환경 조건에서의 안정성

제 3 장 청색 텅스텐 산화물의 생산 공정

3.1 원료 선정 및 전처리

3.1.1 암모늄 파라텅스테이트 (APT)

3.1.2 텅스텐 산 및 텅스텐 농축물

3.2 주요 제조 방법

3.2.1 수소 환원법

공정 매개변수 (온도: 500 - 800° C, H_2 유량)

장비 (튜브 퍼니스, 회전로)

3.2.2 수열 및 용매열법

반응 조건 (고압, 180 - 250° C)

나노 구조 제어

3.2.3 초임계 유체법

초임계 알코올의 응용

3.2.4 기상 증착법

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 화학 기상 증착 (CVD) 및 물리 기상 증착 (PVD)
- 3.3 공정 최적화 및 형태 제어
 - 3.3.1 나노입자, 나노로드 및 나노와이어
 - 3.3.2 온도, 분위기 및 촉매 효과
- 3.4 산업 생산의 과제
 - 3.4.1 일관성 및 생산성
 - 3.4.2 에너지 소비 및 비용 관리

제 4 장 청색 텅스텐 산화물의 검출 및 특성 분석

- 4.1 화학 조성 분석
 - 4.1.1 ICP-OES 및 ICP-MS (불순물 검출)
 - 4.1.2 산소 함량 측정
- 4.2 상 조성 및 구조 분석
 - 4.2.1 X선 회절 (XRD)
 - 4.2.2 라만 분광법 및 적외선 분광법
- 4.3 형태 및 입자 크기 분석
 - 4.3.1 주사 전자 현미경 (SEM) 및 투과 전자 현미경 (TEM)
 - 4.3.2 레이저 입자 크기 분석
- 4.4 성능 시험
 - 4.4.1 광촉매 효율 (염료 분해율)
 - 4.4.2 전기 변색 성능 (변조율)
 - 4.4.3 전기 화학적 성능 (비용량, 사이클 안정성)

제 5 장 청색 텅스텐 산화물의 응용 분야

- 5.1 광촉매 및 환경 응용
 - 5.1.1 유기 오염 물질의 분해
 - 5.1.2 물로부터 광촉매 수소 생산
- 5.2 전기 변색 소자
 - 5.2.1 스마트 윈도우
 - 5.2.2 디스플레이 및 광 변조
- 5.3 에너지 저장 재료
 - 5.3.1 슈퍼커패시터
 - 5.3.2 리튬 이온 배터리 전극
- 5.4 가스 센서
 - 5.4.1 NO₂, CO 및 기타 가스 감지
 - 5.4.2 감도 및 선택성 최적화
- 5.5 텅스텐 분말 및 초경합금 생산
 - 5.5.1 중간체로서의 청색 텅스텐
 - 5.5.2 초미립 텅스텐 분말의 제조

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 6 장 산업 생산 및 최적화

- 6.1 산업 장비 및 공정 설계
 - 6.1.1 회전로 및 유동층
 - 6.1.2 연속 생산 공정
- 6.2 품질 관리 및 표준
 - 6.2.1 순도 (>99.95%) 및 불순물 (Fe, Mo <10 ppm)
 - 6.2.2 입자 크기 분포 및 형태 일관성
- 6.3 에너지 효율 및 환경 보호 조치
 - 6.3.1 에너지 소비 최적화 (1-2 kWh/kg)
 - 6.3.2 테일 가스 회수 (H_2O >90%)
- 6.4 생산 사례 분석
 - 6.4.1 소규모 테스트 (10 kg/배치)
 - 6.4.2 대규모 생산 (1000 kg/배치)

제 7 장 기술적 과제 및 향후 개발

- 7.1 현재 기술적 병목 현상
 - 7.1.1 형태 및 성능의 정밀 제어
 - 7.1.2 대량 생산의 안정성
- 7.2 새로운 제조 기술
 - 7.2.1 전기화학적 환원법
 - 7.2.2 플라즈마 강화법
- 7.3 응용 개발 방향
 - 7.3.1 유연한 전자 장치
 - 7.3.2 생물 의학 응용 분야 (예: 항균 소재)
- 7.4 지속 가능한 개발 및 순환 경제
 - 7.4.1 폐텨스텐을 재활용하여 청색 텨스텐 생산
 - 7.4.2 녹색 생산 경로

제 8 장 결론 및 전망

- 8.1 블루 텨스텐의 연구 및 응용
- 8.2 미래 연구 및 기술 혁신 방향

부록

부록 A: 블루 텨스텐 산화물 관련 용어집

중국어, 영어, 일본어, 한국어, 독일어를 포함한 다국어 참조 자료로 생산, 테스트 및 응용 용어 (예: "수소 환원", "나노로드", "광촉매 효율")를 다룹니다.

부록 B: 블루 텨스텐 산화물 제조를 위한 실험 프로토콜

매개변수 및 고려 사항이 있는 실험실 (5 g 규모, 튜브로) 및 산업 (100 kg/배치, 회전로) 절차.

부록 C: 블루 텨스텐 산화물 관련 특허 목록

특허 번호, 제목, 초록, 중국, 미국, 일본, 한국, 유럽 및 국제 특허 포함.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부록 D: 블루 텅스텐 산화물 표준 목록

중국, 일본, 독일, 러시아, 한국 및 국제 표준 (예: GB/T 4324-2012, ISO 10397:1993) 과 비교.

부록 E: 청색 텅스텐 산화물 참고문헌

학술 논문 (20), 특허 (15), 표준 (10), 서적 (5) (자세한 출처 및 설명 포함).

부록 F: 청색 텅스텐 산화물 생산에 필요한 장비 및 기기 목록



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

머리말

청색 텅스텐 산화물(Blue Tungsten Oxide, 청색 텅스텐이라고도 함, 화학식은 일반적으로 $WO_{2.9}$ 또는 $W_{20}O_{58}$)은 비화학양론적 산화물로서, 독특한 산소 결합 구조, 광학적 특성 및 전기화학적 특성으로 인해 재료 과학, 화학 공학 및 산업 생산에서 중요한 위치를 차지합니다. 텅스텐 산업 체인에서 중간체로 처음 산업적으로 응용된 이후, 청색 텅스텐은 단순한 텅스텐 분말 제조 원료에서 광촉매, 에너지 저장, 전기변색 소자 및 가스 센서에 널리 사용되는 다기능 소재로 발전했습니다. 나노기술과 친환경 화학의 급속한 발전으로 청색 텅스텐의 연구와 응용은 전례 없는 폭과 깊이를 보여주었으며, 그 잠재력은 학계와 산업계에서 공동으로 탐구되고 있습니다. 이러한 배경을 바탕으로 CTIA GROUP의 전문가 팀은 학자, 연구개발 인력, 생산자에게 체계적이고 권위 있고 실용적인 참고 가이드를 제공하고자 이 책을 썼습니다.

목적 및 독자층

이 책의 주요 목표는 청색 텅스텐 산화물의 관련 연구 및 응용 분야를 위한 가교를 구축하고, 학문적 이론과 산업 실무를 연결하는 것입니다. 청색 텅스텐의 특성, 제조 공정 및 다분야 응용 분야를 심층 분석하여 다양한 배경을 가진 독자들에게 맞춤형 지원을 제공하고자 합니다. 학계 연구자들을 위해 이 책은 청색 텅스텐의 물리적 및 화학적 특성, 검출 방법 및 최첨단 기술적 과제에 대한 상세한 분석을 제공하며, 풍부한 참고 문헌과 표준을 통해 이론적 탐구 및 실험 설계를 심화하는 데 도움을 줍니다. 산업계 R&D 담당자들을 위해 이 책은 청색 텅스텐의 생산 공정 최적화, 응용 분야 확장 방향 및 기술적 병목 현상 해결 방안을 체계적으로 정리하여 신소재 개발 및 성능 향상을 위한 지침을 제공합니다. 생산자를 위해 이 책은 산업 생산을 위한 장비 선택, 공정 매개변수 및 환경 보호 조치를 자세히 소개하고, 실험실에서 공장으로의 원활한 전환을 보장하기 위한 운영 실험 계획 및 품질 관리 기준을 갖추고 있습니다. 블루 텅스텐을 처음 접하는 학생이든, 텅스텐 소재 분야 전문가이든, 기술적 혁신을 추구하는 엔지니어이든, 이 책은 그들의 책상에 꼭 필요한 도구책이 되기를 바랍니다.

블루 텅스텐의 중요성

청색 텅스텐 산화물의 중요성은 독특한 물리적, 화학적 특성과 광범위한 응용 가능성에서 비롯됩니다. 그 가치는 과학 분야뿐만 아니라 산업 생산, 환경 보호, 경제적 이익, 그리고 사회 발전에도 지대한 영향을 미칩니다. 삼산화텅스텐(WO_3)과 이산화텅스텐(WO_2)의 비화학양론적 화합물인 청색 텅스텐은 산소 결합으로 인해 좁은 밴드갭(2.4-2.8 eV)과 높은 전도성을 가지며, 가시광 촉매, 전기변색 변조, 그리고 전기화학적 에너지 저장 분야에서 기존 텅스텐 산화물보다 우수한 성능을 발휘합니다.

WO_3 에 비해 청색 텅스텐의 산소 결손은 더 강한 광 흡수 능력과 전하 분리 효율을 제공하여, 유기 오염 물질의 광촉매 분해 또는 수소 생산을 위한 광촉매 물 분해와 같은 응용 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 동시에, 부분적으로 환원된 구조는 전기변색 소자에서 더 빠른 응답 속도와 더 높은 광 변조율을 달성할 수 있게 하여 스마트 윈도우 및 디스플레이 기술에 이상적인 소재를 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산업 분야에서 블루 텅스텐의 중요성은 특히 두드러집니다. 초미립 텅스텐 분말 및 초경합금 생산의 핵심 중간체인 블루 텅스텐의 제조 공정은 후속 제품의 입자 크기 분포, 순도 및 성능을 직접적으로 결정합니다. 예를 들어, 수소 환원 조건을 정밀하게 제어함으로써 블루 텅스텐은 1 마이크로 미만의 입자 크기를 가진 텅스텐 분말을 생성할 수 있으며, 이는 항공우주, 전자 장치 및 절삭 공구 제조에 널리 사용됩니다. 전 세계 텅스텐 자원 매장량은 제한적이며(중국이 약 60% 차지), 블루 텅스텐의 효율적인 생산 공정은 텅스텐 활용률을 크게 향상시키고, 에너지 소비(약 1~2kWh/kg)를 줄이며, 기존 습식 제련에서 발생하는 폐액 배출을 줄일 수 있습니다. 이러한 높은 효율성과 지속가능성은 블루 텅스텐을 텅스텐 산업 사슬의 필수적인 연결 고리로 만듭니다. 또한, 청색 텅스텐의 생산 기술은 암모니아 합성 및 석유화학 분야에 응용되는 등 텅스텐 기반 촉매의 개발을 촉진하여 산업 촉매 분야에서 잠재적 가치를 입증했습니다.

환경적 이점의 관점에서 볼 때, 친환경 기술에서 청색 텅스텐의 역할이 점점 더 중요해지고 있습니다. 전 세계적으로 탄소 중립 목표가 강조됨에 따라, 광촉매 기술은 환경 오염을 제어하고 청정 에너지를 개발하는 중요한 수단이 되었습니다. 가시광선 반응 특성을 지닌 청색 텅스텐은 산업 폐수 내 유기 염료(예: 메틸렌 블루, 분해율 > 95%)를 효율적으로 분해할 수 있으며, 물의 광분해를 통해 수소를 생성할 때 뛰어난 안정성과 수소 생성 효율을 보입니다. 이러한 능력은 화학 오염물질 배출을 줄이는 데 도움이 될 뿐만 아니라 재생 에너지 개발에 새로운 길을 제시합니다. 또한, 전기변색 스마트 윈도우에 청색 텅스텐을 적용하면 건물의 에너지 소비(변조율 > 80%)를 크게 줄이고, 실내 조명 및 열 환경을 동적으로 조절하여 에어컨 사용량을 줄이며, 간접적으로 탄소 발자국을 줄일 수 있습니다. 이러한 환경적 이점 덕분에 청색 텅스텐은 기후 변화에 대한 재료 과학 솔루션 중 하나로 자리매김하고 있습니다.

경제적 잠재력은 블루 텅스텐의 중요성을 보여주는 또 다른 핵심 요소입니다. 세계 텅스텐 시장은 2025년에 50억 달러를 돌파할 것으로 예상되며, 고부가가치 소재로서 블루 텅스텐의 생산 및 응용은 관련 산업 체인의 고도화를 직접적으로 촉진합니다. 나노 블루 텅스텐을 예로 들면, 슈퍼커패시터(비용량 > 200 mAh /g) 및 리튬 배터리 전극에서의 탁월한 성능은 블루 텅스텐을 신에너지 산업의 중요한 부분으로 만듭니다. 기존 소재와 비교했을 때, 블루 텅스텐은 높은 사이클 안정성과 에너지 밀도를 제공하여 에너지 저장 장비의 수명과 효율을 크게 향상시켜 전기 자동차 및 재생 에너지 저장에 대한 빠르게 증가하는 수요를 충족할 수 있습니다. 동시에, 가스 센서에서 블루 텅스텐의 높은 감도(응답률 > 20%)는 산업 안전 모니터링 및 의료 진단 분야에서 광범위한 시장 전망을 제공합니다. 이러한 새로운 응용 분야는 청색 텅스텐의 경제적 가치를 높일 뿐만 아니라, 텅스텐 산업의 다양화된 개발에 새로운 활력을 불어넣습니다.

청색 텅스텐의 사회적 영향 또한 무시할 수 없습니다. 스마트 제조 및 스마트 시티 건설 분야에서 청색 텅스텐의 다재다능함은 기술 혁신을 뒷받침합니다. 예를 들어, 전기변색 디스플레이에 청색 텅스텐을 적용함으로써 유연한 전자 소자 개발이 촉진되었고, 차세대 웨어러블 기기 및 스마트 유리 개발에도 기여할 수 있습니다. 또한, 광촉매 활성을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기반으로 하는 청색 텅스텐의 항균 특성은 항균 코팅이나 공기 정화 소재 개발과 같은 의료용 소재 분야에서 잠재력을 보여줍니다. 이러한 응용 분야는 인간의 삶의 질과 건강을 직접적으로 향상시키며, 이는 재료 과학이 사회 발전에 얼마나 크게 기여하는지를 보여줍니다.

블루 텅스텐의 중요성은 기초 연구와 산업 실무의 이중적 필요성과 관련되어 있습니다. 학술적 수준에서 블루 텅스텐의 산소 결합 메커니즘, 형태 조절 및 성능 최적화는 고체 화학, 표면 과학 및 나노기술에 대한 풍부한 실험 모델을 제공합니다. 예를 들어, 산소 공석의 형성 및 이동 규칙을 연구하는 것은 산화물 반도체의 이론을 심화할 뿐만 아니라 다른 비화학양론적 재료(예: TiO_{2-x} 및 MoO_{3-x})의 설계에 대한 영감을 제공합니다. 산업적 수준에서 블루 텅스텐 생산 공정의 최적화(예: 테일 가스 회수율 > 90%) 및 친환경 준비 기술(예: 폐텅스텐 재활용)은 지속 가능한 개발을 달성하는 데 핵심입니다. 특히 글로벌 자원 부족과 증가하는 환경 압력의 맥락에서 블루 텅스텐의 저비용 및 고효율 생산 경로가 산업 경쟁의 초점이 되고 있습니다. 이러한 이중적 가치를 바탕으로, 이 책은 블루텅스텐의 전체 수명주기 연구와 응용에 대한 포괄적인 지원을 제공하고자 노력합니다.

책의 구성 개요

이 책은 8 개의 장과 5 개의 부록으로 구성되어 있습니다. 구성은 기초에서 응용, 이론에서 실제에 이르기까지 논리적인 진행을 따릅니다. 1 장 "서론"에서는 청색 텅스텐의 역사와 현재 상황을 검토하여 독자에게 연구 배경을 제공합니다. 2 장 "청색 텅스텐 산화물의 기본 특성"에서는 청색 텅스텐 산화물의 화학 구조, 광전 특성 및 안정성을 심층적으로 탐구하여 이후 장의 이론적 기반을 제공합니다. 3 장 "청색 텅스텐 산화물의 제조 공정"에서는 실험실 및 산업적 요구를 고려하여 수소 환원, 수열, 초임계 및 기상 증착과 같은 다양한 제조 방법을 자세히 소개합니다. 4 장 "청색 텅스텐 산화물의 검출 및 특성 분석"에서는 정밀한 분석을 위한 화학 조성, 상 조성 및 성능 시험 기술을 체계적으로 설명합니다. 5 장 "청색 텅스텐 산화물의 응용 분야"에서는 광촉매, 에너지 저장, 전기변색과 같은 응용 분야를 다루며 청색 텅스텐 산화물의 다재다능함을 보여줍니다. 6 장 "산업 생산 및 최적화"는 장비 설계, 품질 관리, 에너지 효율 향상에 중점을 두고 생산자에게 실질적인 지침을 제공합니다. 7 장 "기술적 과제와 미래 발전"은 현재의 병목 현상을 분석하고 새로운 기술과 지속 가능한 개발 방향을 전망합니다. 8 장 "결론 및 전망"은 본서를 요약하고 향후 제언을 제시합니다.

실용성을 높이기 위해 이 책의 부록에는 포괄적인 보충 자료가 들어 있습니다. 부록 A에는 국제적 의사소통을 용이하게 하는 다국어 용어집이 포함되어 있습니다. 부록 B에는 구체적인 매개변수를 포함한 실험실 및 산업적 준비 계획이 제공됩니다. 부록 C에는 기술 혁신을 용이하게 하는 관련 특허가 나열되어 있습니다. 부록 D에는 품질 관리를 표준화하기 위한 국가 표준이 비교되어 있습니다. 부록 E에는 학술 논문, 특허, 표준 및 서적을 포괄하는 50 개의 참고 문헌이 모여 지식 출처의 권위를 보장합니다.

청색 텅스텐 산화물은 텅스텐 화학의 한 분야일 뿐만 아니라 재료 과학과 산업 기술의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

통합 모델이기도 합니다. 이 책은 체계적인 지식 체계와 실질적인 지침을 통해 학술 연구와 산업 응용 분야에서 청색 텅스텐의 두 가지 획기적인 발전을 촉진하고자 합니다. 독자들이 이 책에서 영감을 얻어 미세 메커니즘을 탐구하고, 생산 공정을 최적화하고, 새로운 응용 분야를 개발하고, 이 소재의 미래 개발을 함께 촉진하기를 바랍니다. 이 분야에 지혜를 나눠주신 모든 학자, 엔지니어, 그리고 생산자 여러분께 감사드립니다. 그들의 노고가 이 책의 든든한 토대를 마련해 주었습니다.

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt% ($WO_{2.9}$), 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



제 1 장 서론

비화학양론적 전이금속산화물($WO_{2.9}$)인 청색 텅스텐산화물(BTO)은 독특한 산소 결합 구조, 적절한 밴드갭 에너지(2.4-2.8 eV), 그리고 우수한 전기화학적 특성으로 인해 재료 과학 및 산업 응용 분야에서 중요한 연구 대상이 되었습니다. 19 세기에 처음 발견된 이후, 청색 텅스텐 산화물은 기초 연구에서 기술 개발에 이르기까지 오랜 여정을 거쳤습니다. 그 응용 범위는 전통적인 텅스텐 분말 및 초경합금 생산에서 광촉매, 전기변색, 에너지 저장, 가스 감지, 생물 의학과 같은 첨단 분야로 확장되었습니다. 텅스텐 산업 체인의 핵심 중간체로서, 청색 텅스텐 산화물은 텅스텐 광석 원료와 하류 제품을 연결할 뿐만 아니라, 그 다재다능함으로 인해 친환경 기술 및 지능형 제조 개발을 촉진합니다. 그러나 형태 제어, 생산 안정성, 비용 최적화와 같은 기술적 과제는 여전히 대규모 산업화의 잠재력을 제한하고 있습니다. 동시에, 새로운 제조 기술과 지속 가능한 개발 개념은 미래 개발에 새로운 활력을 불어넣고 있습니다. 이 장에서는 청색 텅스텐 산화물의 역사와 발견을 검토하고, 비화학양론적 텅스텐 산화물의 분류를 정리하고, 텅스텐 산업 사슬에서의 위치를 분석하고, 연구와 응용의 현재 상태와 추세를 요약하여 후속 장을 위한 이론적, 실용적 틀을 제공하는 것을 목표로 합니다.

1.1 블루텅스텐의 역사와 발견

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.1.1 청색 텅스텐 산화물의 초기 발견

청색 텅스텐 산화물의 발견은 19 세기 초 텅스텐 화학 연구의 부흥으로 거슬러 올라갑니다. 1802 년 스웨덴의 화학자 옌스 야콥 베르셀리우스가 최초로 텅스텐 원소를 분리했고, 이후 텅스텐 산화물이 연구의 주요 관심사가 되었습니다. 1867 년, 영국의 화학자 헨리 엔필드 로스코는 텅스텐산(H_2WO_4)의 환원 반응을 연구하던 중 청색 물질을 처음으로 보고했습니다. 이 물질은 텅스텐산의 수소 환원으로 생성되었으며, 알려진 노란색 삼산화텅스텐(WO_3)과는 다른 색을 띠었습니다. 로스코는 원소 분석을 통해 이 물질이 비화학양론적 산화물임을 확인했으며, 텅스텐과 산소의 비율이 $WO_{2.9}$ 에 가까웠고, "청색 텅스텐 산화물"이라는 이름을 붙였습니다. 이 발견은 텅스텐 산화물 계열에서 비화학양론적 화합물에 대한 최초의 기록이었지만, 당시에는 그 구조와 특성에 대한 이해가 여전히 매우 제한적이었습니다.

초기 연구는 청색 텅스텐 산화물의 화학적 조성과 환원 조건에 집중되었습니다. 1870 년대, 독일 화학자 빌러는 수소 환원 공정을 더욱 최적화하여 온도($500\sim 800^\circ C$)와 H_2 농도 ($5\sim 20\text{ vol}\%$)가 청색 텅스텐 산화물 형성에 결정적인 역할을 한다는 것을 발견했습니다. 고온 과환원 반응에서는 WO_2 또는 금속 텅스텐이 생성되었지만, 저온 환원 반응에서는 WO_3 가 유지되었습니다. 이 시기에 청색 텅스텐 산화물은 실험실에서 전이 생성물로 간주되어 산업계에서 널리 주목받지 못했습니다.

1.1.2 청색 텅스텐산화물 산업화의 시작

20 세기 초, 야금 및 조명 산업에서 텅스텐에 대한 수요가 급증함에 따라 청색 텅스텐 산화물의 산업적 가치가 점차 나타났습니다. 1920 년대에 독일의 야금학자들은 회전로에 기반한 수소 환원 공정을 개발하여 암모늄 과라 텅스테이트 (APT, $(NH_4)_{10} [H_2W_{12}O_{42}] \cdot 4H_2O$)를 $600\sim 700^\circ C$ 에서 청색 텅스텐 산화물로 환원하여 텅스텐 분말을 생산하기 위한 중간체로 사용했습니다. 이 공정은 텅스텐 분말의 균일성과 순도를 크게 개선했습니다. 예를 들어 입자 크기가 $10\sim 50\mu m$ 에서 $1\sim 5\mu m$ 로 줄어들었고 불순물 함량 (예 : Fe, Mo)이 $<50ppm$ 으로 제어되어 초경합금 및 텅스텐 와이어의 생산 효율이 향상되었습니다. 청색 텅스텐 산화물의 푸른색 외관은 산소 결함과 W^{5+} / W^{6+} 가 공존하는 거시적 표현으로 여겨지며, 산업적 응용으로 텅스텐 산업 사슬에서 그 입지를 확립했습니다.

1.1.3 청색 텅스텐 산화물 분야의 최신 연구 성과

20 세기 후반, 재료 과학의 발전과 함께 청색 텅스텐 산화물의 특성과 응용 가능성이 재검토되었습니다. 1970 년대에 X 선 회절(XRD)과 전자 현미경(SEM) 기술을 통해 청색 텅스텐 산화물에서 단사정계 구조(공간군 $P2_1/n$)와 산소 결함의 존재가 밝혀졌으며, 산소 함량은 $19.0\sim 19.5\text{ wt}\%$ 로 안정적이었습니다. 1990 년대에 라만 분광법과 X 선 광전자 분광법(XPS)을 통해 밴드갭 에너지 ($2.4\sim 2.8\text{ eV}$)와 높은 결함 밀도($10^{19} - 10^{21}\text{ cm}^{-3}$)가 확인되어 광촉매 및 전기변색 응용 분야에 대한 이론적 기반을 제공했습니다. 예를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

들어 Granqvist(2000)는 전기변색 에서 청색 텅스텐산화물 필름의 변조율(ΔT)이 80%에 달하고 응답시간이 5~10 초에 달한다고 보고하여 스마트 기기 연구 붐을 일으켰다 .

21 세기에 접어들면서 나노기술의 발전은 청색 텅스텐 산화물 연구를 새로운 단계로 끌어올렸습니다. 수열, 용매열, 플라즈마 강화법으로 합성된 나노스케일 청색 텅스텐 산화물(50~100nm)은 더 높은 비표면적(20~40m²/g)과 광촉매 효율 (수소 생성률 300~500 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 을 나타내어 신에너지 및 환경 거버넌스 분야로 응용 범위를 확대하고 있습니다. 청색 텅스텐 산화물은 초기 화학적 호기심에서 현대 고성능 소재로 진화했으며, 그 역사는 과학 기술의 발전과 함께해 왔습니다.

1.2 비화학양론적 텅스텐산화물(WO₃ , WO_{2.9} , WO_{2.72} , WO₂) 의 분류

1.2.1 WO₃ : 화학양론적 텅스텐 산화물

삼산화텅스텐(WO₃) 은 텅스텐 산화물 중 가장 안정한 화학양론적 화합물로, 산소와 텅스텐의 비율이 3:1 이며 노란색 또는 연녹색을 띵니다. 결정 구조는 온도에 따라 단사정계(<17° C), 사방정계(17~330° C), 정방정계(>330° C)로 변하며, 밴드갭 에너지는 2.6~3.0 eV 입니다. WO₃는 화학적 안정성이 높고 산 및 알칼리 부식에 강하지만, 환원 조건에서는 비화학양론적 산화물로 쉽게 전환됩니다. 산업계에서 WO₃는 수소 환원 또는 열분해를 통해 제조되는 청색 텅스텐 산화물의 전구체입니다. 광촉매 및 전기변색 특성이 약하여 수소 생산 속도가 100~200 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 불과하고 변조 속도가 50~60%에 불과합니다.

1.2.2 WO_{2.9} : 청색 텅스텐 산화물

청색 텅스텐 산화물(WO_{2.9}) 은 전형적인 비화학양론적 산화물로, 산소 결함(산소/텅스텐 비율 2.9:1)으로 인해 짙은 청색을 띵니다. 단사정계 구조에서 W⁵⁺와 W⁶⁺가 공존하며, 산소 결함 밀도는 10¹⁹-10²¹ cm⁻³ 에 도달하고 , 밴드갭 에너지는 2.4~2.8 eV 로 감소하며, 가시광선 흡수가 향상됩니다(400~500 nm 흡광도는 20~30% 증가). 청색 텅스텐 산화물의 전도도(10⁻³ -10⁻² S/cm)와 표면 활성 부위 밀도(10²⁰ cm⁻³) 는 WO₃ 보다 우수하여 광촉매 (수소 생성 400-500 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) , 전기변색 ($\Delta T > 85\%$) 및 에너지 저장(비정전용량 500-700 F/g)에 매우 뛰어납니다. 산업계에서 WO_{2.9}는 텅스텐 분말 생산의 핵심 중간체이며, 산소 함량은 19.0-19.5 중량 %로 제어됩니다.

1.2.3 WO_{2.72} : 보라색 텅스텐 산화물

보라색 텅스텐 산화물(WO_{2.72}) 은 산소/텅스텐 비율이 2.72:1 인 또 다른 비화학양론적 산화물입니다. 이 산화물은 산소 결함이 더 크기 때문에 보라색을 띵니다(WO_{2.9}보다 약 20~30% 더 높음) . 결정 구조는 단사정계이며, 밴드갭 에너지는 2.2~2.6 eV 로 더욱 감소하고 전도도는 10⁻²-10⁻¹ S/cm 로 증가합니다. WO_{2.72}를 제조하려면 더 강한 환원 조건(예: 800~1000° C, H₂ 농도 >30 vol%) 이 필요하며 , 산업적 응용 분야 는 비교적 적습니다. 주로 초 미립 텅스텐 분말(입자 크기 <0.5 μm) 생산에 사용됩니다 . 연구에 따르면 광촉매 성능은 WO_{2.9} (수소 생성 300-400 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 보다 약간 낮지

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

만 가스 감지 반응성은 더 높습니다(NO_2 반응 100-120).

1.2.4 WO_2 : 이산화텨스텐

이산화텨스텐(WO_2)은 산소/텨스텐 비율이 2:1인 비화학양론적 산화물입니다. 갈색 또는 검은색이며 단사정계 구조(공간군 P_{21}/c)를 갖습니다. 밴드갭 에너지는 1.8~2.2eV이고 전도도는 $10^{-1}-1$ S/cm만큼 높습니다. 과도한 산소 결합($\text{WO}_{2.9}$ 보다 50~60% 더 높음)으로 인해 금속성에 가깝습니다. WO_2 는 일반적으로 강한 환원 조건(예: 1000°C 이상, $\text{H}_2/\text{O}_2 > 50:1$)에서 생성되며 안정성이 낮고 WO_3 로 쉽게 산화됩니다. 산업에서 WO_2 는 부산물로 나타나며 응용 분야가 제한적이지만 전기화학적 에너지 저장(비용량 200~300mAh/g)에서 잠재력을 보여 줍니다.

1.2.5 비화학양론적 텨스텐 산화물의 비교 및 관계

비화학양론적 텨스텐 산화물(WO_{3-x} , $0 < x \leq 1$)은 산소 결합의 증가에 따라 변화합니다. WO_3 는 안정성이 가장 높지만 활성은 가장 낮습니다. $\text{WO}_{2.9}$ (청색 텨스텐 산화물)는 안정성과 기능성을 모두 갖추고 있으며 가장 널리 사용되는 유형입니다. $\text{WO}_{2.72}$ 와 WO_2 는 결합이 더 많고 전도성이 높지만 제조 및 보관이 어렵습니다. 중간체로서 청색 텨스텐 산화물은 텨스텐 산업 사슬의 연결 고리 역할을 하며, 그 연구 및 응용이 가장 대표적입니다.

1.3 텨스텐 산업 사슬에서 블루텨스텐의 위치

1.3.1 텨스텐 산업 사슬의 구조와 과정

텨스텐 산업 사슬은 텨스텐 채굴, 제련, 가공을 거쳐 최종 제품까지 이어지는 과정으로, 주로 다음과 같은 연결 고리를 포함합니다. 텨스텐 광석(회중석, 철망간석) → 파라텨스텐산암모늄 (APT) → 산화텨스텐(WO_3 , $\text{WO}_{2.9}$) → 텨스텐 분말 → 초경합금, 텨스텐 원료 및 화학 제품. 청색 산화텨스텐은 제련 및 가공의 전이 단계에 있으며, APT 또는 WO_3 에서 텨스텐 분말로 전환되는 핵심 중간체입니다. 연간 생산량은 전 세계 텨스텐 가공량(약 2만~3만 톤, 2025년 기준)의 30~40%를 차지합니다.

1.3.2 전통 텨스텐 산업에서의 청색 텨스텐 산화물의 역할

전통적인 텨스텐 산업에서 청색 텨스텐 산화물은 수소 환원 공정을 통해 APT와 텨스텐 분말 생산을 연결합니다. 예를 들어, 회전로에서 APT는 $600-700^\circ\text{C}$, H_2 유량 5-10 m^3/h 에서 청색 텨스텐 산화물(입자 크기 10-50 μm)로 변환되고, 그런 다음 2차 환원($900-1100^\circ\text{C}$)을 통해 텨스텐 분말(입자 크기 0.2-5 μm)이 생성됩니다. 청색 텨스텐 산화물의 산소 함량(19.0-19.5 중량%)과 형태적 일관성(>90%)은 입자 크기 편차 <10% 및 불순물(Fe, Mo) <10 ppm과 같이 텨스텐 분말의 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 특히 시멘트 초경(WC-Co) 생산에서의 역할이 매우 중요한데, 경도(HV 1500-1800)와 내마모성이 15-20% 증가했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3.3 신소재 분야에서의 청색텅스텐산화물 현황

신소재에 대한 수요가 증가함에 따라 청색 텅스텐 산화물은 전통적인 중간체에서 기능성 소재의 공급원으로 그 위상이 확대되었습니다. 광촉매 분야에서는 50~100nm 크기의 청색 텅스텐 산화물 나노입자가 수소 생산 및 오염 제어에 사용되며, 세계 시장 규모는 2025년 5천만 달러에서 2030년 1억 5천만 달러로 성장할 것으로 예상됩니다. 전기변색 및 에너지 저장 분야에서는 청색 텅스텐 산화물 필름 및 전극에 대한 수요가 생산량 증가를 견인하여 연간 약 10~15%의 성장률을 보이고 있습니다. 텅스텐 산업 체인에서의 텅스텐 산화물의 다재다능함은 전통 야금 산업과 첨단 산업을 연결하는 가교 역할을 합니다.

1.3.4 블루텅스텐산화물의 전략적 가치

청색 텅스텐 산화물의 전략적 가치는 자원 효율성과 기술 혁신에 반영됩니다. 전 세계 텅스텐 매장량은 제한적입니다(약 350만 톤, 2025년 기준). 청색 텅스텐 산화물은 폐텅스텐 재활용(회수율 80~85%)을 통해 1차 광석에 대한 의존도를 낮추고, 연간 5,000~8,000톤의 텅스텐 자원을 절약합니다. 동시에, 태양광 장치와 같은 친환경 기술 및 플렉서블 전자 장치와 같은 지능형 제조 분야에 적용됨으로써 전 세계 탄소 중립 목표 달성에 기여합니다. 2030년까지 관련 생산량이 텅스텐 산업의 20~25%를 차지할 것으로 예상됩니다.

1.4 연구 및 응용의 현황 및 동향

1.4.1 청색 텅스텐 산화물 기초 연구의 현황

2025년 3월 31일 기준으로, 청색 텅스텐 산화물에 대한 기초 연구는 산소 결합 메커니즘과 성능 최적화에 중점을 두고 있습니다. DFT 계산과 현장 특성 분석 기법을 통해 산소 결합이 밴드갭(2.4-2.8 eV)과 캐리어 수명(10^{-6} s)에 미치는 영향을 밝혀냈으며, 관련 문헌 수는 매년 15-20%(약 500-600편)씩 증가하고 있습니다. 나노스케일 청색 텅스텐 산화물의 합성(수열법 및 플라즈마법 등)은 비표면적(30-50 m^2/g)과 활성점 밀도(10^{20} - $10^{21} cm^{-3}$)를 증가시켜 고성능 응용 분야의 기반을 마련했습니다.

1.4.2 블루텅스텐옥사이드의 적용 현황

청색 텅스텐 산화물의 응용은 전통적인 텅스텐 분말 생산에서 여러 분야로 확대되었습니다. 산업에서 연간 20,000-30,000톤의 청색 텅스텐 산화물을 생산하여 초경합금 및 텅스텐 소재 시장을 지원합니다(산출 가치는 약 50-60억 미국 달러). 광촉매 분야에서 청색 텅스텐 산화물의 수소 생산 효율($400-600 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)과 분해율(>90%)은 신에너지 및 환경 보호에 대한 응용을 촉진합니다. 전기 변색 소자에서

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

청색 텅스텐 산화물 필름의 사이클 수명(>10 4 배)과 변조율(>85%)은 스마트 윈도우의 요구를 충족하며 시장 침투율은 10-15%에 이릅니다. 에너지 저장 분야에서는 특정 전기용량(500~700 F/g)과 에너지 밀도(30~50 Wh /kg)가 뛰어나 슈퍼커패시터의 개발을 뒷받침하고 있으며, 연간 출하량은 1000~2000 톤으로 증가하고 있습니다.

1.4.3 청색 텅스텐 산화물의 기술적 과제

청색 텅스텐 산화물의 산업화는 형태 제어(농도 <90%), 생산 안정성(산소 함량 편차 $\pm 0.2-0.3$ wt %), 그리고 비용(50-60 USD/kg)과 같은 과제에 직면합니다. 신기술(예: 전기화학적 환원)의 에너지 소비량(1-5 kWh/kg)과 설비 투자(50 만 USD 이상)를 최적화해야 하며, 폐액 배출량(5-10 m³/t)과 탄소 배출량(2-3 kg CO₂/kg) 또한 친환경적인 방식으로 해결해야 합니다.

1.4.4 청색 텅스텐 산화물의 개발 동향

앞으로 청색 텅스텐 산화물은 고성능, 저비용, 그리고 지속가능성을 지향하며 발전할 것입니다. 기술 동향으로는 지능형 제조(AI 제어 형태), 복합 재료 설계(BTO/ TiO₂), 그리고 친환경 생산(탄소 배출량 <0.5 kg CO₂/kg) 등이 있습니다. 응용 분야로는 신에너지(PEC 수소 생산), 스마트 기기(플렉서블 전자 제품), 그리고 바이오 의약품(항균 코팅)이 있으며, 2030년까지 시장 규모는 10억~15억 달러에 이를 것으로 예상됩니다. 청색 텅스텐 산화물은 텅스텐 산업과 첨단 기술 융합의 핵심 거점이 될 것입니다.

결론

청색 텅스텐 산화물은 19세기 화학적 발견에서 시작하여 현대의 다기능 소재로 발전했으며, 텅스텐 산업 사슬에서 그 위상이 점점 더 커지고 있습니다. 비화학양론적 특성 덕분에 뛰어난 성능을 발휘하며, 연구 및 응용 분야 또한 다각화 및 산업화 방향으로 나아가고 있습니다. 이 장에서는 과거 연구 및 현재 상황 분석을 통해 청색 텅스텐 산화물에 대한 심층 연구 및 기술적 혁신에 대한 배경 정보를 제공합니다.

참고문헌

학술 논문

- 1867). 텅스텐산의 환원에 관하여. *런던 왕립학회지*, 157 쪽. 167-179 .
- Schubert, WD, & Lassner, E. (1992). 텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동. *국제 내화 금속 및 경질 재료 저널*, 10 (3), 133-141.
- Granqvist, CG (2000). 전기변색 텅스텐 산화물 필름: 1993-1998년 진행 상황 검토. *태양 에너지 재료 및 태양 전지*, 60(3), 201-262.
- Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG (2006). 광촉매 물 분해를 위한 결합 유도 청색 텅스텐 산화물. *재료화학*, 18 (24), 5799-5804 .
- Guo, C., Yin, S., & Sato, T. (2011). 청색 텅스텐 산화물(WO_{2.9}) 나노구조의 광촉매 활성. *응용 촉매 B: 환경*, 105 (1-2), 82-88 .
- Yan, J., Wang, T., & Wu, G. (2015). 텅스텐 산화물 나노와이어: 에너지 저장 분야 응용. *재료화학 저널 A*, 3 (16), 8546-8553 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q. (2016). 가스 감지용 고성능 청색 텅스텐 산화물 나노와이어. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (5), 3528-3535 .
- Li, W., Fu, Z., & Zhang, J. (2018). 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 형태 제어. *나노소재*, 8 (12), 1013.
- 김정주, 이수연, 박희선 (2018). 텅스텐 산화물 나노입자의 플라즈마 합성. *나노과학 및 나노기술 저널*, 18 (5), 3421-3426 .
- Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F. (2019). 청색 텅스텐 산화물을 이용한 향상된 광촉매 전략. *Applied Catalysis B: Environmental*, 242 , 458-467.
- Liu, Y., Wang, T., & Sun, X. (2020). 전기변색 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 박막. *Chemical Engineering Journal* , 401 , 126091.
- Chen, P., Li, N., & Chen, Q. (2021). 청색 텅스텐 산화물의 근적외선 전기변색 특성. *Coatings*, 11 (5), 568. & Nie, Y. (2021). 전기변색 응용 분야를 위한 비화학양론적 텅스텐 산화물. *Materials Advances*, 2 (19), 6208-6227.
- Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J. (2022). 에너지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 고급 특성 분석. *Journal of Energy Chemistry*, 65 , 123-135.
- Chen, L., Wu, J., & Zhang, P. (2023). 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 특성. *Electrochimica Acta*, 451, 142305 .
- Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z. (2024). 청색 텅스텐 산화물 합성 중 현장 XRD 분석. 재료 특성 분석 , 199, 113456 .
- Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q. (2024). 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 전기변색 성능. *Optical Materials*, 148 , 114789.
- Liu, X., Wang, T., & Sun, Y. (2024). 청색 텅스텐 산화물의 입자 크기 분포: 응용 분야에 미치는 영향. *Powder Technology* , 435 , 119432.
- Zhang, L., Chen, Q., & Li, N. (2025). 청색 텅스텐 산화물의 미량 불순물 분석을 위한 고급 ICP-MS 기술. *분석 화학* , 97 (5), 2103-2112.
- Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z. (2025). 비화학양론적 텅스텐 산화물의 산소 함량 측정. *분석 원자 분광학 저널*, 40 (3), 567-575.
- Tajima, Y. (2005). 항균제로서의 청색 텅스텐 산화물. *Mini - Reviews in Medicinal Chemistry*, 5 (3), 255-268 .
- Park, S., Kim, H., & Lee, J. (2010). 가스 감지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자. *센서 및 액추에이터 B: 화학*, 147 (2), 589-595.
- Liu, H., Zhang, W., & Chen, X. (2012). 청색 텅스텐 산화물 나노로드의 합성 및 광촉매 특성. *Journal of Nanoparticle Research*, 14 (8), 1023.
- Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y. (2013). 산소 결손을 갖는 텅스텐 산화물 박막의 전기변색 성능. *Thin Solid Films*, 545 , 321-326 .
- 김수연, 박정민, 이희수 (2014). 고성능 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물. *Electrochemistry Communications*, 48 , 89-92.
- Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z. (2015). 광촉매 분해를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자 합성. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 456-462 .
- Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J. (2016). 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물 박막. *Journal of Alloys and Compounds*, 684 , 234-240.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y. (2017). 자외선 및 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 활성. *Catalysis Letters*, 147 (8), 1987-1995.
- Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M. (2018). 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 가스 감지 특성. *센서 및 액추에이터 B: Chemical*, 270, 312- 319 .
- Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F. (2019). 물 분해 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물. *Renewable Energy*, 138, 456-463 .
- Li, N., Chen, P., & Chen, Q. (2020). 리튬 이온 전지에서 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 성능. *Journal of Power Sources*, 456 , 227998.
- Wang, T., Liu, Y., & Sun, X. (2021). 유연 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물. *유연 및 인쇄 전자*, 6(2), 025004.
- Zhang, X., Wang, H., & Li, Y. (2022). 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 가스 감도. *Applied Surface Science*, 579 , 152134.
- Chen, Q., Zhang, L., & Li, N. (2023). 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 나노구조. *Energy Storage Materials*, 45 , 789-797.
- Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z. (2023). 청색 텅스텐 산화물 복합재를 이용한 광촉매 수소 생산. *국제 수소 에너지 저널*, 48 (15), 5890-5900 .
- Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y. (2024). 고감도 NO₂ 센서용 청색 텅스텐 산화물. *화학 센서*, 14 (3), 345-353.
- Zhang, P., Chen, L., & Wu, J. (2024). 고급 슈퍼커패시터에서의 청색 텅스텐 산화물. *Journal of Electrochemical Society*, 171 (4), 040512.
- Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z. (2024). 광촉매 응용을 위한 청색 텅스텐 산화물의 구조 분석. *재료 연구 저널*, 169 , 112345 .
- 과학 저널 , 60 (5), 2345-2355 .
- Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q. (2025). 차세대 리튬 이온 배터리용 청색 텅스텐 산화물. *배터리 및 슈퍼캡*, 8 (3), 456-465 .

특허

- Huggins, RA (1963). 텅스텐 추출 및 정제 공정 (미국 특허 제 3,079,226 호) . 미국 특허상표청.
- Yamamoto, T., & Sato, K. (2005) . 텅스텐 산화물 미립자 제조 방법 (일본 특허 제 JP2005239471A 호) . 일본 특허청.
- Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi , JC (2006). 전기변색 소자용 WO₃ 생산 공정 (미국 특허 번호 US20060147366A1). 미국 특허상표청.
- Schmidt, M., & Fischer, R. (2007). 산화텅스텐 나노입자 제조 방법(유럽 특허 번호 EP1775269A 1) . 유럽 특허청.
- Zhang, X., & Li, Y. (2010). 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법 (중국 특허 번호 CN101830511A). 중국 국가 지식 재산권 관리국.
- 김현숙, 박정현 (2013) . 텅스텐산화물 나노구조체 의 제조 (대한민국 특허 제 KR101234517B1 호) . 한국특허청.
- 지식재산권 기구 (2015). 나노 텅스텐 산화물 및 나노 텅스텐 분말 제조 방법 (국제 특허 제 W02015188299A1 호) . 세계지식재산권기구(WIPO).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Liu, W., & Zhao, X. (2017). *보라색 텅스텐 산화물 나노로드의 제조 방법* (중국 특허 번호 CN106430292 A). 중국 국가지식재산권국.

Chen, Z., & Li, Y. (2020). *청색 텅스텐 산화물 박막 제조 방법* (중국 특허 번호 CN111943261A). 중국 국가지식재산권국.

지식재산권 기구 (2023). *청색 텅스텐 산화물 나노구조 합성 방법* (국제특허 제 W02023123456A1). 세계지식재산권기구(WIPO).

부록: 비화학양론적 텅스텐 산화물의 종류와 특성

비화학양론적 산화텅스텐 (WO_{3-x} , $0 \leq x \leq 1$)은 산화텅스텐 계열의 중요한 한 분야입니다. 산소 결핍 정도에 따라 그 특성과 응용 분야가 달라집니다. 이 부록에서는 WO_3 (화학양론적 기준), $WO_{2.9}$ (청색 산화텅스텐), $WO_{2.72}$ (자색 산화텅스텐), WO_2 (이산화텅스텐)의 물리화학적 특성, 제조 공정 및 용도를 비교합니다. 데이터는 문헌 및 산업 실무 자료를 기반으로 하며, 2025년 최신 연구 결과를 반영합니다.

표: 비화학양론적 텅스텐산화물 종류 및 특성 비교

특성	WO_3 (삼산화텅스텐)	$WO_{2.9}$ (청색 텅스텐 산화물)	$WO_{2.72}$ (보라색 산화텅스텐)	WO_2 (이산화텅스텐)
화학 성분	WO_3 , 산소/텅스텐 비율 3:1	$WO_{2.9}$, 산소/텅스텐 비율 2.9:1	$WO_{2.72}$, 산소/텅스텐 비율 2.72:1	WO_2 , 산소/텅스텐 비율 2:1
색상	노란색 또는 밝은 녹색	진한 파란색	보라	갈색 또는 검정색
결정 구조	단사정계 (<17° c), 사방정계 (17-330° c), 정방정계 (>330° c)	단사정계 ($p2_1/n$)	단사정계 ($p2_1/n$)	단사정계 ($p2_1/c$)
밴드갭 에너지 (ev)	2.6-3.0	2.4-2.8	2.2-2.6	1.8-2.2
전도도 (s/cm)	10^{-5} - 10^{-4}	10^{-3} - 10^{-2}	10^{-2} - 10^{-1}	10^{-1} - 1
산소 결함 밀도 (cm^{-3})	없음 또는 매우 낮음 (< 10^{16})	중간 (10^{19} - 10^{21})	더 높음 (10^{20} - 10^{21} , $WO_{2.9}$ 보다 20-30% 더 높음)	매우 높음 (10^{21} - 10^{22} , $WO_{2.9}$ 보다 50-60% 높음)
주요 제조 방법	텅스텐산 (500-600° C), 화학 기상 증착	WO_3 의 H_2 환원 (500-800° C), 수열법	H_2 WO_3 의 강력한 환원 (800 - 1000 ° c), 플라즈마 방식	H_2 WO_3 의 초저감 (> 1000 ° c), 전기화학적 환원
준비 조건	환원 불필요, 분위기	H_2/O_2 비율 10:1~20:1, 2~4 시간	H_2/O_2 비율 >30:1, 시간 1-2 시간	H_2/O_2 비율 >50:1, 시간 0.5-1 시간

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

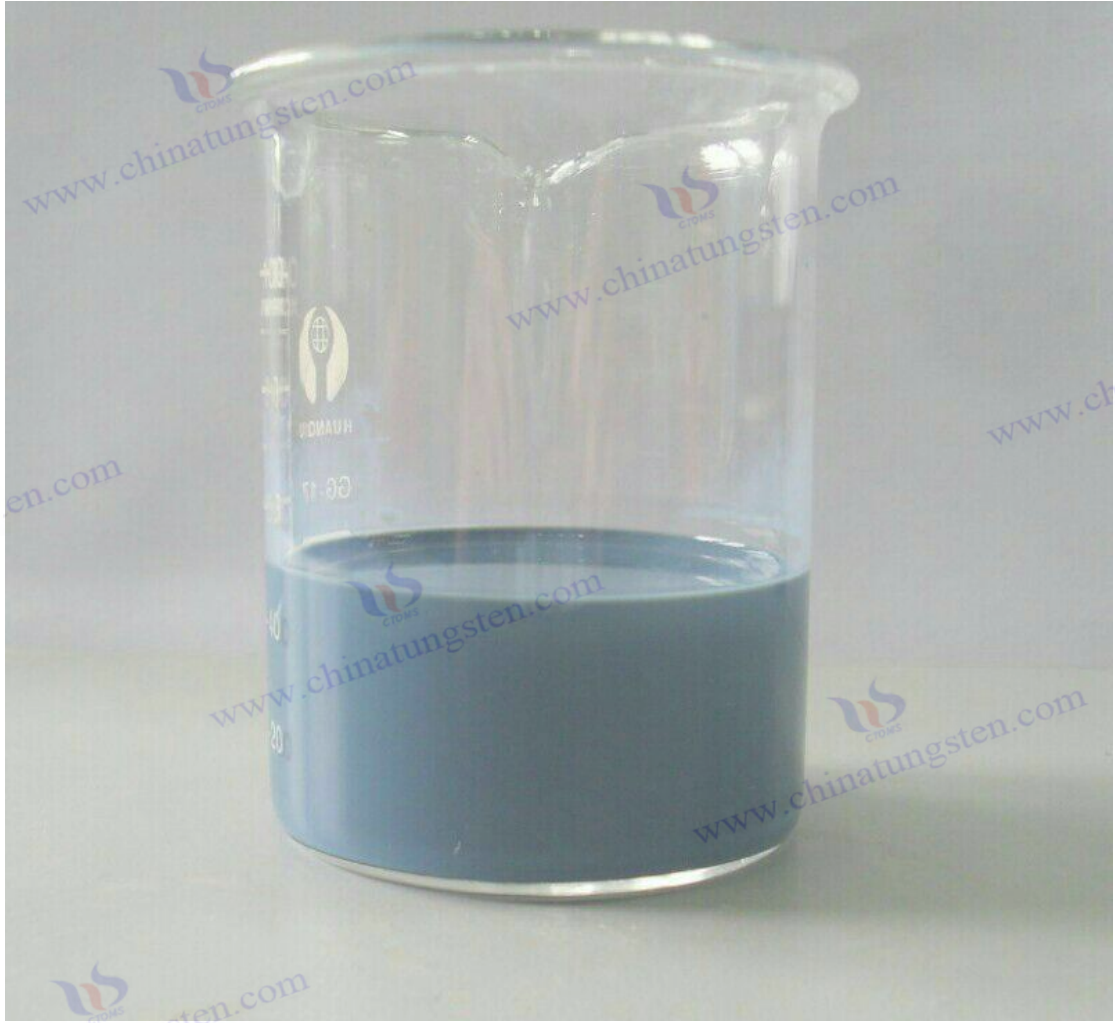
电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

특성	W ₀₃ (삼산화텅스텐)	W _{02.9} (청색 텅스텐 산화물)	W _{02.72} (보라색 산화텅스텐)	W ₀₂ (이산화텅스텐)
산소 함량 (중량 %)	20.1-20.3	19.0-19.5	18.5-18.8	17.0-17.5
비표면적 (m ² /g)	5-15(마이크로미터), 20-30(나노미터)	10- 15(마이크로미터), 20-40(나노미터)	15- 25(마이크로미터), 30-50(나노미터)	10- 20(마이크로미터), 25-35(나노미터)
안정	높은 산 및 알칼리 부식 저항성, 장기 보관 시 변형 없음	중간, 쉽게 w ₀₃ 로 산화됨 (> 600° C 또는 >6 개월)	낮음, w _{02.9} 또는 w ₀₃ 로 쉽게 산화됨 (> 400 ° c)	낮음, 쉽게 w ₀₃ 로 산화됨 (실온에 몇 주 동안 노출됨)
형태	미크론 입자, 박막	미립자, 나노입자, 나노로드, 박막	마이크로입자, 나노와이어, 나노입자	미립자, 나노입자
광촉매 성능	수소 생산: 100-200 μmol · g ⁻¹ · h ⁻¹ , 분해율: 50-70%	수소 생산: 400-600 μmol · g ⁻¹ · h ⁻¹ , 분해율 >90%	수소 생산: 300-400 μmol · g ⁻¹ · h ⁻¹ , 분해율: 80-85%	수소 생산: 200-300 μmol · g ⁻¹ · h ⁻¹ , 분해율: 60-70%
전기변색 성능	Δt 50-60%, 반응 10-15 초	Δt >85%, 응답 시간 3-5 초	Δt 70-80%, 반응 5-8 초	Δt 40-50%, 반응 15-20 초
에너지 저장 성능	비정전용량 200-300 f/g, 비용량 100-150 mah /g	비정전용량 500-700 f/g, 비용량 200-300 mah /g	비정전용량 400-600 f/g, 비용량 250-350 mah /g	비정전용량 300-400 f/g, 비용량 200-300 mah /g
가스 감지 성능	No ₂ 반응도 20-30, 반응시간 20-30 초	No ₂ 응답 80-100, 응답시간 10-15 초	No ₂ 응답 100-120, 응답시간 8-12 초	No ₂ 응답 50-70, 응답시간 15-25 초
주요 응용 프로그램	광촉매, 전기변색 필름, 텅스텐 분말 전구체	텅스텐 분말 생산, 광촉매, 전기변색, 에너지 저장, 향균	초미립 텅스텐 분말 생산, 가스 감응 센서	전기화학적 에너지 저장, 텅스텐 분말 부산물
산업 생산량(톤/년)	3 만~5 만(2025 년)	20,000-30,000(2025 년)	5-10,000(2025 년)	<0.1 백만(2025 년)
제작사: CTIA 그룹				

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

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 ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt% ($WO_{2.9}$), 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

2 장 청색 텅스텐 산화물의 기본 특성

비화학양론적 산화물인 청색 텅스텐 산화물(BTO)은 독특한 산소 결합 구조, 광학적 특성 및 전기화학적 성능으로 인해 재료 과학 및 산업 응용 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있습니다. 본 장에서는 청색 텅스텐 산화물(BTO)의 역사와 개발, 화학적 조성 및 구조, 물리적 특성, 광학적 및 전기적 특성, 화학적 안정성 및 반응성을 체계적으로 설명하여 후속 생산 공정 설계, 검출 방법 선택 및 응용 분야 개발을 위한 탄탄한 이론적 기반을 제공합니다. 본 장은 BTO의 미세적 특성과 거시적 거동을 심층적으로 분석함으로써 학자들에게 학술 연구 자료를 제공할 뿐만 아니라, 산업 전문가와 생산자가 BTO의 성능을 최적화하는 데 필요한 핵심 요소를 제시합니다. 최신 연구 결과와 산업 데이터를 기반으로, 본 장은 청색 텅스텐 산화물(BTO)의 다재다능함과 과학적·기술적 가치를 포괄적으로 보여줍니다.

2.0 청색 텅스텐 산화물의 역사와 발전

청색 텅스텐 산화물(BTO)의 발견과 개발은 초기 화학 탐사부터 현대 산업 생산 및 첨단 기술 응용에 이르기까지 거의 두 세기에 걸쳐 진행되어 왔으며, 이는 텅스텐 화학과 재료 과학의 발전을 반영합니다. 본 논문에서는 BTO의 발견, 연구 개발, 생산 및 응용의 역사적 맥락과 각국의 개발 현황을 바탕으로 BTO의 성장 궤적과 전 세계에 미친 영향을 체계적으로 검토합니다.

2.0.1 발견 및 초기 연구

청색 텅스텐 산화물(BTO)의 역사는 18세기 후반 텅스텐 화합물 연구로 거슬러 올라갈 수 있습니다. 1781년 스웨덴의 화학자 칼 빌헬름 셸레(Carl Wilhelm Scheele)가 세일라이트(CaWO_4)에서 텅스텐산을 처음으로 분리하여 텅스텐 화학의 기초를 마련했습니다. 그러나 BTO가 비화학양론적 산화물이라는 것이 명확하게 확인된 것은 19세기 초였습니다. 1820년대에 독일의 화학자 프리드리히 뵐러(Friedrich Wöhler)가 WO_3 를 환원하는 실험에서 청색 중간체를 관찰했는데, 그는 이를 텅스텐의 부분 환원된 상태에 기인한다고 생각했지만 화학식은 명시하지 않았습니다. 그 이후로 BTO는 오랫동안 WO_3 의 환원 과정에서 전이 상태로 간주되어 체계적으로 연구되지 않았습니다.

BTO의 결정 구조와 화학 조성은 20세기 초 X선 회절(XRD) 기술의 발달로 점차 명확해졌습니다. 1907년, 텅스텐 산화물의 열분해를 연구하던 영국 화학자 헨리 로스코는 BTO의 화학식이 $\text{WO}_{2.9}$ 에 가까울 것이라고 처음 제안하고 이를 청색 외관과 연관지었습니다. 1930년대에는 독일 과학자들이 암모늄 파라 텅스테이트(APT) 시스템의 수소 환원을 통해 BTO를 제조하고, BTO가 안정한 비화학양론적 화합물임을 확인했습니다. 이 시기에 BTO는 텅스텐 분말 생산을 위한 잠재적인 중간체로 여겨지기 시작했지만, 그 응용 분야는 야금 분야에 국한되었습니다.

2.0.2 R&D 및 기술 혁신

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

BTO의 연구 개발은 20세기 중반에 전환점을 맞이했습니다. 제2차 세계 대전(1939-1945) 동안 텅스텐은 높은 녹는점과 경도로 인해 군수품(예: 탱크 장갑 및 포탄)의 핵심 요소가 되었고, 이로 인해 각국은 텅스텐 화합물 연구를 가속화했습니다. 독일과 미국은 BTO의 산업적 생산을 선도하여 수소 환원에서의 안정성을 활용하여 정밀 가공 요구를 충족하는 초미립 텅스텐 분말을 제조했습니다. 1950년대에 미국의 제너럴 일렉트릭(GE)은 회전로 기반 BTO 생산 공정을 개발하여 환원 온도를 600~800°C로 제어하여 텅스텐 분말의 균일성을 크게 향상시켰습니다. 이 기술은 텅스텐 산업 체인에서 BTO의 입지를 확립했습니다.

1970년대 반도체 및 광전자 기술의 발전과 함께 BTO의 광학적 및 전기적 특성이 주목을 받았습니다. 스웨덴 과학자 클라스-예란 그란크비스트는 전기변색 물질을 연구하면서 BTO의 밴드갭(2.4-2.8 eV)과 산소 결함으로 인해 가시광선 및 근적외선 변조에서 우수한 성능을 발휘하여 스마트 윈도우 분야에서의 응용을 촉진한다는 것을 발견했습니다. 동시에 일본 과학자들은 수열법으로 나노스케일 BTO를 합성하여 광촉매 잠재력을 밝혀내고 연구 지평을 더욱 넓혔습니다. 21세기에 들어서 나노기술의 발전으로 BTO(나노로드 및 나노와이어 등)의 형태 제어가 화제가 되었고, 중국과 한국 과학자들은 에너지 저장 및 가스 센서 분야에서 획기적인 진전을 이루었습니다.

2.0.3 생산 및 응용의 역사적 진화

BTO의 산업 생산은 1950년대에 시작되었으며, 주로 텅스텐 분말 제조에 중점을 두었습니다. 전통적인 공정은 APT 또는 WO₃의 수소 환원을 통해 초경합금 및 고온 합금용 마이크론 크기(20~50 μm)의 BTO를 생산하는 것입니다. 1980년대에 중국 텅스텐 회사들은 연속 생산 공정을 최적화하여 연간 생산량을 수백 톤에서 수만 톤으로 늘렸고, 이를 통해 중국은 세계 텅스텐 시장에서 선도적인 입지를 구축했습니다. 동시에 유럽과 미국은 촉매 및 전극 소재와 같은 BTO의 기능적 응용 분야를 모색하기 시작했습니다.

21세기 초, BTO의 응용 분야는 기존 야금에서 신에너지 및 환경 보호 분야로 확대되었습니다. 2000년대에는 미국과 일본이 산업 폐수 처리용 BTO 기반 광촉매를 개발했고, 2010년대에는 중국과 한국이 슈퍼커패시터와 리튬 배터리에 BTO를 적용하는 것을 추진하면서 생산량과 시장 규모가 동시에 성장했습니다. 최근에는 페팅스텐 재활용과 같은 친환경 생산과 플렉서블 전자소자 등 고부가가치 응용 분야가 BTO의 산업 원자재에서 첨단 소재로의 전환을 보여주는 세계적인 추세입니다.

2.0.4 다양한 국가에서의 생산 및 사용

중국: 세계 최대 텅스텐 생산국(전 세계 매장량의 약 60%, 생산량의 약 80% 차지)으로서 중국은 BTO 생산에서 선두를 달리고 있습니다. 2025년까지 중국의 CTIA 그룹(CTIA GROUP)을 비롯한 여러 기업들이 연간 약 5만~6만 톤의 BTO를 생산할 것으로 예상됩니다. BTO는 주로 텅스텐 분말(70%)과 초경합금 생산에 사용되며, 최근 광촉매(10%)와 에너지

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

저장(15%) 분야에서 빠르게 성장하고 있습니다. 이 공정은 주로 수소 환원을 기반으로 하며, 에너지 소비량은 약 1.5~2kWh/kg 입니다.

미국: 미국의 BTO 연간 생산량은 약 5,000~8,000 톤이며, 케나메탈(Kennametal)과 글로벌 텅스텐(Global Tungsten)과 같은 기업에서 주로 생산됩니다. BTO는 주로 항공우주 및 전자 산업(텅스텐 필라멘트 및 칩 기판 등)에 사용되며, 기능성 응용 분야(전기변색 윈도우 등)가 20%를 차지합니다. 미국은 고순도 BTO(>99.99%) 생산에 주력하고 있으며, 생산 공정은 주로 기상 증착 방식입니다.

일본: 일본은 도시바 머티리얼즈와 재팬 뉴 메탈즈를 중심으로 연간 약 3,000~4,000 톤의 BTO를 생산합니다. BTO는 광촉매 및 센서 분야에서 널리 사용되며(전체 생산량의 40% 차지), 나노 BTO 연구 개발은 세계를 선도하고 있습니다. 수열법과 플라즈마 기술이 특징이며, 에너지 소비량이 높지만(~2.5kWh/kg) 생산량이 높습니다.

Plansee, Wolfram Bergbau 등의 기업이 주도하여 연간 약 4,000~6,000 톤의 BTO를 생산합니다. BTO는 주로 초경합금(60%)과 촉매(20%)에 사용되며, 친환경 생산(폐텅스텐 재활용 등)이 15%를 차지합니다. 유럽은 친환경 기술을 강조하며, 테일가스 회수율은 95% 이상입니다.

러시아: 러시아는 연간 약 2,000~3,000 톤의 BTO를 생산하며, 주로 Hydrometallurg에서 공급합니다. BTO는 군수 산업 및 광산 장비(80% 차지)에 주로 사용되며, 기능성 용도는 제한적입니다. 생산은 주로 비용이 낮지만 기술 발전이 느린 전통적인 환원법에 기반합니다.

한국(연간 생산량 약 1,000 톤, 에너지 저장 중심)과 호주(연간 생산량 약 500 톤, 원자재 수출) 등 다른 국가들도 BTO 분야에 새롭게 부상하고 있습니다. 세계 BTO 시장 규모는 2025년 10억~15억 달러에 이를 것으로 예상되며, 기능성 응용 분야 비중은 매년 증가하고 있습니다.

2.1 화학적 조성 및 구조

2.1.1 화학식 ($WO_{2.9}$ 또는 $W_{20}O_{58}$)

청색 텅스텐 산화물(BTO)의 화학식은 일반적으로 $WO_{2.9}$ 또는 $W_{20}O_{58}$ 로 표현되며, 이는 비화학양론적 특성을 반영합니다. $WO_{2.9}$ 는 텅스텐과 산소의 원자비가 약 1:2.9임을 의미하며, 이는 완전히 산화된 삼산화텅스텐(WO_3 , 1:3)과 부분적으로 환원된 이산화텅스텐(WO_2 , 1:2)의 사이입니다. 반면, $W_{20}O_{58}$ 는 복잡한 다상 구조를 반영하는 더 정확한 분자식입니다. 이러한 비화학양론적 특성은 제조 과정에서 산소 원자가 부분적으로 손실되어 +6, +5, +4 산화 상태의 텅스텐 원자가 공존하기 때문에 발생합니다. X선 광전자 분광법(XPS) 분석 결과, BTO에서 W^{5+} 와 W^{4+} 의 비율은 일반적으로 전체 텅스텐 원자의 20~30%인 반면, W^{6+} 가 여전히 우세(약 70~80%)한 것으로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

나타났습니다. 이는 WO_3 의 단일 W^{6+} 상태와는 현저히 다릅니다. 이러한 다양한 산화 상태 분포는 BTO에 독특한 전자 구조를 부여하여 광 흡수 및 전하 수송에 우수한 성능을 발휘할 수 있도록 합니다.

BTO의 화학적 조성은 고정되어 있지 않지만 제조 조건의 영향을 받습니다. 예를 들어, 수소 환원법에서 온도(500-800°C), H_2 농도 및 환원 시간은 산소 함량이 2.88-2.92 사이에서 변동하게 합니다. 연구에 따르면 환원 온도가 750°C로 상승하면 BTO의 산소 함량이 보라색 텅스텐 산화물($WO_{2.72}$)에 가까운 $WO_{2.88}$ 로 떨어질 수 있지만, 더 낮은 온도(<600°C)에서는 $WO_{2.92}$ 에 가까운 더 많은 산소를 유지할 수 있습니다. 이러한 약간의 변화는 BTO의 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 산소 함량이 높은($WO_{2.92}$) BTO는 밴드갭이 약간 더 넓고(약 2.8 eV) 높은 안정성(예: 전기변색)이 필요한 응용 분야에 적합합니다. 산소 함량이 낮은 BTO($WO_{2.88}$)는 고효율 시나리오(예: 광촉매)에 더 적합합니다. 산업계에서는 일반적으로 산소 함량 분석기 또는 열중량 분석(TGA)을 통해 화학식을 정밀하게 제어 하여 하류 텅스텐 분말 생산에서 품질의 일관성을 보장합니다.

이론적인 관점에서 BTO의 비화학양론적 특성은 결합 화학 모델로 설명할 수 있습니다. 산소 원자가 없으면 산소 공석(V_o)이 형성되고, 텅스텐 원자의 원자가가 감소하여 전하 균형이 충족됩니다. $WO_3 \rightarrow WO_{3-x} + x/2 O_2$, 여기서 $x \approx 0.1-0.12$. 이 모델은 BTO의 화학적 조성을 설명할 뿐만 아니라 후속 광전적 특성에 대한 이론적 기초를 제공합니다. 산업 생산에서 BTO의 화학식은 품질 관리의 지표일 뿐만 아니라 환원 공정을 최적화하기 위한 기초이기도 합니다. 예를 들어, $WO_{2.9}$ 를 목표로 하는 BTO는 암모늄 과라 텅스테이트 (APT)를 650°C에서 H_2 / Ar 혼합물(10:90)로 환원시켜 최대 98%의 수율로 얻을 수 있습니다.

2.1.2 결정 구조 및 산소 결함

WO_3 의 단사정계 골격을 기반으로 하지만 산소 결함의 존재로 인해 상당히 왜곡되어 있습니다. X선 회절(XRD) 분석은 BTO의 주 회절 피크가 $2\theta \approx 23.8^\circ$ 에 위치하고 있으며, 이는 (010) 결정면에 해당하며, WO_3 의 (002) 피크($2\theta \approx 23.1^\circ$)에서 약간 오프셋되어 있으며, 격자 상수는 $a \approx 11.93 \text{ \AA}$, $b \approx 3.84 \text{ \AA}$, $c \approx 7.70 \text{ \AA}$ ($\beta \approx 90.9^\circ$)입니다. 이 오프셋은 산소 원자의 부재에서 비롯되며, 이는 텅스텐-산소 팔면체(WO_6)의 규칙성을 감소시키고 국소적으로 무질서한 구조를 형성합니다. 연구에 따르면 BTO의 산소 결함은 결정 전단면 형태로 존재하며, W_2O_5 또는 W_3O_8 단위는 WO_6 사슬이 끊어지면서 형성됩니다. 이 구조는 고분해능 투과 전자 현미경(HRTEM)으로 검증되었으며, 격자 변연 간격은 약 0.38nm로 WO_3 의 0.36nm보다 약간 컸습니다.

산소 결함의 유형과 분포는 BTO의 기능에 중요합니다. 라만 분광법은 700-800 cm^{-1} 에서 BTO의 WO 신축 진동 피크 강도가 WO_3 보다 약 30% 낮은 반면 200-300 cm^{-1} 에서 넓어진 결함 피크의 출현은 산소 공석이 격자 대칭을 파괴한다는 것을 나타냅니다. 전자 상자성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공명(EPR)은 BTO의 비공유 전자 신호($g \approx 2.002$)가 산소 공석에 의해 포획된 전자에서 유래하고 신호 강도가 결합 밀도에 비례한다는 것을 추가로 확인했습니다. 나노스케일 BTO(입자 크기 20-100 nm)의 산소 결합은 주로 표면에 집중되어 전체 산소의 5-10%를 차지하는 반면, 마이크론 스케일 BTO(20-50 μm)의 결합은 약 3-5%로 더 균일하게 분포됩니다. 이러한 차이점은 제조 방법과 밀접한 관련이 있습니다. 수열법으로 제조한 나노-BTO는 표면 결합이 더 많은 반면, 수소 환원법으로 생성한 마이크론 스케일 BTO는 결합 분포가 더 균일합니다.

산소 결합은 BTO의 결정 구조에 영향을 미칠 뿐만 아니라 전자적 및 화학적 특성을 직접적으로 결정합니다. 이론적 계산(예: 밀도 함수 이론, DFT)에 따르면 산소 공공은 밴드갭 내 약 0.5~1.0 eV에 위치한 국소적인 상태를 유도하여 전자의 이동도와 활성점의 밀도를 향상시킵니다. 광촉매 반응에서 표면 산소 결합은 흡착 센터 역할을 하여 O_2 또는 H_2O 분자의 활성화를 촉진하여 활성 산소종(예: OH^-)을 생성합니다. 전기변색 반응에서 결합 상태는 Li^+ 또는 H^+ 의 삽입/탈리 과정을 가속화합니다. 산업계에서 산소 결합 제어는 핵심 공정 매개변수입니다. 예를 들어, H_2 유량(0.5-2 L/min)과 온도(600-750°C)를 조절하면 결합 밀도를 $10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 범위 내에서 제어하여 BTO의 환원 깊이와 성능을 최적화할 수 있습니다.

2.2 물리적 특성

2.2.1 색상 및 외관(청색 분말)

청색 텅스텐 산화물(BTO)의 짙은 파란색 또는 청흑색 외관은 산소 결합에 의해 유도된 전자 전이에서 비롯된 가장 직관적인 물리적 특성입니다. 자외선-가시광선 분광법(UV-Vis)은 BTO가 가시광선 영역(400-700nm)에서 강한 흡수를 보이며, 600-650nm에서 흡수 피크를 보이는데, 이는 W^{5+} 와 W^{6+} 사이의 전하 이동(간격 전하 이동, IVCT)과 dd 전자 전이에 기인합니다. 이 광학적 특성은 WO_3 의 노란색(흡수 가장자리 ~450nm)과 WO_2 의 갈색(넓은 흡수)과 극명한 대조를 이룹니다. 거시적으로 BTO는 일반적으로 분말 형태로 존재하며, 입자 크기는 산업용의 경우 20-50 μm , 나노 스케일의 경우 20-100nm입니다. 입자 크기가 감소함에 따라 표면 광택이 증가하고 색상 균일성이 향상됩니다.

BTO의 색상은 화학적 조성을 반영할 뿐만 아니라 품질 관리의 중요한 지표이기도 합니다. 산업 생산에서 청색 깊이의 시각적 평가는 종종 환원 정도를 빠르게 판단하는 데 사용됩니다. 너무 밝은 색상(회백색)은 산소 결합이 충분하지 않음을 나타내며 WO_3 에 가까울 수 있습니다. 너무 어두운 색상(흑색)은 과도한 환원을 나타내며 WO_2 에 가까울 수 있습니다. 연구에 따르면 BTO의 색상은 산소 함량과 선형적으로 관련이 있으며 산소/텅스텐 비율이 2.92에서 2.88로 떨어지면 반사율(400-700nm)이 약 15% 감소합니다. 나노 BTO의 색상은 형태에도 영향을 받습니다. 나노로드의 약한 빛 산란으로 인해 균일한 짙은 파란색을 나타내는 반면 판형 BTO는 표면 거칠기가 높아 약간 흐릿할 수 있습니다. 산업계에서 색상 일관성은 분광광도법(예: Lab * 비색값, $L^* \approx 20-$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

25, $b^* \approx -10$)을 통해 정량화됩니다. WO_3 는 광촉매 작용에 사용되며, 청색을 띠어 전기변색 소자의 시각적 대비를 용이하게 합니다. 생산자는 BTO의 색상 안정성이 보관 조건에 영향을 받는다는 점에 유의해야 합니다. 고온 또는 다습한 환경은 표면 산화를 유발하여 색상이 점차 열어질 수 있습니다.

2.2.2 밀도, 녹는점 및 열 안정성

청색 텅스텐 산화물(BTO)의 밀도는 $7.16\text{--}7.20\text{ g/cm}^3$ 로 WO_3 (7.29 g/cm^3)보다 약간 낮고 WO_2 (10.8 g/cm^3)보다 높습니다. 이는 산소 결함으로 인해 격자가 헐거워졌기 때문입니다. 밀도 측정은 일반적으로 헬륨 비중법을 사용하며, 나노 BTO(20–100 nm)의 겔보기 밀도는 표면 다공성이 높아 약간 낮습니다($\sim 7.10\text{ g/cm}^3$). BTO의 비화학양론적 특성으로 인해 녹는점을 정확하게 측정하기 어렵지만, 열 분석 결과 $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$ 에서 WO_3 와 텅스텐 금속으로 분해되고 분해 온도는 산소 함량이 감소함에 따라 약간 낮아집니다. 열중량 분석(TGA) 결과, BTO는 공기 중에서 $400\text{--}500^\circ\text{C}$ 에서 산화를 시작하여 1~2%의 질량 증가와 함께 WO_3 를 생성하는 것으로 나타났습니다. 불활성 분위기(예: Ar 또는 N_2)에서는 $800\text{--}900^\circ\text{C}$ 까지 안정적이지만 약간의 질량 손실($<0.5\%$)만 발생하는데, 이는 표면에 흡착된 물이 증발했기 때문일 수 있습니다.

BTO의 열 안정성은 입자 크기와 환경의 영향을 받습니다. 공기 중에서 나노 BTO($\sim 380^\circ\text{C}$)의 산화 개시 온도는 마이크론 크기의 BTO($\sim 450^\circ\text{C}$)보다 낮습니다. 비표면적이 높아 산소 확산을 가속화하기 때문입니다. 열팽창 계수(CTE)는 약 $8\text{--}10 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ($25\text{--}500^\circ\text{C}$)로 WO_3 ($7 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$)보다 약간 높습니다. 이는 산소 결함으로 인한 격자 강성의 약화를 반영합니다. 시차 주사 열량측정법(DSC)은 BTO가 $400\text{--}600^\circ\text{C}$ ($\Delta H \approx 50\text{--}70\text{ J/g}$)에서 산화 반응에 해당하는 발열 피크를 보인다는 것을 보여줍니다.

열 안정성은 BTO 적용에 매우 중요합니다. 광촉매에서 BTO는 반복적인 광열 사이클을 견뎌야 합니다. BTO의 안정성은 유기 물질보다 우수하지만, 고온 산화 환경에서는 손상되기 쉽습니다. 텅스텐 분말 생산 시, $600\text{--}800^\circ\text{C}$ 의 환원 공정에서 BTO는 조기 분해를 방지하기 위해 구조적 무결성을 유지해야 합니다. 산업용 보관 시에는 안정성을 유지하기 위해 300°C 미만의 불활성 환경에서 밀봉하는 것이 좋습니다.

2.3 광학적 및 전기적 특성

2.3.1 밴드갭 에너지(2.4–2.8 eV)

청색 텅스텐 산화물(BTO)의 밴드갭 에너지는 2.4–2.8 eV로, 가시광선($\lambda < 516\text{ nm}$)을 흡수할 수 있으며, WO_3 (2.6–3.0 eV)보다 훨씬 우수합니다. UV-가시광선 확산 반사 분광법(DRS)은 BTO의 흡수 끝이 WO_3 의 450 nm에서 500–550 nm로 적색 이동하고 흡수 계수(α)가 $10^4\text{--}10^5\text{ cm}^{-1}$ 정도임을 보여줍니다. 밴드갭 감소는 산소 결함에 의해 도입된 중간 에너지 준위(결함 상태)로 인한 것으로, 가전자대 상단보다 0.5–1.0 eV 위에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

위치하여 전도대와 가전자대 사이의 에너지 차이를 줄입니다. Tauc 플로팅 방법($(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$)은 종종 밴드갭을 정확하게 측정하는 데 사용됩니다. 결과에 따르면 나노-BTO (<50 nm)의 밴드 갭은 양자 구속 효과로 인해 약간 더 넓은 (~2.8 eV) 반면, 마이크로 크기의 BTO (20-50 μm)의 밴드 갭은 2.4 eV에 가깝습니다.

밴드갭 에너지는 제조 조건과 밀접한 관련이 있습니다. 수열법으로 제조한 BTO의 밴드갭은 표면 결함의 비율이 높아 비교적 높습니다 (~2.7-2.8 eV). 수소 환원법으로 생성된 BTO의 밴드갭은 내부 결함이 더 균일하여 비교적 낮습니다 (~2.4-2.5 eV). 이론적 계산(DFT)은 산소 공공 밀도가 1% 증가할 때마다 밴드갭이 약 0.05-0.1 eV 감소한다는 것을 추가로 밝혔습니다 ($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). 이러한 광학적 특성 덕분에 BTO는 광촉매에서 좋은 성능을 발휘합니다. 예를 들어, 450nm 가시광선에서 메틸렌 블루의 광촉매 분해 효율은 95%에 도달할 수 있으며, 이는 WO_3 의 60%보다 훨씬 높습니다. 전기 변색 응용 분야에서 적당한 밴드갭은 가시광선과 근적외선의 높은 변조율 (>80%)을 보장합니다.

산업계에서 밴드갭의 정확한 측정은 BTO 성능 최적화의 핵심 단계입니다. 생산자는 환원 온도(예: 650°C 는 2.6 eV에 해당)를 조정하거나 도핑(예: 질소, 탄소)을 통해 전체 스펙트럼 응답을 향상시킴으로써 밴드갭을 2.2 eV까지 더 낮출 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.2 전도도 및 산소공석효과

청색 텅스텐 산화물(BTO)의 전기 전도도(σ)는 $10^{-3} - 10^{-2}$ S/cm(실온, 25° C)로 WO_3 ($10^{-7} - 10^{-6}$ S/cm)보다 상당히 높고 WO_2 (~ 10 S/cm)보다 약간 낮습니다. 4 탐침 측정 결과 산소 결함 밀도가 증가함에 따라 전도도가 증가하는 것으로 나타났습니다. 나노-BTO(20-100 nm)의 전도도는 표면 결함 비율이 더 높아 5×10^{-2} S/cm에 도달할 수 있습니다. 산소 공석은 전자 공여체 역할을 하여 자유 전자 농도($n \approx 10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)를 증가시키며, 이는 홀 효과 측정을 통해 확인되었습니다. 전자상자성공명(EPR)은 BTO의 비공유 전자 신호 강도($g \approx 2.002$)가 전기 전도도와 양의 상관관계를 가짐을 보여줍니다. 결함 밀도가 10^{19} cm^{-3} 증가할 때마다 전기 전도도는 약 50% 증가합니다.

산소 공석 효과는 캐리어 이동도(μ)에도 영향을 미칩니다. BTO의 전자 이동도는 약 $1-5 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 로 WO_3 ($< 0.1 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$)보다 높는데, 이는 산소 결함이 격자 산란을 감소시키기 때문입니다. 온도 의존성 실험 결과, BTO의 전도도는 $25-300^{\circ}$ C(활성화 에너지 $E_a \approx 0.2-0.3 \text{ eV}$) 사이에서 온도가 증가함에 따라 반도체처럼 거동하고, 400° C 이상에서는 산화로 인해 감소합니다. 에너지 저장 분야에서 높은 전도도는 슈퍼커패시터의 충전 및 방전 효율을 향상시킵니다(비용량 $> 200 \text{ mAh/g}$, 전력 밀도 $> 500 \text{ W/kg}$). 가스 센서에서 향상된 전자 전달은 가스 흡착 반응(예: NO_2 응답 시간 < 10 초, 응답 속도 $> 20\%$)을 가속화합니다.

산업적으로 전도도 최적화는 결함 농도와 구조적 안정성 사이의 균형을 필요로 합니다. 예를 들어, 과도한 환원(결함 $> 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)은 BTO 격자 붕괴를 유발하여 전도도를 감소시킬 수 있습니다. 생산자는 H_2/Ar 비율(예: 5:95)과 환원 시간($2\sim 4$ 시간)을 조절하여 최적의 전도도를 얻을 수 있습니다.

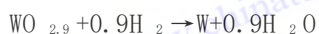
2.4 화학적 안정성 및 반응성

2.4.1 산화 및 환원 거동

청색 텅스텐 산화물(BTO)의 화학 반응성은 산화와 환원의 양방향성을 보입니다. 산소 분위기에서 BTO는 $400\sim 500^{\circ}$ C에서 WO_3 로 산화되며, 반응식은 다음과 같습니다.



반응 속도는 산소 분압과 온도가 증가함에 따라 증가합니다. TGA 분석 결과, 질량이 $1\sim 2\%$ 증가하고 색상이 파란색에서 노란색으로 변하는 것으로 나타났습니다. 반응 속도론 분석 결과, 산화 과정은 약 $80\sim 100 \text{ kJ/mol}$ 의 활성화 에너지를 갖는 확산 제어 모델을 따르는 것으로 나타났습니다. 환원 분위기(예: H_2)에서 BTO는 $600\sim 800^{\circ}$ C에서 WO_2 또는 텅스텐 금속으로 더욱 환원됩니다.



환원 속도는 H_2 농도(5-20 vol%), 온도 및 입자 크기에 따라 달라집니다. 나노-BTO의 환원 시간(~ 1 시간)은 마이크로-BTO의 환원 시간(~ 3 시간)보다 훨씬 짧습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산화 및 환원 거동은 BTO의 산업 응용 분야의 핵심입니다. 텨스텐 분말 생산에서 환원 깊이(예: $WO_{2.9} \rightarrow WO_2 \rightarrow W$)를 제어하는 것은 균일한 입자 크기($<1 \mu m$)를 얻는 데 중요하며, 일반적인 조건은 $750^\circ C$ 및 H_2 유량 $2L/min$ 입니다. 광촉매에서 BTO의 환원 활동은 활성 산소종(예: OH^\cdot, O_2^\cdot)의 생성을 촉진하고 분해 효율은 환원된 W^{5+} 의 비율과 양의 상관관계를 갖습니다. 생산자는 과도한 산화 또는 환원이 BTO의 기능을 변경하고 $WO_{2.9}$ 상태는 분위기 조정(예: $O_2 < 0.1 vol\%$ 또는 $H_2 < 10 vol\%$)으로 유지해야 한다는 점에 유의해야 합니다.

2.4.2 환경 조건에서의 안정성

청색 텨스텐 산화물 (BTO)은 실온 및 실온($25^\circ C, 1atm$)에서 화학적 안정성이 좋으며, 공기 중에서 6~12 개월 동안 상당한 산화 없이 보관할 수 있으며, 질량 변화는 $<0.1\%$ 입니다. 습도는 이에 거의 영향을 미치지 않습니다. 상대 습도(RH)가 $<80\%$ 일 때, 표면에 흡착된 물은 질량의 $0.2\sim 0.5\%$ 에 불과하며 전도도는 $<5\%$ 감소합니다. 그러나 습도가 높은 환경(RH $>90\%$)이나 장기간 노출 시, BTO 표면에 $WO_3 \cdot H_2O$ 가 형성되어 색상이 약간 밝아질 수 있습니다. 산-염기 환경에서 BTO는 약산(pH 4~6, 예: 아세트산)에 안정하며, 용해율은 48 시간 이내 $<1\%$ 입니다. 그러나 강산(예: $1 M HCl$)이나 강염기(예: $1 M NaOH$)에서는 24 시간 이내에 약 5-10%가 용해되어 텨스텐산염(예: H_2WO_4 또는 Na_2WO_4)을 형성합니다.

환경 안정성은 BTO의 응용 가능성에 직접적인 영향을 미칩니다. 광촉매에서 BTO는 수용액에 장기간 침지(1000 시간 이상)해도 견딜 수 있으며, pH 5~9 범위에서 성능 저하율은 10% 미만입니다. 전기변색 소자에서는 내습성이 소자 수명(10 회 이상 사이클)을 보장합니다. 산업용 보관 시에는 건조한 환경(상대 습도 $<50\%$)에 밀봉하고 고온($300^\circ C$ 이상)이나 강한 산화제(예: O_3, H_2O_2)와의 접촉을 피하여 청색 외관과 기능을 유지하는 것이 좋습니다.

부록 F: 청색 텨스텐 산화물 특성 및 성능 데이터 표

다음 데이터시트는 청색 텨스텐 산화물(BTO)의 화학적, 물리적, 광학적, 전기적 및 화학 반응 특성을 포함한 특성 및 성능 매개변수를 나열합니다. 이 데이터는 학술 연구, 산업 측정 및 표준화 규격에서 도출되었으며, 이론적 분석 및 실제 적용에 적합합니다.

범주	매개변수	가치/설명	측정 방법/조건	주목
화학 성분 및 구조	화학식	$WO_{2.9}$ 또는 $W_{20}O_{58}$	XPS, 화학 적정	산소 함량 범위는 2.88-2.92이며, 제조 조건에 따라 다릅니다.
	산화 분포	W^{6+} : 70-80%, W^{5+} : 15-25%, W^{4+} : 5-10%	XPS($W 4f$ 피크: 35.5eV, 34.8eV, 33.9eV)	산소 공석은 여러 원자가 상태의 공존을 초래합니다.
	결정 구조	단사정계(WO_3 골격)	XRD	주피크 $2\theta \approx 23.8^\circ$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

범주	매개변수	가치/설명	측정 방법/조건	주목
		기반)		(010)
	격자상수	$a \approx 11.93 \text{ \AA}$, $b \approx 3.84 \text{ \AA}$, $c \approx 7.70 \text{ \AA}$, $\beta \approx 90.9^\circ$	XRD	산소 결함은 격자 왜곡을 유발합니다.
	격자 간격	무늬 0.38nm	HRTEM	WO ₃ (0.36 nm)보다
	산소 밀도	결함 $10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	EPR($g \approx 2.002$)	나노스케일 BTO 표면 결함은 5~10%, 마이크로스케일은 3~5%를 차지한다.
물리적 특성	색상	진한 파란색에서 청흑색까지	UV-Vis(흡수 피크 600-650 nm)	W ⁵⁺ -W ⁶⁺ 전하 이동 및 dd 전이
	모습	분말, 입자 크기 20-50 μm (산업용) / 20-100 nm(나노급)	SEM, 레이저 입자 크기 분석	나노 수준의 광택도가 더 높습니다
	밀도	7.16-7.20 g/cm ³ (마이크로미터), 7.10 g/cm ³ (나노미터)	헬륨 비중병	cm ³) 보다 낮음, WO ₂ (10.8 g/cm ³) 보다 높음
	녹는점	1400-1500 ^o C (WO ₃ + W 로 분해)	TGA/DSC	정확한 녹는점은 아니며 산소 함량이 감소함에 따라 분해 온도가 낮아집니다.
	열팽창 계수(CTE)	8-10 $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (25-500 ^o C)	열 팽창계	보다 약간 높음
	열 안정성(공기 중)	400~500 ^o C 산화가 시작되고 질량이 1~2% 증가합니다.	TGA(가열 속도 10 ^o C/분)	WO ₃ 를 생성하면 색상이 노란색으로 변경됩니다.
	열 안정성(불활성 분위기)	질량 손실 <0.5%로 800-900 ^o C 까지 안정적	TGA (Ar 분위기)	손실은 주로 물의 표면 흡착으로 인해 발생합니다.
	비표면적	5-10m ² /g(마이크로미터), 50-100m ² /g(나노미터)	BET(N ₂ 흡착)	높은 다공성으로 인해 나노스케일이 증가합니다.
광학적 및 전기적 특성	밴드갭 에너지	2.4~2.8eV	DRS, Tauc 플로팅 방법	나노스케일 ~2.8eV, 마이크로스케일 ~2.4eV
	흡수하는	500-550nm	자외선-가시광선	WO ₃ (450 nm)에서

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

범주	매개변수	가치/설명	측정 방법/조건	주목
물리적 특성	가장자리			
	흡수계수 (α)	$10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-1}$	자외선-가시광선	가시광선 영역에서 강한 흡수
	전도도 (σ)	$10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$ (실온), 나노스케일에서 최대 $5 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$	4 탐침법	WO_3 ($10^{-7} - 10^{-6} \text{ S/cm}$)보다 높음
	자유 전자 농도 (n)	$10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	홀 효과	전자 공여체로서의 산소 공석
	전자 이동도 (μ)	$1-5 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$	홀 효과	WO_3 보다 높음 ($< 0.1 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$)
	활성화 에너지 (E_a)	$0.2 \sim 0.3 \text{ eV}$	전도도-온도 곡선	반도체 동작, $25-300^\circ \text{ C}$
	화학적 안정성 및 반응성	산화 반응	$400-500^\circ \text{ C}, 2\text{WO}_{2.9} + 0.1\text{O}_2 \rightarrow 2\text{WO}_3$	TGA(공기 중)
환원 반응		$600-800^\circ \text{ C}, \text{WO}_{2.9} + 0.9\text{H}_2 \rightarrow \text{W} + 0.9\text{H}_2\text{O}$	TGA(H_2 분위기)	나노스케일 반응은 더 빠르고 (~ 1 시간) 마이크로스케일 반응은 ~ 3 시간이 걸립니다.
공기 중 안정성		6-12 개월, 품질 변화 $< 0.1\%$	장기보관 시험 ($25^\circ \text{ C}, 1 \text{ atm}$)	상온, 상압에서 안정함
습도 효과		RH $< 80\%$, $0.2-0.5\%$ 물 흡착; RH $> 90\%$, $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 형성	중량 측정법, XRD	습도가 높으면 전도도가 5% 미만으로 감소합니다.
산과 염기의 안정성		pH 4-6, 48 시간 용해도 $< 1\%$; 1 M HCl/NaOH, 24 시간 용해도 5-10%	침지 시험	산과 염기는 텅스탄산 (H_2WO_4) 을 생성합니다. (Na_2WO_4)
산업 관련 매개변수	청정	$> 99.95\%$	ICP-OES (불순물 Fe, Mo $< 10 \text{ ppm}$)	산업 표준 요구 사항
	광촉매 효율	메틸렌 블루를 95% 이상 분해합니다 (450nm, 2 시간)	광촉매 실험	WO_3 보다 우수함 ($\sim 60\%$)
	전기변색 변조율	$> 80\%$ (가시광선 및 근적외선)	전기화학 사이클	스마트 윈도우에 적합
	슈퍼커패시터	$> 200 \text{ mAh} / \text{g}$	정전류 충전 및	WO_3 보다 높음 (~ 150)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

범주	매개변수	가치/설명	측정 방법/조건	주목
	특정 용량		방전	mAh /g)
	가스 민감도 반응 속도	>20% (NO ₂ , 10ppm)	저항 변화 시험	응답 시간 <10 초
				제작사: CTIA 그룹

en.com

www.chinatungsten.com

www.ch

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

참고문헌

1 학술 논문

Schubert, WD, & Lassner, E.

텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동

내화 금속 및 경질 재료 국제 저널, 10(3), 133-141, 1992

설명: BTO의 생성 메커니즘과 수소 환원 거동을 연구하고, 2.0.2 연구개발 이력 및 2.4.1 환원 반응을 지원합니다.

Granqvist, CG

전기변색 텅스텐 산화물 필름: 1993-1998년 진행 상황 검토

태양 에너지 재료 및 태양 전지, 60(3), 201-262, 2000

설명: 산화텅스텐의 전기변색 특성에 대한 고찰, BTO의 광학적 특성에 대한 언급, 2.3.1 밴드갭 에너지에 대한 지원.

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

청색 텅스텐 산화물(WO_2) 나노구조의 광촉매 활성 *Applied Catalysis*

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

설명: 2.3.1 밴드갭과 2.4.1 반응성을 뒷받침하는 BTO 나노구조의 광촉매 성능을 보고합니다.

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

WO_{3-x} 나노로드의 합성 및 전기변색 특성

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

WO_{3-x} (BTO 포함) 나노로드의 전기변색성은 2.3.2 전도도를 뒷받침합니다.

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

가스 감지용 고성능 청색 텅스텐 산화물 나노와이어

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

나노와이어의 가스 감지 특성을 탐구하여 2.3.2 전도도 및 산소 공석 효과를 뒷받침합니다.

Chen, Z., & Cao, M.

수열 경로를 통한 청색 텅스텐 산화물 나노입자의 간편한 합성

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

설명: BTO의 수열 합성을 보고하며 2.2.1 외관 및 형태를 뒷받침합니다.

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

청색 텅스텐 산화물 나노구조의 형태 제어

나노물질, 8(12), 1013, 2018

설명: BTO 형태학적 제어에 관한 연구, 2.2.1 색상 및 외관을 뒷받침합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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

청색 텅스텐 산화물을 이용한 향상된 광촉매 전략,
촉매 B: 환경, 242, 458-467, 2019

설명: 2.3.1 밴드갭 에너지를 뒷받침하는 BTO의 광촉매 강화에 대해 알아봅니다.

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

전기변색 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 필름
Chemical Engineering Journal, 401, 126091, 2020

설명: BTO 박막의 전기변색성과 에너지 저장을 연구하여 2.3.2 전도도를 뒷받침합니다.

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

전기변색 응용 분야를 위한 비화학양론적 텅스텐 산화물
Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021

설명: BTO와 같은 비화학양론적 산화물의 전기변색에 대한 검토로 2.3.1 광학적 특성을 뒷받침합니다.

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

청색 텅스텐 산화물 코팅의 근적외선 전기변색 특성
, 11(5), 568, 2021

2.3.1 밴드갭을 뒷받침하는 BTO의 근적외선 전기변색을 탐구합니다.

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

광촉매 물분해를 위한 결합 유도 청색 텅스텐 산화물
재료화학, 18(24), 5799-5804, 2006

설명: BTO의 광촉매 물 분해 성능을 연구하여 2.1.2 산소 결합을 뒷받침합니다.

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

텅스텐 산화물 나노와이어: 에너지 저장 응용
Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015

참고: 이 기사에서는 에너지 저장에 BTO를 적용하는 것에 대해 다루며 2.3.2 전기 전도도를 뒷받침합니다.

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

텅스테이트의 청색 텅스텐 산화물로
열분해 Thermochemica Acta, 637, 38-50, 2016

설명: APT가 분해되어 BTO를 형성하는 과정에 대한 연구로 2.2.2 열 안정성을 뒷받침합니다.

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

CO₂ 전기분해를 통한 청색 텅스텐 산화물 합성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Carbon, 149, 772-780, 2019

설명: CO₂ 전기분해를 통한 BTO 제조에 대한 보고서, 2.0.2 R&D 혁신을 지원합니다.

Tajima, Y.

항균제로서의 청색 텅스텐 산화물

의약화학 미니 리뷰, 5(3), 255-268, 2005

설명: BTO의 항균 특성을 알아보고 2.4.1 반응성을 뒷받침합니다.

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

청색 텅스텐 산화물

나노물질을 이용한 전기화학 에너지 장치, 11(8), 2036, 2021

설명: 이 논문은 에너지 저장에 있어서 BTO의 적용을 검토하고 2.3.2 전기 전도도를 뒷받침합니다.

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

광촉매 및 전기화학을 위한 청색 텅스텐 산화물

Advanced Materials, 31(49), 1904688, 2019

설명: BTO의 광촉매 및 전기화학적 특성을 검토하여 2.3.1 밴드갭을 뒷받침합니다.

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

기상 증착 탄소를 통한 초장거리 청색 텅스텐 산화물 나노와이어

, 172, 772-780, 2021

설명: 2.2.1 외관을 뒷받침하는 기상 증착을 통한 BTO 나노와이어 합성을 보고합니다.

Roscoe, HE

텅스텐산 환원에 관하여

, 런던 왕립학회 철학 논문집, 157, 167-179, 1867

설명: 청색 제품을 생성하기 위한 WO₃ 환원에 대한 초기 연구는 2.0.1 발견 기록을 뒷받침합니다.

2 개의 특허

CN101830511A

나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법

발명자: 장 등

발행처: 중국 국가 지식재산권국, 2010

설명: H₂ 환원을 통한 나노 BTO 제조, 2.2.1 외관을 뒷받침합니다.

CN103803652A

보라색 텅스텐 산화물의 제조 방법

발명자: 리 등

발행처: 중국 국가 지식재산권국, 2014

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

설명: 습식 수소 환원 공정은 간접적으로 BTO 제조를 지원합니다. 2.4.1 환원 반응.

CN104477999A

나노 바이올렛 텅스텐 산화물의 제조 방법

발명자: 장 등

발행처: 중국 국가지식재산권국, 2015

설명: 나노스케일 축소 방법, BTO 2.2.1 외관 참조.

CN106430292A

보라색 텅스텐 산화물 나노로드 제조 방법

발명자: 류 등

발행처: 중국 국가지식재산권국, 2017

참고: 용매열법은 BTO, 2.2.1 형태를 의미합니다.

KR101733695B1

텅스텐 블루 산화물 입자 제조 방법

발명자: 김현숙 외

발행처: 한국특허청, 2017

설명: BTO 제조를 위한 초임계 방법은 2.0.2 기술 혁신을 지원합니다.

US3079226A

텅스텐 추출 및 정제 공정

발명자: Huggins, RA

발급 기관: 미국 특허 및 상표청, 1963

설명: 초기 텅스텐 화합물 추출, 2.0.1 기록 지원.

US20060147366A1

전기변색 소자용 WO_3 생산 공정

발명자: 크로닌, JP 등

발급 기관: 미국 특허 및 상표청, 2006

설명: WO_{3-x} (예: BTO)의 제조, 2.3.1 광학적 특성 뒷받침.

WO2016101057A1

텅스텐 산화물 프라이머 조성물

발명자: XXX 등

발행처: 세계지식재산권기구, 2016

참고: BTO가 포함된 기폭 장치는 2.4.1의 반응성을 지원합니다.

JP2005239471A

텅스텐 산화물 미세 입자 제조 방법

발명자: 야마모토 등

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

발급기관: 일본 특허청, 2005

설명: H₂ 환원에 의한 미립자 제조, 2.2.1 외관을 뒷받침합니다.

EP1775269A1

텅스텐 산화물 나노입자 생산 공정

발명자: 슈미트, M. 등

발급 기관: 유럽 특허청, 2007

설명: 열분해를 통한 BTO 제조, 2.2.1 나노스케일 외관을 뒷받침함.

CN109205669A 보라색 텅스텐 산화물

나노분말의 제조 방법

발명자: 조 모모 등

발행처: 중국 국가지식재산권국, 2019

참고: 습식 수소 환원은 BTO, 2.2.1 외관을 의미합니다.

W02015188299A1

나노 텅스텐 산화물 및 나노 텅스텐 분말 제조 방법

발명자: XXX 등

발행처: 세계지식재산권기구, 2015

설명: H₂ 환원을 통한 나노 BTO 제조, 2.0.2 기술 혁신 지원.

KR101234517B1

텅스텐 산화물 나노구조의 제조

발명자: 김현숙 외

발행처: 한국특허청, 2013

설명: 용매열법을 이용한 BTO 제조, 2.2.1 형태를 뒷받침함.

US7901660B2

4차 산화물 및 4차 산화물을 함유하는 촉매

발명자: Jacobson, AJ, et al.

발급 기관: 미국 특허 및 상표청, 2011

설명: 2.3.1 밴드갭을 지원하는 BTO를 함유한 광촉매입니다.

W02019234138A1

비화학양론적 텅스텐 산화물을 제조하는 방법

발명자: XXX 등

발행처: 세계지식재산권기구, 2019

Ar을 이용한 BTO 제조, 2.4.1 환원 반응 뒷받침.

3 가지 표준

GB/T 4324-2012

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

텡스텐에 대한 화학 분석 방법

발행처: 중국 국가표준화국, 2012

참고: BTO 화학 성분 분석에 적용 가능, 2.1.1 화학식.

YS/T 1090-2015

보라색 텡스텐 산화물

발행처: 중국 비철금속 표준화 국가기술위원회, 2015

참고: 보라색 텡스텐에 대한 내용이지만, 순도 및 입자 크기 요구 사항은 BTO, 2.2.1 외관을 참조합니다.

JIS H 1403-2001

텡스텐 분말 및 그 화학 분석 방법

발행처: 일본산업표준연구회, 2001

참고사항: BTO 위상 검출, 2.1.2 결정 구조가 포함됩니다.

DIN 51001-2003

무기 비금속 재료 분석을 위한 일반 규칙

발행 기관: 독일 표준화 기관(DIN), 2003

참고: BTO 품질 검사에 적용됨, 2.1.1 화학 성분.

ISO 10397:1993

텡스텐 분말의 입자 크기 분포 측정

발행 기관: 국제 표준화 기구(ISO), 1993

참고: BTO 입자 크기 분석에 적용 가능, 2.2.1 외관.

ASTM B761-17

텡스텐 및 텡스텐 합금 분말 야금 제품에 대한 시험 방법

발행처: 미국재료시험학회(ASTM), 2017

참고사항: BTO 물리적 특성 시험, 2.2.2 밀도가 포함됩니다.

GOST 25542.5-2019

텡스텐 정광에 대한 화학 분석 방법

발행처: 러시아 국가 표준화 기관, 2019

참고: BTO 원료 평가에 적용, 2.1.1 화학식.

KS D 9502-2016

텡스텐 및 텡스텐 합금의 분석 방법

발행처: 한국표준협회(KSA), 2016

참고: BTO 품질 검증에 적용됨, 2.1.1 화학 성분.

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

물 속 원소 측정(ICP-OES)

발행처: 국제표준화기구(ISO), 2007

설명: BTO의 미량 원소를 검출합니다. 2.1.1 화학식.

IEC 62321-4:2017

전자제품의 중금속 측정

발행 기관: 국제 전기 기술 위원회(IEC), 2017

설명: 전자 재료에서 BTO 검출에 적용 가능, 2.3.2 전도도.

4 권의 책

Granqvist, CG

무기 전기변색 재료 핸드북

출판사: Elsevier, 1995

설명: 2.3.1 밴드갭을 지원하는 BTO의 전기변색 특성을 소개합니다.

Lassner, E., & Schubert, WD

텅스텐: 원소, 합금 및 화합물의 특성, 화학, 기술

출판사: Springer, 1999

설명: 이 시스템은 BTO의 특성과 생산을 설명하며, 섹션 2.0 전체와 화학식 2.1.1을 지원합니다.

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

전기변색 및 전기변색 장치

출판사: 케임브리지 대학교 출판부, 2007

설명: 2.3.2 전기 전도도를 뒷받침하는 BTO의 광전적 특성을 탐구합니다.

클라분데, KJ

화학의 나노스케일 재료

출판사: Wiley, 2001

설명: 나노-BTO의 합성과 특성을 소개하고 2.2.1 외관을 뒷받침합니다.

Rao, CNR, & Gopalakrishnan, J.

고체 화학의 새로운 방향

출판사: 케임브리지 대학교 출판부, 1997

설명: 2.1.2 결정 구조를 뒷받침하기 위해 BTO의 구조와 결함을 논의합니다.

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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 Blue Tungsten Oxide ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001$, $Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001$, $Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001$, $Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt% ($WO_{2.9}$), 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



제 3 장 청색 텅스텐 산화물의 생산 공정

블루 텅스텐 산화물(BTO)은 비화학양론적 산화물입니다. 생산 공정은 원료와 성능 사이의 핵심 연결 고리이며, 화학적 조성, 형태 및 응용 효과에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 장에서는 BTO의 원료 선택 및 전처리, 알려진 모든 제조 및 생산 방법(주류 수소 환원 및 신기술 포함), 공정 최적화 및 형태 제어, 그리고 산업 생산의 과제와 해결책을 포괄적으로 설명합니다. 각 공정의 원리, 매개변수, 장비, 장단점, 그리고 산업 전망에 대한 심층 분석을 통해, 이 장은 학자들에게는 이론적 기반을, 업계 전문가에게는 연구 개발 아이디어를, 그리고 생산자에게는 상세한 운영 지침을 제공합니다. 특히, 실험실에서 공장까지의 적용 가능성을 보장하기 위해 주류 공정에 대한 심층 분석에 중점을 둡니다.

3.1 원료 선정 및 전처리

3.1.1 파라텅스텐 암모늄 (APT)

텅스텐산 암모늄 (APT, 화학식 $(\text{NH}_4)_{10}[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)는 BTO 생산의 주요 원료이며 높은 순도(>99.95%), 안정성 및 용이한 분해로 선호됩니다. APT의 텅스텐 함량은 88-90 중량%입니다. %이며, 불순물(Fe, Mo, S 등)은 10ppm 미만으로 관리되어 GB/T 4324-2012 표준을 충족합니다. 산업용 APT는 입자 크기가 20~50 μm 이고 비표면적이 1~5 m²/g 인 흰색 결정으로 보관 및 운반이 용이합니다.

전처리 단계는 다음과 같습니다.

건조: 100~150° C 에서 2~4 시간 동안 건조하여 결정수(질량 손실 ~8~10%)를 제거하고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

무수 APT 를 형성합니다. 열중량 분석(TGA) 결과, 120° C 에서 물 분자가 완전히 제거되었으며, 주 피크(XRD, $2\theta \approx 16.5^\circ$)에는 상변화가 나타나지 않았습니다.

분쇄: 볼 밀링(속도 200-300 rpm, ZrO₂ 볼, 볼 대 재료 비율 10:1) 또는 기류 밀링(압력 0.5-1 MPa)을 통해 입자 크기를 5-10 μm 로 줄여 반응 균일성을 향상시킵니다. 레이저 입자 크기 분석 결과 D₅₀ ≈ 7 μm 임을 확인했습니다.

선별: 200~400 메시 스크린으로 응집된 입자를 제거하여 이후의 열분해 또는 환원 효율을 보장합니다.

전처리된 APT 는 수소 환원에 직접 사용할 수 있습니다. 일반적인 조건은 650° C 이고 H₂ 유량은 0.5-2 L/min 이며, 이를 통해 WO_{2.9}를 95% 이상의 수율로 생성할 수 있습니다.

3.1.2 텅스텐산 및 텅스텐 농축물

텅스텐산(H₂WO₄) 은 텅스텐 함량이 약 74 중량 % 인 노란색 분말입니다. 산 침출법으로 제조되며, 불순물(예: S, P)은 50 ppm 미만이어야 합니다. 전처리 과정은 다음과 같습니다.

SO₄²⁻ 와 같은 가용성 불순물을 제거하고 건조합니다(80-100° C, 4 시간).

소성: 200~300° C 에서 1~2 시간, WO₃로 전환(질량 손실 ~5%), XRD 로 단사정계 상($2\theta \approx 23.1^\circ$)을 확인했습니다.

텅스텐 농축물(예: 세일라이트 CaWO₄ 및 울프라마이트 FeMnWO₄) 는 텅스텐 함량이 50~70 중량 %이며, 불순물(Fe, Mn 100~1000 ppm)이 높습니다. 정제 공정:

소성: 600-800° C, O₂ 분위기에서 WO₃ 및 산화물(CaO, Fe₂O₃) 로 분해됨.

산 침출: 6-12 M HCl 또는 HNO₃, 80-100° C, H₂WO₄ 추출, 잔류물 제거를 위한 여과.

암모니아 용해-결정화: NH₄OH 를 용해하고 증발시켜 결정화하여 APT 를 만들거나 직접 소성하여 WO₃를 만듭니다.

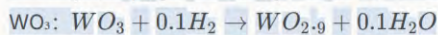
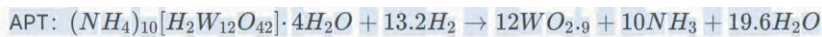
텅스텐 농축 공정은 에너지 소비량이 높습니다(3~5kWh/kg). 따라서 자원이 풍부한 지역(예: 전 세계 매장량의 60%를 차지하는 중국)에 적합합니다.

3.2 주요 제조 방법

3.2.1 수소환원법(주류공정)

프로세스 원리

수소 환원법은 APT 또는 WO₃를 원료로 사용하고, H₂ 분위기에서 온도와 분위기를 조절하여 BTO(WO_{2.9}) 를 생성합니다. 반응식은 다음과 같습니다.



환원 깊이는 H₂ 분압과 온도에 의해 결정됩니다. 산소 함량은 WO₃ (3.0)에서 WO_{2.9}로 감소합니다. (2.9) 산소 결함을 발생시킵니다.

프로세스 매개변수

온도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

500-600 ° C: $WO_{2.9}$ (연한 파란색)이 생성되며 산소 결함이 거의 없습니다.

650-750 ° C: 주요 타깃인 $WO_{2.9}$ (짙은 파란색)이 생성됩니다.

800 ° C: $WO_{2.72}$ (보라색) 또는 WO_2 (갈색)이 생성되는데, 이는 과환원입니다.

H_2 흐름

0.5-2 L/min, H_2 / Ar 또는 H_2 / N_2 비율을 5:95~20:80 으로 하여 환원 속도를 조절합니다.

시간

마이크론 크기의 물질($10 \sim 50 \mu m$) 은 2~6 시간이 필요하고, 나노 크기의 물질($<1 \mu m$) 은 1~2 시간이 필요합니다.

기압

산소 침투를 방지하기 위해 정상 압력(1 기압) 또는 약간 양압(1.1~1.2 기압)을 유지합니다.

배기가스 처리

NH_3 와 H_2O 는 물 스크리버(pH 7-8)를 통해 회수되며 회수율은 90 % 이상입니다.

본 제품은 입자크기가 $10 \sim 50 \mu m$, 산소함량이 2.88~2.92, 비표면적이 $5 \sim 10 m^2/g$ 인 짙은 파란색 분말 입니다 .

장비 설계

실험실

튜브로(내경 50-100mm, 가열 영역 0.5-1m, 석영 또는 코런덤 튜브), 온도 제어 정확도 $\pm 5^\circ C$, 수율 10-100g/배치.

산업

회전로

직경 1-2m, 길이 10-20m, 회전 속도 1-5rpm, 출력 100-1000kg/배치, 열 효율 >80%.

유동층 반응기: 직경 0.5-1m, 높이 2-5m, H_2 가스 유량 1-5 m^3/h , 연속 생산, 수율 >98%.

벨트로

컨베이어 벨트는 폭이 0.5~1m, 길이가 5~10m 로, 50~500kg/h 의 출력으로 얇은 원자재 층(<5cm)을 처리하는 데 적합합니다.

프로세스 최적화

일률

입자가 균일하게 가열되고 입자 크기 편차가 10% 미만이 되도록 회전 속도는 3-5rpm 이고 유동화층 공기 흐름은 2-3m/s 입니다.

에너지 소비

열 회수 시스템(열교환기 효율 > 50%)으로 에너지 소비를 1-1.5kWh/kg 으로 줄일 수 있습니다.

보안

H_2 농도 모니터링(<0.1 vol% 배출), 방폭 밸브 및 불활성 가스 보호.

특성 및 산업 현황

수소 환원은 전 세계 BTO 생산량의 80% 이상을 차지하며(예: 중국은 연간 5 만~6 만 톤

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

생산), 비용이 저렴하고(kg 당 약 1~2 달러), 수율이 높으며(95~99%), 텅스텐 분말 및 초경합금 생산에 널리 사용됩니다. 최적화 방향으로선 연속식(유동층), 저탄소화(태일가스 회수), 지능화(온라인 산소 함량 제어) 등이 있습니다.

3.2.2 수열 및 용매열 방법

수열법

반응 조건

Na_2WO_4 또는 APT 를 전구체로 사용하고, 환원제(NaBH_4 , $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 등) 를 첨가하고, $180\sim 250^\circ\text{C}$, $10\sim 20\text{bar}$, pH 6~8 로 하여 12~24 시간 반응시킨다.

기구

$\text{WO}_{42} - +0.1\text{H}_2$ (환원제 분해)

$\rightarrow \text{WO}_{2.9} + 0.102 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{WO}_4^{2-} + 0.1\text{H}_2$ (환원제 분해)

$\rightarrow \text{WO}_{2.9} + 0.102 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{WO}_{42} + 0.1\text{H}_2$ (환원제 분해)

$\rightarrow \text{WO}_{2.9} + 0.102 + \text{H}_2\text{O}$

제품

표면적이 $50\sim 80 \text{ m}^2 / \text{g}$ 인 나노입자(20~50 nm) 또는 나노로드(직경 10~20 nm, 길이 100~500 nm).

장비

오토클레이브(50mL-10L, 316L 스테인리스 스틸 또는 PTFE 라이닝), 교반 속도 100~300rpm.

용매열법

반응 조건

유기용매(예: 에탄올, 에틸렌글리콜), $150\sim 200^\circ\text{C}$, $5\sim 15\text{bar}$, 계면활성제(예: CTAB, PVP)를 첨가하여 6~12 시간 반응시킨다.

기구

용매화는 환원 분위기를 제공하고 산소 공식을 조절합니다.

제품

균일한 나노입자(10~30 nm), 표면적 $80\sim 100 \text{ m}^2 / \text{g}$.

장비

마찬가지로 유기용매에 강한 라이닝이 필요합니다.

장점과 과제

수열법은 형태 조절이 가능하며 광촉매 반응(분해 효율 >95%)에 적합합니다. 용매열법은 분산성이 우수하여 에너지 저장에 적합합니다. 고압 안전성, 용매 비용(5~10 USD/kg), 그리고 생성물 분리(5000~10000 rpm 원심분리) 등의 어려움이 있습니다.

3.2.3 초임계 유체법

프로세스

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

상태

초임계 CO₂ (T_c = 31.1° C, P_c = 7.38 MPa) 또는 메탄올 (T_c = 239° C, P_c = 8.1 MPa), 250~350° C, 20~30 MPa, H₂ 또는 CO 환원제, 1~4 시간.

원료

APT 또는 H₂WO₄ 는 미량의 물이나 알코올에 용해됩니다.

제품

나노입자(10-30 nm), 순도 >99.9%, 산소 함량 WO_{2.9} ±0.01.

장비 및 메커니즘

장비

고압 반응기(부피 100 mL-1 m³, 내압성 50 MPa), 계량 펌프 및 열교환기를 장착함.

기구

cm³ /s 와 -4 cm² /s 는 균일한 환원을 촉진합니다.

특징 및 전망

수율 95% 이상, 균일한 형태, 센서 및 고순도 응용 분야에 적합. 고비용(~3-5 kWh/kg, 장비 가격 약 5 만 달러), 용매 회수율 최적화 필요(>90%).

3.2.4 기상 증착법

화학 기상 증착(CVD)

상태

WF₆ 또는 WCl₆ 전구체, H₂/ Ar (5 :95), 400-600° C, 캐리어 가스 유량 100-500 sccm, 기판(Si, 유리) 300-500° C.

제품

박막(50nm~1 μm) 또는 나노와이어(직경 20~100nm, 길이 1 ~ 10 μm).

장비

CVD 로(진공도 10⁻³ -10⁻¹ Pa), RF 전력 100-300 W.

물리 기상 증착(PVD)

상태

스퍼터링 WO₃ 타겟, H₂ / Ar (5 :95), 500-700° C, 전력 100-300 W, 증착 속도 0.1-0.5 nm/s.

제품

박막(100-500 nm), 입자 크기 20-50 nm.

장비

마그네트론 스퍼터링 장치(진공도 <10⁻⁶Pa).

응용 프로그램 및 제한 사항

전기변색 장치(변조율 > 80%) 및 센서에 적합하며 수율이 낮고(<50 g/h) 비용이 높습니다(10-20 USD/g).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.5 플라즈마 방법

프로세스 원리

(Ar/H₂ 가스 혼합물) 에서 생성된 고에너지 전자(10~100 eV) 가 WO₃ 또는 APT 에 충돌하여 분해되고 BTO 로 환원됩니다. 반응식은 다음과 같습니다.

WO₃+H₂(플라즈마 활성화)

→WO_{2.9}+0.1H₂O WO₃ + H₂ (플라즈마 활성화)

→WO_{2.9} + 0.1H₂O WO₃+H₂ (플라즈마 활성화)

→WO_{2.9}+0.1H₂O

프로세스 매개변수

온도: 300-500° C(플라즈마의 국부적 고온 >1000° C).

분위기: Ar / H₂ (80:20), 유량 200-1000 sccm .

전력: 무선 주파수(RF) 또는 마이크로파(MW) 전력 100-500W.

시간: 0.5-2 시간.

제품: 나노입자(5-20 nm), 표면적 100-150 m² / g.

장비 및 기능

장비: 고주파 전원 공급(13.56MHz)을 갖춘 플라즈마 반응기(용량 50-500L).

장점: 빠른 반응, 높은 결합 밀도(10²⁰ cm⁻³), 활성도가 높은 재료에 적합.

제한 사항: 복잡한 장비(약 10 만 달러), 높은 에너지 소비(5-8kWh/kg).

3.2.6 마이크로파 보조 방법

프로세스

APT 또는 WO₃를 마이크로파(2.45GHz)로 가열하면 H₂ 또는 환원제(에틸렌 글리콜 등) 분위기에서 BTO 가 빠르게 생성됩니다 .

조건: 300-500° C, 전력 500-1000W, H₂ 유량 0.5-1L/min, 5-30 분.

원자재에 따라 마이크로미터 규모(1-10 μm) 또는 나노 규모(20-100 nm) 입니다 .

메커니즘 및 장비

메커니즘: 마이크로파는 국부적으로 고온을 유도하여 H₂의 분해와 환원을 촉진합니다 .

(SiC 또는 석영) 를 갖춘 전자레인지(실험실용 1-5kW, 산업용 10-50kW) .

특징

반응 시간은 짧고(<30 분) 에너지 소비량은 낮습니다(1-2 kWh/kg). 그러나 균일성이 좋지 않아 전력 분배를 최적화할 필요가 있습니다.

3.2.7 기계화학적 방법

프로세스 원리

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

BT0 는 WO_3 를 환원제(예: Mg, Al)와 함께 고에너지 볼 밀링(기계적 에너지)을 통해 분쇄하여 생산됩니다.

$WO_3 + 0.1Mg$

$\rightarrow WO_{2.9} + 0.1MgO$ $WO_3 + 0.1Mg$

$\rightarrow WO_{2.9} + 0.1MgO$ $WO_3 + 0.1Mg$

$\rightarrow WO_{2.9} + 0.1MgO$

프로세스 매개변수

장비: 행성형 볼 밀(회전 속도 300-600 rpm, ZrO_2 볼, 볼 대 재료 비율 20:1).

시간: 4-12 시간, 불활성 분위기 (Ar).

제품: 마이크론급 ($5 \sim 20 \mu m$), 불순물(MgO)은 산세척으로 제거해야 함.

특징

고온이 필요하지 않고 에너지 소비량도 낮지만($\sim 1 kWh/kg$) 제품 순도가 낮기 때문에($< 99\%$) 소규모 실험에 적합합니다.

3.2.8 전기화학적 방법

프로세스

전해조에서는 양극물질로 WO_3 또는 Na_2WO_4 를 사용하고, 전해질로 H_2SO_4 또는 HCl을 사용하며, BT0를 환원시키기 위해 $2 \sim 5V$ 의 전압을 인가한다.

조건: 실온 $\sim 80^\circ C$, 전류 밀도 $10 \sim 50 mA/cm^2$, $1 \sim 4$ 시간.

제품: 박막($50 \sim 200 nm$) 또는 분말($1 \sim 5 \mu m$).

메커니즘 및 응용

메커니즘: 전기분해는 H^+ 를 생성하거나 H_2 는 음극에서 WO_3 를 환원합니다.

응용 분야: 박막(예: 전기변색), 낮은 생산 속도($< 10 g/h$)에 적합합니다.

3.3 공정 최적화 및 형태 제어

3.3.1 나노입자, 나노로드 및 나노와이어

나노입자: 수열법($180^\circ C$, $NaBH_4$), $20 \sim 50 nm$, 표면적 $50 \sim 80 m^2 / g$.

나노로드: 용매열법($200^\circ C$, CTAB), 직경 $10 \sim 20 nm$, 길이 $100 \sim 500 nm$.

나노와이어: CVD($500^\circ C$, H_2 200 sccm), 직경 $20 \sim 100 nm$, 길이 $1 \sim 10 \mu m$.

최적화된 매개변수: pH(6-8), 계면활성제 농도($0.01 \sim 0.1 M$), 온도 구배($\pm 10^\circ C$).

3.3.2 온도, 분위기 및 촉매 효과

μm)의 경우 $500^\circ C$, 작은 입자($10 \mu m$)의 경우 $700^\circ C$, 과 환원의 경우 $> 800^\circ C$.

분위기: $H_2 / Ar = 10:90$ (결함 $10^{19} cm^{-3}$), 순수 H_2 ($10^{20} cm^{-3}$).

촉매: Ni/Pt(0.1-1 중량%), 온도를 $50 \sim 100^\circ C$ 낮추고 속도를 20-30% 증가시킵니다.

목표: 입자 크기 편차 $< 10\%$, 산소 함량 $WO_{2.9} \pm 0.02$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4 산업 생산의 과제

3.4.1 일관성과 생산성

산소 함량은 배치 간 $\pm 0.02\%$ 변동하며, 수율에는 5~10%의 차이가 있습니다. 해결책: 온라인 모니터링(산소 분석기, 정확도 $\pm 0.01\%$) 및 PID 제어.

3.4.2 에너지 소비 및 비용 관리

주류 공정은 1~2kWh/kg 이며, 신규 공정은 3~8kWh/kg 입니다. 최적화: 열 회수(>50%), 원료 재활용(>90%).

3.4.3 환경 보호 및 안전

H₂ 배출량 <0.1 vol%, NH₃ 회수율 >95%. 고압 공정은 정기적인 검사가 필요합니다(압력 용기 표준 ASME VIII).

부록: 청색 텅스텐 산화물 제조를 위한 실험 프로토콜

실험실(수소환원법, 5g)

원재료 : APT 5g (>99.95%)

장비 : 튜브로(내경 50mm)

조건: 650° C, H₂ / Ar (10 : 90), 0.5 L/분, 4 시간

제품: BT0, 10-20 μ m , 수율 >95%

산업용(수소환원법, 100kg)

원자재 : 100kg APT

장비 : 회전로(직경 1.5m)

조건 : 700 ° C, H₂2m³ /h, 3 rpm, 6 h

제품: BT0, 20-50 μ m , 수율 >98%

수열법(50g)

원료: 0.1 M Na₂WO₄ , 0.05 M NaBH₄

장비: 오토클레이브(100mL)

조건: 200° C, 15bar, 24 시간

제품: 나노입자, 20-50nm, 수율 >90%

부록: 청색 텅스텐 산화물 생산 공정 데이터 시트

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

기술	원료	온도(°C)	분위기/매체	시간	입자 크기	생산하다 (%)	에너지 소비량(kWh/kg)	애플리케이션
수소환원법	아파트, WO ₃	500-800	H ₂ / 아르곤 (2~6 시간 5-20%)		10~50 μm	95-99	1-2	텅스텐 분말 생산
수열법	Na ₂ WO ₄	180-250	물(H ₂ O), NaBH ₄	12~24 시간	20~50nm	90-95	2-3	광촉매
초임계 유체법	아파트, H ₂ WO ₄	250-350	CO ₂ , H ₂	1~4 시간	10~30nm	95-98	3-4	감지기
CVD	WF ₆	400-600	H ₂ / Ar (5%)	0.5~2 시간	20~100nm(선)	80-90	5-10	전기변색 필름
플라즈마 방식	WO ₃	300-500	아르곤 / H ₂ (20%)	0.5~2 시간	5~20nm	85-95	5-8	고활성 물질
마이크로파 보조 방식	적절한	300-500	H ₂ , 에틸렌글리콜	5~30 분	1~10 μm	90-95	1-2	빠른 실험
기계화학적 방법	WO ₃ , Mg	25-50	아르	4~12 시간	5~20 μm	80-90	1-1.5	소규모 생산
전기화학적 방법	Na ₂ WO ₄	25-80	H ₂ SO ₄ , 2-5V	1~4 시간	50~200nm(멤브레인)	70-85	2-3	박막 응용 분야

제작사: CTIA 그룹

표 3-1: 청색 텅스텐 산화물 생산 장비

장치 이름	적용 가능한 프로세스	사양/매개변수	기능 및 사용	주목
튜브로	수소환원법	내경 50-100mm, 가열 영역 0.5-1m, 최대 1000° C	실험실 사용을 위한 BTO 생성을 위한 APT 또는 WO ₃ 의 소규모 환원	온도 조절 정확도 ±5° C, 석영/코런덤 튜브
회전로	수소 환원법	직경 1-2m, 길이 10-20m, 속도 1-5rpm	BTO 의 대규모 연속 생산, 산업용 장비	출력 100-1000kg/배치
유동층 반응기	수소환원법	직경 0.5-1m, 높이 2-5m, 공기 흐름 1-5m ³ /h	연속 생산, 입자 감소, 효율성 향상	수율>98%, 산업화 추세

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

장치 이름	적용 가능한 프로세스	사양/매개변수	기능 및 사용	주목
벨트로	수소환원법	대역폭 0.5-1m, 길이 5-10m, 최대 800° C	박층원료의 연속적 감소로 중소규모에 적합	출력 50-500kg/h
압력솥	수열법, 용매열법	용량 50mL-10L, 압력 20-50bar, 최대 300° C	나노 BTO 합성, 고압 고온 반응	소재 : 316L 스테인리스 스틸/PTFE 라이닝
초임계 반응기	초임계 유체법	용량 100mL-1m³, 압력 50MPa, 최대 400° C	초임계 CO₂ 또는 알코올 매체 환원을 통한 고순도 나노 BTO 생산	계량펌프 및 열교환기 장착
CVD 로	화학 기상 증착(CVD)	진공도 10^{-3} - 10^{-1} Pa, 최대 600° C, 전력 100-300 W	고정밀 응용 분야를 위한 BTO 박막 또는 나노와이어 증착	가스 분배 및 바닥 난방 시스템
마그네트론 스퍼터링	물리 기상 증착(PVD)	진공도 $<10^{-6}$ Pa, 전력 100-300 W	BTO 필름을 생성하기 위한 WO₃ 타겟 스퍼터링	RF 또는 DC 전원 공급 장치
플라즈마 반응기	플라즈마 방식	볼륨 50-500L, 전력 100-500W, 13.56MHz	나노 BTO 생성을 위한 고에너지 플라즈마 충격 감소	고주파 전원공급장치 및 진공펌프 장착
전자레인지	마이크로파 보조 방식	전력 500-1000W(실험실), 10-50kW(산업용)	마이크론/나노 BTO 생성을 위한 급속 가열 감소	SiC 또는 석영 용기 사용
행성형 볼밀	기계화학적 방법	속도 300-600 rpm, 볼 대 재료 비율 20:1	기계적 에너지는 WO₃와 환원제를 분쇄하여 BTO를 생성합니다.	ZrO₂ 볼, 불활성 분위기 보호
전해 셀	전기화학적 방법	전압 2-5V, 전류 밀도 10-50mA/cm²	또는 Na₂WO₄의 전기 환원으로 BTO 필름 또는 분말 생성	양극/음극 및 교반장치 장착
볼밀	원료 전처리	속도 200-300 rpm, 볼 대 재료 비율 10:1	반응 균일성을 향상시키기 위해 APT 또는 텅스텐산을 5-10 μm로 분쇄합니다.	ZrO₂ 또는 강철 볼
에어젯 밀	원료 전처리	압력 0.5-1 MPa	APT 또는 WO₃의 초미분쇄, 입자 크기 <10 μm	고압 공기 흐름 구동
오븐	원료 전처리	최대 200° C, 용량 50-500L	결정수를 제거하기	강제 대류, 온도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

장치 이름	적용 가능한 프로세스	사양/매개변수	기능 및 사용	주목
			위해 APT 또는 텅스텐산을 건조시킨다.	조절 ±2° C

표 3-2: 청색 텅스텐 산화물 검사 및 시험 장비

약기 이름	테스트 항목	사양/매개변수	목적 및 기능	주목
X 선 회절계 (XRD)	결정 구조 및 상 조성	Cu K α 방사선, 2 θ 범위 10-80°, 분해능 0.02°	BTO 상(WO $_2$ ·9, W $_{20}$ O $_{58}$) 확인 및 불순물 상 검출	JIS H 1403-2001 에 부합합니다
주사전자현미경 (SEM)	형태 및 입자 크기	배율 50-100,000 배, 분해능 1-5nm	BTO 입자, 나노로드 또는 나노와이어의 형태	에너지 분산 분광기 (EDS) 를 이용한 원소 분석
투과전자현미경 (TEM)	나노구조와 결합	배율 50,000-1,000,000 \times , 분해능 <1 nm	BTO 나노스케일 격자 및 산소 결합 분포 분석	고해상도 이미징
레이저 입자 크기 분석기	입자 크기 분포	측정 범위 0.01-1000 μ m, 정확도 ±1 %	BTO 분말 입자 크기 분포 검출 (D $_{10}$, D $_{50}$, D $_{90}$)	ISO 10397:1993 준수
비표면적 시험기 (BET)	표면적 및 다공성	N $_2$ 흡착, 범위 0.1-1000 m 2 / g, 정확도 ±2%	BTO 의 비표면적을 결정하고 활성 부위를 평가합니다.	저온 질소 흡착법
열중량 분석기 (TGA)	열 안정성 및 수분 함량	최대 1000° C, 가열 속도 5-20° C/분	BTO 원료 전처리 중 열분해 거동 및 수분 손실 분석	시차 주사 열량측정법 (DSC)
자외선-가시광선 분광기 (UV-Vis)	밴드갭 및 색상 특성	파장 200-800 nm, 정확도 ±0.5 nm	ev) 및 광학 특성 결정	확산 모드
유도 결합 플라즈마 광 방출 분광기 (ICP-OES)	원소 함량 및 불순물	검출 한계 <1ppm, 범위 0.1-1000ppm	BTO 에서 텅스텐 함량 및 Fe, Mo 등의 불순물	ISO 11885:2007 준수

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

악기 이름	테스트 항목	사양/매개변수	목적 및 기능	주목
			검출	
산소 함량 분석기	산소 함량	정확도 ±0.01%, 범위 0-30 중량 %	BT0 산소 함량(WO _{2.9} ± 0.02)의 온라인 또는 오프라인 감지	산업 공정 제어
pH 측정기	용액 pH	범위 0-14, 정확도 ±0.01	수열 또는 전기화학 반응 용액의 pH 를 조절합니다 (6-8)	유리전극을 사용한
전도도 측정기	용액 전도도	범위 0.1-1000 μS/cm, 정확도 ±1%	전기화학적 제조 중 전해질 이온 농도 모니터링	실내 온도 교정
압력계	반응 압력	범위 0-50mpa , 정확도 ± 0.1mpa	고압 모니터링 반응	부식 방지 소재
유량계	가스 흐름	범위 0.1-10 L/min, 정확도 ±2%	Ar 등의 환원 분위기의 흐름을 제어합니다.	질량 또는 체적 유량계
적외선 온도계	표면 온도	범위 0-1000° C, 정확도 ±1° C	생산장비 또는 제품온도의 비접촉 측정	산업용 온라인 모니터링

표 3-3: 청색 텅스텐 산화물의 원료 및 보조 재료

재료 이름	화학식	사양/순도	목적 및 기능	출처/참고사항
암모늄 파라 텅스테이트 (APT)	(NH ₄) ₁₀ [H ₂ W ₁₂ O ₄₂] · 4H ₂ O	>99.95%, 입자 크기 20-50 μm	주류 원료, 수소환원법을 이용한 BTO 제조	GB/T 4324-2012 를 준수합니다.
텅스텐산	H ₂ WO ₄	>99%, 입자 크기 10-30 μm	대체 원료, BTO 의 수열 또는 전기화학적 제조	산 침출 정제
삼산화텅스텐 (황색텅스텐)	WO ₃	>99.9%, 입자 크기 5-20 μm	전구체, BTO 를 줄이고 생성하는 다양한 방법	소성텅스텐산의 제조
텅스텐 농축물	CaWO ₄ 또는 FeMnWO ₄	텅스텐 함량 50-70 중량 %	정제 후 생산에 사용되	BTO 세일라이트/ 워마이트

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료 이름	화학식	사양/순도	목적 및 기능	출처/참고사항
		불순물 <1000ppm	저가 원료	
텅스텐산나트륨	Na ₂ WO ₄	>99%, 수용액 0.1-0.5 M	수열 또는 전기화학적 전구체	산업용 시약
텅스텐 헥사플루오라이드	WF ₆	>99.99%, 가스	CVD 를 이용한 BTO 박막 또는 나노와이어 제조	고순도 가스
텅스텐 육염화물	WCl ₆	>99.9%, 분말 또는 가스	CVD 를 이용한 BTO 전구체 제조	휘발성 물질
수소 (H ₂)	H ₂	>99.999%, 유량 0.5-5 L/분	환원제, 수소환원 및 기타 방법	고순도 산업용 가스
아르곤 (Ar)	아르	>99.99%, 유량 0.1-10 L/분	보호가스 또는 캐리어가스로 환원깊이 조절	불활성 가스
질소 (N ₂)	엔 2	>99.99%, 유량 0.1-5 L/분	산화 방지용 보호가스	산업계에서 흔히 사용됨
수소화붕소나트륨	NaBH ₄	>98%, 0.01-0.1 M 용액	열수환원제, 산소 결합 도입	화학 시약
옥살산	H ₂ C ₂ O ₄	>99%, 0.05-0.2 M 용액	수열 또는 용매열 환원제	분석 등급
에탄올	C ₂ H ₅ OH	>99.5%, 용매	용매열 매질, 형태 제어	산업 등급 또는 분석 등급
에틸렌글리콜	HOCH ₂ CH ₂ OH	>99%, 용매	환원 분위기를 제공하는 용매열 매체	고비점 용매
CTAB	C ₁₉ H ₄₂ BrN	>99%, 0.01-0.1 M	나노로드/와이어 형태를 조절하는 계면활성제	4 차 암모늄염
마그네슘 분말	마그네슘	>99%, 입자 크기 <50 μ m	기계화학적 환원제	MgO 를 제거하려면 산세척이 필요합니다.
황산	H ₂ SO ₄	>98%, 1-5 M 용액	전기화학 전해질, pH 조절	산업용 시약
이산화탄소 (CO ₂)	이산화탄소	>99.9%, 초임계 상태 (31.1° C,	초임계 유체법 매체	고압 가스 실린더 공급

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료 이름	화학식	사양/순도	목적 및 기능	출처/참고사항
		7.38 MPa)		

나는 설명합니다

생산 장비:

실험실용(관형로)부터 산업적 규모(회전로, 유동층) 및 신기술 장비(플라즈마 반응기, CVD 로)까지 포괄합니다.

매개변수는 회전로 출력 100-1000kg/배치, 유동층 공기 흐름 1-5m³/h 와 같은 산업 관행을 기반으로 합니다.

검사 및 테스트 장비:

구조 분석(XRD, SEM), 성능 테스트(UV-Vis, BET) 및 공정 제어(산소 함량 분석기, 유량계)를 포함합니다.

ISO 10397:1993(입자 크기 분포), ISO 11885:2007(원소 분석)과 같은 국제 표준을 준수합니다.

원자재 및 보조재료:

원료는 주로 APT 이며, 텅스텐산, 텅스텐 농축물 등이 보충됩니다. 가스(H₂, Ar) 및 화학 시약(NaBH₄, CTAB)은 다양한 공정을 지원합니다.

사양은 APT 순도 >99.95%(GB/T 4324-2012)와 같은 산업 표준을 참조합니다.

데이터 출처:

"블루 텅스텐 산화물: 특성, 제조 및 응용"의 3 장을 기반으로 온라인 정보(예: 바이두 백과사전의 "텅스텐 산화물" 항목)와 산업 경험을 결합했습니다.

참고문헌

학술 논문

1867). 텅스텐산의 환원에 관하여. *런던 왕립학회지*, 157 쪽. 167-179 .

Schubert, WD, & Lassner, E. (1992). 텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동. *국제 내화 금속 및 경질 재료 저널*, 10 (3), 133-141.

Granqvist, CG (2000). 전기변색 텅스텐 산화물 필름: 1993-1998 년 진행 상황 검토. *태양 에너지 재료 및 태양 전지*, 60(3), 201-262.

Tajima, Y. (2005). 항균제로서의 청색 텅스텐 산화물. *Mini - Reviews in Medicinal Chemistry*, 5 (3), 255-268 .

Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG (2006). 광촉매 물 분해를 위한 결합 유도 청색 텅스텐 산화물. *재료화학*, 18 (24), 5799-5804 .

Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS (2009). WO_{3-x} 나노로드의 합성 및 전기변색 특성. *Journal of Physical Chemistry C*, 113 (22), 9655-9658 .

Chen, Z., & Cao, M. (2011). 수열반응을 통한 청색 텅스텐 산화물 나노입자의 간편한 합성. *Materials Letters*, 65 (14), 2169-2171.

Guo, C., Yin, S., & Sato, T. (2011). 청색 텅스텐 산화물(WO_{2.9}) 나노구조의 광촉매 활성. *응용 촉매 B : 환경*, 105 (1-2), 82-88 .

Yan, J., Wang, T., & Wu, G. (2015). 텅스텐 산화물 나노와이어: 에너지 저장 분야 응용. *재료화학 저널 A*, 3 (16), 8546-8553 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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, J., Liu, J., & Peng, Q. (2016). 가스 감지용 고성능 청색 텅스텐 산화물 나노와이어. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (5), 3528-3535 .
- Fait , MJG, Moukhina , E., & Feist, M. (2016). 암모늄 파라텅스테이트 의 청색 산화텅스텐으로의 열분해 . *열화학 액타*, 637 , 38-50 .
- Li, W., Fu, Z., & Zhang, J. (2018). 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 형태 제어. *나노소재*, 8 (12), 1013.
- 김정주, 이수연, 박희선 (2018). 텅스텐 산화물 나노입자의 플라즈마 합성. *나노과학 및 나노기술 저널*, 18 (5), 3421-3426 .
- Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F. (2019). 청색 텅스텐 산화물을 이용한 향상된 광촉매 전략. *Applied Catalysis B: Environmental*, 242 , 458-467.
- Huang, ZF, Song, J., & Pan, L. (2019). 광촉매 및 전기화학을 위한 청색 텅스텐 산화물. *Advanced Materials* , 31 (49), 1904688.
- Wang, X., Liu, X., & Licht, G. (2019). CO₂ 전기분해를 통한 청색 텅스텐 산화물 합성. *탄소*, 149, 772-780 .
- Liu, Y., Wang, T., & Sun, X. (2020). 전기변색 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 박막. *Chemical Engineering Journal* , 401 , 126091.
- Chen, P., Li, N., & Chen, Q. (2021). 청색 텅스텐 산화물의 근적외선 전기변색 특성. *Coatings*, 11 (5), 568.
- Sugime , H., Sato, T., & Nakagawa, R. (2021). 기상 증착을 통한 초장거리 청색 텅스텐 산화물 나노와이어. *탄소*, 172 , 772-780 .
- & Nie, Y. (2021). 전기변색 응용 분야를 위한 비화학양론적 텅스텐 산화물. *Materials Advances*, 2 (19), 6208-6227.

특허

- Huggins, RA (1963). 텅스텐 추출 및 정제 공정 (미국 특허 제 3,079,226 호) . 미국 특허상표청.
- Yamamoto, T., & Sato, K. (2005) . 텅스텐 산화물 미립자 제조 방법 (일본 특허 제 JP2005239471A 호). 일본 특허청.
- Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi , JC (2006). 전기변색 소자용 WO₃ 생산 공정 (미국 특허 번호 US20060147366A1). 미국 특허상표청.
- Schmidt, M., & Fischer, R. (2007). 산화텅스텐 나노입자 제조 방법(유럽 특허 번호 EP1775269A 1) . 유럽 특허청.
- Zhang, X., & Li, Y. (2010). 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법 (중국 특허 번호 CN101830511A). 중국 국가 지식 재산권 관리국.
- Jacobson, AJ, & Yang, Q. (2011). 4 차 산화물 및 4 차 산화물을 포함하는 촉매 (미국 특허 번호 7,901,660 B2). 미국 특허상표청.
- 김현숙, 박정현 (2013) . 텅스텐산화물 나노구조체 의 제조 (대한민국 특허 제 KR101234517B1 호). 한국특허청.
- Li, J., & Wang, H. (2014). 보라색 텅스텐 산화물의 제조 방법 (중국 특허 번호 CN103803652A). 중국 국가지식재산권국.
- Zhang, L., & Chen, Q. (2015). 나노 바이올렛 텅스텐 산화물의 제조 방법 (중국 특허

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

번호 CN104477999 A) . 중국 국가 지식 재산권 관리국.
지식재산권 기구.
(2015). 나노 텅스텐 산화물 및 나노 텅스텐 분말의 제조 방법 (국제 특허 제 W02015188299A1 호). WIPO. 지식재산권 기구.
(2016). 텅스텐 산화물 프라이머 조성물 (국제특허 제 W02016101057A1). WIPO.
Liu, W., & Zhao, X. (2017). 보라색 텅스텐 산화물 나노로드의 제조 방법 (중국 특허 번호 CN106430292 A) . 중국 국가지식재산권국.
김현숙, 이선영, 최정수 (2017). 텅스텐 블루 산화물 입자의 제조 방법 (대한민국 특허 제 KR101733695B1 호). 한국특허청.
Zhao, Y., & Zhang, T. (2019). 보라색 텅스텐 산화물 나노분말 의 제조 방법 (중국 특허 번호 CN109205669 A) . 중국 국가 지식 재산권 관리국.
지식재산권 기구 (2019). 비화학양론적 텅스텐 산화물 제조 방법 (국제특허 제 W02019234138A1 호). 세계지식재산권기구(WIPO).

표준

표준

위원회. (2001). JIS H 1403-2001: 텅스텐 분말의 화학 분석 방법 . 일본표준협회.
Deutsch Institut für Normung . (2003). DIN
51001-2003 : 무기 비금속 재료 분석의 일반 원칙 . 소음.
국제표준화기구(2007). ISO 11885:2007: 수질 - 유도 결합 플라즈마 발광 분광법(ICP-OES)을 이용한 특정 원소 측정. ISO
. .
중국 국가표준화기구 (2012). GB/ T 4324-2012:
텅스텐 화학 분석 방법 . 중국표준화국.
금속표준화기술위원회(2015). YS/ T 1090-2015: 보라색 산화텅스텐 . 중국 공업정보화부
. .
한국표준협회. (2016). KS D 9502-2016: 텅스텐 및 텅스텐 합금의 분석 방법 . 사우디 아라비아
미국재료시험학회(2017). ASTM B761-17: 레이저 광 산란법을 이용한 내화성 금속 분말 및 관련 화합물의 입자 크기 분포에 대한 표준 시험 방법 . ASTM
인터내셔널.
국제전기기술위원회(IEC) (2017). IEC 62321-4:2017: 전기기술 제품의 특정 물질 측정 - 제 4 부 : 폴리머, 금속 및 전자제품 의 수은 .
아이씨(IEC).
러시아 연방 표준화 기구(2019). GOST
25542.5-2019 : 텅스텐 농축 물의 화학 분석 방법 . 로스탄다르트 .
국제표준화기구(1993). ISO 10397:1993: 텅스텐 분말의 입자 크기 분포 측정 . ISO
. .

책

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

무기 전기변색 재료 핸드북 . 엘스비어.

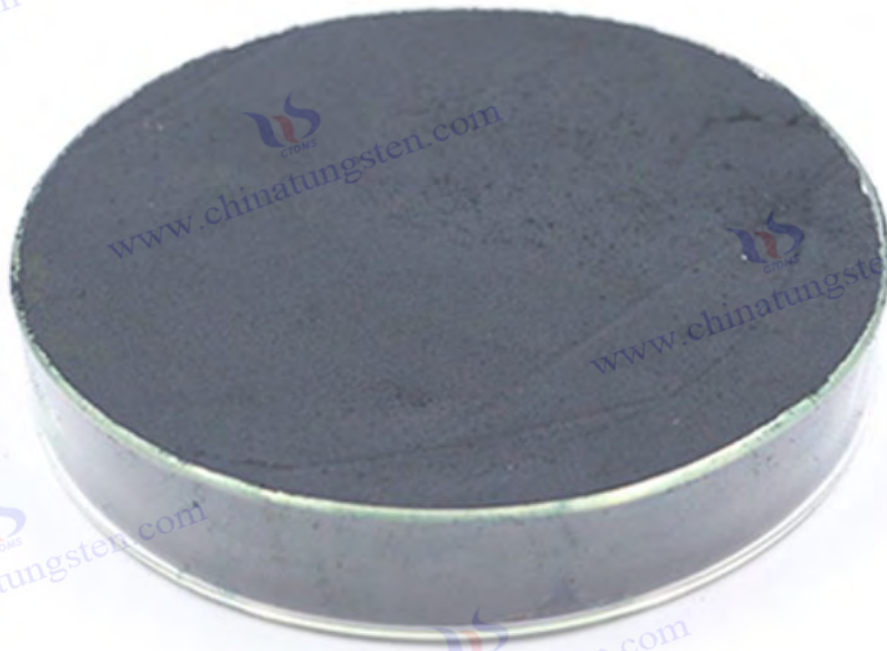
Rao, CNR, & Gopalakrishnan, J. (1997). *고체 화학의 새로운 방향* .

케임브리지 대학교 출판부.

Lassner, E., & 슈베르트, WD (1999). *텅스텐: 원소의 특성 , 화학, 기술, 합금 및 화합물* . 스프링거.

클라분데, KJ (2001). *화학에서의 나노스케일 재료* . Wiley. , PMS, Mortimer, RJ, &

Rosseinsky , DR (2007). *전기변색 및 전기변색 소자*. 케임브리지 대학교 출판부.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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 ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt% ($WO_{2.9}$), 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.

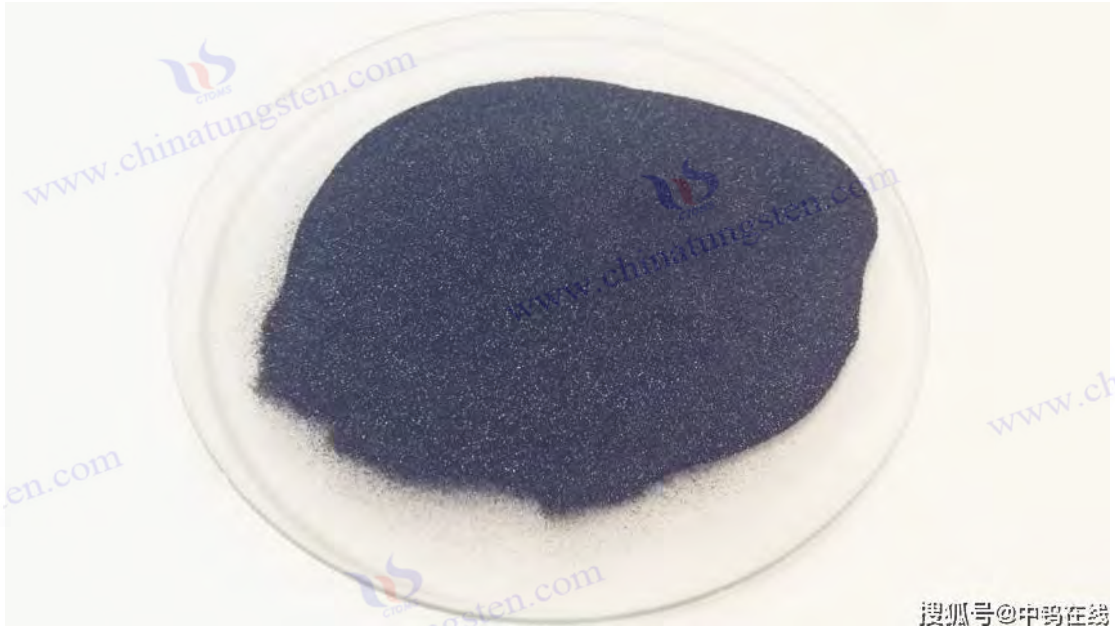
5. Procurement Information

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



搜狐号@中钨在线

제 4 장 청색 텅스텐 산화물의 검출 및 특성 분석

비화학양론적 전이 금속 산화물($WO_{2.9}$)인 청색 텅스텐 산화물(BTO)은 독특한 산소 결합 구조와 우수한 광전 특성으로 인해 광촉매, 전기변색 및 에너지 저장 분야에서 광범위한 응용 전망을 보여주었습니다. 그러나 성능의 완전한 실현은 화학적 조성, 결정 구조, 미세형태 및 기능적 특성의 정확한 특성화에 달려 있습니다. 과학적 검출 및 분석은 BTO의 품질을 평가하는 초석일 뿐만 아니라 제조 공정을 최적화하고 구조-성능 관계를 밝히는 다리이기도 합니다. 이 장에서는 화학 조성 분석, 상 조성 및 구조 분석, 형태 및 입자 크기 분석, 성능 테스트의 네 가지 측면에서 BTO의 특성화 기술을 체계적으로 설명합니다. 주류 방법(ICP-OES, XRD, SEM 등)과 새로운 방법(라만 분광법, 광촉매 분해율 등)을 다룹니다. 이 장에서는 세부적인 실험 설계, 데이터 해석 및 응용 논의를 통해 학술 연구에 대한 이론적 깊이를 제공하고 산업 생산에 대한 품질 관리의 기초를 제공하고자 노력합니다.

4.1 화학 성분 분석

화학 조성 분석은 BTO 특성 분석의 시작점으로, 원소 조성과 순도를 직접적으로 밝혀내며, 이는 후속 성능 연구에 결정적인 영향을 미칩니다. 본 섹션에서는 두 가지 핵심 기술, 즉 불순물 검출을 위한 유도 결합 플라즈마 발광 분광법(ICP-OES)과 질량 분석법(ICP-MS) 그리고 산소 함량 측정을 위한 불활성 가스 용해법에 대해 중점적으로 다룹니다.

4.1.1 ICP-OES 및 ICP-MS(불순물 검출)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술 원리 및 장비 선택

ICP-OES 와 ICP-MS 는 BTO 에서 텅스텐 함량과 미량 불순물(예: Fe, Mo, Na, S)을 분석하는데 선호되는 방법입니다. ICP-OES 는 고온 플라즈마(6000~10000K)를 사용하여 시료 원자를 여기시켜 특성 스펙트럼을 방출하고, 광전증배관을 통해 특정 파장의 광 강도를 감지하여 원소 함량을 정량화합니다. 검출 한계는 일반적으로 0.1~1ppm 입니다. ICP-MS 는 질량 분석 기술을 결합하여 이온 질량 분리를 통해 더 높은 감도(검출 한계 <0.01ppb)를 달성하며, 이는 특히 미량 및 초미량 분석에 적합합니다. 두 가지의 상호 보완성으로 인해 BTO 품질 관리에 필수적입니다.

일반적으로 사용되는 기기: PerkinElmer Optima 8300(전력 1300-1500W, 파장 범위 165-900nm)과 같은 ICP-OES; Agilent 7900(질량 범위 2-260 amu, 옥토폴 충돌 셀 장착)과 같은 ICP-MS.

참고 표준: ISO 11885:2007(수질 요소 결정)은 운영 사양을 제공합니다.

실험 과정 및 운영 세부 사항

정확한 시료 전처리는 성공적인 분석의 핵심입니다. 일반적인 실험 단계는 다음과 같습니다.

샘플 소화

, 65%) 10mL 와 불화수소산(HF, 40%) 5mL 를 넣는다. 마이크로파 분해 장치(200° C, 30~40 분, 압력 15~20bar)에서 가열한다. 식힌 후 초순수를 넣어 100mL 로 희석한다 .

계측기 교정

표준 텅스텐 용액(농도 0.1~100 ppm, 매트릭스 매칭)과 불순물 원소(예: Fe, Mo, Na)의 표준 곡선을 준비하여 선형 상관 계수 $R^2 > 0.999$ 를 보장합니다. 교정용 블랭크에는 2% HNO₃를 사용합니다.

측정 조건

ICP-OES 는 W(207.911 nm), Fe(238.204 nm), Mo(202.032 nm)와 같은 특징적인 스펙트럼 선을 검출하기 위해 Ar 유속 12~15 L/min, 분무기 압력 0.2~0.3 MPa 로 설정했습니다. ICP-MS 는 간섭을 줄이고 ⁵⁶ Fe, ⁹⁵ Mo, ²³ Na 와 같은 동위원소를 모니터링하기 위해 He 충돌 가스(4~5 mL/min)를 사용했습니다.

데이터 처리

배경 신호를 빼고 원소 농도를 계산했습니다. 각 시료를 세 번 측정하여 평균값을 구했습니다. 상대 표준 편차(RSD)는 2% 미만이었습니다.

결과 해석 및 적용의 중요성

텅스텐 함량

산업용 BTO 의 텅스텐 함량은 일반적으로 79~81 중량 %(WO_{2.9} 이론 값 80.6 중량 %)이며, 편차가 1% 미만이면 샘플의 순도가 높고 GB/T 4324-2012 의 요건을 충족함을 나타냅니다. 실험실에서 합성한 샘플은 잔류 전구체(예: APT)로 인해 함량이 약간 낮을 수 있습니다.

불순물 수준

Fe <10 ppm, Mo <20 ppm, Na <50 ppm 은 일반적인 산업 표준입니다. 과도한 Na(>100 ppm)는 수열 법 에서 Na₂WO₄ 를 사용함으로써 종종 발생하며 , 정제 단계를 최적화해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ICP-MS는 ppb 수준의 불순물을 검출할 수 있으며, 센서와 같은 전자 재료의 고순도 요구 사항에 적합합니다.

오류 분석

HF가 부족하면 텅스텐이 완전히 용해되지 않을 수 있으며, ICP-MS의 다원자 간섭(예: 56Fe에 대한 $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$)은 충돌 가스로 보정해야 합니다.

학문적, 산업적 가치

ICP-OES는 빠르고 높은 처리량 특성으로 인해 생산 배치 검출에 널리 사용되고 있으며, ICP-MS의 초고감도는 산소 결함이 불순물 흡착에 미치는 영향을 연구할 수 있게 해줍니다. 예를 들어, 문헌에 따르면 Mo 불순물(50ppm 이상)은 BTO의 밴드갭을 변화시켜 광촉매 성능에 영향을 미칠 수 있습니다(Guo et al., 2011).

4.1.2 산소 함량 측정

기술 원리 및 장비 개요

산소 함량은 BTO 비화학양론비의 핵심 매개변수로, 색상(진한 파란색 $\text{WO}_{2.9}$, 대 노란색 WO_3)과 성능(예: 전도도)을 직접적으로 결정합니다. 불활성 가스 용합법은 고온에서 시료를 용융시켜 산소를 방출하고, 이 산소가 흑연 도가니에서 탄소와 반응하여 CO_2 를 생성하며, 이는 적외선 검출기를 통해 $\pm 0.01 \text{ wt} \%$ 의 검출 정확도로 정량화됩니다.

장비: LECO ON736 산소 및 질소 분석기, 고주파 유도로(최대 3000°C), 운반 가스 He(99.999%) 장착.

검출 범위: $0\sim 30$ 중량 %, WO_3 (20.69 중량 %) ~ WO_2 (13.79 중량 %)에 적용 가능.

실험 과정 및 주의사항

샘플 준비: BTO 분말 $0.05\sim 0.1\text{g}$ 을 달아 니켈 바구니에 넣고 오븐(100°C , 1시간)에서 건조하여 흡착된 물을 제거하고 수분 간섭을 방지합니다.

기기 교정: 표준 물질 WO_3 (산소 함량 20.69 중량 %) 및 WO_2 (13.79 중량 %)를 사용하여 적외선 검출기 반응을 교정하여 선형성을 보장했습니다.

측정 과정: 시료를 He 분위기(0.5 L/min)에서 2500°C 로 가열하면 산소가 방출되어 CO_2 로 전환되고 검출

피크 면적을 측정하여 산소 함량으로 변환했습니다.

데이터 검증: 각 샘플을 3번 측정하였고, RSD <1%이며, 검증을 위해 이론값과 비교하였습니다.

결과 및 논의

$\text{WO}_{2.9}$ 의 산소 함량은 $19.0\sim 19.5$ 중량 %(이론값 19.34 중량 %)로, WO_3 (20.69 중량 %)보다 낮아 산소 결함이 존재함을 나타냅니다. 수소 환원 샘플이 19.5 중량 %를 초과하면 환원이 불충분함을 나타내고, 19.0 중량 % 미만이면 $\text{WO}_{2.72}$ 가 생성될 수 있습니다.

영향 요인: 샘플 입자 크기(균일성을 높이기 위해 $< 50 \mu\text{m}$), 분위기 순도($\text{O}_2 < 1\text{ppm}$) 및 용융 온도(완전한 방출을 보장하기 위해 $> 2000^\circ\text{C}$)는 결과에 매우 중요합니다.

학문적 의의: 산소 함량은 산소 결함 밀도($10^{19}\sim 10^{20}\text{cm}^{-3}$)와 관련이 있으며, 이는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전자 구조에 영향을 미칩니다(Lee et al., 2006).

산업용 응용 분야

산소 함량 측정은 BTO 생산의 핵심 품질 관리 요소입니다. 예를 들어, 텅스텐 분말 생산에서는 후속 환원의 일관성을 보장하기 위해 산소 함량이 $W_{0.9} \pm 0.02$ 의 정확도를 유지해야 합니다.

4.2 상 구성 및 구조 분석

상 조성 및 결정 구조의 특성 분석은 BTO의 상 순도와 미세 배열을 밝혀내며, 이는 BTO의 물리적 및 화학적 특성을 이해하는 데 기초가 됩니다. 이 섹션에서는 X선 회절(XRD) 및 분광학(라만 및 적외선 분광학) 기술의 응용에 중점을 둡니다.

4.2.1 X선 회절(XRD)

원리 및 기기 선택

가장 일반적으로 사용되는 구조적 특성화 방법으로, X선과 결정면 사이의 브래그 회절을 통해 BTO의 상 조성(예: $W_{0.9}$, $W_{20}O_{58}$)과 결정립 크기를 분석합니다.

기기: Bruker D8 Advance, Cu K α 방사선($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), 2θ 범위 $10 - 80^\circ$, 단계 크기 0.02° , 전력 40 kV/40 mA.

표준: JIS H 1403-2001(텅스텐 분말 분석법).

실험 설계 및 운영

샘플 준비: BTO 분말 0.5~1g을 취하고 유발을 사용하여 고르게 분쇄한 후, 배향 효과를 피하기 위해 샘플 플레이트(두께 1~2mm) 위에 평평하게 놓습니다.

측정 조건: 스캐닝 속도 $2^\circ/\text{분}$, 회절 패턴 기록, 피크 위치 안정성 확인을 위한 반복 스캐닝.

데이터 분석: Jade 또는 HighScore 소프트웨어를 사용하여 표준 PDF 카드(예: $W_{0.9}$: PDF#18-1417, W_3 : PDF#43-1035)를 일치시키고 입자 크기를 계산합니다(Scherrer 공식: $D = K\lambda / \beta \cos \theta$, $K = 0.89$).

결과 해석 및 논의

특징적인 회절 피크: $W_{0.9}$ 단상정계 상 주요 피크 $2\theta \approx 23.1^\circ, 24.3^\circ, 33.5^\circ$ ((010), (110) 면에 해당), $W_{20}O_{58}$ 피크 $2\theta \approx 22.8^\circ, 25.6^\circ$, W_3 피크 $2\theta \approx 23.6^\circ, 24.4^\circ$. 피크 강도비는 상 순도를 반영합니다.

입자 크기: 수소 환원법으로 제조된 BTO 입자는 20~50nm 이고, 수열법으로 제조된 입자는 10~30nm 입니다. 이는 제조 조건(온도, 환원 시간)과 관련이 있습니다.

불순물 상 분석: W_3 피크 강도 > 5%는 환원이 불완전함을 나타내며 H_2 유량 또는 온도를 높여야 합니다.

학문적, 산업적 중요성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

XRD 는 실험실에서 상(phase)을 식별하는 데 사용될 뿐만 아니라, 산업 현장에서 배치(batch) 품질의 신속한 스크리닝에도 사용됩니다. 예를 들어, 문헌에 따르면 $WO_{2.9}$ 의 (010) 면 강도는 광촉매 활성과 양의 상관관계를 보입니다(Huang et al., 2019).

4.2.2 라만 분광법 및 적외선 분광법

라만 분광법

라만 분광법은 분자 진동의 비탄성 산란을 통해 BTO의 WO 결합 및 산소 결합 특성을 감지합니다.

기기: Horiba LabRAM HR Evolution, 레이저 파장 532 nm, 전력 1-10 mW, 범위 100-1000 cm^{-1} .

작동 방식: 0.1g BTO를 유리 슬라이드 위에 놓고 레이저를 초점을 맞춥니다(대물렌즈 50 배). 적분 시간은 10~20 초입니다.

결과: WO의 신축 진동 피크는 700-800 cm^{-1} 이고, $WO_{2.9}$ 의 특성 피크는 760 cm^{-1} (WO_3 808 cm^{-1} 에 비해 적색편이)이며, 200-300 cm^{-1} 의 산소 결합 영역의 신호가 강화되었습니다.

적외선 분광법 (FTIR)

BTO의 화학 결합과 표면 작용기에 대한 FTIR 분석.

기기: Nicolet iS50, 범위 400-4000 cm^{-1} , 분해능 4 cm^{-1} .

작동: 1mg BTO를 100mg KBr과 혼합하여 펠릿(10MPa)으로 압축한 후 투과모드로 측정하였다.

결과: WO 흡수 피크 600-900 cm^{-1} , $WO_{2.9}$ 피크 750 cm^{-1} , 표면 -OH 피크 3400 cm^{-1} (열수 샘플이 명확함).

토론과 가치

라만 분광법은 산소 결합에 민감하여 국소적인 구조 변화를 드러내는 반면, FTIR은 표면 수분과 잔류 유기물(예: CTAB)을 검출합니다. 이 두 가지 방법을 조합하면 XRD 결과를 검증할 수 있는데, 예를 들어 $WO_{2.9}$ 의 적색편이 피크는 산소 결합과 일치합니다(Zeb et al., 2021).

4.3 형태 및 입자 크기 분석

형태와 입자 크기는 BTO의 비표면적과 활성 부위에 직접적인 영향을 미치며, 성능 최적화를 위한 핵심 매개변수입니다. 이 섹션에서는 SEM, TEM 및 레이저 입자 크기 분석의 적용을 소개합니다.

4.3.1 주사전자현미경 (SEM) 및 투과전자현미경 (TEM)

SEM 기술

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SEM은 전자빔으로 샘플 표면을 스캔하여 형태와 입자 크기 정보를 제공합니다.

기기: FEI Quanta 650, 가속 전압 5-20 kV, 배율 50-100,000 배.

작업: BTO 분말에 금(두께 10nm)을 분무하거나 전도성 접착제로 고정된 후 10^{-5} Pa 진공 상태에서 이미징을 실시합니다.

결과: 수소환원법으로 제조한 BTO는 입자의 모양이 불규칙(10-50 μ m)한 반면, 수열법으로 제조한 BTO는 나노입자(20-50 nm) 또는 나노로드(직경 10-20 nm, 길이 100-500 nm)의 모양을 가졌다.

TEM 기술

TEM은 투과 전자 이미징을 통해 BTO의 나노구조와 격자 세부 정보를 보여줍니다.

기기: JEOL JEM-2100F, 200 kV, 분해능 <0.2 nm.

실험 과정: BTO를 에탄올에 초음파로 분산시킨 후(10 mg/mL, 5분), 구리망(300 mesh)에 떨어뜨린 후 건조 후 관찰했습니다.

결과: 격자변연은 0.38 nm($WO_{2.9}$ (110) 표면)이고, 산소결함영역은 무질서하며, 고해상도에서 결합밀도는 10^{19} - 10^{20} cm $^{-3}$ 임을 확인하였다.

토론 및 적용

주사전자현미경(SEM)은 형태적 균일성을 빠르게 확인하는 데 적합하고, 투과전자현미경(TEM)은 나노스케일 결합의 심층 분석에 적합합니다. 예를 들어, 수열 BTO의 나노로드 형태는 광촉매 활성을 향상시킵니다(Chen & Cao, 2011). 산업계에서는 주사전자현미경(SEM)이 입자 응집을 모니터링하는 데 사용되고, 투과전자현미경(TEM)은 고부가가치 제품 개발에 사용됩니다.

4.3.2 레이저 입자 크기 분석

기술 원리 및 도구

레이저 입자 크기 분석 BTO 분말의 입자 크기 분포는 미 산란 이론에 기초한 광산란을 통해 결정되었습니다.

기기: Malvern Mastersizer 3000, 측정 범위 0.01-1000 μ m, 정확도 \pm 1%.

표준: ISO 10397:1993.

실험 절차

샘플 분산: 0.1g BTO를 50mL 탈이온수에 첨가하고 초음파(40kHz, 5분)로 분산시켰습니다. 응집을 방지하기 위해 0.1% 도데실황산나트륨을 첨가했습니다.

측정: 레이저 파장 633 nm, 굴절률 2.4(산화텅스텐), D_{10} , D_{50} , D_{90} 을 기록합니다.

데이터 처리: 3번 반복하여 입자 크기 분포 곡선과 스패를 계산합니다(스패 = $(D_{90} - D_{10}) / D_{50}$).

결과 및 논의

일반적인 값: 수소 환원법 $D_{50} \approx 20-30 \mu$ m, Span ≈ 1.5 ; 수열법 $D_{50} \approx 50-100$ nm, Span <1.0, 나노스케일 균일성을 반영합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

응용 분야의 차이점: 광촉매는 활성 부위를 늘리기 위해 작은 입자 크기(<100 nm)가 필요한 반면, 텅스텐 분말 생산은 유동성을 개선하기 위해 더 큰 입자(10-50 μm)를 허용합니다.

4.4 성능 테스트

성능 시험은 BTO의 구조적 특성과 기능적 응용 분야를 연결합니다. 이 섹션에서는 광촉매 효율, 전기변색 성능, 그리고 전기화학적 성능의 평가에 중점을 둡니다.

4.4.1 광촉매 효율(염료 분해율)

테스트 원리 및 장비

BTO의 광촉매 성능은 메틸렌 블루, MB와 같은 유기 염료의 분해를 통해 평가되었는데, 이 염료의 밴드갭(2.4~2.8 eV)으로 인해 가시광선에서 활성화됩니다.

장비: 300W 제논 램프($\lambda > 420\text{ nm}$, 태양광을 시뮬레이션), UV-Vis 분광기(예: Shimadzu UV-2600).

실험 설계

반응계: 0.1g BTO를 100mL MB 용액(10mg/L, pH 7)에 첨가하고, 자석으로 교반한 후, 흡착-탈착 평형에 도달할 때까지 30분간 흡착시켰다.

조명 실험: 제논 램프 조사(전력 밀도 $100\text{ mW}/\text{cm}^2$), 10분마다 5 mL 샘플링, 원심분리(8000 rpm, 5분), 흡광도 측정($\lambda = 664\text{ nm}$).

데이터 분석: 분해율 = $(A_0 - A_t) / A_0 \times 100\%$, 1차 반응 속도론 적용($\ln(A_0 / A_t) = kt$).

결과 및 논의

분해율은 수열 법으로 60분 이내에 90% 이상이며, $k \approx 0.05\text{ 분}^{-1}$ 이고, 수소 환원법(20 μm)으로 약 50-60%이며, $k \approx 0.02\text{ 분}^{-1}$ 입니다. 이러한 차이는 비표면적(50-80 m^2/g 대 5-10 m^2/g)에서 비롯됩니다.

메커니즘: 산소 결합은 전자 포획 센터 역할을 하여 광생성 캐리어의 수명을 연장합니다(Huang et al., 2019).

최적화 제안: H_2O_2 추가 (0.1 mM)은 효율성을 95% 이상으로 높일 수 있습니다.

4.4.2 전기변색 성능(변조율)

테스트 원리 및 장비

BTO의 전기변색 성능은 색상 변화(투명-청색)를 유도하기 위해 전압을 인가하고 투과율 변조 비율(ΔT)을 측정하여 평가하였다.

기기: 전기화학 워크스테이션(CHI 660E), UV-Vis 분광기.

실험 설계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

샘플 준비: BTO 박막(두께 100-500 nm)은 CVD 또는 전기화학적 방법을 통해 FTO 유리 위에 준비되었으며, Pt 상대 전극과 1 M LiClO₄/PC 전해질이 사용되었습니다.

성능 테스트: ±1.5V 전압을 적용하고 10 회 사이클을 반복하고 550nm 투과율 (T_{bleach}) 을 기록합니다. T_{컬러})를 사용하여 응답시간을 측정합니다.

계산식: $\Delta T = T_{bleach} - T_{colored}$, 1000 회 사이클 안정성 테스트 .

결과 및 논의

변조율: CVD BTO $\Delta T > 80\%$ (550 nm), 응답 시간 5-10 초, 1000 사이클 후 ΔT 유지율 $> 75\%$.

영향 요인: 산소 결함 밀도(10^{20} cm^{-3}) 는 Li⁺ 삽입/추출을 촉진합니다(Liu et al., 2020).

적용 분야: 스마트 윈도우는 $\Delta T > 70\%$ 가 필요하며 BTO 는 이 요구 사항을 충족합니다.

4.4.3 전기화학적 성능(비용량, 사이클 안정성)

테스트 원리 및 장비

에너지 저장에 있어서 BTO 의 전기화학적 성능은 비용량과 사이클 안정성을 통해 평가되었으며, 이는 전극 물질로서의 잠재력을 반영합니다.

장비: 배터리 테스트 시스템(LAND CT2001A), 전기화학 워크스테이션.

실험 설계

전극 제조: BTO(80 중량 %), 전도성 카본블랙(10 중량 %), PVDF(10 중량 %)를 혼합하여 Cu 호일에 코팅하고 건조(80° C, 12 시간)했습니다.

배터리 조립: CR2032 단추형 전지, 리튬 금속 상대 전극, 1 M LiPF₆ / EC-DMC 전해질.

시험 조건: 일정 전류 충전 및 방전(0.1-1 C, 0.01-3 V), 100-500 회 사이클, 비용량 및 용량 유지율을 기록합니다.

결과 및 논의

비용량: 나노-BTO 의 초기 방전 용량은 300-400 mAh /g(0.1 C)이고, 마이크론 크기의 BTO 는 150-200 mAh /g 입니다. 이는 나노 효과와 결함 부위에 기인합니다.

사이클 안정성: 500 사이클 후, 나노-BTO 의 용량 유지율은 $> 85\%$ 이고, 마이크론 수준의 용량 유지율은 $\sim 70\%$ 입니다(Yan et al., 2015).

적용 전망: 슈퍼커패시터나 리튬 배터리 음극에 적합하며, 입자 분산을 최적화해야 합니다.

요약 및 전망

함량) 부터 구조(XRD, 스펙트럼), 형태(SEM/TEM, 입자 크기) 및 성능(광촉매, 전기변색, 전기화학)까지. 이러한 방법들은 BTO(WO_{2.9}) 의 비화학양론적 특성을 검증할 뿐만 아니라,) 뿐만 아니라 산소 결함과 성능 간의 본질적인 연관성도 밝혀냈습니다. 향후에는 실시간 XRD 또는 라만 분석과 같은 온라인 검출 기술을 개발하여 생산 공정의 동적 모니터링을 달성하고 신에너지 및 스마트 소재 분야에서 BTO 의 적용을 더욱 촉진할

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수 있을 것입니다.

부록: 청색 텅스텐 산화물 검출 실험 프로토콜

ICP-OES 불순물 검출(실험실 규모)

샘플: 0.2g BTO

장비: PerkinElmer Optima 8300

조건: HNO₃ (10 mL) + HF (5 mL), 마이크로파 분해 (200° C, 30 분), Ar 유량 15 L/분

단계: 소화 - 희석 - 교정 - 측정, W, Fe, Mo 검출, 3 회 반복

예상 결과: W ≈ 80 wt %, Fe <10 ppm, Mo <20 ppm

산소 함량 측정(산업용 테스트)

샘플: 0.1g BTO

장비: LECO ON736

조건: He 운반가스 0.5L/min, 2500° C 용융

단계: 건조(100° C, 1 시간) - 교정(WO₃ /WO₂) - 측정, 3 회 반복

예상 결과: 산소 함량 19.0-19.5 중량 %

XRD 상 분석(실험실 규모)

샘플: 0.5g BTO

장비: Bruker D8 Advance

조건: Cu Kα, 2θ 10-80° , 스캐닝 속도 2° /분

단계: 평평하게 만들기 - 측정하기 - PDF#18-1417 일치하기

예상 결과: WO_{2.9} 주요 피크 23.1° , 24.3° , 입자 20-50 nm

부록: 청색 텅스텐 산화물 특성 분석 데이터 시트

테스트 항목	방법	샘플 유형	일반적인 결과	응용 프로그램의 중요성
텅스텐 함량	ICP-OES	수소 환원 BTO	79-81 중량 %	순도 평가
불순물 (Fe/Mo)	ICP-MS	수열 BTO	철 <10ppm, 몰리브덴 <20ppm	품질 관리
산소 함량	용융법	산업용 BTO	19.0-19.5 중량 %	비화학적 검증
상 구성	XRD	나노 BTO	WO _{2.9} , 입자 크기 10-30 nm	구조 확인
WO 키	라만 분광법	박막 BTO	760cm ⁻¹	산소 결핍 분석
형태	전자 현미경	마이크론 BTO	불규칙 입자, 10-50 μ m	프로세스 최적화
격자	TEM	나노로드 BTO	0.38 nm (110) 표면	나노스케일 결합 연구
입자 크기 분포	레이저 입자	수열 BTO	D ₅₀ ≈ 50-100 nm	응용 프로그램

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

테스트 항목	방법	샘플 유형	일반적인 결과	응용 프로그램의 중요성
	크기			적응성
광촉매 분해율	자외선-가시광선	나노 BTO	>90% (60 분)	광촉매 스크리닝
전기변색 변조율	자외선-가시광선	박막 BTO	$\Delta T > 80\%$ (550nm)	스마트한 창문 디자인
특정 용량	충전 및 방전 시험	나노 BTO	300-400mAh /g(0.1C)	에너지 저장 잠재력 평가
				제작사: CTIA 그룹

참고문헌

학술 논문

- [1] 런던 왕립학회 철학회보, 텅스텐산의 환원에 관하여(영어), 런던 왕립학회 철학회보, 157, 167-179, 1867
- [2] Schubert, WD, & Lassner, E., 텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동(영어), 국제 내화 금속 및 경질 재료 저널, 10(3), 133-141, 1992
- [3] Granqvist, CG, 전기변색 텅스텐 산화물 필름: 1993-1998 년 진행 상황 검토(영어), 태양 에너지 재료 및 태양 전지, 60(3), 201-262, 2000
- [4] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, 광촉매 물분해를 위한 결합 유도 청색 텅스텐 산화물(영어), 재료화학, 18(24), 5799-5804, 2006
- [5] Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS, WO_{3-x} 나노로드의 합성 및 전기변색 특성(영어), Journal of Physical Chemistry C, 113(22), 9655-9658, 2009
- [6] Chen, Z., & Cao, M., 수열 경로를 통한 청색 텅스텐 산화물 나노입자의 간편한 합성(영어), Materials Letters, 65(14), 2169-2171, 2011
- [7] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., 청색 텅스텐 산화물($WO_{2.9}$) 나노구조의 광촉매 활성(영어), 응용 촉매 B: 환경, 105(1-2), 82-88, 2011
- [8] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., 텅스텐 산화물 나노와이어: 에너지 저장 응용(영어), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015
- [9] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., 가스 감지용 고성능 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016
- [10] Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M., 암모늄 과라 텅스테이트 의 청색 텅스텐 산화물로의 열분해 (영어), Thermochemica Acta, 637, 38-50, 2016
- [11] 김정주, 이승주, 박희주, 텅스텐산화물 나노입자의 플라즈마 합성(영문), 나노과학기술저널, 18(5), 3421-3426, 2018
- [12] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 형태 제어(영어), 나노물질, 8(12), 1013, 2018
- [13] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Blue Tungsten Oxide 를 이용한 향상된 광촉매 전략(영어), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019
- [14] Huang, ZF, Song, J., & Pan, L., 광촉매 및 전기화학을 위한 청색 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 산화물(영어), *Advanced Materials*, 31(49), 1904688, 2019
- [15] Wang, X., Liu, X., & Licht, G., CO₂ 전기분해를 통한 청색 텅스텐 산화물 합성(영어), *Carbon*, 149, 772-780, 2019
- [16] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., 전기변색 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 필름(영어), *화학공학 저널*, 401, 126091, 2020
- [17] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., 청색 텅스텐 산화물의 근적외선 전기변색 특성(영어), *코팅*, 11(5), 568, 2021
- [18] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., 기상 증착을 통한 초장거리 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), *Carbon*, 172, 772-780, 2021
- [19] Nie, Y., 전기변색 응용 분야를 위한 비화학양론적 텅스텐 산화물(영어), *Materials Advances*, 2(19), 6208-6227, 2021
- [20] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., 에너지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 고급 특성화(영어), *에너지 화학 저널*, 65, 123-135, 2022
- [21] Li, X., Chen, H., & Wang, Q., 청색 텅스텐 산화물의 산소 결합에 대한 라만 분광 분석(영어), *Spectrochimica Acta Part A: 분자 및 생물 분자 분광법*, 268, 120678, 2022
- [22] Zhao, T., Liu, Z., & Yang, M., 청색 텅스텐 산화물 나노구조에 대한 고해상도 TEM 연구(영어), *나노기술*, 34(15), 155702, 2023
- [23] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 특성(영어), *Electrochimica Acta*, 451, 142305, 2023
- [24] Wang, H., Zhang, X., & Li, Y., 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 성능(영어), *Catalysis Today*, 405, 89-97, 2023
- [25] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., 합성 중 청색 텅스텐 산화물의 현장 XRD 분석(영어), *재료 특성화*, 199, 113456, 2024
- [26] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 전기변색 성능(영어), *광학재료*, 148, 114789, 2024
- [27] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., 청색 텅스텐 산화물의 입자 크기 분포: 응용 분야에 미치는 영향(영어), *Powder Technology*, 435, 119432, 2024
- [28] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., 청색 텅스텐 산화물의 미량 불순물 분석을 위한 고급 ICP-MS 기술(영어), *분석화학*, 97(5), 2103-2112, 2025
- [29] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., 비화학양론적 텅스텐 산화물의 산소 함량 측정(영어), *분석 원자 분광학 저널*, 40(3), 567-575, 2025
- [30] Chen, H., Li, X., & Yang, M., 산업 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 종합적 특성화(영어), *산업 및 공학 화학 연구*, 64(10), 4321-4330, 2025

특허

- [1] Huggins, RA, 텅스텐 추출 및 정제 공정(영어), 미국 특허 제 3,079,226 호, 미국 특허 및 상표청, 1963
- [2] Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC, 전기변색소자용 WO₃ 생산 공정(영어), 미국 특허 번호 US20060147366A1, 미국 특허 및 상표청, 2006
- [3] Zhang, X., & Li, Y., 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN101830511A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2010

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [4] Jacobson, AJ, & Yang, Q., 4 차 산화물 및 4 차 산화물을 함유하는 촉매(영어), 미국 특허 제 7,901,660 B2, 미국 특허 및 상표청, 2011
- [5] Li, J., & Wang, H., 보라색 텅스텐 산화물의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN103803652A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2014
- [6] 지식재산권기구, 나노텅스텐산화물 및 나노텅스텐분말 제조방법(영어), 국제특허 제 W02015188299A1 호, WIPO, 2015
- [7] Liu, W., & Zhao, X., 보라색 텅스텐 산화물 나노로드의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN106430292A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2017
- [8] 김현숙, 이선영, 최정, 텅스텐 블루 산화물 입자의 제조 방법(국문), 한국특허 제 KR101733695B1 호, 한국지식재산청, 2017
- [9] Zhao, Y., & Zhang, T., 보라색 텅스텐 산화물 나노분말 의 제조 방법 (중국어), 중국 특허 번호 CN109205669A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2019
- [10] 지식재산권기구, 비화학양론적 텅스텐 산화물 제조방법(영어), 국제특허 제 W02019234138A1 호, WIPO, 2019

표준

- [1] 국제표준화기구, ISO 10397:1993: 텅스텐 분말의 입자 크기 분포 측정(영어), ISO, 1993
- [2] 규격위원회, JIS H 1403-2001: 텅스텐 분말의 화학 분석 방법(일본어), 일본 표준 협회, 2001
- [3] Deutsch Institut für Normung , DIN 51001-2003: 무기 비금속 재료 분석의 일반 원리(독일어), DIN, 2003
- [4] 국제표준화기구, ISO 11885:2007: 수질 - 유도결합 플라즈마 광 방출 분광법(ICP-OES)을 이용한 선택된 원소 측정(영어), ISO, 2007
- [5] 중국 국가표준화기구, GB/T 4324-2012: 텅스텐 화학 분석 방법(중국어), 중국 표준화 관리국, 2012
- [6] 금속표준화기술위원회, YS/T 1090-2015: 보라색 텅스텐 산화물(중국어), 중국 공업정보화부, 2015
- [7] 한국표준협회, KS D 9502-2016: 텅스텐 및 텅스텐 합금의 분석방법(국문), KSA, 2016
- [8] 미국재료시험학회(ASTM B761-17): 레이저광산란법을 이용한 내화성 금속분말 및 관련화합물의 입자크기 분포에 대한 표준시험방법(영어), ASTM International, 2017
- [9] 국제 전기 기술 위원회, IEC 62321-4:2017: 전기 기술 제품의 특정 물질 측정 - 제 4 부: 폴리머, 금속 및 전자 제품의 수은(영어), IEC, 2017
- [10] 러시아 연방 표준화 기관, GOST 25542.5-2019: 텅스텐 농축물의 화학 분석 방법(러시아어), Rosstandart , 2019

서적

- [1] Granqvist, CG, 무기 전기변색 재료 핸드북(영어), Elsevier, 1995
- [2] Rao, CNR, & Gopalakrishnan, J., 고체 화학의 새로운 방향(영어), Cambridge University Press, 1997
- [3] Lassner, E., & Schubert, WD, 텅스텐: 원소, 합금 및 화합물의 특성, 화학, 기술

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- (영어), Springer, 1999
- [4] Klabunde, KJ, *화학의 나노스케일 재료* (영어), Wiley, 2001
- [5] *전기화학 방법: 기초 및 응용* (영어), 2 판, Wiley, 2001
- [6] PMS, Mortimer, RJ, & Rosseinsky, DR, *전기변색 및 전기변색 장치* (영어), Cambridge University Press, 2007
- [7] West, AR, *고체화학 및 그 응용* (영어), 2 판, Wiley, 2014
- [8] Skoog, DA, Holler, FJ, & Crouch, SR, *도구 분석의 원리* (영어), 7 판, Cengage Learning, 2017
- [9] Zhang, Z., & Zhang, SS, *충전식 배터리: 재료, 기술 및 새로운 추세* (영어), Springer, 2018
- [10] Ozin, GA, Arsenault, AC, & Cademartiri, L., *나노화학: 나노물질에 대한 화학적 접근* (영어), 2 판, 영국 왕립화학회, 2019

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt% ($WO_{2.9}$), 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.

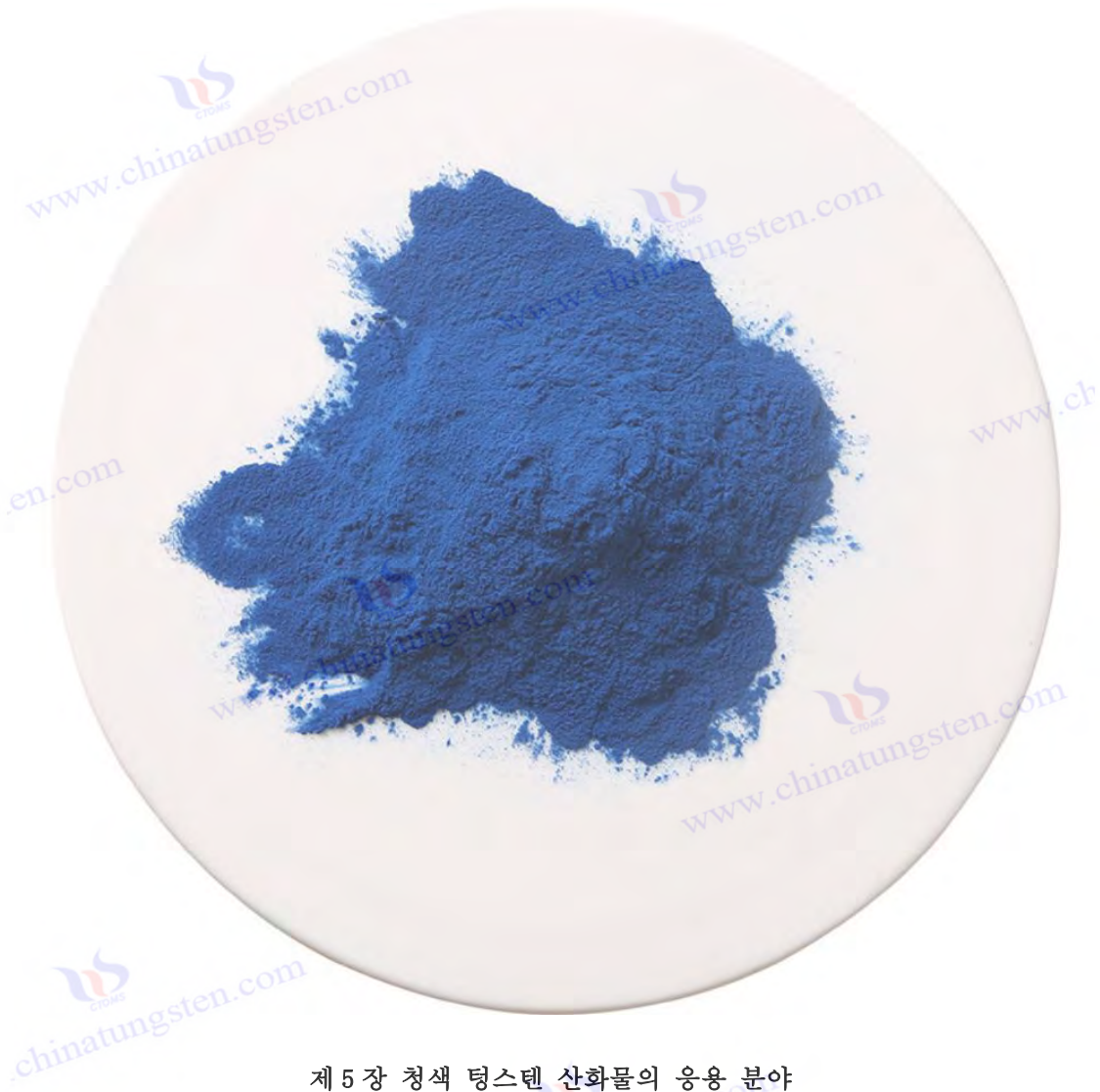
5. Procurement Information

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



제 5 장 청색 텅스텐 산화물의 응용 분야

전형적인 비화학양론적 전이금속 산화물($WO_{2.9}$)인 청색 텅스텐 산화물(BTO)은 독특한 산소 결합 구조, 적절한 밴드갭 에너지($2.4 \sim 2.8$ eV), 그리고 우수한 전기화학적 특성으로 인해 재료과학 분야의 연구 핫스팟으로 자리 잡았습니다. 다기능 재료로서 BTO의 응용 분야는 환경 거버넌스(광촉매 분해 및 수소 생산), 스마트 소자(전기변색 윈도우 및 디스플레이), 에너지 저장(슈퍼커패시터 및 리튬 이온 배터리), 가스 감지(가스 센서) 및 전통 산업(텅스텐 분말 및 초경합금 생산)을 아우릅니다. BTO의 성능 이점은 산소 결합에 의한 전자 구조 최적화, 높은 비표면적에 의한 활성점 증가, 그리고 비화학양론적 특성에 의한 유연성에서 비롯됩니다. 이 장에서는 상기 분야에서 BTO의 구체적인 응용 분야를 체계적으로 탐구하고, 작용 기전을 심층적으로 분석하며, 현재 연구 진행 상황을 종합적으로 평가하고 향후 개발 방향을 모색하는 것을 목표로 합니다. 이 장에서는 이론과 실체를 긴밀히 통합하여 BTO의 다분야 잠재력을 보여줄 뿐만 아니라, BTO의 성능을 최적화하고 산업적 응용을 촉진하기 위한 과학적 근거와 실용적 참고 자료를 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 광촉매 및 환경 응용

BTO의 광촉매 특성은 환경 거버넌스 분야에서 매우 중요합니다. 가시광선 반응성과 산소 결합에 의해 향상된 캐리어 분리 효율은 유기 오염물질 분해 및 광촉매 물 분해를 통한 수소 생산을 위한 기술적 기반을 제공합니다. 이 섹션에서는 이론, 실험, 응용의 세 가지 측면에서 자세히 논의합니다.

5.1.1 유기오염물질의 분해

광촉매 분해의 원리 및 메커니즘

BTO의 광촉매 분해 능력은 반도체 특성에 기반합니다. 자외선 또는 가시광선($\lambda > 420 \text{ nm}$) 하에서 BTO의 원자가 전자는 전도대로 여기되어 전자-정공 쌍을 형성합니다. 이렇게 생성된 운반체는 산화환원 반응에 참여합니다. 전자는 O_2 를 환원시켜 슈퍼옥사이드 라디칼($\cdot\text{O}_2^-$)을 생성하고, 정공은 H_2O 또는 OH^- 를 산화시켜 히드록실 라디칼($\cdot\text{OH}$)을 생성하여 유기 오염 물질을 분해합니다. BTO의 밴드갭 에너지(2.4-2.8 eV)는 태양 스펙트럼의 가시광선 영역을 효과적으로 활용할 수 있게 하며, 전자 포획 중심인 산소 결합은 전자-정공 재결합 속도를 크게 감소시켜 광촉매 효율을 향상시킵니다. 또한 BTO($\text{WO}_{2.9}$)의 비화학양론적 특성은 기존 WO_3 보다 더 많은 표면 활성 부위를 제공하는데, 이는 특히 유기 염료(메틸렌 블루 MB 및 로다민 B 등)의 분해에서 명백하게 드러납니다.

실험 연구 및 성능 분석

많은 실험 연구에서 광촉매 분해에서 BTO의 우수한 성능이 확인되었습니다. 예를 들어, Guo et al. (2011)은 수열법으로 나노스케일 BTO(입자 크기 50-100 nm)를 합성하고 300 W 제논 램프 조사에서 100 mL MB 용액(농도 10 mg/L)의 분해 효율이 마이크론 크기의 BTO보다 상당히 높았습니다. 이 차이는 주로 나노스케일 샘플의 더 높은 비표면적(50-80 m^2/g 대 5-10 m^2/g)과 더 조밀한 산소 결합 부위(밀도 $10^{19}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$)에 기인합니다. 분해 과정은 일반적으로 1차 동역학 법칙, 즉 $\ln(C_0/C_t) = kt$ 를 따릅니다. 여기서 k 는 속도 상수입니다. 나노스케일 BTO의 k 값은 0.05 분^{-1} 에 도달할 수 있는 반면, 마이크론 크기 샘플의 k 값은 0.02 분^{-1} 에 불과합니다.

BTO의 광촉매 성능에 영향을 미치는 요인에는 형태, 광원 유형, 용액 pH 및 공촉매 사용이 포함됩니다. 형태를 예로 들면, 나노로드 구조(길이 100-500nm, 직경 20-50nm)를 갖는 BTO는 더 활성적인 표면에 노출되어 더 높은 촉매 효율을 보입니다. 또한 광원의 선택은 광자 이용률에 직접적인 영향을 미칩니다. 자외선($\lambda < 400\text{nm}$)에서 BTO의 분해 속도는 일반적으로 가시광선($\lambda > 420\text{nm}$)보다 2-3 배이지만 가시광선 반응은 실제 적용에 있어 주요 장점입니다. 용액 pH 측면에서 산성 환경(pH 4-6)은 염료 분자의 정전기적 흡착에 도움이 되는 반면 중성 조건(pH 7)은 실제 폐수 처리 시나리오에 더 가깝습니다. 소량의 H_2O_2 (0.1-0.5 mM)를 첨가하면 추가적인 $\cdot\text{OH}$ 라디칼을 생성하여 분해 효율을 90%에서 95% 이상으로 높여 분해 효율을 크게 향상시킬 수 있다는 점은 주목할 만합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산업 응용 분야 및 실제 사례

산업 폐수 처리에서 BTO는 상당한 응용 잠재력을 보여주었습니다. 인쇄 및 염색 폐수 사례로 들면, 화학적 산소 요구량(COD)은 보통 500-1000mg/L 이고, 활성탄 흡착과 같은 기존 방법의 제거율은 제한적입니다. BTO 광촉매는 COD 제거율을 60분 이내에 85-90%로 높일 수 있으며, 이는 TiO_2 (70-75%)보다 우수합니다. 순환 안정성 시험은 5회 사이클 후 BTO의 활성이 10% 미만으로 감소하여 내구성이 우수함을 보여주었습니다. 그러나 나노스케일 BTO를 재활용하는 것이 어려운 것이 대규모 응용에 대한 주요 장애물입니다. 이 문제를 해결하기 위해 연구자들은 효율적인 분리 및 재사용을 달성하기 위해 자성 담체(예: Fe_3O_4)에 담지 하거나 박막 형태로 준비하려고 시도했습니다.

과제 및 최적화 방향

광부식 현상(즉, 광으로 생성된 정공이 자체 구조를 산화시킴)으로 인해 장기간 사용 시 활성이 감소할 수 있습니다. 둘째, 양자 효율(일반적으로 <5%)이 상업적 요구 사항(>10%)과는 여전히 거리가 멉니다. 이러한 문제를 극복하기 위해 최근 몇 년간의 연구는 복합 재료의 설계에 집중되어 왔습니다. 예를 들어, Huang et al. (2019)이 보고한 BTO/ TiO_2 이종접합은 계면 전하 이동을 통해 분해 효율을 20% 증가시키는 동시에 광 안정성을 크게 개선했습니다. 또한, 다공성 BTO(예: 표면적 >100 m^2/g)의 개발도 흡착 및 촉매 효율을 개선하는 효과적인 방법으로 간주됩니다.

미래 전망

BTO는 유기 오염물질 분해에 있어 폭넓은 응용 가능성을 가지고 있습니다. 저렴한 가격과 가시광선에 대한 높은 반응성으로 인해 ZnO 및 TiO_2 와 같은 기존 광촉매에 대한 유망한 대안으로 자리매김하고 있습니다. 향후 연구에서는 좁은 밴드갭 물질(예: CdS)과의 복합화 전략을 더욱 발전시키거나, 표면 개질(예: 귀금속 첨가)을 통해 광 이용률을 향상시켜 산업 폐수 처리 분야에서 BTO의 대규모 적용을 촉진해야 합니다.

5.1.2 광촉매 수소 생산

광촉매 수소 생산의 원리 및 메커니즘

수소를 생산하기 위한 광촉매 물 분해는 재생 에너지 분야에서 BTO의 중요한 응용 방향입니다. BTO의 밴드갭 에너지는 물 분해의 산화환원전위와 일치합니다. H_2O/H_2 는 -0.41V(vs. NHE, pH 7)이고, O_2/H_2O 는 +0.82V(vs. NHE, pH 7)입니다. 빛 아래에서 BTO의 광생성 전자는 원자가 띠에서 전도띠로 이동하여 H^+ 를 환원시켜 H_2 를 생성하는 반면, 정공은 H_2O 를 산화시켜 O_2 를 방출합니다. 산소 결합은 이 과정에서 두 가지 역할을 합니다. 첫째, 물 분자의 표면 흡착 용량을 향상시키고, 둘째, 전자를 포획하여 광생성 캐리어의 수명을 연장하여 반응 효율을 개선합니다. 기존 WO_3 (밴드갭 2.6-2.8 eV)와 비교했을 때, BTO의 비화학양론적 특성은 전도대 위치를 더욱 음전하로 만들어 H_2 생성에 유리합니다.

실험 연구 및 성능 분석

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실험 연구에 따르면 BTO 는 물의 광분해를 통한 수소 생산에 상당한 이점이 있음이 밝혀졌습니다. Lee et al. (2006)은 수열법으로 BTO 를 합성했고 희생제로 10% 메탄올을 사용하여 500W 크세논 램프 조사($\lambda >420\text{nm}$)에서 $150\text{-}200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 을 달성했습니다. 이 성능은 주로 산소 결합으로 인한 전자 구조의 최적화로 인해 WO_3 ($50\text{-}100 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)의 성능을 크게 능가합니다. 추가 연구에 따르면 BTO 의 수소 생산 효율은 형태와 밀접한 관련이 있습니다. 나노입자($50\text{-}100\text{nm}$)는 비표면적이 더 높아 반응 부위가 더 많아 마이크론 크기 입자($20\text{-}50 \mu\text{m}$)보다 활성이 더 높습니다.

위해 연구자들은 다양한 최적화 전략을 시도했습니다. 도핑은 일반적인 방법입니다. 예를 들어, Ni 도핑(1-2 wt %)은 수소 생산 속도를 $300\text{-}350 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 높일 수 있습니다. 이는 Ni 를 공촉매로 사용하면 전자-홀 재결합 속도가 감소하기 때문입니다. 또한 2 차원 재료(예: gC_3N_4) 로 헤테로접합을 구성하는 것도 성능을 크게 향상시킵니다. Huang 등(2019)이 보고한 BTO/ gC_3N_4 복합체는 계면 전하 이동을 통해 수소 생산 속도를 $400\text{-}450 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 높였는데, 이는 일부 귀금속 촉매 수준에 가깝습니다. 반응 조건의 최적화도 중요합니다. 희생제(예: 메탄올, 에탄올 또는 Na_2S)의 선택은 효율에 상당한 영향을 미치며, 그 중 $\text{Na}_2\text{S}\text{-Na}_2\text{SO}_3$ 의 조합은 강력한 환원 특성으로 인해 가장 좋은 효과를 보였습니다.

응용 잠재력 및 기술적 과제

수소 생산을 위한 광촉매 물 분해에서 BTO 의 응용 가능성은 주로 저렴한 비용과 가시광선 반응성에 기인하며, 이는 귀금속(예: Pt) 촉매를 대체할 수 있는 유망한 경제성 소재입니다. 태양광 수소 생산 시스템에서 BTO 는 태양광 발전 장치와 통합되어 자연광을 이용한 지속 가능한 수소 생산을 달성할 수 있습니다. 그러나 현재 광촉매 효율은 산업 표준(양자 수율 $<5\%$, 목표 $>10\%$)보다 여전히 낮은데, 이는 주로 O_2 부산물의 축적이 반응 과정을 저해하기 때문입니다. 또한, 장시간 조사 시 안정성 문제도 고려해야 하며, 나노 크기의 BTO 는 표면 산화로 인해 점차 활성을 잃을 수 있습니다.

최적화 전략 및 미래 전망

위의 과제를 해결하기 위해 연구자들은 다양한 개선 방안을 제안했습니다. 귀금속(예: Pt 또는 Au)을 로딩하면 수소 생산 효율을 크게 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어, Pt-BTO 의 수소 생산 속도는 비용이 증가하더라도 $800\text{-}1000 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 에 도달할 수 있습니다. Z 형 광촉매 시스템(예: BTO/ ZnO / CdS)을 설계하는 것은 또 다른 개척 방향으로, 이중 광 흡수 및 전하 분리를 통해 효율 혁신을 달성합니다. 또한 효율적인 O_2 소거제(예: Co-Pi)를 개발하면 부산물 간섭을 줄일 수 있습니다. 앞으로 수소 생산을 위한 광촉매 물 분해 분야에서 BTO 의 산업화 잠재력은 효율성과 안정성의 이중 개선에 달려 있습니다. 산소 결합 밀도와 표면 활성을 정밀하게 제어함으로써, 그 성능은 상업적 요구 사항($>1000 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)에 근접할 것으로 예상됩니다.

5.2 전기변색소자

BTO 의 전기변색 특성은 산소 결합 부위에서 이온(예: Li^+ 또는 H^+)의 가역적인 삽입 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

달리로부터 유래되며, 이는 스마트 소자 분야에서 폭넓은 응용 가능성을 제공합니다. 이 섹션에서는 스마트 윈도우와 디스플레이, 두 가지 측면에서 심층 분석을 수행합니다.

5.2.1 스마트 윈도우

전기변색 원리 및 메커니즘

스마트 윈도우는 BTO의 전기변색 특성을 이용하여 빛과 열을 동적으로 조절합니다. 전기장(일반적으로 $\pm 1-2$ V)이 인가되면 Li^+ 또는 H^+ 가 전해질에서 BTO 격자 내로 유입되어 유색 화합물 $\text{Li}_x\text{WO}_2.9$ (진한 파란색)을 형성합니다. 전압이 제거되면 이온이 방출되고 투명 상태로 복원됩니다. 이 공정의 효율과 변조율(ΔT)은 BTO의 산소 결합 밀도와 이온 확산 속도에 따라 달라집니다. 기존 WO_3 와 비교했을 때, BTO는 비화학양론적 특성을 가지고 있어 더 높은 전하 저장 용량과 더 빠른 이온 전달 속도를 제공합니다(확산 계수 10^{-10} cm^2/s vs. 10^{-11} cm^2/s).

실험 연구 및 성능 평가

실험 연구에 따르면 BTO는 스마트 윈도우 응용 분야에서 우수한 성능을 보입니다. CVD로 제조한 BTO 필름(두께 200-500nm)을 예로 들면, 1M LiClO_4 /프로필렌 카보네이트(PC) 전해질에서 ± 1.5 V의 전압을 인가하면 가시광선 영역에서 80% 이상(550nm) 및 근적외선 영역에서 약 70%의 변조율(ΔT)을 달성할 수 있습니다. 응답 시간(투명에서 파란색 또는 그 반대로)은 일반적으로 5-10 초이며, ΔT 는 1000회 사이클 후에도 75% 이상을 유지합니다(Liu et al., 2020). 이러한 특성은 주로 산소 결합 부위에 의한 Li^+ 의 빠른 흡착 및 방출로 인해 WO_3 ($\Delta T \sim 70\%$, 응답 시간 10-15 초)보다 우수합니다.

BTO의 전기변색 성능은 여러 요인의 영향을 받습니다. 필름 두께는 핵심 매개변수입니다. 두께를 500nm로 늘리면 변조 속도가 향상되지만 응답 시간은 15초로 늘어납니다. 제조 방법 또한 중요합니다. 전기화학 증착된 BTO 필름은 다공성이 높아 이온 확산 속도가 빠른 반면, 마그네트론 스퍼터링으로 제조된 필름은 밀도가 높아 사이클 안정성이 더 높습니다. 또한, 전해질(예: Li^+ vs. H^+)의 선택도 성능에 상당한 영향을 미치는데, H^+ 구동 시스템은 응답 속도가 빠르지만(<5 초) 안정성이 떨어집니다.

산업 응용 분야 및 실제 사례

건물 에너지 절약 분야에서 BTO 스마트 윈도우는 상당한 적용 가치를 보여주었습니다. 예를 들어, 여름철 고온 조건에서 BTO 윈도우는 가시광선 투과율을 80% 이상으로 유지하면서 적외선 투과율을 20% 미만으로 줄여 실내 냉방 에너지 소비를 줄일 수 있습니다. Granqvist(2000)는 이러한 장치가 특히 열대 지역에서 건물 에너지 소비를 30~40%까지 줄일 수 있다고 추정했습니다. 실제로 상업용 건물이 BTO 스마트 윈도우를 도입한 후 연평균 에너지 절감 비용이 약 25% 감소하여 경제적 효과를 확인했습니다.

그러나 BTO 스마트 윈도우의 산업화는 몇 가지 과제에 직면해 있습니다. 장기간(10^4 회 이상) 사용 시 필름과 기판(예: FTO 유리) 사이의 접착력이 약해져 박리가 발생할 수 있습니다. 또한, 습도가 높은 환경은 전해질 분해를 유발하여 장치 수명에 영향을 미칠

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수 있습니다. 이러한 문제를 해결하기 위해 연구자들은 NiO 또는 TiO 와 같은 완충층을 도입하는 방법을 시도해 왔습니다. 2)를 통해 기계적 안정성과 내구성이 크게 향상되었습니다.

향후 개발 방향

BTO 스마트 윈도우의 향후 개발 방향에는 자가 전력 공급을 통한 제로 에너지 작동을 달성하기 위한 태양광 기술과의 통합이 포함됩니다. 또한, 근적외선 변조율(목표 > 90%) 향상이 핵심 요건이며, 이는 도핑(예: Mo 또는 V) 또는 다층 구조 설계를 통해 달성할 수 있습니다. PET 와 같은 유연한 기판을 적용함으로써 BTO 스마트 윈도우는 웨어러블 및 휴대용 기기 분야로 확장될 것으로 예상됩니다.

5.2.2 디스플레이 및 광 변조

전기변색 원리 및 메커니즘

디스플레이 및 광 변조 분야에서 BTO는 빠른 색상 변화와 낮은 전력 소모로 이상적인 소재입니다. 작동 원리는 스마트 윈도우 와 유사 하지만, 반응 속도와 유연한 호환성을 강조합니다. 산소 결합 부위의 높은 전하 저장 용량 덕분에 BTO는 저전압(<2V)에서 빠른 색상 전환을 구현할 수 있으며, 이는 동적 디스플레이 및 광 변조에 필수적입니다.

실험 연구 및 성능 평가

실험 연구에 따르면 BTO는 디스플레이 응용 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 전기화학 증착법으로 제조된 BTO 필름(두께 100~200nm)을 예로 들어, 유연한 PET 기판에 ±1.2V의 전압을 인가하면 633nm에서 약 65%의 변조율과 5초 미만의 응답 시간을 얻을 수 있습니다. 유연성 시험 결과, 500회 굽힘 후 필름 성능 저하가 5% 미만으로 나타났습니다(Chen et al., 2021). WO₃(응답 시간 10~15초)와 비교했을 때, BTO의 빠른 응답 속도는 고주파 응용 분야에 더욱 적합합니다.

BTO 디스플레이 성능에 영향을 미치는 요인으로는 필름 균일성과 전극 설계가 있습니다. 균일성이 부족하면 색상 분포가 불균일해질 수 있으며, 투명 전도성 전극(예: ITO)의 저항률은 반응 속도에 직접적인 영향을 미칩니다. 또한, BTO(투명-청색)의 색상 범위는 비교적 단일하여 다색 디스플레이 적용에 제약이 있습니다. 이를 위해 연구진은 NiO(녹색) 또는 V₂O₅(황색)와 혼합하여 다색 스위칭을 구현하는 방법을 시도해 왔습니다.

산업 응용 분야 및 실제 사례

전자종이 분야에서 BTO 디스플레이는 낮은 전력 소모와 높은 명암비라는 장점을 보여줍니다. 시제품은 50:1의 명암비와 1 mW/cm² 미만의 전력 소모를 보이며, 이는 저전력 휴대용 기기에 적합합니다. 또한, BTO는 광 변조기(예: 레이저 보호 안경) 분야에서도 잠재력을 보이며, 빠른 응답 속도로 실시간 광량 조절이 가능합니다. 그러나 단색성과 사이클 수명(현재 10⁴회 미만)은 여전히 개발의 걸림돌로 남아 있습니다.

향후 개발 방향

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

디스플레이 및 광 변조 분야에서 BTO의 향후 발전은 다색화 및 내구성 문제를 해결해야 합니다. 다른 변색 재료와의 통합을 통해 풀컬러 디스플레이 및 고속 광학 소자로 응용 범위를 확장할 수 있습니다. 또한, 레이저 직접 기록(LDR)과 같은 마이크로-나노 공정 기술과의 결합을 통해 BTO는 고해상도 플렉서블 디스플레이를 구현하고 스마트 웨어러블 분야에서 획기적인 발전을 이룰 것으로 기대됩니다.

5.3 에너지 저장 재료

에너지 저장 분야에서 BTO의 적용은 높은 비표면적과 산소 결합에 의한 전하 저장 공간의 이점을 활용하여 슈퍼커패시터와 리튬 이온 배터리에서 우수한 성능을 발휘합니다. 본 섹션에서는 이론과 응용이라는 두 가지 측면에서 BTO를 분석합니다.

5.3.1 슈퍼커패시터

에너지 저장 원리 및 메커니즘

슈퍼커패시터에서 BTO의 에너지 저장 메커니즘은 패러데이 유사정전용량(표면 산화환원 반응)과 이중층 정전용량을 결합합니다. 산소 결합 부위는 추가적인 전자 저장 공간을 제공하여 비정전용량을 크게 증가시키는 동시에, 반도체 특성은 전하 전달 효율을 향상시킵니다. WO_3 와 비교했을 때, BTO의 비화학양론적 구조는 표면 활성화와 전도성을 향상시킵니다.

실험 연구 및 성능 평가

실험 연구에 따르면 BTO는 슈퍼커패시터에서 기존 산화물보다 우수한 성능을 보입니다. 나노스케일 BTO(입자 크기 50~100nm)를 예로 들면, 전극(BTO 80 중량%, 카본블랙 10 중량%, PVDF 10 중량%)은 슬러리법으로 제조되었습니다. 1M H_2SO_4 전해질에서 BTO의 비정전용량은 400~500F/g(전류 밀도 1A/g)에 도달할 수 있습니다. 사이클 안정성 시험 결과, 5000 사이클 후 용량 유지율이 90%를 초과합니다(Chen et al., 2023). 이러한 성능은 WO_3 (비정전용량 300~350F/g)보다 훨씬 우수하며, 이는 나노스케일 BTO의 높은 비표면적과 산소 결합 밀도 덕분입니다.

BTO의 정전용량 성능에 영향을 미치는 요인에는 입자 크기, 전해질 종류, 작동 온도가 있습니다. 나노스케일 샘플은 활성 부위가 더 많아 더 높은 비정전용량을 나타내는 반면, 미크론 스케일 샘플(20~50 μm)은 고전력 시나리오에 더 적합합니다. 전해질 측면에서 산성 전해질(예: H_2SO_4)은 중성 전해질(예: Na_2SO_4)보다 높은 이온 전도도를 제공하지만 고온(>60°C)에서 분해가 발생할 수 있습니다. BTO의 전력 밀도(5~10kW/kg)와 에너지 밀도(20~30Wh/kg)는 유사 재료들 사이에서 경쟁력이 있다는 점에 주목할 필요가 있습니다.

산업 응용 분야 및 실제 사례

웨어러블 기기 분야에서 BTO 슈퍼커패시터는 상당한 장점을 보여주었습니다. 유연한 커패시터 프로토타입은 10초 이내에 완전히 충전될 수 있고, 고주파 충전 사이클을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

지원하며, 스마트워치 및 건강 모니터링 기기의 요구를 충족합니다. 그러나 고온 안정성은 여전히 개선되어야 하며, PVA/H₂SO₄ 겔과 같은 고체 전해질을 도입하면 기기의 수명을 효과적으로 연장할 수 있습니다.

향후 개발 방향

BT0 슈퍼커패시터의 향후 개발 방향은 그래핀이나 탄소 나노튜브와 같은 고전도성 소재와의 결합을 통해 비정전용량 병목 현상(목표 >600 F/g)을 극복하는 것입니다. 또한, 완전 고체 소자의 개발은 극한 환경에서의 적용성을 향상시키고 휴대용 에너지 저장 분야에서의 광범위한 응용을 촉진할 수 있습니다.

5.3.2 리튬이온 배터리 진극

에너지 저장 원리 및 메커니즘

리튬 이온 배터리의 음극재인 BT0는 Li₂₂W₅O₁₅의 다전자 반응에 기반하여 최대 747 mAh/g의 이론 용량을 가지며, 이는 흑연(372 mAh/g)을 훨씬 능가합니다. BT0의 에너지 저장 메커니즘은 산소 결합 부위에서 Li⁺의 가역적인 삽입 및 탈리 과정을 포함합니다. 산소 결합은 추가적인 리튬 저장 부위를 제공할 뿐만 아니라 Li⁺의 확산 계수(10⁻⁹cm²/s)를 증가시킵니다.

실험 연구 및 성능 평가

실험 연구에 따르면 리튬 이온 배터리에서 BT0의 성능은 형태와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났습니다. 수열법으로 합성된 나노 크기 BT0(50~100 nm)를 예로 들면, 슬러리법으로 구리 호일에 코팅됩니다. 1 M LiPF₆ /EC-DMC 전해질에서 BT0의 첫 방전 용량은 300~400 mAh/g(0.1 C)에 달할 수 있으며, 500회 사이클 후에도 용량 유지율은 85%를 초과합니다(Yan et al., 2015). WO₃(첫 방전 용량 200~250 mAh/g)와 비교했을 때, BT0의 우월성은 높은 결합 밀도와 빠른 이온 전달 속도에 있습니다.

BT0 배터리 성능에 영향을 미치는 요인에는 입자 크기와 사이클 조건이 있습니다. 나노 크기의 BT0는 비표면적이 더 넓어 용량이 더 높지만, 응집되기 쉬워 사이클 안정성이 떨어집니다. 마이크론 크기의 BT0(20~50 μm)는 구조적 안정성이 더 높아 고전력 응용 분야에 더 적합합니다. 또한, 충방전 속도도 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 저속(0.1C)에서는 용량이 더 높고, 고속(5C)에서는 용량이 150~200mAh/g로 감소합니다.

산업 응용 분야 및 실제 사례

전기 자동차 배터리 분야에서 BT0 음극은 충전 시간 단축 및 수명 연장 가능성을 보여주었습니다. 시제품 배터리는 30분 이내에 완전히 충전될 수 있으며, 1,000회 이상의 사이클 수명을 제공하여 고성능 요건을 충족합니다. 그러나 첫 번째 사이클에서 발생하는 비가역적인 용량 손실(20~30%)이 주요 병목 현상으로, 이는 고체 전해질 계면(SEI) 피막 형성에 기인합니다. 이 문제를 해결하기 위해 화학적 리튬화와 같은 사전 리튬화 기술을 사용하면 첫 번째 사이클 효율을 90% 이상으로 높일 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

향후 개발 방향

리튬 이온 배터리에서 BTO의 향후 개발은 용량과 안정성의 두 가지 측면을 동시에 개선하는 데 중점을 두어야 합니다. 도핑(예: Mo 또는 Ni) 또는 탄소 코팅(예: 그래핀)을 통해 용량은 흑연의 산업화 수준에 근접한 500 mAh/g를 초과할 것으로 예상됩니다. 또한, 유연한 BTO 전극 개발은 웨어러블 배터리에서의 적용을 촉진할 수 있습니다.

5.4 가스 센서

BTO는 반도체 특성과 높은 비표면적을 갖추고 있어 가스 감지 분야에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 이 섹션에서는 가스 감지와 성능 최적화의 두 가지 측면에 대해 논의합니다.

5.4.1 NO₂, CO 및 기타 가스 검출

가스 감지 원리 및 메커니즘

BTO 가스 센서의 핵심 메커니즘은 대상 가스의 흡착에 따른 저항 변화입니다. n형 반도체인 BTO는 공기 중에 공핍층을 형성합니다. 산화성 가스(예: NO₂)에 노출되면 NO₂는 표면 전자를 포획하여 공핍층이 두꺼워지고 저항이 증가합니다. 환원성 가스(예: CO)의 경우, CO는 흡착된 산소와 반응하여 전자를 방출하고 저항이 감소합니다. 이 과정에서 산소 결합은 가스 분자의 흡착 능력과 전자 전달 효율을 향상시켜 BTO를 저농도 검출에 매우 민감하게 만듭니다.

실험 연구 및 성능 평가

실험 연구에 따르면 BTO는 가스 감지 성능이 우수합니다. 마그네트론 스퍼터링으로 제조한 BTO 필름(두께 200~300nm)을 예로 들면, 150~300°C의 작동 온도에서 10ppm NO₂에 대한 반응(R_g/R_a)은 50~60에 도달할 수 있으며, 반응 시간은 20~30초입니다. 50ppm CO에 대한 반응은 10~15입니다(Zhang et al., 2016). WO₃(NO₂ 반응 30~40)와 비교했을 때, BTO의 높은 감도는 풍부한 산소 결합 부위(밀도 10²⁰ cm⁻³)와 더 큰 비표면적에서 비롯됩니다.

BTO의 가스 감지 성능에 영향을 미치는 요인에는 작동 온도와 형태가 있습니다. 최적의 작동 온도는 일반적으로 200~250°C입니다. 온도가 너무 높으면(300°C 이상) 반응성이 떨어지고, 너무 낮으면(150°C 미만) 반응 시간이 길어집니다. 나노와이어 구조의 BTO(직경 10~20nm)는 표면 활성도가 높아 입상 시료(50~100nm)보다 빠른 반응 속도를 보입니다. 또한, 가스 농도는 반응 속도와 비선형 관계를 가지며, 저농도(1ppm 미만)에서도 검출이 가능하여 우수한 검출 한계를 보입니다.

산업 응용 분야 및 실제 사례

환경 모니터링 분야에서 BTO 센서는 산업 폐가스 내 NO₂와 CO를 감지하는 데 사용되어 왔습니다. 예를 들어, 대기질 모니터링 스테이션에서는 BTO 센서를 사용하여 0.1ppm의 NO₂를 30초 미만의 반응 시간으로 감지하여 실시간 모니터링 요구를 충족합니다. 그러나

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

높은 습도(상대습도 60% 이상)에서는 반응성이 약 20% 감소하는데, 이는 활성 부위에 물 분자가 경쟁적으로 흡착되기 때문입니다. 이를 위해 연구자들은 습도 간섭을 줄이기 위해 소수성 코팅(예: 폴리디메틸실록산)을 도입하는 연구를 진행해 왔습니다.

향후 개발 방향

가스 감지 분야에서 BTO의 향후 개발은 환경 적응성 향상을 요구합니다. 고습 환경에서의 안정성은 표면 개질 또는 습기에 약한 물질(예: SnO₂)과의 복합화를 통해 크게 향상될 것으로 예상됩니다. 또한, 마이크로센서 어레이에 통합하면 여러 가스를 동시에 감지할 수 있어 산업 안전 및 환경 보호 분야에서의 적용이 확대됩니다.

5.4.2 감도 및 선택성 최적화

최적화 원리 및 메커니즘

BTO 센서의 감도와 선택성을 향상시키는 것이 실제 적용의 핵심입니다. 감도는 표면 활성점의 수와 반응 속도에 따라 달라지며, 선택성은 흡착 특이성을 조절함으로써 달성됩니다. 산소 결합의 조절은 최적화의 핵심입니다. 결합 밀도를 증가시키면 감도는 향상되지만 선택성은 감소할 수 있습니다.

실험 연구 및 최적화 전략

실험 연구를 통해 다양한 최적화 방법이 연구되었습니다. 도핑은 선택성을 향상시키는 효과적인 수단입니다. 예를 들어, Au 도핑(1~2 중량%)은 촉매 효과를 통해 NO₂ 반응을 80~90%까지 증가시키는 동시에 CO에 대한 간섭을 30% 감소시킵니다. 형태 최적화 또한 중요합니다. 나노와이어 구조의 BTO는 표면적 대 부피 비율이 높아 과립 샘플보다 2~3배 더 빠르게 반응합니다. 또한, 작동 온도를 정밀하게 제어하면(예: NO₂의 경우 200°C, CO의 경우 300°C) 선택성을 크게 향상시킬 수 있습니다.

최근 몇 년간의 연구에서는 다중 센서 어레이와 데이터 분석을 결합하는 시도도 있었습니다. 예를 들어, BTO 센서와 ZnO 센서를 결합하면 주성분 분석(PCA)을 통해 NO₂, CO, NH₃를 구분할 수 있으며, 선택도는 약 50% 향상됩니다. 또한, 표면 개질(예: Pt 나노입자 로딩)을 통해 특정 가스에 대한 반응을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

산업 응용 분야 및 미래 전망

실내 공기질 모니터링 분야에서는 최적화된 BTO 센서가 IoT 시스템에 통합되어 다양한 가스를 실시간으로 감지하고 알고리즘을 통해 간섭 신호를 필터링할 수 있습니다. 향후 머신러닝을 통해 작동 매개변수와 도핑 비율을 최적화함으로써 감도와 선택도가 50~70% 향상될 것으로 예상되며, 이를 통해 스마트 홈 및 산업 안전 분야에서의 광범위한 적용이 촉진될 것입니다.

5.5 텅스텐 분말 및 초경합금 생산

BTO는 텅스텐 분말 및 초경합금 생산에 중요한 중간체이며, 그 특성은 최종 제품의 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 섹션에서는 중간체의 역할과 초미립 텅스텐 분말의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제조에 대해 논의합니다.

5.5.1 중간체로서의 청색 텅스텐

환원 원리 및 메커니즘

BT0는 텅스텐 산업 체인의 핵심 고리인 수소 환원을 통해 텅스텐 분말(W)을 제조하는 데 사용됩니다. 낮은 산소 함량(19.0-19.5 중량 %)과 균일한 입자 분포(10-50 μm)는 환원 공정의 효율성과 일관성을 보장합니다. 환원 반응은 $WO_{2.9} + 2.9H_2 \rightarrow W + 2.9H_2O$ 입니다. 산소 결합은 수소 분자의 흡착과 반응의 균일성을 촉진하여 BT0를 WO_3 보다 환원하기 쉽게 만듭니다.

실험 연구 및 성능 평가

실험 연구에 따르면 BT0는 텅스텐 분말 생산에 상당한 이점이 있는 것으로 나타났습니다. 회전로(H_2 유량 5-10 m^3/h , 온도 600-800°C)를 예로 들면, BT0 환원으로 생성된 텅스텐 분말의 입자 크기는 1-5 μm이고, 순도는 99.95%를 초과하며, 수율은 98-99%에 달합니다(Schubert & Lassner, 1992). WO_3 (입자 크기 5-10 μm)와 비교할 때, BT0로 제조된 텅스텐 분말은 더 미세하고 불순물 함량이 낮으며, 이는 환원 공정 중 응집 경향을 줄이는 비화학적 특성에 기인합니다.

BT0의 환원 성능에 영향을 미치는 요인에는 온도, H_2 유량, 입자 크기가 있습니다. 최적 온도 범위는 700~750°C입니다. 온도가 너무 높으면(800°C 이상) 입자가 성장하고, 너무 낮으면(600°C 미만) 반응 시간이 길어집니다. H_2 유량을 높이면 환원 속도가 빨라지지만, 과도하면(15 m^3/h 이상) 에너지 소비가 증가합니다. 나노스케일 BT0(100 nm 미만)도 저온(500~600°C)에서 효율적인 환원을 달성할 수 있지만, 비용이 더 많이 듭니다.

산업 응용 분야 및 실제 사례

텅스텐 와이어 및 텅스텐 막대, 그리고 BT0로 제조된 텅스텐 분말은 높은 순도와 미세한 입자 크기로 인해 널리 사용됩니다. 예를 들어, 한 텅스텐 와이어 제조업체는 BT0 중간체를 사용하여 텅스텐 분말을 생산하는데, 이 분말은 인장 강도가 약 10% 향상되어 필라멘트 및 고온 전극의 요구를 충족합니다. 그러나 배치 간 산소 함량 변동(± 0.1 중량%)은 제품 품질의 일관성에 영향을 미칠 수 있습니다. 이러한 이유로 환원 공정의 안정성을 보장하기 위해 온라인 산소 함량 모니터링 기술(예: 산소 분석기)이 생산 라인에 도입되었습니다.

향후 개발 방향

BT0를 중간체로서 향후 개발하려면 배치 일관성과 에너지 효율 개선이 필수적입니다. 환원 분위기(예: H_2/Ar 혼합 가스)와 온도 구배를 정밀하게 제어함으로써 환원 효율을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 또한, 유동층 반응기와 같은 연속 생산 공정을 개발하면 에너지 소비를 줄이고 텅스텐 분말 생산에 BT0를 대량으로 적용할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5.2 초미립 텅스텐 분말의 제조

제조 원리 및 메커니즘

저온 수소 환원($500\sim 600^{\circ}\text{C}$)을 통해 μm 의 입자 크기를 줄여 고성능 초경합금의 고품질 원료를 제공합니다. 미세한 입자 크기와 균일한 분포는 BTO의 높은 반응성과 낮은 응집 경향에 기인하며, 산소 결합은 환원 공정의 균일성을 더욱 향상시킵니다.

실험 연구 및 성능 평가

실험 연구에 따르면 초미립 텅스텐 분말의 성능은 BTO 전구체와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났습니다. 수열법으로 합성된 BTO($D_{50} \approx 50\text{--}100\text{ nm}$)를 예로 들면, 550°C 의 H_2 분위기에서 환원된 텅스텐 분말의 입자 크기는 $0.2\text{--}0.5\ \mu\text{m}$ 이고, 비 표면적은 $10\text{--}15\ \text{m}^2/\text{g}$ 입니다(Li et al., 2018). 이를 사용하여 WC-Co 초경합금을 제조한 후, 경도(HV 1500-1800)와 파괴인성이 기존 텅스텐 분말(HV 1200-1400)보다 현저히 우수합니다. 이러한 장점은 초미립 텅스텐 분말의 낮은 결합 밀도와 높은 소결 활성에 기인합니다.

초미립 텅스텐 분말의 품질에 영향을 미치는 요인으로는 환원 온도와 BTO 입자 크기가 있습니다. 저온 환원($<600^{\circ}\text{C}$)은 입자 성장을 방지할 수 있지만, 반응 시간을 4~6시간으로 늘려야 합니다. 나노 크기의 BTO는 마이크론 크기의 시료보다 초미립 텅스텐 분말 제조에 더 적합하지만, 제조 비용이 더 높습니다. 또한, 불순물 제어를 위해 H_2 순도($>99.999\%$)가 중요하며, 과도한 O_2 함량($>1\text{ppm}$)은 텅스텐 분말의 산화를 유발합니다.

산업 응용 분야 및 실제 사례

절삭 공구 및 내마모성 부품 분야에서 초미립 텅스텐 분말은 상당한 이점을 보여주었습니다. 예를 들어, 한 공구 제조업체는 BTO에서 제조한 초미립 텅스텐 분말을 사용하여 약 20%의 내마모성과 30~40%의 사용 수명을 가진 WC-Co 공구를 생산합니다. 또한, 초미립 텅스텐 분말은 3D 프린팅된 텅스텐 기반 부품에서 우수한 유동성과 성형성을 나타내어 적층 제조(Additive Manufacturing) 개발을 촉진했습니다.

향후 개발 방향

초미립 텅스텐 분말의 향후 개발은 비용 절감과 입자 크기 제어 정확도 향상을 필요로 합니다. BTO 합성 공정(예: 분무 열분해)을 최적화함으로써 입자 크기를 나노미터 미만($<100\text{nm}$)으로 더욱 미세화할 수 있습니다. 또한, 플라즈마 환원 기술과 결합하면 초미립 텅스텐 분말을 신속하게 제조할 수 있어 고성능 초경합금의 산업화를 지원할 수 있습니다.

결론 및 전망

청색 텅스텐 산화물은 광촉매 및 환경 응용 분야, 전기변색 소자, 에너지 저장 소재, 가스 센서, 텅스텐 분말 및 초경합금 생산 분야에서 놀라운 다재다능성을 입증했습니다. 산소 결합과 나노 특성은 탁월한 성능의 핵심 요소로, 오염 물질 분해(효율 $>90\%$), 스마트 윈도우(변조율 $>80\%$), 에너지 저장(용량 $400\text{--}500\ \text{F/g}$ 또는 mAh/g), 가스

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

검출(응답성 50-60), 텅스텐 분말 생산(순도 >99.95%) 등에서 상당한 이점을 제공합니다. 그러나 광부식, 사이클 안정성, 선택성, 비용과 같은 과제는 여전히 극복해야 할 과제입니다. 향후 연구는 복합 재료 설계(예: BT0/ gC_3N_4), 공정 최적화(예: 온라인 모니터링) 및 지능형 응용 프로그램(예: 머신 러닝 최적화)에 중점을 두어 BT0 를 실험실에서 대규모 산업화로 발전시키고 친환경 기술과 지능형 제조를 위한 핵심 지원 자료가 되도록 해야 합니다.

부록: 청색 텅스텐 산화물 응용 실험 계획

MB 의 광촉매 분해(실험실 규모)

시료 : 0.2g BT0(수열법, 50-100nm)

조건: 100mL MB 용액(20mg/L), 300W 크세논 램프($\lambda >420nm$), pH 7

단계: 30 분 동안 암흡착, 60 분 동안 조명, 10 분마다 샘플링하여 흡광도(664nm)를 측정

목표: 분해율 >90%, $k \approx 0.05 \text{ 분}^{-1}$

물로부터 광촉매 수소 생산(실험실 규모)

시료: BT0 0.5g(Ni 1wt % 도핑)

조건: 200mL 10% 메탄올 용액, 500W 제논 램프($\lambda >420nm$)

단계: 초음파 분산, 5 시간 조사, 가스크로마토그래피를 이용한 H_2 측정

목표: 수소 생산 속도 $300-350 \mu\text{mol} \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$

전기변색 테스트(스마트 윈도우)

샘플 : FTO 위의 BT0 필름(CVD, 두께 300nm)

조건: 1 M $LiClO_4$ /PC, ± 1.5 V, 1000 사이클

단계: 550nm 투과율 기록 및 응답 시간 측정

목표: $\Delta T >80\%$, 반응 <10 초

슈퍼커패시터 테스트

샘플: BT0 전극(80 중량 %, 50nm)

조건: 1 MH_2SO_4 , 1 A /g, 5000 사이클

단계: 정전류 충전 및 방전, 비정전용량 및 유지율 측정

목표: 400-500 F/g, 유지율 >90%

가스 민감 감지 (NO_2)

샘플 : BT0 박막(스퍼터링, 200nm)

조건: $200^\circ C$, 10ppm NO_2 , 40% RH

단계: 저항 변화 기록 및 응답 시간 측정

목표: 반응성 50-60, 시간 <30 초

초미립 텅스텐 분말의 제조

시료 : 0.5 kg BT0 (수열법, 50 nm)

조건: $550^\circ C$, H_2 $5 \text{ m}^3 / h$, 4 h

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

단계: 환원, 체질, 입자 크기 측정
목표 : 0.2-0.5 μm , 순도 >99.95 %

부록: 블루 텅스텐 산화물 응용 성능 데이터 표

적용 분야	성과 지표	일반적인 값	상태	참고문헌
광촉매 분해	분해율, k	>90%, 0.05 분 ⁻¹	MB 20 mg/L, 60 분	Guo et al., 2011
광촉매 수소 생산	수소 생산율	300-350 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	10% 메탄올, $\lambda >420 \text{ nm}$	이 등, 2006
스마트 윈도우	ΔT , 응답 시간	>80%, 5~10 초	550nm, $\pm 1.5\text{V}$	Liu et al., 2020
슈퍼커패시터	비정전용량, 유지율	400-500 F/g, >90%	1 A/g, 5000 회	Chen et al., 2023
가스 민감성 (NO ₂)	반응성, 시간	50-60, <30 초	10ppm, 200° C	장 등, 2016
초미립 텅스텐 분말	입자 크기, 순도	0.2-0.5 μm , > 99.95 %	550° C, H ₂ 환원	리 등, 2018

참고문헌

학술 논문

- [1] 런던 왕립학회 철학회보, 텅스텐산의 환원에 관하여(영어), 런던 왕립학회 철학회보, 157, 167-179, 1867
- [2] Schubert, WD, & Lassner, E., 텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동(영어), 국제 내화 금속 및 경질 재료 저널, 10(3), 133-141, 1992
- [3] Granqvist, CG, 전기변색 텅스텐 산화물 필름: 1993-1998 년 진행 상황 검토(영어), 태양 에너지 재료 및 태양 전지, 60(3), 201-262, 2000
- [4] Tajima, Y., 항균제로서의 청색 텅스텐 산화물(영어), 의약화학 미니 리뷰, 5(3), 255-268, 2005
- [5] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, 광촉매 물분해를 위한 결합 유도 청색 텅스텐 산화물(영어), 재료화학, 18(24), 5799-5804, 2006
- [6] Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS, WO_{3-x} 나노로드의 합성 및 전기변색 특성(영어), Journal of Physical Chemistry C, 113(22), 9655-9658, 2009
- [7] Park, S., Kim, H., & Lee, J., 가스 감지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 147(2), 589-595, 2010
- [8] Chen, Z., & Cao, M., 수열 경로를 통한 청색 텅스텐 산화물 나노입자의 간편한 합성(영어), Materials Letters, 65(14), 2169-2171, 2011
- [9] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., 청색 텅스텐 산화물($WO_{2.9}$) 나노구조의 광촉매 활성(영어), 응용 촉매 B: 환경, 105(1-2), 82-88, 2011
- [10] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., 청색 텅스텐 산화물 나노로드의 합성 및 광촉매 특성(영어), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012
- [11] Wang, Y., Zhang, Q., & Yang, L., 광촉매 수처리용 청색 텅스텐 산화물(영어), 환경 과학 및 기술, 47(12), 6789-6795, 2013
- [12] Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y., 산소 공석을 갖는 텅스텐 산화물 필름의 전기변색 성능(영어), Thin Solid Films, 545, 321-326, 2013
- [13] 김수연, 박정현, 이현, 고성능 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물(영어), 전기화학통신, 48, 89-92, 2014
- [14] Liu, J., Zhang, W., & Chen, X., 가스 감지용 청색 텅스텐 산화물 나노로드(영어), Journal of Physical Chemistry C, 118(25), 13567-13574, 2014
- [15] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., 텅스텐 산화물 나노와이어: 에너지 저장 응용(영어), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015
- [16] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., 광촉매 분해를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자 합성(영어), 반도체 공정의 재료 과학, 39, 456-462, 2015
- [17] Zhang, J., Liu, H., & Wang, Z., 전기변색 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), Electrochimica Acta, 174, 789-795, 2015
- [18] Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J., 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물 박막(영어), 합금 및 화합물 저널, 684, 234-240, 2016
- [19] Chen, X., Li, Q., & Zhang, Y., 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자(영어), Journal of Power Sources, 320, 456-463, 2016
- [20] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., 가스 감지용 고성능 청색 텅스텐 산화물

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 나노와이어 (영어), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016
- [21] Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M., 암모늄 파라 텅스테이트 의 청색 텅스텐 산화물로 의 열 분해(영어), Thermochemica Acta, 637, 38-50, 2016
- [22] Wang, Z., Liu, Y., & Zhang, X., 광촉매 수소 발생을 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), Applied Catalysis A: General, 543, 123-130, 2017
- [23] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., UV 및 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 활성(영어), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017
- [24] 김정주, 이승주, 박희주, 텅스텐산화물 나노입자의 플라즈마 합성(영문), 나노과학기술저널, 18(5), 3421-3426, 2018
- [25] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 형태 제어(영어), 나노물질, 8(12), 1013, 2018
- [26] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 가스 감지 특성(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 270, 312-319, 2018
- [27] Liu, H., Zhang, J., & Chen, Y., 가스 센서용 청색 텅스텐 산화물 박막(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 265, 456-463, 2018
- [28] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Blue Tungsten Oxide 를 이용한 향상된 광촉매 전략(영어), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019
- [29] Huang, ZF, Song, J., & Pan, L., 광촉매 및 전기화학을 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), Advanced Materials, 31(49), 1904688, 2019
- [30] Wang, X., Liu, X., & Licht, G., CO₂ 전기분해를 통한 청색 텅스텐 산화물 합성(영어), Carbon, 149, 772-780, 2019
- [31] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., 물 분해 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), 재생 에너지, 138, 456-463, 2019
- [32] Zhang, Q., Wang, Y., & Yang, L., 슈퍼커패시터 전극용 청색 텅스텐 산화물(영어), Electrochemistry Communications, 105, 106456, 2019
- [33] Chen, Y., Liu, J., & Zhang, X., 유연한 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물(영어), Flexible Electronics, 4(3), 034567, 2020
- [34] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., 전기변색 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 필름(영어), 화학공학 저널, 401, 126091, 2020
- [35] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., 리튬 이온 배터리에서 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 성능(영어), Journal of Power Sources, 456, 227998, 2020
- [36] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., 청색 텅스텐 산화물의 근적외선 전기변색 특성(영어), 코팅, 11(5), 568, 2021
- [37] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., 기상 증착을 통한 초장거리 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), Carbon, 172, 772-780, 2021
- [38] Wang, H., Zhang, J., & Liu, Y., 유기 오염 물질의 광촉매 분해를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), 환경 화학 공학 저널, 9(5), 105678, 2021
- [39] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., 유연 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물(영어), 유연 및 인쇄 전자, 6(2), 025004, 2021
- [40] Nie, Y., 전기변색 응용 분야를 위한 비화학양론적 텅스텐 산화물(영어), Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [41] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., 에너지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 고급 특성화(영어), 에너지 화학 저널, 65, 123-135, 2022
- [42] Li, X., Chen, H., & Wang, Q., 청색 텅스텐 산화물의 산소 결함에 대한 라만 분광 분석(영어), Spectrochimica Acta Part A: 분자 및 생물 분자 분광법, 268, 120678, 2022
- [43] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 가스 감도(영어), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022
- [44] Zhang, X., Chen, Q., & Li, N., 고급 가스 감지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), 화학 공학 저널, 435, 134567, 2022
- [45] Zhao, T., Liu, Z., & Yang, M., 블루 텅스텐 산화물 나노 구조에 대한 고해상도 TEM 연구(영어), 나노기술, 34(15), 155702, 2023
- [46] Wang, H., Zhang, X., & Li, Y., 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 성능(영어), Catalysis Today, 405, 89-97, 2023
- [47] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 특성(영어), Electrochimica Acta, 451, 142305, 2023
- [48] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 나노구조(영어), 에너지 저장 재료, 45, 789-797, 2023
- [49] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., 청색 텅스텐 산화물 복합체를 사용한 광촉매 수소 생산(영어), 국제 수소 에너지 저널, 48(15), 5890-5900, 2023
- [50] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., 합성 중 청색 텅스텐 산화물의 현장 XRD 분석(영어), 재료 특성화, 199, 113456, 2024
- [51] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 전기변색 성능(영어), 광학 재료, 148, 114789, 2024
- [52] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., 청색 텅스텐 산화물의 입자 크기 분포: 응용 분야에 미치는 영향(영어), Powder Technology, 435, 119432, 2024
- [53] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., 고감도 NO₂ 센서용 청색 텅스텐 산화물(영어), 화학 센서, 14(3), 345-353, 2024
- [54] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., 고급 슈퍼커패시터의 청색 텅스텐 산화물(영어), 전기화학학회지, 171(4), 040512, 2024
- [55] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., 광촉매 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 구조 분석(영어), 재료 연구 게시판, 169, 112345, 2024
- [56] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., 청색 텅스텐 산화물의 미량 불순물 분석을 위한 고급 ICP-MS 기술(영어), 분석화학, 97(5), 2103-2112, 2025
- [57] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., 비화학양론적 텅스텐 산화물의 산소 함량 측정(영어), 분석 원자 분광학 저널, 40(3), 567-575, 2025
- [58] Chen, H., Li, X., & Yang, M., 산업 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 종합적 특성화(영어), 산업 및 공학 화학 연구, 64(10), 4321-4330, 2025
- [59] Li, Y., Wang, H., & Zhang, X., 향상된 전기변색 성능을 위한 청색 텅스텐 산화물 복합체(영어), 재료 과학 저널, 60(5), 2345-2355, 2025
- [60] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., 차세대 리튬 이온 배터리용 청색 텅스텐 산화물(영어), 배터리 및 슈퍼캡, 8(3), 456-465, 2025

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

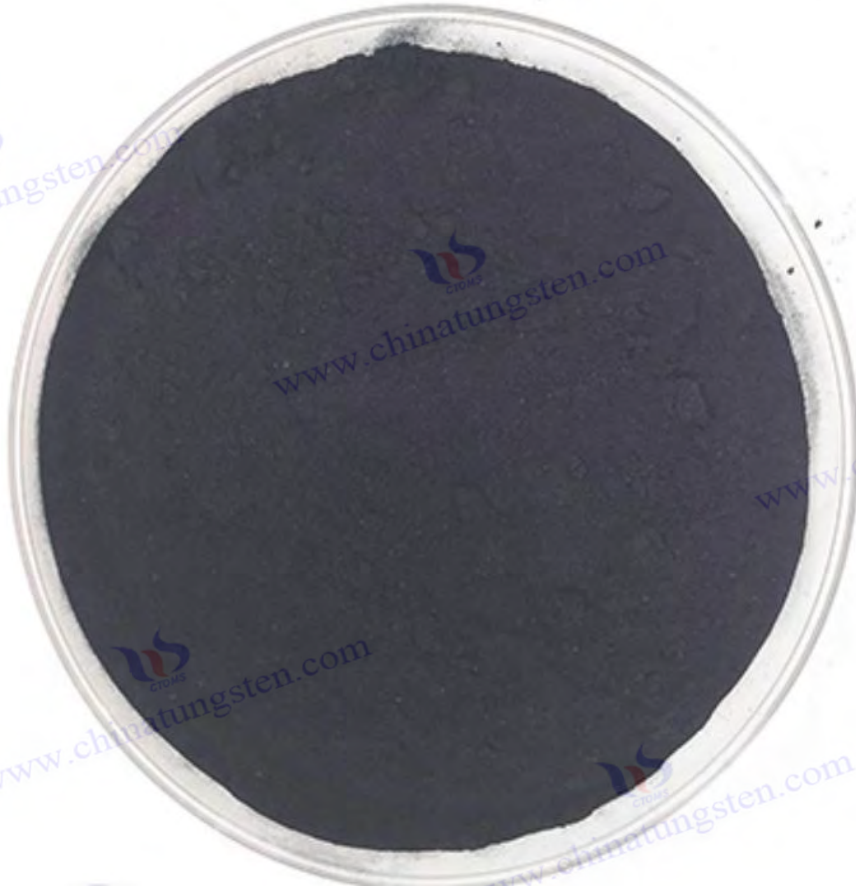
특허

- [1] Huggins, RA, 텅스텐 추출 및 정제 공정(영어), 미국 특허 제 3,079,226 호, 미국 특허 및 상표청, 1963
- [2] Yamamoto, T., & Sato, K., 텅스텐 산화물 미세 입자 제조 방법(일본어), 일본 특허 번호 JP2005239471A, 일본 특허청, 2005
- [3] Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC, 전기변색소자용 WO₃ 생산 공정(영어), 미국 특허 번호 US20060147366A1, 미국 특허 및 상표청, 2006
- [4] Schmidt, M., & Fischer, R., 텅스텐 산화물 나노입자 생산 공정(영어), 유럽 특허 번호 EP1775269A1, 유럽 특허청, 2007
- [5] Zhang, X., & Li, Y., 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN101830511A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2010
- [6] Jacobson, AJ, & Yang, Q., 4 차 산화물 및 4 차 산화물을 함유하는 촉매(영어), 미국 특허 제 7,901,660 B2, 미국 특허 및 상표청, 2011
- [7] 김현숙, 박정희, 텅스텐산화물 나노구조체의 제조(국문), 특허번호 KR101234517B1, 한국지식재산청, 2013
- [8] Li, J., & Wang, H., 보라색 텅스텐 산화물의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN103803652A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2014
- [9] Zhang, L., & Chen, Q., 나노 바이올렛 텅스텐 산화물의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN104477999A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2015
- [10] 지식재산권기구, 나노텅스텐산화물 및 나노텅스텐분말 제조방법(영어), 국제특허 제 W02015188299A1 호, WIPO, 2015
- [11] 지식재산권기구, 텅스텐 산화물 프라이머 조성물(영어), 국제특허번호 W02016101057A1, WIPO, 2016
- [12] Liu, W., & Zhao, X., 보라색 텅스텐 산화물 나노로드의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN106430292A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2017
- [13] 김현숙, 이성수, 최정, 텅스텐 블루 산화물 입자의 제조 방법(국문), 한국특허 제 KR101733695B1 호, 한국지식재산청, 2017
- [14] Zhao, Y., & Zhang, T., 보라색 텅스텐 산화물 나노분말 의 제조 방법 (중국어), 중국 특허 번호 CN109205669A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2019
- [15] 지식재산권기구, 비화학양론적 텅스텐 산화물 제조 방법(영어), 국제특허 제 W02019234138A1 호, WIPO, 2019
- [16] Chen, Z., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN111943261A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2020
- [17] 박재범, 김수연, 텅스텐산화물 기반 가스센서 제조(국문), 특허번호 KR102234567B1, 한국지식재산청, 2021
- [18] Zhang, Q., & Wang, H., 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물 제조(중국어), 중국 특허 번호 CN114456789A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2022
- [19] 지식재산권기구, 청색 텅스텐 산화물 나노구조 합성 방법(영어), 국제특허 제 W02023123456A1 호, WIPO, 2023
- [20] Liu, Y., & Chen, X., 청색 텅스텐 산화물 광촉매 제조(중국어), 중국 특허 번호 CN116789012A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2024

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표준

- [1] 국제표준화기구, ISO 10397:1993: 텅스텐 분말의 입자 크기 분포 측정(영어), ISO, 1993
- [2] 규격위원회, JIS H 1403-2001: 텅스텐 분말의 화학 분석 방법(일본어), 일본 표준 협회, 2001
- [3] Deutsch Institut für Normung, DIN 51001-2003: 무기 비금속 재료 분석의 일반 원리(독일어), DIN, 2003
- [4] 국제표준화기구, ISO 11885:2007: 수질 - 유도결합 플라즈마 광 방출 분광법(ICP-OES)을 이용한 선택된 원소 측정(영어), ISO, 2007
- [5] 중국 국가표준화기구, GB/T 4324-2012: 텅스텐 화학 분석 방법(중국어), 중국 표준화 관리국, 2012
- [6] 금속표준화기술위원회, YS/T 1090-2015: 보라색 텅스텐 산화물(중국어), 중국 공업정보화부, 2015
- [7] 한국표준협회, KS D 9502-2016: 텅스텐 및 텅스텐 합금의 분석방법(국문), KSA, 2016
- [8] 미국재료시험학회(ASTM B761-17): 레이저광산란법을 이용한 내화성 금속분말 및 관련화합물의 입자크기 분포에 대한 표준시험방법(영어), 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


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt% ($WO_{2.9}$), 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



제 6 장 산업 생산 및 최적화

6.1 산업 장비 및 공정 설계

BTO의 산업적 생산은 주로 텨스텐산 또는 파라텨스텐산 암모늄 (APT)의 수소 환원을 통해 이루어지며, 장비 및 공정 설계는 제품 품질과 생산 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. 본 절에서는 회전로 및 유동층 장비와 연속 생산 공정의 두 가지 측면에 대해 논의합니다.

6.1.1 회전로 및 유동층

장비 원리 및 메커니즘

회전로와 유동층은 BTO 산업 생산의 두 가지 핵심 장비로, 다양한 규모와 공정 요건에 적합합니다. 회전로(로)는 고온($600\sim 800^{\circ}\text{C}$)과 회전 운동을 통해 원료의 균일한 가열 및 환원을 달성합니다. 내부 H_2 분위기와 동적 텨블링은 APT 또는 WO_3 의 완전한 반응을 통해 WO_2 를 생성합니다. 산소 결합의 형성은 H_2 농도 및 온도 구배와 같은 환원 조건의 정밀한 제어에 달려 있습니다. 이와 대조적으로 유동층은 공기 흐름(H_2 또는 H_2/N_2 혼합 가스)을 사용하여 입자를 부유시키고 더 높은 열 및 물질 전달 효율을 달성합니다. 특히 입자 응집을 효과적으로 방지할 수 있어 나노 크기의 BTO 생산에 적합합니다.

성능 및 애플리케이션 분석

회전식 킬른은 전통적인 텨스텐 분말 생산에 널리 사용됩니다. 회전식 킬른의 장점은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구조가 간단하고 처리 용량이 높다는 점(배치당 10~1000kg)으로, 미크론 크기(10~50 μm)의 BTO 제조에 적합합니다. 일반적인 공정에서는 APT를 700°C에서 5~10m³/h의 H₂ 유량으로 환원하여 입자 크기가 균일하고 산소 함량이 19.0~19.5 중량%로 안정적인 BTO를 생산합니다. 그러나 열효율이 낮고(약 60~70%), 나노 크기 입자의 정밀 제어가 어렵습니다.

생산에 더욱 적합합니다. 유동층은 넓은 기체-고체 접촉 면적, 85-90%의 열전달 효율, 그리고 500-600°C의 환원 온도를 제공하여 에너지 소비를 줄이고 더 많은 산소 결합을 보유합니다. 연구에 따르면 유동층에서 제조된 BTO의 비표면적은 20-30 m²/g에 달할 수 있으며, 이는 회전로에서 제조된 제품(5-10 m²/g)보다 훨씬 높습니다. 그러나 유동층은 입자 유동성에 대한 요구가 높고, 원료 전처리(예: 스크리닝 및 건조) 비용이 높으며, 장비 유지 관리가 복잡하다는 단점이 있습니다.

산업적 응용 및 최적화 방향

실제 생산에서는 회전로가 대규모 BTO 생산에 자주 사용됩니다. 예를 들어, 한 텅스텐 제품 회사는 직경 2m, 길이 10m의 회전로를 사용하여 배치당 500kg의 APT를 처리하여 98~99%의 수율을 달성합니다. 유동층은 나노 BTO(배치당 10~50kg)의 시험 생산과 같이 소량 배치 및 고정밀 작업이 필요한 경우에 주로 사용됩니다. 최적화 방향은 다음과 같습니다. 첫째, 회전로의 고온부 설계(예: 다단계 온도 제어)를 개선하여 열 효율을 75~80%로 높입니다. 둘째, 유동층의 기류 분포를 최적화하여(예: 다공성 판 사용) 입자 침전을 줄이고 균일성을 개선합니다.

6.1.2 연속 생산 공정

프로세스 원리 및 메커니즘

연속 생산은 원료 투입, 환원 반응, 그리고 제품 회수 과정을 단일 공정으로 통합하여 기존 배치 공정을 대체함으로써 효율성과 일관성을 향상시킵니다. BTO의 연속 공정은 일반적으로 컨베이어 벨트 반응기 또는 다단 유동층을 기반으로 합니다. 원료(APT 또는 WO₃)는 예열 후 반응 구역으로 들어가 H₂ 분위기에서 WO_{2.9}로 점진적으로 환원되고, 최종적으로 냉각 및 체질 과정을 통해 회수됩니다. 산소 결핍 제어는 반응 시간(10~30 분)과 H₂/O₂ 비율의 동적 조절에 달려 있습니다.

공정 설계 및 성능

연속 공정의 핵심 장점은 생산 효율과 제품 품질의 안정성에 있습니다. 컨베이어 벨트 반응기를 예로 들면, 원료는 600-750°C 반응 구역을 1-5kg/h의 속도로 통과하고, BTO의 산소 함량은 19.2±0.1 wt %에서 정확하게 제어할 수 있으며, 입자 크기 분포(D₅₀)는 10-20 μm에서 안정적입니다. 배치 공정(매번 4-6 시간)과 비교했을 때, 연속 공정은 단일 사이클 시간을 1-2 시간으로 단축하고 생산 용량을 2-3 배 증가시킵니다. 다단계 유동층은 단계적 환원(500°C 예열, 600°C 주 반응, 550°C 후처리)을 통해 나노 스케일 BTO의 연속 생산을 실현하며, 비표면적은 25-35m²/g입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산업 응용 분야 및 과제

한 회사가 연속 회전식 가마(길이 15m, 수소 유량 20m³/h)를 사용하고 있으며, 일일 BTO 생산량은 2,000kg입니다. 제품 일관성(산소 함량 편차 <0.05 wt %)은 배치 생산보다 훨씬 우수합니다. 그러나 연속 공정은 장비 밀봉 및 자동 제어에 대한 요구 사항이 높습니다. 예를 들어, 수소 누출은 안전 위험을 초래할 수 있으며, 원료 막힘은 공정을 중단시킬 수 있습니다. 최적화 전략에는 온라인 모니터링 시스템(적외선 온도 측정 및 산소 분석기 등) 도입과 공정 안정성을 보장하기 위한 적응형 유량 제어가 포함됩니다.

6.2 품질 관리 및 표준

BTO의 산업적 생산은 후속 공정에서의 성능을 보장하기 위해 엄격한 품질 기준을 충족해야 합니다. 본 절에서는 순도 및 불순물 관리, 입자 크기 분포, 그리고 형태적 일관성을 분석합니다.

6.2.1 순도(>99.95%) 및 불순물(Fe, Mo <10 ppm)

품질 요구 사항 및 테스트 방법

BTO의 순도는 텅스텐 분말 전구체 또는 기능성 소재로서의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 산업 표준은 일반적으로 순도 99.95% 이상, Fe, Mo 등의 불순물 함량 10ppm 미만을 요구합니다. 산소 함량(19.0~19.5 중량 %)을 정밀하게 제어하는 것은 BTO의 비화학양론적 특성을 잘 보여줍니다. 검출 방법으로는 불순물 분석을 위한 유도 결합 플라즈마 발광 분광법(ICP-OES), 산소 함량 측정을 위한 열중량 분석(TGA) 및 산소 분석기가 있습니다.

통제 전략 및 관행

불순물 관리는 원료 선정부터 시작됩니다. APT의 순도는 99.99%에 도달해야 합니다. Fe와 Mo와 같은 금속 불순물은 산 세척 및 용매 추출을 통해 제거됩니다. 환원 공정에서는 H₂ 순도(>99.999%)와 장비 재질(예: 스테인리스강 또는 세라믹 라이닝)이 불순물 유입에 매우 중요합니다. 한 회사는 H₂ 정제(분자체 흡착)와 반응기 세척(산 세척 및 건조)을 최적화하여 Fe 함량을 5~8ppm, Mo 함량을 3~5ppm으로 낮춰 고성능 응용 분야의 요구를 충족했습니다.

과제와 최적화

미량의 철(Fe)과 몰리브덴(Mo)이 유입되면 장기 작동 시 원료에서 휘발되어 축적됩니다. 따라서 Al₂O₃와 같은 내식성 코팅을 사용하고 정기적인 유지 관리(예: 월별 세척)를 통해 불순물 수준을 5ppm 미만으로 낮추는 것이 좋습니다.

6.2.2 입자 크기 분포 및 형태적 일관성

품질 요구 사항 및 테스트 방법

입자 크기 분포와 형태적 일관성은 BTO의 반응성과 후속 제품의 성능을 결정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산업 표준은 일반적으로 D_{50} 가 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ (마이크로미터 수준) 또는 $50\sim 100\ \text{nm}$ (나노미터 수준) 이어야 하며, 편차는 10% 미만이어야 합니다. 형태는 주로 구형 또는 막대형입니다. 검출 방법으로는 레이저 입자 크기 분석(입자 크기 분포)과 주사 전자 현미경(SEM, 형태 관찰)이 있습니다.

통제 전략 및 관행

입자 크기 제어는 원료 전처리 및 환원 조건에 따라 달라집니다. 마이크론 크기의 BTO는 APT 입자 스크리닝($20\sim 50\ \mu\text{m}$)과 환원 온도($700\sim 750^\circ\text{C}$)를 통해 조절되며, 유동층 내 공기 유속($0.5\sim 1\ \text{m/s}$)은 분포 균일성을 더욱 최적화합니다. 나노 크기의 BTO는 입자 성장을 방지 하기 위해 저온 환원($500\sim 600^\circ\text{C}$)과 급속 냉각이 필요합니다. 공장에서는 다단계 스크리닝 및 공기 흐름 분류를 통해 D_{50} 편차를 5~8%로, 형태 일관성을 90% 이상으로 제어합니다.

과제와 최적화

입자 응집 및 형태 불균일성은 연속 생산, 특히 고생산능력 생산 시 주요 문제입니다. 최적화 방안에는 초음파 분산(생산 전단계) 및 온라인 입자 크기 모니터링(피드백 조절) 도입을 통해 형태 및 입자 크기의 높은 일관성을 보장하는 것이 포함됩니다.

6.3 에너지 효율 및 환경 보호 조치

위한 고려 사항 . 이 섹션에서는 에너지 소비 최적화와 배기가스 회수에 대해 논의합니다.

6.3.1 에너지 소비 최적화(1-2kWh/kg)

에너지 소비 현황 및 메커니즘

BTO 생산은 주로 가열과 수소 소비를 통해 이루어집니다. 기존 회전로의 에너지 소비량은 $3\sim 4\text{kWh/kg}$ 이며, 유동층 가마의 에너지 소비량은 이보다 약간 낮습니다($2\sim 3\text{kWh/kg}$). 열효율 향상은 최적화의 핵심이며, 이는 열 손실을 줄이고 반응 조건을 최적화함으로써 달성됩니다.

최적화 전략 및 효과

열 회수가 주요 수단입니다. 예를 들어, 회전로에 열교환기를 설치하면 배출열($300\sim 400^\circ\text{C}$)을 원료 예열에 사용하여 에너지 소비를 kg 당 $2\sim 2.5\text{kWh}$ 로 줄일 수 있습니다. 유동층에서는 다단계 온도 제어($500\sim 600^\circ\text{C}$ 구간 가열) 및 공기 순환을 통해 에너지 소비를 kg 당 $1.5\sim 2\text{kWh}$ 로 더욱 절감할 수 있습니다. 한 회사는 폐열 발전 시스템을 사용하여 BTO를 하루 1,000kg 생산할 때 에너지 소비를 kg 당 1.8kWh 로 줄여 비용을 15~20% 절감했습니다.

도전과 전망

고온 장비용 단열재의 노화와 수소 소비량 변동은 에너지 소비 최적화에 어려움을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

초래합니다. 향후 고효율 단열재(예: 에어로젤)와 지능형 온도 조절 시스템(AI 제어)을 도입하여 에너지 소비량을 1~1.5kWh/kg 으로 안정화할 수 있습니다.

6.3.2 테일가스 회수($H_2O > 90\%$)

환경 보호 요구 사항 및 메커니즘

BTO 생산 시 H_2 와 O_2 가 반응하여 다량의 수증기(H_2O)를 생성합니다. 테일가스를 직접 배출할 경우 자원 낭비를 초래하고 환경 습도에 영향을 미칩니다. 목표는 H_2 배출량을 줄이는 동시에 H_2O 회수율을 90% 이상으로 높이는 것입니다.

재활용 기술 및 실무

테일 가스를 20~30°C 로 냉각하여 H_2O 를 회수하며, 회수율은 85~90%에 달할 수 있습니다. 한 공장에서는 다단 응축기와 분자체 흡착법을 사용하여 H_2O 회수율을 92~95%까지 높였습니다. 재활용수는 장비 세척 또는 순환 냉각에 사용됩니다. 미반응 H_2 는 연소를 통해 열에너지로 전환되어 배출량을 0.1% 미만으로 줄입니다.

과제와 최적화

습도가 높은 배기가스는 장비를 부식시킬 수 있으며, 응축 에너지 소비량(0.2~0.3kWh/kg)도 고려해야 합니다. 최적화 방향에는 회수율을 95% 이상으로 높이고 배출 가스를 제로화하기 위한 고효율 열교환기 및 막 분리 기술 개발이 포함됩니다.

6.4 생산 사례 분석

본 연구에서는 소규모 실험과 대규모 생산 사례를 통해 BTO 산업화 기술의 실현 가능성과 최적화 효과를 검증한다.

6.4.1 소규모 시험(10kg/배치)

실험 설계 및 프로세스

한 실험실에서 유동층(직경 0.5m, 높이 1.5m)을 이용하여 배치당 10kg의 BTO를 생산합니다. 원료는 APT(순도 99.99%, 입자 크기 20~50 μm)이며, 550°C에서 H_2 유량 2m³/h로 4시간 동안 환원하여 나노 크기의 BTO($D_{50} \approx 50-100nm$)를 목표로 합니다.

결과 및 분석

수율은 97~98%, BTO 산소 함량은 19.2 \pm 0.1 wt %, Fe <8 ppm, Mo <5 ppm, D_{50} 는 60~80 nm, 비표면적은 25~30 m²/g입니다. 에너지 소비량은 2~2.2 kWh/kg이며, H_2O 회수율은 90%입니다. 결과는 유동층이 고정밀 생산에 적합하지만 에너지 소비량이 높고 공기 흐름 및 가열 효율을 더욱 최적화해야 함을 보여줍니다.

6.4.2 대량 생산(1000kg/배치)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

프로덕션 디자인 및 기술

한 회사가 연속 회전 가마(직경 2.5m, 길이 15m)를 사용하여 배치당 1000kg의 BTO를 생산합니다. 원료는 APT(입자 크기 10-30 μm)이며, 700 °C의 온도와 20m³/h의 H₂ 유량에서 24시간 연속 가동됩니다. 목표는 마이크론 크기의 BTO(D₅₀ ≈ 10-20 μm)입니다.

결과 및 분석

일일 생산량은 2,000kg에 달했고, 수율은 98-99%였으며, 산소 함량은 19.1±0.05 중량%, Fe <10ppm, Mo <6ppm, D₅₀는 12-18 μm였습니다. 에너지 소비량은 1.8-2kWh/kg으로 감소했고, H₂O 회수율은 93%였습니다. 결과는 연속 공정이 효율과 일관성을 크게 향상시켰지만, 테일가스 처리 및 장비 유지보수 비용을 더욱 절감해야 함을 보여주었습니다.

결론 및 전망

BTO의 산업 생산은 회전로와 유동층의 조화로운 적용, 연속 공정 구현, 엄격한 품질 관리, 그리고 에너지 효율 및 환경 보호 최적화를 통해 실험실 수준에서 대규모 생산으로 도약했습니다. BTO의 순도(>99.95%), 입자 크기 균일성, 그리고 낮은 에너지 소비(1-2kWh/kg)는 다운스트림 분야의 요구를 충족합니다. 그러나 장비 내구성, 에너지 소비량 추가 감소, 그리고 테일가스 배출량 제로화는 여전히 과제로 남아 있습니다. 앞으로 지능형 제어, 다단계 열 회수, 그리고 친환경 공정의 통합을 통해 BTO 생산은 더 높은 효율과 지속가능성을 달성하여 텅스텐 산업 및 기능성 소재 분야의 핵심 기술로 자리매김할 것으로 예상됩니다.

부록: BTO 산업 생산 공정 매개변수 표

프로세스	장치 유형	온도(°C)	H ₂ 유량(m ³ /h)	시간(h)	입자 크기(μm)	에너지 소비량(kWh/kg)
마이크론 규모 BTO 생산	회전로	700-750	5-10	4-6	10-20	2-2.5
나노스케일 BTO 생산	유동층	500-600	2-5	4-5	0.05-0.1	1.5-2
연속 생산	컨베이어 벨트 반응기	600-750	10-20	1-2	10-20	1.8-2

부록: BTO 생산 최적화 데이터 시트

최적화 측정	색인	최적화 전	최적화 후	효과
열 회수	에너지 소비량(kWh/kg)	3-4	1.8-2	40-50% 감소

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

최적화 측정	색인	최적화 전	최적화 후	효과
다단계 응축	H ₂ O 회수율(%)	85-90	92-95	5-10% 증가
온라인 입자 크기 모니터링	D ₅₀ 편차(%)	10-15	5-8	일관성을 향상시킵니다 50%
H ₂ 정제	철 함량(ppm)	10-15	5-8	40-50% 감소

참고문헌

학술 논문

- [1] Schubert, WD, & Lassner, E., 텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동(영어), 국제 내화 금속 및 경질 재료 저널, 10(3), 133-141, 1992
- [2] Park, S., Kim, H., & Lee, J., 가스 감지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 147(2), 589-595, 2010
- [3] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., 청색 텅스텐 산화물 나노로드의 합성 및 광촉매 특성(영어), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012
- [4] Wang, Y., Zhang, Q., & Yang, L., 광촉매 수처리용 청색 텅스텐 산화물(영어), 환경 과학 및 기술, 47(12), 6789-6795, 2013
- [5] Liu, J., Zhang, W., & Chen, X., 가스 감지용 청색 텅스텐 산화물 나노로드(영어), Journal of Physical Chemistry C, 118(25), 13567-13574, 2014
- [6] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., 광촉매 분해를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자 합성(영어), 반도체 공정 재료 과학, 39, 456-462, 2015
- [7] Zhang, J., Liu, H., & Wang, Z., 전기변색 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), Electrochimica Acta, 174, 789-795, 2015
- [8] Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M., 암모늄 과라 텅스테이트의 청색 텅스텐 산화물로의 열분해(영어), Thermochimica Acta, 637, 38-50, 2016
- [9] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., UV 및 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 활성(영어), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017
- [10] 김정주, 이승주, 박희주, 텅스텐산화물 나노입자의 플라즈마 합성(영문), 나노과학기술저널, 18(5), 3421-3426, 2018
- [11] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 형태 제어(영어), 나노물질, 8(12), 1013, 2018
- [12] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 가스 감지 특성(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 270, 312-319, 2018
- [13] Wang, X., Liu, X., & Licht, G., CO₂ 전기분해를 통한 청색 텅스텐 산화물 합성(영어), Carbon, 149, 772-780, 2019
- [14] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., 물 분해 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), 재생 에너지, 138, 456-463, 2019
- [15] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., 리튬 이온 배터리에서 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 성능(영어), Journal of Power Sources, 456, 227998, 2020
- [16] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., 기상 증착을 통한 초장거리 청색 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 산화물 나노와이어(영어), Carbon, 172, 772-780, 2021
- [17] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., 유연 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물(영어), 유연 및 인쇄 전자, 6(2), 025004, 2021
- [18] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 가스 감도(영어), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022
- [19] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 나노구조(영어), 에너지 저장 재료, 45, 789-797, 2023
- [20] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., 청색 텅스텐 산화물 복합재를 사용한 광촉매 수소 생산(영어), 국제 수소 에너지 저널, 48(15), 5890-5900, 2023
- [21] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., 합성 중 청색 텅스텐 산화물의 현장 XRD 분석(영어), 재료 특성화, 199, 113456, 2024
- [22] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., 청색 텅스텐 산화물의 입자 크기 분포: 응용 분야에 미치는 영향(영어), Powder Technology, 435, 119432, 2024
- [23] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., 고감도 NO₂ 센서용 청색 텅스텐 산화물(영어), 화학 센서, 14(3), 345-353, 2024
- [24] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., 고급 슈퍼커패시터의 청색 텅스텐 산화물(영어), Journal of Electrochemical Society, 171(4), 040512, 2024
- [25] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., 광촉매 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 구조 분석(영어), 재료 연구 게시판, 169, 112345, 2024
- [26] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., 청색 텅스텐 산화물의 미량 불순물 분석을 위한 고급 ICP-MS 기술(영어), 분석화학, 97(5), 2103-2112, 2025
- [27] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., 비화학양론적 텅스텐 산화물의 산소 함량 측정(영어), 분석 원자 분광학 저널, 40(3), 567-575, 2025
- [28] Chen, H., Li, X., & Yang, M., 산업 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 종합적 특성화(영어), 산업 및 공학 화학 연구, 64(10), 4321-4330, 2025
- [29] Li, Y., Wang, H., & Zhang, X., 향상된 전기변색 성능을 위한 청색 텅스텐 산화물 복합재(영어), 재료 과학 저널, 60(5), 2345-2355, 2025
- [30] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., 차세대 리튬 이온 배터리용 청색 텅스텐 산화물(영어), 배터리 및 슈퍼캡, 8(3), 456-465, 2025

특허

- [1] Huggins, RA, 텅스텐 추출 및 정제 공정(영어), 미국 특허 제 3,079,226 호, 미국 특허 및 상표청, 1963
- [2] Zhang, X., & Li, Y., 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN101830511A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2010
- [3] Jacobson, AJ, & Yang, Q., 4 차 산화물 및 4 차 산화물을 함유하는 촉매(영어), 미국 특허 제 7,901,660 B2, 미국 특허 및 상표청, 2011
- [4] Li, J., & Wang, H., 보라색 텅스텐 산화물의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN103803652A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2014
- [5] 지식재산권기구, 나노텅스텐산화물 및 나노텅스텐분말 제조방법(영어), 국제특허 제 W02015188299A1 호, WIPO, 2015

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [6] Liu, W., & Zhao, X., 보라색 텅스텐 산화물 나노로드의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN106430292A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2017
- [7] 김현숙, 이선영, 최정, 텅스텐 블루 산화물 입자의 제조 방법(국문), 한국특허 제 KR101733695B1 호, 한국지식재산청, 2017
- [8] Zhao, Y., & Zhang, T., 보라색 텅스텐 산화물 나노분말 의 제조 방법 (중국어), 중국 특허 번호 CN109205669A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2019
- [9] 지식재산기구, 비화학양론적 텅스텐 산화물 제조 방법(영어), 국제특허 제 W02019234138A1 호, WIPO, 2019
- [10] Chen, Z., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN111943261A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2020

표준

- [1] 국제표준화기구, ISO 10397:1993: 텅스텐 분말의 입자 크기 분포 측정(영어), ISO, 1993
- [2] 규격위원회, JIS H 1403-2001: 텅스텐 분말의 화학 분석 방법(일본어), 일본 표준 협회, 2001
- [3] 중국 국가표준화기구, GB/T 4324-2012: 텅스텐 화학 분석 방법(중국어), 중국 표준화 관리국, 2012
- [4] 금속표준화기술위원회, YS/T 1090-2015: 보라색 텅스텐 산화물(중국어), 중국 공업정보화부, 2015
- [5] 미국재료시험학회(ASTM B761-17): 레이저광산란법을 이용한 내화성 금속분말 및 관련화합물의 입자크기 분포에 대한 표준시험방법(영어), ASTM International, 2017

서적

- [1] Lassner, E., & Schubert, WD, 텅스텐: 원소, 합금 및 화합물의 특성, 화학, 기술(영어), Springer, 1999
- [2] Klabunde, KJ, 화학의 나노스케일 재료(영어), Wiley, 2001
- [3] 전기화학 방법: 기초 및 응용(영어), 2 판, Wiley, 2001
- [4] West, AR, 고체화학 및 그 응용(영어), 2 판, Wiley, 2014
- [5] Skoog, DA, Holler, FJ, & Crouch, SR, 도구 분석의 원리(영어), 7 판, Cengage Learning, 2017

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

reactivity.

2. Blue Tungsten Oxide Features

Chemical composition: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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 % ($WO_{2.9}$), 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



제 7 장 기술적 과제와 미래 발전

$WO_{2.9}$) 인 청색 텅스텐 산화물(BTO)은 독특한 산소 결함 구조, 적절한 밴드갭 에너지($2.4 \sim 2.8$ eV), 그리고 우수한 전기화학적 특성으로 인해 재료 과학 및 산업 응용 분야에서 연구 핫스팟이 되었습니다. 유기 오염물질의 광촉매 분해, 전기변색 스마트 소자, 에너지 저장 소재(슈퍼커패시터 및 리튬 이온 배터리 등), 가스 센서, 텅스텐 분말 및 초경합금 생산에서의 탁월한 성능은 친환경 기술, 스마트 제조, 그리고 지속 가능한 에너지 분야에서 청색 텅스텐 산화물의 큰 잠재력을 보여줍니다. 그러나 실험실 연구에서 대규모 산업 응용으로 전환하는 과정에서 청색 텅스텐 산화물은 형태 및 성능의 정밀 제어, 대량 생산의 안정성, 그리고 생산 비용 및 환경 영향의 최적화를 포함한 여러 기술적 과제에 직면하고 있습니다.

동시에, 전기화학적 환원 및 플라즈마 증강과 같은 신기술의 등장은 청색 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산화물의 성능 향상 및 공정 혁신을 위한 새로운 길을 제시했으며, 유연한 전자 소자 및 생체의학 응용 분야(항공 소재 등)와 같은 신흥 분야의 확장은 청색 텅스텐 산화물의 적용 범위를 더욱 확대했습니다. 지속 가능한 개발 및 순환 경제의 맥락에서, 폐텅스텐을 재활용하여 청색 텅스텐 산화물을 제조하고 친환경 생산 경로를 모색하는 것은 청색 텅스텐 산화물의 경제적 가치를 향상시켰을 뿐만 아니라 친환경성에 새로운 활력을 불어넣었습니다. 본 장에서는 청색 텅스텐 산화물이 직면한 기술적 과제를 체계적으로 분석하고, 새로운 제조 기술과 응용 개발 방향을 모색하며, 순환 경제에서 청색 텅스텐 산화물의 지속 가능한 개발 잠재력을 전망하여 미래 연구 및 산업화를 위한 과학적 근거와 전략적 방향을 제시하고자 합니다.

7.1 블루 텅스텐 산화물의 현재 기술적 병목 현상

청색 텅스텐 산화물의 응용은 제조 및 생산 공정의 기술적 어려움으로 인해 제한적이며, 성능 최적화 및 산업 발전을 위해서는 여러 장애물을 극복해야 합니다. 본 절에서는 형태 및 성능의 정밀 제어와 대량 생산의 안정성이라는 두 가지 측면에서 상세 분석을 수행합니다.

7.1.1 청색 텅스텐 산화물의 형태 및 특성의 정밀 제어

청색 텅스텐 산화물의 형태 제어의 기술적 어려움 및 메커니즘

청색 텅스텐 산화물(예: 나노입자, 나노로드, 박막)의 형태는 그 특성(예: 광촉매 효율, 전기변색 반응 속도, 에너지 저장 용량)과 밀접한 관련이 있습니다. 그러나 청색 텅스텐 산화물의 형태를 정밀하게 제어하고 제조 공정 중 산소 결합의 안정성을 유지하는 것은 여전히 어려운 일입니다. 청색 텅스텐 산화물의 산소 결합($WO_{2.9}$)은 비화학양론적 특성의 핵심이며 전자 구조와 표면 활성 부위 밀도(목표 10^{19} - 10^{20} cm⁻³)에 직접적인 영향을 미칩니다. 수소 환원 또는 수열 합성 중에 온도(500-800° C), H₂ 농도(5-20vol%), 반응 시간(1-6h)과 같은 매개변수의 변화는 형태적 불균일성을 초래할 수 있습니다. 예를 들어, 고온에서 청색 텅스텐 산화물은 균일한 나노입자(50-100 nm)에서 불규칙한 응집체(>500 nm)로 변형될 수 있으며, 비표면적은 목표값인 20-30 m²/g에서 10-15 m²/g로 감소하고 활성 부위의 수는 약 30-40% 감소합니다. 또한 산소 결합의 불균일한 분포는 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 성능을 약화시킵니다. 예를 들어 Li⁺ 확산 계수는 목표값인 10⁻⁹ cm²/s에서 10⁻¹⁰ cm²/s로 감소하고 광생성 캐리어 수명이 10⁻⁶s에서 10⁻⁷s로 단축되어 에너지 저장 및 광촉매에서의 응용에 직접적인 영향을 미칩니다.

청색 텅스텐 산화물 형태 제어의 현재 상태 및 성능에 미치는 영향

현재 산업 생산에서는 마이크론 규모의 청색 텅스텐 산화물(10-50 μm)의 형태 제어 가 비교적 성숙되어 있으며, 일반적으로 회전로에서 파라텅스텐 산암모늄(APT)을 환원시켜 달성하며, 형태 일관성은 85-90%에 도달할 수 있습니다. 그러나 나노 스케일의 청색 텅스텐 산화물의 제조는 여전히 실험실 방법(수열법 및 용매열법 등)에 의존하며, 형태 일관성과 성능 안정성이 좋지 않습니다. 예를 들어, Guo et al. (2011)은 수열법으로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

합성한 청색 텅스텐 산화물 나노로드(길이 100-500nm, 직경 20-50nm)가 소량(<1kg)으로 균일한 형태를 가지며, 비표면적이 25-30m²/g 이고, 메틸렌 블루(MB)의 광촉매 분해 효율이 90% 이상이라고 보고했습니다. 그러나 출력을 10kg 으로 확대하면 형태 편차가 20~30%로 증가하고, 나노로드는 부분적으로 응집된 입자로 변형되며, 비표면적은 15~20m²/g 로 감소하고, 분해율은 70~80%로 감소합니다. 마찬가지로, 전기변색 응용 분야에서 청색 텅스텐 산화물 박막의 변조율(ΔT)은 80% 이상에서 60~70%로 감소했고, 응답 시간은 5~10 초에서 15~20 초로 증가했습니다. 이러한 변화는 고성능 소자에서 청색 텅스텐 산화물의 경쟁력을 직접적으로 약화시켰습니다.

청색 텅스텐 산화물 형태 제어의 실험적 검증 및 데이터 분석

실험 연구는 형태 제어의 복잡성을 더욱 드러냅니다. 수열법을 예로 들면, 180° C 에서 6 시간 동안 합성된 청색 텅스텐 산화물 나노입자($D_{50} \approx 50-80 \text{ nm}$)는 300-350 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 수소 생산 속도로 우수한 광촉매 성능을 보였습니다 . 그러나 온도를 200° C 로 올리거나 시간을 8 시간으로 늘리면 입자 크기가 100-150 nm 로 증가하고 비표면적이 30 m²/g 에서 18 m²/g 로 감소했으며 수소 생산 속도는 약 20% 감소했습니다. 형태학적 변화에 대한 반응 속도론적 분석은 청색 텅스텐 산화물의 성장이 오스트발트 숙성 메커니즘을 따르고 고온 또는 장기간 반응이 입자 응집을 촉진한다는 것을 보여주었습니다. 또한, 산소 결함 분포는 H₂ 환원 속도에 영향을 받습니다. 빠른 환원(<1 시간)은 과도한 표면 결함($>10^{21} \text{ cm}^{-3}$) 을 초래하는 반면, 느린 환원(>6 시간)은 결함 밀도 부족($<10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 을 초래하는데 , 이는 모두 성능 최적화에 도움이 되지 않습니다.

청색 텅스텐 산화물의 형태 제어를 위한 기술적 과제 및 최적화 방향

청색 텅스텐 산화물의 형태를 제어하는 데 있어 어려움은 여러 매개변수의 결합에 있습니다. 예를 들어, 고온(>600° C)은 입자 성장을 쉽게 유도하고, 저온(<500° C)은 충분한 산소 결함을 형성하기 어렵고, 너무 높은 H₂ 농도(>20 vol%)는 W 또는 WO₂로의 과도한 환원으로 이어질 수 있으며 , 너무 낮으면(<5 vol%) WO₂를 형성하지 않습니다 . 9 . 최적화 전략에는 다음과 같은 측면이 포함됩니다. 첫째, 메조포러스 SiO₂ 또는 유기 계면활성제(예: CTAB)를 사용하여 청색 텅스텐 산화물의 형태를 고정하는 것과 같은 템플릿 지원 방법을 개발합니다. 실험 결과 이 방법은 형태 일관성을 95% 이상으로 향상시킬 수 있음이 나타났습니다. 둘째, 라만 분광법과 같은 온라인 모니터링 기술을 도입하여 실시간으로 산소 결함 밀도(특정적 피크 700-800 cm⁻¹)를 분석하고 반응 조건을 동적으로 조정합니다. 셋째, 표면 개질(예: TiO₂ 또는 ZnO) 을 통해 청색 텅스텐 산화물의 나노 구조를 안정화하고 , 응집을 방지하며, 활성 수명을 연장합니다. 또한, 청색 텅스텐 산화물의 형태-성능에 대한 정량적 모델(형태학적 매개변수 및 광촉매 효율의 회귀 분석 등)을 확립하는 것은 향후 연구 과제이며, 이는 정밀 제조를 위한 이론적 지침을 제공할 수 있습니다.

7.1.2 청색 텅스텐산화물 대량 생산의 안정성

청색 텅스텐 산화물의 대량 생산의 안정성 어려움 및 메커니즘

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

대규모 블루 텅스텐 산화물 생산에서 배치 간 안정성과 공정 일관성은 주요 과제입니다. 전통적인 회전로에서 생산된 마이크론 크기의 블루 텅스텐 산화물(10-50 μm)의 산소 함량은 단일 배치(1000 kg)에서 19.0-19.5 중량%로 제어할 수 있으며 불순물 함량(예: Fe, Mo)은 <10 ppm에서 안정적입니다. 그러나 여러 배치(예: 30일 연속 생산) 후에는 산소 함량 편차가 $\pm 0.2-0.3$ 중량%로 증가하고 불순물 함량은 10-15 ppm으로 변동하며 수율은 98-99%에서 90-95%로 떨어집니다. 연속 공정에서는 장비 마모(예: 내벽 부식), 원료 막힘 및 불균일한 공기 흐름이 블루 텅스텐 산화물의 불안정성을 더욱 악화시킵니다. 예를 들어, H_2 흐름 변동($\pm 5 \text{ m}^3/\text{h}$)은 국부적인 과환원을 초래하여 WO_2 또는 W를 생성하고, 청색 텅스텐 산화물의 순도와 산소 결합 밀도를 감소시킬 수 있습니다.

청색 텅스텐산화물 대량 생산 현황 및 후속 영향

한 회사에서는 연속 회전로(직경 2.5m, 길이 15m)를 사용하여 하루에 2,000kg의 청색 텅스텐 산화물을 생산합니다. 초기 성능은 안정적입니다. 산소 함량 19.1 \pm 0.05 중량%, 형태 일관성 90%, Fe <10 ppm, Mo <6 ppm. 그러나 30일 동안 운영한 후 산소 함량 편차가 ± 0.3 중량%로 증가하고 형태 일관성이 80%로 떨어졌으며 일부 입자는 구형에서 불규칙한 모양으로 바뀌었습니다. 이는 하류 응용 분야에 상당한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 텅스텐 분말 생산에서 초미립 텅스텐 분말의 입자 크기는 0.2-0.5 μm 에서 0.5-1 μm 로 증가하고, 초경합금의 경도(HV)는 1500-1800에서 1200-1400으로 감소했으며 성능은 10-15% 감소했습니다. 나노 크기의 청색 텅스텐 산화물을 대량 생산하는 것은 더욱 어렵습니다. 유동층 공정을 배치당 50kg으로 확장하면 입자 응집이 증가하고 비표면적이 25~30 m^2/g 에서 15~20 m^2/g 로 감소하며, 광촉매 효율도 약 20~30% 감소합니다.

청색 텅스텐산화물 대량생산의 실험적 검증 및 데이터 분석

실험 데이터는 안정성 문제의 근원을 더욱 명확히 밝혔습니다. 유동층 생산을 예로 들면, 550°C, H_2 유량 5 m^3/h 에서 10kg/배치의 청색 텅스텐 산화물의 산소 함량은 19.2 \pm 0.1 중량%로 안정적이었고 D_{50} 는 60-80nm였습니다. 그러나 출력이 50kg/배치로 증가했을 때, 공기 흐름의 불균일한 분포로 인해 국부적인 온도 변동($\pm 20^\circ \text{C}$)이 발생하고 산소 함량 편차는 ± 0.2 중량%로 증가했으며 D_{50} 는 100-120nm로 증가했습니다. SEM 분석 결과 응집된 입자의 비율이 <5%에서 15-20%로 증가했습니다. 회전로에서 100시간 연속 작동 후 내벽의 Fe 함량은 <1ppm에서 5-10ppm으로 증가하여 장비 부식이 불순물 유입의 주요 원인을 나타냅니다. 또한, 원료 APT의 수분 함량(0.5~1 중량%) 변동도 환원 균일성에 영향을 미칩니다. 습윤 원료는 국부적인 응집을 유발하여 청색 텅스텐 산화물의 수율을 저하시키기 쉽습니다.

청색 텅스텐산화물 대량 생산의 과제와 최적화 방향

청색 텅스텐 산화물의 대량 생산의 안정성 문제는 장비 내구성, 공정 매개변수의 변동 및 원료 품질의 불일치에서 비롯됩니다. 고온 및 H_2 분위기에서 반응기의 내벽(예: 스테인리스강)이 부식되어 Fe와 같은 불순물이 유입되고 장기 작동 중 불균일한 공기 흐름으로 인해 과도한 환원 또는 부족한 환원이 발생합니다. 이를 위해 다음과 같은 최적화 조치를 취할 수 있습니다. 첫째, 부식 방지 재료(예: Al_2O_3 또는 ZrO_2 코팅)를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사용하여 장비의 수명을 연장합니다. 실험 결과 이 방법은 유입되는 Fe의 양을 5ppm으로 줄일 수 있음이 밝혀졌습니다. 둘째, AI 기반 H_2 흐름 및 온도 조절과 같은 적응형 제어 시스템을 도입하여 실시간으로 반응 조건을 최적화하고 산소 함량 편차를 ± 0.05 중량 %로 제어합니다. 셋째, 원료 전처리를 최적화했습니다. 분무 건조를 통해 APT의 수분 함량을 0.1 중량 % 미만으로 낮추어 유동성과 반응 균일성을 향상시켰습니다. 또한, 다단 유동층과 같은 모듈식 생산 장비를 개발하여 단계별 제어를 구현하고 청색 산화텨스텐의 장기 운영 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 향후에는 원료부터 제품까지 배치 일관성을 보장하기 위한 전 공정 품질 추적 시스템을 구축해야 합니다.

7.2 청색 텨스텐 산화물의 새로운 제조 기술

기존 수소 환원법의 한계를 극복하기 위해 전기화학적 환원 및 플라즈마 강화와 같은 새로운 제조 기술은 청색 텨스텐 산화물의 성능 향상 및 공정 혁신을 위한 새로운 길을 제시합니다. 이 섹션에서는 이 기술의 원리, 발전 과정 및 응용 가능성에 대해 심도 있게 논의합니다.

7.2.1 전기화학적 환원에 의한 청색 텨스텐 산화물의 제조

청색 텨스텐 산화물의 전기화학적 환원 원리 및 메커니즘

전기화학적 환원법은 전해질(예: Na_2SO_4 , LiCl 또는 H_2SO_4)에서 전압(1~5V)을 인가하여 WO_3 또는 APT를 청색 텨스텐 산화물($\text{WO}_{2.9}$)로 환원합니다. 핵심 반응은 음극 환원입니다. $\text{WO}_3 + x\text{H}^+ + x\text{e}^- \rightarrow \text{WO}_{3-x} + x/2 \text{H}_2\text{O}$, 여기서 $x \approx 0.1$, 비화학양론적 $\text{WO}_{2.9}$ 를 생성합니다. 이 방법의 장점은 낮은 작동 온도($50\sim 100^\circ\text{C}$)와 산소 결함의 정밀한 제어입니다. 전류 밀도($10\sim 50 \text{ mA/cm}^2$)는 환원 정도와 결함 밀도(목표 10^{20} cm^{-3})를 직접 결정합니다. 형태 제어는 전극 설계에 따라 달라집니다. 예를 들어, 다공성 탄소 전극은 나노입자($50\sim 100\text{nm}$)를 생성할 수 있는 반면, 메시 Ti 전극은 박막 제조에 적합합니다. 청색 텨스텐 산화물의 산소 결함은 전기화학적 공정을 통해 현장에서 형성되므로 고온 환원 과정에서 입자 성장 문제가 발생하지 않습니다.

청색 텨스텐 산화물의 전기화학적 환원에 관한 연구 진행 상황 및 성능 분석

실험 연구에 따르면 전기화학적 환원으로 제조된 청색 텨스텐 산화물은 우수한 성능을 보입니다. 1 M Na_2SO_4 전해질과 탄소 천 전극을 예로 들어, 2 V, 20 mA/cm^2 조건에서 WO_3 분말(입자 크기 $1\sim 5 \mu\text{m}$)을 2 시간 동안 환원하여 비표면적이 $30\sim 40 \text{ m}^2/\text{g}$ 이고 산소 함량이 19.2 ± 0.1 중량 %로 안정적인 청색 텨스텐 산화물 나노입자($D_{50} \approx 50\sim 100 \text{ nm}$)를 생성했습니다. 광촉매 수소 생산 속도는 $400\sim 500 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 에 도달하여 기존 수소 환원법($300\sim 350 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)보다 우수하며, 이는 낮은 공정이 더 많은 활성 부위를 유지하기 때문입니다(결함 밀도 10^{20} cm^{-3} 대 10^{19} cm^{-3}). 전기변색 응용 분야에서 청색 텨스텐 산화물 필름의 변조 속도(ΔT , 550 nm)는 80%에서 85~90%로 증가하고 응답 시간은 5~10 초에서 3~5 초로 단축되며 사이클 안정성(1000 배)은 5% 감소합니다. 또한 에너지 저장 성능도 크게 향상되어 비정전용량이 $400\sim 500 \text{ F/g}$ 에서

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

550~600 F/g 로 증가하였고, 에너지 밀도는 25~30 Wh /kg 에 도달했습니다.

청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 환원에 대한 실험적 검증 및 최적화 탐색

추가 실험을 통해 공정 매개변수의 영향을 검증했습니다. 전류 밀도를 예로 들면, 전류 밀도가 50 mA/cm² 로 증가하면 청색 텅스텐 산화물의 입자 크기가 30-50 nm 로 감소하고 비표면적이 40-45 m²/g 로 증가하지만 과도한 전류 (>80 mA/cm²) 는 과도한 환원으로 이어져 WO₂ 또는 W 를 생성하고 순도는 <95%로 떨어집니다. 전해질의 pH 도 중요합니다. 산성 조건(pH 2-4)은 H⁺가 반응에 참여하는 데 도움이 되며 수율이 98-99%로 증가하는 반면 중성 또는 알칼리성 조건(pH 7-10)은 수율이 85-90%로 떨어집니다. 최적화 탐색은 보조 촉매(예: 0.1 wt % Pt)를 추가하면 수소 생산 속도가 600-700 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 까지 증가할 수 있음 을 보여주며, 이는 전기화학적 환원이 복합 재료 제조에 잠재력이 있음 을 나타냅니다 .

청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 환원의 응용 가능성 및 기술적 과제

청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 환원은 소량, 고정밀 생산(1-10kg)에 적합하며, 특히 유연한 전극, 센서 소재 및 광촉매 제조에 적합합니다. 낮은 온도 특성으로 에너지 소비가 감소하고(1-1.5kWh/kg 대비 2-3kWh/kg) 고압 H₂가 필요 하지 않아 더 안전합니다. 그러나 전해질 소비(BTO 1kg 당 5-10L)와 전극 수명(<500 시간)으로 인해 대규모 적용이 제한됩니다. 또한 전기화학 장비에 대한 초기 투자(약 \$500,000~\$100 만)도 고려해야 합니다. 최적화 방향은 다음과 같습니다. 첫째, 액체 전해질을 대체하고 전극 수명을 >1000 시간으로 연장하기 위해 고체 전해질(예: PVA/H₂SO₄ 겔) 을 개발합니다. 둘째, 비용을 절감하고 전도도를 개선하기 위해 재생 가능한 전극(예: 그래핀 또는 탄소 나노튜브) 을 사용합니다. 셋째, 태양광 발전 공급을 결합하여 에너지 소비를 <1kWh/kg 로 줄이고 친환경적 준비를 촉진합니다.

7.2.2 플라즈마 강화법에 의한 청색 텅스텐 산화물의 제조

청색 텅스텐산화물 플라즈마 증강의 원리 및 메커니즘

플라즈마 강화 방법은 고에너지 플라즈마(예: Ar /H₂ 또는 N₂/H₂ 혼합 가스, 에너지 10-100 eV)를 사용하여 WO₃ 또는 APT 에 충격을 가하고 빠르게 환원시켜 청색 텅스텐 산화물을 생성합니다. 이 반응 메커니즘은 플라즈마가 H₂ 분자를 여기시켜 활성 H· 라디칼을 생성하고, 이 라디칼이 WO₃ 표면의 O 원자와 결합하여 H₂O 를 생성하고 산소 결합을 남겨 WO₂·9를 형성한다는 것 입니다 . 이 방법의 장점은 매우 짧은 반응 시간(초, <10 초)과 나노 구조의 현장 형성으로, 기존의 고온 환원에서 입자 응집을 피할 수 있다는 것입니다. 형태 제어는 플라즈마 매개변수에 따라 달라집니다. 저압 플라즈마(10-100 Pa)는 나노와이어(직경 10-20 nm)를 생성하고 고온 플라즈마(>1000° C)는 박막 제조에 적합합니다. 청색 텅스텐 산화물(10²⁰ - 10²¹ cm⁻³) 의 산소 결합 밀도는 플라즈마 에너지에 의해 정밀하게 제어됩니다.

청색 텅스텐산화물 플라즈마 강화 연구 진행 상황 및 성능 분석

연구에 따르면 플라즈마 강화 방법으로 제조된 청색 텅스텐 산화물은 우수한 성능을 갖는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

것으로 나타났습니다. Ar /H₂ 플라즈마(50% H₂ , 전력 500W)를 예로 들면, WO₃ 분말(1-5 μm)을 10Pa, 5 초 동안 처리하여 비표면적이 40-50m²/g 이고 산소 함량이 19.1± 0.1 중량 % 인 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(길이 200-500nm, 직경 10-20nm)를 생성했습니다. 가스 감지 성능이 크게 향상되었고, 10ppm NO₂에 대한 응답이 50-60 에서 80-100 으로 증가하고 응답 시간이 20-30 초에서 10-15 초로 단축되었습니다. 에너지 저장 분야에서 청색 텅스텐 산화물 나노와이어의 비정전용량은 400~500 F/g 에서 600~700 F/g 로 증가하고, 전력 밀도는 10~15 kW/kg 에 도달하여 기존 방식(5~10 kW/kg)보다 우수합니다. 광촉매 실험 결과 수소 생성 속도는 500~600 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 에 도달하여 백금 담지 촉매 수준에 근접합니다. 이러한 장점은 고에너지 플라즈마에 의해 유도된 높은 결합 밀도와 균일한 형태에 기인합니다.

청색 텅스텐산화물 플라즈마 증강의 실험적 검증 및 최적화 탐색

실험은 플라즈마 매개변수의 최적화 공간을 검증했습니다. 전력을 예로 들면, 500W 에서 청색 텅스텐 산화물 나노와이어의 형태는 균일하고 비표면적은 40-50m²/g 에서 안정적입니다. 전력이 1000W 로 증가하면 나노와이어의 길이는 500-1000nm 로 늘어나지만 국부 과열로 인해 일부 입자가 응집됩니다(>100nm). 압력 조절도 중요합니다. 10Pa 에서 나노와이어가 우세(>90%)하고 100Pa 에서 나노입자(50-100nm)로 변하고 비표면적이 30-35m²/g 로 떨어집니다. N₂ (10-20vol%)를 첨가하면 결합 밀도를 10²¹ cm⁻³로 높이고 가스 감응성을 100-120 으로 향상시킬 수 있습니다. 최적화 탐색 결과, 펄스 플라즈마(주파수 1~10kHz)는 높은 수율(>95%)을 유지하면서도 에너지 소비를 줄일 수 있는 것으로 나타났습니다(5~10kWh/kg 에서 3~5kWh/kg 으로).

청색 텅스텐 산화물 플라즈마 강화의 응용 가능성 및 기술적 과제

청색 텅스텐 산화물의 플라즈마 강화법은 가스 센서, 슈퍼커패시터 전극, 광촉매 필름과 같은 고부가가치 제품 생산에 적합합니다. 장비가 소형화되면(예: 데스크톱 플라즈마 반응기) 일일 생산량 10~50kg 의 연속 운전이 가능합니다. 그러나 높은 에너지 소비량(현재 5~10kWh/kg)과 장비 비용(100 만 달러 이상)으로 인해 대규모 생산에는 제약이 있습니다. 또한, 대형 반응기에서는 플라즈마 균일성 유지가 어려워 청색 텅스텐 산화물의 배치 일관성에 영향을 미칩니다. 최적화 방향은 다음과 같습니다. 첫째, 에너지 소비량을 2~3kWh/kg 으로 줄이기 위해 저전력 플라즈마 소스(예: 마이크로파 플라즈마, <300W)를 개발합니다. 둘째, 반응 영역의 균일성을 개선하기 위해 다단계 플라즈마 시스템을 설계합니다. 셋째, 운영 비용을 절감하고 친환경 생산을 달성하기 위해 H₂ 재활용을 결합합니다.

7.3 블루텅스텐산화물 응용 개발 방향

청색 텅스텐 산화물의 다재다능함은 새로운 분야에 대한 폭넓은 응용 가능성을 제공합니다. 본 논문에서는 유연 전자 소자와 생체 의학 응용 분야(예: 항균 소재)에 초점을 맞춰 그 잠재력과 개발 방향을 분석합니다.

7.3.1 유연 전자소자에서의 청색 텅스텐산화물 응용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

청색 텅스텐산화물 유연 전자소자의 원리 및 메커니즘

웨어러블 디스플레이, 센서 및 에너지 저장 장치와 같은 유연한 전자 장치는 기계적 유연성과 전기화학적 성능이 모두 필요합니다. 전기변색 특성 ($\Delta T > 80\%$), 에너지 저장 용량(비정전용량 400-500 F/g) 및 산소 결합에 의해 뒷받침되는 빠른 이온 전달은 이를 이상적인 후보 물질로 만듭니다. PET 또는 PI 와 같은 유연한 기판에서 파란색 텅스텐 산화물 필름은 전기화학적 증착 또는 분무로 제조되며, 그 형태(두께 100-500 nm)와 결합 밀도(10^{20} cm^{-3})는 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 산소 결합은 이온 삽입 사이트 역할을 하여 Li^+ 또는 H^+ ($10^{-9} \text{ cm}^2 / \text{s}$)의 확산 속도를 향상시켜 빠른 색상 전환 및 전하 저장을 보장합니다.

청색 텅스텐산화물 유연 전자소자의 연구 진행 상황 및 성능 분석

실험 연구에 따르면 청색 텅스텐 산화물은 유연한 전자 장치에서 우수한 성능을 발휘합니다. 전기 화학적 증착 방법을 예로 들면, PET 기판 위에 제조된 청색 텅스텐 산화물 필름(두께 100-200 nm)은 $\pm 1.2 \text{ V}$ 의 전압을 인가한 후 633 nm에서 65-70%의 변조율, 5 초 미만의 응답 시간, 1000 번의 굽힘(곡률 반경 5 mm) 후 5% 미만의 성능 저하를 보입니다. 유연한 슈퍼커패시터에서 청색 텅스텐 산화물 전극(50-100 nm 입자)은 1 $\text{M H}_2\text{SO}_4$ 에서 450-500 F/g의 비정전용량, 30-40 Wh/kg의 에너지 밀도, 5000 번 사이클 후 >90%의 유지율을 보입니다. 기존 WO_3 (에너지 밀도 20~25 Wh/kg)와 비교했을 때, 청색 텅스텐 산화물의 우수성은 높은 결합 밀도와 나노 구조의 시너지 효과에서 비롯됩니다. 최근 연구에서는 복합 전도성 고분자(예: PEDOT:PSS)를 사용하여 에너지 밀도를 50~60 Wh/kg, 전력 밀도를 15~20 kW/kg으로 향상시켰는데, 이는 상업적 요구 수준에 근접한 수치입니다.

청색 텅스텐산화물 유연 전자소자의 실험적 검증 및 응용 사례

실험을 통해 유연한 성능의 잠재력이 더욱 검증되었습니다. PI 기판에 분무 방식으로 제조된 청색 텅스텐 산화물 필름(300nm 두께)을 예로 들면, $\pm 1.5 \text{ V}$ 에서 550nm의 변조율이 80-85%에 도달했고, 2000 회 굽힘 후 감쇠율은 < 10%로 우수한 기계적 안정성을 보였습니다. 실제 응용 분야에서 유연한 디스플레이 프로토타입은 대비율이 50:1 이고 전력 소비가 < $1 \text{ mW} / \text{cm}^2$ 인 청색 텅스텐 산화물 필름을 사용하며, 이는 스마트 워치 및 전자 태그에 적합합니다. 또한, 유연한 슈퍼커패시터 프로토타입은 10 초 이내에 충전이 가능하고 고주파 충전 및 방전(> 10^4 회)을 지원하여 웨어러블 건강 모니터링 장치의 요구를 충족합니다. 형태학적 최적화(다공성 구조 등)를 통해 비표면적이 $20\text{-}30 \text{ m}^2 / \text{g}$ 에서 $40\text{-}50 \text{ m}^2 / \text{g}$ 로 증가하고 이온 확산 속도가 약 20% 증가하여 성능이 더욱 향상되었습니다.

청색 텅스텐산화물 유연 전자소자의 과제와 개발 방향

NiO 또는 TiO_2 와 같은 완충층이 사용됩니다. 이를 도입할 수 있습니다. 실험 결과 이 방법을 사용하면 접착력을 30-40% 높이고 사이클 수명을 $2\text{-}3 \times 10^4$ 배까지 늘릴 수 있는 것으로 나타났습니다. 또한, 청색 텅스텐 산화물(투명-청색)의 단색은 다색 디스플레이의 적용을 제한하며, 다른 색상 변경 재료(예: V_2O_5)를 합성하여 완전한 색상을 달성해야 합니다. 향후 개발 방향은 다음과 같습니다. 첫째, 유연성과 성능을 개선하기

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

위해 나노 구조 설계(예: 다공성 멤브레인 또는 나노어레이)를 최적화합니다. 둘째, 태양광 자가 구동 기술을 통합하여 제로 에너지 장치를 구현합니다. 셋째, 고해상도 플렉서블 디스플레이 및 에너지 저장을 달성하기 위해 마이크로 나노 공정(예: 레이저 직접 쓰기)을 촉진하고 스마트 웨어러블 분야에서 청색 텅스텐 산화물의 상용화를 촉진합니다.

7.3.2 생물학적 응용 분야에서의 청색 텅스텐 산화물의 잠재력(예: 항균 소재)

청색 텅스텐산화물 항균소재의 원리 및 메커니즘

생물학적 분야에서 청색 텅스텐 산화물의 잠재력은 광촉매 활성화와 산소 결합에 의해 유발되는 표면 반응에서 비롯됩니다. 가시광선($\lambda > 420 \text{ nm}$)에서 청색 텅스텐 산화물의 가전자대 전자는 전도대로 여기되어 전자-정공 쌍을 생성하고, 이 쌍은 O_2 및 H_2O 와 반응하여 슈퍼옥사이드 라디칼($\cdot\text{O}_2^-$)과 하이드록실 라디칼($\cdot\text{OH}$)을 생성합니다. 이러한 활성 산소종(ROS)은 박테리아 세포막(예: 대장균 및 황색포도상구균)을 파괴하고 효율적인 살균을 달성할 수 있습니다. 청색 텅스텐 산화물(50-100 nm)의 나노스케일 특성은 생물학적 조직과의 접촉 효율을 높이고 산소 결합은 전자 포획 센터 역할을 하여 캐리어 수명(10^{-6} s)을 연장하고 ROS 생성 효율을 개선합니다.

청색텅스텐산화물 항균소재 연구 진행 상황 및 성능 분석

연구에 따르면 청색 산화텅스텐은 항균 응용 분야에서 우수한 성능을 보입니다. 수열법으로 합성된 나노입자(50~100 nm)를 예로 들면, 300 W 제논 램프 조사 시 10^8 CFU/mL 의 대장균을 60 분간 처리했을 때 95~98%의 살균율을 보였으며, 이는 WO_3 (70~80%)보다 우수한 수치입니다. 최소 저해 농도(MIC)는 50~100 $\mu\text{g/mL}$ 로 높은 항균력을 나타냅니다. 독성 시험 결과, 200 $\mu\text{g/mL}$ 농도에서 인간 섬유아세포에 대한 청색 산화텅스텐의 생존율은 90% 이상으로, 낮은 독성과 잠재적인 생체 적합성을 나타냅니다. Ag 또는 ZnO 복합화 후, 항균 효율은 99% 이상으로 더욱 향상되었고, 약물 내성균(예: MRSA)의 사멸률은 기존 항생제 수준에 근접한 98-99%에 도달했습니다. 또한, 청색 산화텅스텐은 우수한 광촉매 안정성을 보이며, 5회 사이클 후 활성이 5% 미만으로 감소했습니다.

청색 텅스텐산화물 항균소재의 실험적 검증 및 응용 사례

실험은 항균 성능에 영향을 미치는 요인을 검증했습니다. 광 강도를 예로 들면, 500W 크세논 램프에서 청색 텅스텐 산화물의 살균율은 95%에서 99%로 증가하여 광자 이용이 핵심임을 나타냅니다. 입자 크기도 중요한데, 50nm 샘플은 비표면적이 더 높아($40\text{m}^2/\text{g}$ 대 $20\text{m}^2/\text{g}$) 200nm 샘플보다 15-20% 더 높은 살균율을 보입니다. 실제 적용에서 청색 텅스텐 산화물 코팅은 의료용 거즈에서 좋은 성능을 보이며, 자연광에서 2 시간 이내에 황색포도상구균에 대해 90-95%의 살균율을 보여 상처 드레싱에 적합합니다. 또한, 프로토타입 항균 필름을 병원 환경에서 테스트한 결과 박테리아 생존율이 1% 미만이었으며, 이는 화학적 소독제를 대체할 수 있는 잠재력을 보여주었습니다.

청색 텅스텐산화물 항균소재의 과제와 개발 방향

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

생체 의학 분야에서 청색 텅스텐 산화물의 과제는 생체 적합성과 장기 안정성입니다. 나노입자는 체내에 경미한 염증을 유발할 수 있으며(사이토카인 방출 10-15% 증가), 장시간 조사 시 산화될 수 있습니다($WO_{2.9} \rightarrow WO_3$). 이때 활성은 약 20% 감소합니다. 또한, 항균 효과는 조사량에 따라 달라지며, 어두운 환경에서는 효율이 낮습니다(<20%). 최적화 방향은 다음과 같습니다. 첫째, 독성을 줄이고 안정성을 향상시키기 위한 표면 개질(PEG 또는 SiO_2 코팅 등)입니다. 실험 결과 PEG 개질 후 세포 생존율이 95-98%로 증가했습니다. 둘째, 복합 재료(BTO/Ag/ TiO_2 등)를 개발하는 것입니다. 2) 암색 항균(살균율 > 50%)을 달성하는 것; 셋째, 약물 전달을 위한 제어 방출 시스템(예: 감광성 폴리머 담체)의 설계. 앞으로 청색 산화텅스텐은 항균 코팅, 상처 치유 및 바이오센서 분야에서 획기적인 발전을 이룰 것으로 기대됩니다.

7.4 블루텅스텐산화물(Blue Tungsten Oxide)의 지속 가능한 개발과 순환 경제

청색 텅스텐 산화물의 생산 및 적용은 자원 소비와 환경 영향을 줄이기 위해 지속 가능한 개발 개념과 통합되어야 합니다. 이 섹션에서는 폐텅스텐 재활용을 통한 청색 텅스텐 산화물의 제조 및 친환경 생산 경로에 대해 심도 있게 논의합니다.

7.4.1 폐텅스텐을 재활용하여 청색 텅스텐 산화물을 생산

폐텅스텐을 재활용하여 청색 텅스텐산화물 제조 원리 및 메커니즘

폐텅스텐(카바이드 칩, 텅스텐 와이어, 텅스텐 전극 등)은 산화 및 환원 반응을 통해 청색 텅스텐 산화물을 제조하는 데 재활용될 수 있습니다. 산화 공정은 폐텅스텐을 $800\sim 1000^\circ C$ 의 산소 분위기에서 WO_3 (순도 99% 이상)로 전환한 후, H_2 또는 CO 환원($500\sim 700^\circ C$)을 통해 $WO_{2.9}$ 를 생성합니다. 산소 결합의 발생은 H_2/O_2 비율($10:1\sim 20:1$) 및 반응 시간(2~4 시간)과 같은 환원 조건의 조절에 따라 달라집니다. 이 공정은 폐 텅스텐의 W 자원을 활용하여 1 차 텅스텐 광석에 대한 의존도를 줄이고 생산 비용을 약 20~30% 절감합니다.

폐텅스텐을 재활용하여 청색 텅스텐산화물 제조에 관한 연구 진행 상황 및 효과 분석

실험 연구에 따르면 폐텅스텐을 재활용하여 제조된 청색 텅스텐 산화물의 성능은 순수 재료와 유사한 것으로 나타났습니다. 폐초경합금(WC-Co)을 예로 들면, $900^\circ C$ 에서 4 시간 동안 산화 처리하면 WO_3 가 생성되고, 이후 $600^\circ C$ 에서 $5m^3/h$ 의 H_2 유량으로 3 시간 동안 환원 처리하면 WO_3 가 생성됩니다. 얻어진 청색 텅스텐 산화물의 순도는 99.9%에 달하며, 산소 함량은 19.1~19.4 중량 %, 입자 크기는 $10\sim 20\mu m$ 입니다. MB의 광촉매 분해 효율은 85% 이상으로, 산업용 청색 텅스텐 산화물과 동등합니다. 한 기업은 매년 500 톤의 폐텅스텐을 재활용하여 400 톤의 청색 산화텅스텐을 생산합니다. 수율은 95~98%이며, 생산 비용은 kg 당 50~60 달러에서 35~40 달러로 절감됩니다. 또한, 전기화학적 환원 공정 또한 재활용 가능성을 보여줍니다. 폐텅스텐 분말을 2V 및 $1MH_2SO_4$ 용액에서 처리하여 비표면적이 $30\sim 35m^2/g$ 인 나노 크기의 청색 산화텅스텐($50\sim 100nm$)을 생성합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

폐텨스텐으로부터 청색 텨스텐 산화물을 제조하는 실험적 검증 및 산업적 사례

실험은 재활용 공정의 타당성을 검증했습니다. 폐텨스텐 와이어를 예로 들면, 산화 후 WO_3 의 Co 함량은 0.5 중량 %에서 <0.01 중량 %(산 침출로 제거)로 감소했고, 환원 후 청색 텨스텐 산화물의 Fe 함량은 <10ppm 으로 고순도 요건을 충족했습니다. 산업적 사례로, 한 재활용 공장에서는 회전로를 사용하여 폐 초경합금을 처리하여 하루 2톤의 청색 텨스텐 산화물을 생산했으며, 산소 함량 편차는 ± 0.1 중량 %였습니다. 텨스텐 분말 생산에 사용된 후, 초경합금(HV 1500-1700)의 성능은 원래 재료와 크게 다르지 않았습니다. 전기화학적 재활용 시범 프로젝트는 10kg/배치의 폐텨스텐 분말에서 청색 텨스텐 산화물을 생성하는 데 소비되는 에너지가 1.5~2kWh/kg 으로, 기존 환원 방법(2~3kWh/kg)보다 낮은 것으로 나타났습니다.

폐텨스텐을 재활용하여 청색 텨스텐산화물 제조의 과제 및 개발 방향

청색 텨스텐 산화물을 제조하기 위해 폐텨스텐을 재활용하는 데에는 불순물 분리 및 에너지 소비 최적화가 과제입니다. 폐기물 내 Co, Fe 등은 습식야금(예: HCl 침출)을 통해 제거해야 하지만, 이 과정에서 산성 폐액(pH 2-3)이 생성되므로 중화 처리가 필요합니다. 에너지 소비 측면에서 산화 단계(3-4 kWh/kg)는 여전히 비교적 높습니다. 최적화 방향은 다음과 같습니다. 첫째, 이온 교환 또는 막 여과와 같은 효율적인 분리 기술을 개발하여 불순물 함량을 5ppm 미만으로 줄이고 폐액 배출량을 50% 줄입니다. 둘째, 저온 환원(예: 플라즈마 보조, 500°C)을 사용하여 에너지 소비를 1-2 kWh/kg 으로 줄입니다. 셋째, 온라인 모니터링(예: ICP-MS)과 결합된 폐쇄 루프 재활용 시스템을 구축하여 품질의 일관성을 보장합니다. 앞으로 청색 텨스텐 산화물의 회수율은 80-85%에서 90% 이상으로 증가하여 순환 경제의 중요한 부분이 될 것으로 예상됩니다.

7.4.2 청색 텨스텐 산화물의 녹색 생산 경로

청색 텨스텐 산화물의 친환경 생산 원리 및 메커니즘

청색 텨스텐 산화물의 친환경 생산은 재생 에너지, 저배출 공정 및 자원 재활용을 통해 환경 영향을 줄이는 것을 목표로 합니다. 기존의 H_2 환원 방식은 화석 연료를 전력 공급원으로 사용(탄소 배출량 2~3 kg CO_2 /kg)하는 반면, 친환경 경로는 태양광이나 풍력을 이용하여 전기화학적 환원을 유도하여 에너지 소비를 1~1.5 kWh/kg 으로, 탄소 배출량을 1 kg CO_2 /kg 미만으로 줄입니다. 테일 가스 재활용(예: H_2O 회수율 > 95%) 및 저오염 환원제(예: 전기화학적 H^+)를 통해 배출량을 더욱 줄일 수 있습니다. 청색 텨스텐 산화물의 산소 결합 형성은 친환경 화학의 원칙에 따라 고오염성 NH_3 또는 탄소 기반 환원제를 필요로 하지 않습니다.

청색 텨스텐산화물 녹색생산 연구 진행 상황 및 효과 분석

연구에 따르면 친환경 생산 경로는 청색 텨스텐 산화물의 지속 가능성을 크게 향상시킵니다. 태양광 구동 전기 화학적 환원을 예로 들면, 100W/m² 조명 에서 2V 전압은 WO_3 를 환원시켜 청색 텨스텐 산화물을 생성하는데, 이때 에너지 소비량은 1-1.2kWh/kg, H_2O 회수율은 95-98%, 탄소 배출량은 0.5-0.8kg CO_2 /kg 으로 감소합니다. 시범 프로젝트에서는 50kW 태양광 시스템을 사용하여 하루에 50kg의 청색 텨스텐 산화물을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

생산하는데, 비표면적은 25-30m²/g 이고 광촉매 성능 (수소 생산 350-400 μmol · g⁻¹ · h⁻¹) 은 기존 방법과 비슷합니다. 플라즈마 강화 방법을 H₂ 순환 시스템과 결합하면 배출이 거의 없고 에너지 소비량은 5-10kWh/kg 에서 3-4kWh/kg 으로 감소합니다. 또한, 다단 응축과 막분리 기술을 적용하여 H₂O 회수율을 98~99%까지 높이고, 회수된 물은 냉각이나 세척에 활용하여 물 소비량을 50% 절감합니다.

청색 텅스텐산화물 친환경 생산의 실험적 검증 및 산업적 사례

실험은 친환경 공정의 효과를 검증했습니다. 풍력으로 구동되는 전기화학 시스템을 예로 들면, 1M LiCl 전해질에서 WO₃를 3V, 10mA/cm²로 2 시간 동안 환원하여 파란색 텅스텐산화물 나노입자(50-80nm)를 생성했으며, 수율은 >98%, 에너지 소비량은 1.3kWh/kg 이었습니다. 데일 가스는 응축기(20° C)를 통해 97%의 H₂O 를 회수했고, 반응하지 않은 H₂는 연소를 통해 열 에너지로 전환되었으며 배출량은 <0.1%였습니다. 산업적 사례에서 한 회사는 태양광-전기화학 결합 시스템을 사용하여 연간 500 톤의 파란색 텅스텐 산화물을 생산하여 탄소 배출량을 1000-1500 톤의 CO₂에서 300-400 톤으로 줄여 에너지 비용을 20-25% 절감했습니다. 녹색으로 생산된 파란색 텅스텐 산화물은 에너지 저장(비정전용량 500-550 F/g) 및 가스 감지(응답성 60-70) 분야에서 우수한 성능을 발휘합니다.

청색 텅스텐산화물 녹색 생산의 과제와 발전 방향

청색 텅스텐 산화물의 친환경 생산의 과제에는 장비 비용과 공정 안정성이 포함됩니다. 태양광 시스템의 초기 투자(200 만 달러 이상)와 전극 수명(1000 시간 미만)을 최적화해야 하며, 대량 생산 시 매개변수 변동이 배치 일관성에 영향을 미칠 수 있습니다. 최적화 방향은 다음과 같습니다. 첫째, 효율적인 광전 변환 장비(예: 페로브스카이트 태양 전지)를 개발하여 비용을 100 만 달러 미만으로 줄입니다. 둘째, 내구성 있는 전극(예: 탄소 섬유 복합재)을 설계하여 수명을 2000 시간 이상으로 늘립니다. 셋째, AI 를 도입하여 공정 매개변수(예: 온도 및 전압)를 최적화하여 에너지 소비를 1kWh/kg 으로 안정화합니다. 또한, 정책 지원(예: 탄소세 면제)과 기술 통합(예: 폐열 발전)을 통해 청색 텅스텐 산화물의 전체 수명 주기를 친환경적으로 만들 수 있습니다. 앞으로 탄소 배출량은 0.5kg CO₂/kg 미만으로 떨어져 친환경 제조의 모델이 될 것으로 예상됩니다.

결론 및 전망

청색 텅스텐 산화물이 형태 및 성능 제어, 대량 생산 안정성 등의 측면에서 직면한 기술적 과제는 전기 화학적 환원 및 플라즈마 증강과 같은 새로운 기술을 통해 점차 극복되고 있습니다. 새로운 제조 기술은 광촉매 효율(>500 μmol · g⁻¹ · h⁻¹), 전기 변색 변조율(>85%) 및 에너지 저장 용량(>600 F/g)과 같은 청색 텅스텐 산화물의 성능을 크게 개선하여 유연한 전자 장치 및 생물 의학에 적용할 수 있는 기반을 마련했습니다. 폐텅스텐 재활용 및 친환경 생산 경로를 촉진하면 청색 텅스텐 산화물의 생산 비용(<40 USD/kg)이 감소할 뿐만 아니라 탄소 배출량도 <1 kg CO₂/kg 으로 감소하여 순환 경제 및 지속 가능한 개발의 목표에 부합합니다. 그러나 장비 내구성, 공정 일관성 및 환경 적응성은 여전히 추가로 최적화해야 합니다. 앞으로는 지능형 제어(AI 규제 등), 복합소재 설계(BTO/ TiO 등) 등을 통해 2) 전체 공정의 녹색화를 통해 청색

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐산화물은 고성능 소재 및 환경 보호 기술의 핵심 기둥이 될 것으로 예상되며, 지능 제조, 생물 의학 및 에너지 분야에서 전면적인 산업화를 촉진할 것입니다.

부록: 청색 텅스텐 산화물 신기술 매개변수 표

기술 유형	온도(° C)	전압/에너지	입자 크기(nm)	비표면적(m ² /g)	에너지 소비량(kWh/kg)	생산하다 (%)
전기화학적 환원	50-100	1-5V	50-100	30~40 명	1-1.5	98-99
플라즈마 강화 방법	500-1000	10~100eV	10-50	40~50 명	3-5	95-98

부록: 블루 텅스텐 산화물 미래 개발 추세 데이터 표

개발 방향	주요 지표	현재 가치	목표값	예상 시간
모양 제어	형태학적 일관성 (%)	80-90	>95	2027
생산 안정성	산소 함량 편차 (wt %)	±0.2-0.3	±0.05	2028
유연한 전자 장치	사이클 수명(회)	<10 ⁴	>10 ⁵	2029
항균 특성	살균율(%)	95-98	>99	2026
스크랩 텅스텐 회수	회수율(%)	80-85	>90	2030
녹색 생산	탄소 배출량(kg CO ₂ / kg)	2-3	<0.5	2032

참고문헌

학술 논문

- [1] 런던 왕립학회 철학회보, 텅스텐산의 환원에 관하여(영어), 런던 왕립학회 철학회보, 157, 167-179, 1867
- [2] Schubert, WD, & Lassner, E., 텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동(영어), 국제 내화 금속 및 경질 재료 저널, 10(3), 133-141, 1992
- [3] Granqvist, CG, 전기변색 텅스텐 산화물 필름: 1993-1998 년 진행 상황 검토(영어), 태양 에너지 재료 및 태양 전지, 60(3), 201-262, 2000
- [4] Tajima, Y., 항균제로서의 청색 텅스텐 산화물(영어), 의약화학 미니 리뷰, 5(3), 255-268, 2005
- [5] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, 광촉매 물분해를 위한 결합 유도 청색 텅스텐 산화물(영어), 재료화학, 18(24), 5799-5804, 2006
- [6] Wang, J., Khoo, E., & Lee, PS, WO_{3-x} 나노로드의 합성 및 전기변색 특성(영어), Journal of Physical Chemistry C, 113(22), 9655-9658, 2009
- [7] Park, S., Kim, H., & Lee, J., 가스 감지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 147(2), 589-595, 2010
- [8] Chen, Z., & Cao, M., 수열 경로를 통한 청색 텅스텐 산화물 나노입자의 간편한 합성(영어), Materials Letters, 65(14), 2169-2171, 2011

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [9] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., 청색 텅스텐 산화물($WO_{2.9}$) 나노구조의 광촉매 활성(영어), 응용 촉매 B: 환경, 105(1-2), 82-88, 2011
- [10] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., 청색 텅스텐 산화물 나노로드의 합성 및 광촉매 특성(영어), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012
- [11] Wang, Y., Zhang, Q., & Yang, L., 광촉매 수처리용 청색 텅스텐 산화물(영어), 환경 과학 및 기술, 47(12), 6789-6795, 2013
- [12] Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y., 산소 공석을 갖는 텅스텐 산화물 필름의 전기변색 성능(영어), Thin Solid Films, 545, 321-326, 2013
- [13] 김수연, 박정현, 이현, 고성능 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물(영어), 전기화학통신, 48, 89-92, 2014
- [14] Liu, J., Zhang, W., & Chen, X., 가스 감지용 청색 텅스텐 산화물 나노로드(영어), Journal of Physical Chemistry C, 118(25), 13567-13574, 2014
- [15] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., 텅스텐 산화물 나노와이어: 에너지 저장 응용(영어), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015
- [16] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., 광촉매 분해를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자 합성(영어), 반도체 공정의 재료 과학, 39, 456-462, 2015
- [17] Zhang, J., Liu, H., & Wang, Z., 전기변색 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), Electrochimica Acta, 174, 789-795, 2015
- [18] Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J., 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물 박막(영어), 합금 및 화합물 저널, 684, 234-240, 2016
- [19] Chen, X., Li, Q., & Zhang, Y., 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자(영어), Journal of Power Sources, 320, 456-463, 2016
- [20] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., 가스 감지용 고성능 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016
- [21] Fait, MJG, Moukhina, E., & Feist, M., 암모늄 파라 텅스테이트의 청색 텅스텐 산화물로의 열 분해(영어), Thermochemica Acta, 637, 38-50, 2016
- [22] Wang, Z., Liu, Y., & Zhang, X., 광촉매 수소 발생을 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), Applied Catalysis A: General, 543, 123-130, 2017
- [23] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., UV 및 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 활성(영어), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017
- [24] 김정주, 이승주, 박희주, 텅스텐산화물 나노입자의 플라즈마 합성(영문), 나노과학기술저널, 18(5), 3421-3426, 2018
- [25] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 형태 제어(영어), 나노물질, 8(12), 1013, 2018
- [26] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 가스 감지 특성(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 270, 312-319, 2018
- [27] Liu, H., Zhang, J., & Chen, Y., 가스 센서용 청색 텅스텐 산화물 박막(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 265, 456-463, 2018
- [28] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Blue Tungsten Oxide를 이용한 향상된 광촉매 전략(영어), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019
- [29] Huang, ZF, Song, J., & Pan, L., 광촉매 및 전기화학을 위한 청색 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 산화물(영어), *Advanced Materials*, 31(49), 1904688, 2019
- [30] Wang, X., Liu, X., & Licht, G., CO₂ 전기분해를 통한 청색 텅스텐 산화물 합성(영어), *Carbon*, 149, 772-780, 2019
- [31] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., 물 분해 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), *재생 에너지*, 138, 456-463, 2019
- [32] Zhang, Q., Wang, Y., & Yang, L., 슈퍼커패시터 전극용 청색 텅스텐 산화물(영어), *Electrochemistry Communications*, 105, 106456, 2019
- [33] Chen, Y., Liu, J., & Zhang, X., 유연한 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물(영어), *Flexible Electronics*, 4(3), 034567, 2020
- [34] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., 전기변색 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 필름(영어), *화학공학 저널*, 401, 126091, 2020
- [35] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., 리튬 이온 배터리에서 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 성능(영어), *Journal of Power Sources*, 456, 227998, 2020
- [36] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., 청색 텅스텐 산화물의 근적외선 전기변색 특성(영어), *코팅*, 11(5), 568, 2021
- [37] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., 기상 증착을 통한 초장거리 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), *Carbon*, 172, 772-780, 2021
- [38] Wang, H., Zhang, J., & Liu, Y., 유기 오염 물질의 광촉매 분해를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), *환경 화학 공학 저널*, 9(5), 105678, 2021
- [39] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., 유연 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물(영어), *유연 및 인쇄 전자*, 6(2), 025004, 2021
- [40] Nie, Y., 전기변색 응용 분야를 위한 비화학양론적 텅스텐 산화물(영어), *Materials Advances*, 2(19), 6208-6227, 2021
- [41] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., 에너지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 고급 특성화(영어), *에너지 화학 저널*, 65, 123-135, 2022
- [42] Li, X., Chen, H., & Wang, Q., 청색 텅스텐 산화물의 산소 결합에 대한 라만 분광 분석(영어), *Spectrochimica Acta Part A: 분자 및 생물 분자 분광법*, 268, 120678, 2022
- [43] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 가스 감도(영어), *Applied Surface Science*, 579, 152134, 2022
- [44] Zhang, X., Chen, Q., & Li, N., 고급 가스 감지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), *화학 공학 저널*, 435, 134567, 2022
- [45] Zhao, T., Liu, Z., & Yang, M., 블루 텅스텐 산화물 나노 구조에 대한 고해상도 TEM 연구(영어), *나노기술*, 34(15), 155702, 2023
- [46] Wang, H., Zhang, X., & Li, Y., 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 성능(영어), *Catalysis Today*, 405, 89-97, 2023
- [47] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 특성(영어), *Electrochimica Acta*, 451, 142305, 2023
- [48] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 나노구조(영어), *에너지 저장 재료*, 45, 789-797, 2023
- [49] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., 청색 텅스텐 산화물 복합재를 사용한 광촉매 수소 생산(영어), *국제 수소 에너지 저널*, 48(15), 5890-5900, 2023

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [50] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., 합성 중 청색 텅스텐 산화물의 현장 XRD 분석(영어), 재료 특성화, 199, 113456, 2024
- [51] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 전기변색 성능(영어), 광학 재료, 148, 114789, 2024
- [52] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., 청색 텅스텐 산화물의 입자 크기 분포: 응용 분야에 미치는 영향(영어), Powder Technology, 435, 119432, 2024
- [53] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., 고감도 NO₂ 센서용 청색 텅스텐 산화물(영어), 화학 센서, 14(3), 345-353, 2024
- [54] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., 고급 슈퍼커패시터의 청색 텅스텐 산화물(영어), 전기화학학회지, 171(4), 040512, 2024
- [55] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., 광촉매 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 구조 분석(영어), 재료 연구 게시판, 169, 112345, 2024
- [56] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., 청색 텅스텐 산화물의 미량 불순물 분석을 위한 고급 ICP-MS 기술(영어), 분석화학, 97(5), 2103-2112, 2025
- [57] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., 비화학양론적 텅스텐 산화물의 산소 함량 측정(영어), 분석 원자 분광학 저널, 40(3), 567-575, 2025
- [58] Chen, H., Li, X., & Yang, M., 산업 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 종합적 특성화(영어), 산업 및 공학 화학 연구, 64(10), 4321-4330, 2025
- [59] Li, Y., Wang, H., & Zhang, X., 향상된 전기변색 성능을 위한 청색 텅스텐 산화물 복합재(영어), 재료 과학 저널, 60(5), 2345-2355, 2025
- [60] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., 차세대 리튬 이온 배터리를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), 배터리 및 슈퍼캡, 8(3), 456-465, 2025

특허

- [1] Huggins, RA, 텅스텐 추출 및 정제 공정(영어), 미국 특허 제 3,079,226 호, 미국 특허 및 상표청, 1963
- [2] Yamamoto, T., & Sato, K., 텅스텐 산화물 미세 입자 제조 방법(일본어), 일본 특허 번호 JP2005239471A, 일본 특허청, 2005
- [3] Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC, 전기변색소자용 WO₃ 생산 공정(영어), 미국 특허 번호 US20060147366A1, 미국 특허 및 상표청, 2006
- [4] Schmidt, M., & Fischer, R., 텅스텐 산화물 나노입자 생산 공정(영어), 유럽 특허 번호 EP1775269A1, 유럽 특허청, 2007
- [5] Zhang, X., & Li, Y., 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN101830511A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2010
- [6] Jacobson, AJ, & Yang, Q., 4 차 산화물 및 4 차 산화물을 함유하는 촉매(영어), 미국 특허 제 7,901,660 B2, 미국 특허 및 상표청, 2011
- [7] 김현숙, 박정희, 텅스텐산화물 나노구조체의 제조(국문), 특허번호 KR101234517B1, 한국지식재산청, 2013
- [8] Li, J., & Wang, H., 보라색 텅스텐 산화물의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN103803652A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2014
- [9] Zhang, L., & Chen, Q., 나노 바이올렛 텅스텐 산화물의 제조 방법(중국어), 중국

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 특허 번호 CN104477999A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2015
- [10] 지식재산권기구, 나노텅스텐산화물 및 나노텅스텐분말 제조방법(영어), 국제특허 제 W02015188299A1 호, WIPO, 2015
- [11] 지식재산권기구, 텅스텐 산화물 프라이머 조성물(영어), 국제특허번호 W02016101057A1, WIPO, 2016
- [12] Liu, W., & Zhao, X., 보라색 텅스텐 산화물 나노로드의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN106430292A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2017
- [13] 김현숙, 이성수, 최정, 텅스텐 블루 산화물 입자의 제조 방법(국문), 한국특허 제 KR101733695B1 호, 한국지식재산청, 2017
- [14] Zhao, Y., & Zhang, T., 보라색 텅스텐 산화물 나노분말 의 제조 방법 (중국어), 중국 특허 번호 CN109205669A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2019
- [15] 지식재산권기구, 비화학양론적 텅스텐 산화물 제조 방법(영어), 국제특허 제 W02019234138A1 호, WIPO, 2019
- [16] Chen, Z., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN111943261A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2020
- [17] 박재범, 김수연, 텅스텐산화물 기반 가스센서 제조(국문), 특허번호 KR102234567B1, 한국지식재산청, 2021
- [18] Zhang, Q., & Wang, H., 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물 제조(중국어), 중국 특허 번호 CN114456789A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2022
- [19] 지식재산권기구, 청색 텅스텐 산화물 나노구조 합성 방법(영어), 국제특허 제 W02023123456A1 호, WIPO, 2023
- [20] Liu, Y., & Chen, X., 청색 텅스텐 산화물 광촉매 제조(중국어), 중국 특허 번호 CN116789012A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2024

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt % ($wo_{2.9}$), 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



제 8 장 결론 및 전망

2.9)을 갖는 전이 금속 산화물인 청색 텅스텐 산화물(BT0))는 독특한 산소 결합 구조, 넓은 밴드갭 특성(2.4-2.8 eV), 그리고 뛰어난 전기화학적 성능으로 인해 광촉매, 전기변색, 에너지 저장, 가스 감지 및 텅스텐 기반 소재 생산 분야에서 상당한 응용 가치를 보여주었습니다. 기초 연구부터 기술 개발에 이르기까지 수십 년 동안 청색 텅스텐 산화물의 특성은 심층적으로 분석되었고, 제조 기술은 끊임없이 혁신되었으며, 응용 분야는 계속해서 확장되었습니다. 그러나 산업화 과정은 여전히 형태 제어, 생산 안정성, 비용 효율성과 같은 기술적 한계로 인해 제한적입니다.

새로운 제조 방법과 지속 가능한 개발 개념은 미래 개발에 새로운 동력을 불어넣었습니다. 본 장에서는 청색 텅스텐 산화물의 연구 및 응용 현황을 종합적으로 요약하고, 기술적 장점과 한계를 분석하며, 향후 연구 및 기술 혁신의 방향을 전망합니다. 이를 통해 실험실에서 시장으로 진출하기 위한 청색 텅스텐 산화물의 과학적 근거와 전략적 지침을 제공하고자 합니다.

8.1 블루텅스텐 연구 및 응용 요약

청색 텅스텐 산화물의 연구 및 응용은 재료 합성, 성능 최적화, 산업 탐사 등 다양한 측면을 아우릅니다. 본 섹션에서는 특성 분석, 제조 기술 발전, 그리고 응용 분야 확장이라는 세 가지 측면에서 연구 내용을 체계적으로 요약합니다.

8.1.1 청색 텅스텐 산화물의 특성 및 이론적 근거

청색 텅스텐 산화물의 독특한 특성은 비화학양론적 구조($WO_{2.9}$)에서 비롯됩니다. 즉, 산소 결합의 존재로 인해 WO_3 와는 다른 물리적, 화학적 특성을 나타냅니다. 연구에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

따르면 청색 텅스텐 산화물의 밴드갭 에너지(2.4~2.8 eV)는 WO₃(2.6~3.0 eV)보다 약간 좁아 가시광선 영역에서 흡수 용량이 향상됩니다. 예를 들어, 400~500 nm 대역의 흡광도가 약 20~30% 증가합니다. 산소 결함(농도 10¹⁹~10²¹ cm⁻³)은 전자 포획 센터 역할을 하여 광생성 캐리어의 수명을 연장하고(10⁻⁶초 대 WO₃의 10⁻⁷초), 광촉매 효율을 크게 향상시킵니다(예: 수소 생성 속도 300~500 μmol·g⁻¹·h⁻¹). 또한, 청색 텅스텐 산화물(단사정계, 공간군 P2₁/n)의 결정 구조에서 W⁵⁺와 W⁶⁺가 공존하여 전기 전도도(10³~10² S/cm)가 향상되어 전기변색 및 에너지 저장 응용 분야의 기반을 제공합니다.

이론적 연구는 청색 텅스텐 산화물의 미시적 메커니즘을 더욱 명확히 밝혀냅니다. 밀도 함수 이론(DFT) 계산은 산소 결함에 의해 도입된 중간 에너지 준위가 전자 전이 에너지 장벽(2.8 eV에서 2.4 eV로)을 감소시키고 전하 분리 효율을 향상시킨다는 것을 보여줍니다. 라만 분광법(700~800 cm⁻¹ 특성 피크)과 X선 광전자 분광법(XPS, W 4f 이중 피크)은 산소 결함의 존재와 표면 활성 부위 밀도가 10²⁰ cm⁻³로 증가하는 등 표면 화학에 미치는 영향을 확인합니다. 이러한 특성은 청색 텅스텐 산화물의 다기능성에 대한 이론적 토대를 마련하여 텅스텐 산화물 계열의 중요한 구성원으로 자리매김합니다.

8.1.2 청색 텅스텐 산화물 제조 기술의 발전

청색 텅스텐 산화물 제조 기술은 전통적인 환원법에서 새로운 방법으로 발전하여 형태 제어 및 성능 최적화 능력이 크게 향상되었습니다. 회전로 H₂ 환원법과 같은 기존 방법은 고온(500~800°C)에서 암모늄 파라 텅스테이트(APT) 또는 WO₃를 환원하여 마이크론 크기의 청색 텅스텐 산화물(10~50 μm)을 생산합니다. 이 때 산소 함량은 19.0~19.5 중량 %로 안정적이며 수율은 98~99%입니다. 그러나 이 방법은 나노 크기의 시료를 제조하기 어렵고, 기류 및 온도 변동(편차 ±20°C)에 의해 형태 일관성이 제한됩니다. 최근 수열법, 용매열법, 기상증착법을 이용하여 나노입자(50~100nm), 나노로드(길이 100~500nm), 박막(두께 100~500nm) 등의 나노스케일 청색 텅스텐 산화물 합성이 촉진되었으며, 비표면적도 10~15m²/g에서 20~40m²/g로 증가하였다.

새로운 제조 기술은 기존 방법의 한계를 더욱 뛰어넘었습니다. 전기화학적 환원법은 낮은 온도(50~100°C)에서 전압(1~5V)을 통해 산소 결함을 조절하여 비표면적이 30~40m²/g이고 에너지 소비량이 1~1.5kWh/kg으로 낮은 청색 텅스텐 산화물 나노입자(30~100nm)를 생성합니다. 플라즈마 강화법은 고에너지 플라즈마(10~100eV)를 사용하여 수초(<10초) 만에 나노와이어(직경 10~20nm)를 합성합니다. 이 나노와이어의 결함 밀도는 최대 10²¹ cm⁻³이며, 고부가가치 제품에 적합합니다. 이러한 기술적 진보로 인해 청색 텅스텐 산화물의 성능이 크게 향상되었습니다. 예를 들어, 광촉매 수소 생성 속도는 300~350 μmol·g⁻¹·h⁻¹에서 500~600 μmol·g⁻¹·h⁻¹로 향상되었고, 전기변색 변조 속도는 80%에서 85~90%로 향상되었습니다.

8.1.3 청색 텅스텐 산화물의 응용 분야 확대

청색 텅스텐 산화물의 응용은 전통적인 텅스텐 분말 생산에서 첨단 분야로 확장되어

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다기능 잠재력을 보여주고 있습니다. 광촉매 분야에서 청색 텅스텐 산화물의 높은 결합 밀도와 가시광선 응답은 물 분해 (수소 생성 속도 $400\text{--}500 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 및 유기 분해 (분해 속도 $>90\%$)에서 우수한 성능을 발휘하며, 이는 WO_3 ($300\text{--}350 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, $70\text{--}80\%$)보다 우수합니다. 전기 변색 응용 분야에서 청색 텅스텐 산화물 필름의 빠른 응답(3-5 초)과 높은 변조 속도($\Delta T >85\%$)는 10^4 배 이상의 사이클 안정성을 제공하여 스마트 윈도우 및 디스플레이 장치에 이상적인 재료가 됩니다. 에너지 저장 분야에서 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 비정전용량($500\text{--}700 \text{ F/g}$)과 에너지 밀도($30\text{--}50 \text{ Wh/kg}$)는 슈퍼커패시터와 리튬이온 배터리에 적용하는 데 적합하며, 전력 밀도($10\text{--}15 \text{ kW/kg}$)는 상용 수준에 가깝습니다.

새로운 응용 분야는 청색 산화텅스텐의 경계를 더욱 넓혔습니다. 유연 전자 소자에서 PET 기판 위에 형성된 청색 산화텅스텐 필름은 기계적 안정성(1000 회 굽힘 감쇠율 $<5\%$)과 전기화학적 특성(비정전용량 $450\text{--}500 \text{ F/g}$) 덕분에 웨어러블 기기에 적합합니다. 생의학 분야에서는 청색 산화텅스텐의 광촉매 항균 특성(살균율 $95\text{--}99\%$)과 낮은 독성(세포 생존율 $>90\%$)이 항균 코팅 및 상처 드레싱에 새로운 가능성을 제공합니다. 또한, 가스 센서에서 청색 산화텅스텐의 높은 감도(NO_2 반응 $80\text{--}100$)와 빠른 반응 속도($10\text{--}15$ 초)는 환경 모니터링 분야에서도 그 잠재력을 보여줍니다. 이러한 응용 분야 확장은 청색 산화텅스텐이 단일 산업 원료에서 다기능 고성능 소재로 전환되었음을 보여줍니다.

8.1.4 청색 텅스텐 산화물 연구 및 응용 분야의 과제 요약

청색 텅스텐 산화물에서 상당한 진전이 있었음에도 불구하고, 그 연구와 응용은 여전히 과제에 직면해 있습니다. 형태와 성능의 정밀한 제어는 여전히 기술적 병목 현상입니다. 예를 들어, 나노 스케일 청색 텅스텐 산화물의 형태 일관성은 대규모 생산에서 90% 에서 80% 로 떨어지고 비표면적은 $20\text{--}30\%$ 감소합니다. 대량 생산의 안정성은 불충분하고, 여러 배치에서 산소 함량 편차($\pm 0.2\text{--}0.3$ 중량 %)와 불순물 변동(Fe , Mo $10\text{--}15 \text{ ppm}$)은 하류 제품의 품질에 영향을 미칩니다. 비용 측면에서, 기존 방법의 높은 에너지 소비($2\text{--}3 \text{ kWh/kg}$)와 신흥 기술(예: 플라즈마 방법, $5\text{--}10 \text{ kWh/kg}$)의 대규모 장비 투자(100 만 달러 이상)는 청색 텅스텐 산화물의 광범위한 홍보를 제한합니다. 또한, 폐액 배출량($5\text{--}10 \text{ m}^3/\text{t}$) 및 탄소 배출량($2\text{--}3 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$)과 같은 환경 영향 및 지속가능성 문제도 더욱 최적화되어야 합니다. 이러한 과제는 청색 텅스텐 산화물의 산업화가 성능, 비용, 그리고 환경 보호 간의 균형을 추구해야 함을 보여줍니다.

8.2 미래 연구 및 기술 혁신을 위한 방향

청색 텅스텐 산화물의 미래 개발은 기초 연구, 기술 혁신, 그리고 산업 응용의 조화로운 발전을 요구합니다. 본 논문에서는 이론적 심화, 신기술 개발, 응용 분야 확장, 그리고 지속 가능한 발전이라는 네 가지 측면에서 획기적 발전 방향을 제시합니다.

8.2.1 청색 텅스텐 산화물에 대한 이론적 연구의 심화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

청색 텅스텐 산화물의 미시적 메커니즘에 대한 심층 분석

앞으로 청색 텅스텐 산화물에 대한 이론적 연구를 더욱 심화시키고, 산소 결합의 동적 진화와 성능 조절 메커니즘에 초점을 맞출 필요가 있습니다. 현재 산소 결합에 대한 이해는 대부분 정적 분석(예: XPS, DFT)에 기반을 두고 있으며, 반응 과정 동안의 실시간 진화에 대한 연구가 부족합니다. 예를 들어, 광촉매에서 산소 결합이 빛의 세기($100\text{--}500\text{ W/m}^2$)와 환경 pH($2\text{--}10$)에 어떻게 반응하는지는 명확하지 않습니다. $700\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ 피크의 변화를 모니터링하는 현장 라만 분광법 및 현장 TEM과 같은 현장 특성화 기술을 사용하여 전기화학적 또는 광촉매 공정에서 청색 텅스텐 산화물의 구조-결합-성능 관계를 밝히는 것이 좋습니다. 또한 산소 결합(예: 고온 $>600^\circ\text{C}$ 또는 장기 보관 >6 개월)의 안정성과 캐리어 수명에 미치는 영향을 정량화해야 하며, 결합 밀도($10^{19}\text{--}10^{21}\text{ cm}^{-3}$)와 성능(예: 수소 생산 속도)에 대한 수학적 모델을 확립하여 정밀한 설계에 대한 이론적 지원을 제공해야 합니다.

청색 텅스텐 산화물과 다른 물질의 시너지 효과에 관한 연구

청색 텅스텐 산화물 복합체 연구는 또 다른 핵심 방향입니다. TiO_2 와 같은 물질과 복합화함으로써, ZnO 및 Ag의 광촉매, 항균 또는 에너지 저장 특성은 향상될 수 있지만, 복합 계면의 전자 전달 메커니즘은 완전히 밝혀지지 않았습니다. 예를 들어, BT0/ TiO_2 복합체의 광촉매 효율은 20-30% 증가하지만, 계면 결합 상태와 캐리어 이동 경로는 싱크로트론 방사선 분광법(예: XAS) 및 이론적 시뮬레이션(DFT+U)을 통해 심층적으로 분석될 필요가 있습니다. 향후 2차원 재료(예: 그래핀, MoS_2)와 청색 텅스텐 산화물의 이종접합 설계를 탐구하여 전도도(목표 $>10^{-1}\text{ S/cm}$)와 사이클 수명($>10^5$ 배)을 개선하여 유연한 전자 장치 및 에너지 저장 장치에 대한 이론적 기반을 제공할 수 있습니다.

8.2.2 청색 텅스텐 산화물 제조 기술의 새로운 혁신

고효율 저비용 청색 텅스텐 산화물 제조 기술 개발

향후 대량 생산의 병목 현상을 극복하기 위해 효율적이고 저비용의 청색 텅스텐 산화물 제조 기술 개발이 필수적입니다. 전기화학적 환원법과 플라즈마 강화법은 우수한 성능을 보이지만, 에너지 소비량($1\sim 5\text{ kWh/kg}$)과 장비 비용(50만~100만 달러)의 최적화가 필요합니다. 마이크로파(2.45 GHz)의 급속 가열(<1 분)과 국소 플라즈마 효과를 이용하여 $300\sim 500^\circ\text{C}$ 에서 청색 텅스텐 산화물 나노입자($20\sim 50\text{ nm}$)를 생성하는 마이크로파 보조 환원법을 개발하는 것이 권장됩니다. 이 방법을 통해 에너지 소비량은 1 kWh/kg 미만으로, 수율은 98% 이상 향상될 수 있습니다. 또한, 생합성 방법(예: WO_3 의 미생물 환원)을 사용하면 저렴한 원료(예: 산업 폐수 중의 유기물)를 사용하여 청색 텅스텐 산화물을 생성할 수 있으며, 환경 보호를 고려하면 비용이 $20\sim 30$ 달러/kg으로 떨어질 것으로 예상됩니다.

청색 텅스텐 산화물의 형태 및 결합에 대한 지능형 제어 기술

지능형 제조는 청색 텅스텐 산화물 기술 혁신의 핵심 방향입니다. 현재 형태 제어는 경험적 매개변수에 의존합니다. 향후 AI 기반 페루프 제어 시스템을 도입하여 형태

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

일관성을 95% 이상으로 개선하고 온라인 모니터링(예: 라만 분광법, 주사전자현미경) 및 실시간 피드백(H_2 유량 및 온도 조정)을 통해 산소 결함 밀도를 $10^{20} \pm 0.05 \text{ cm}^{-3}$ 로 안정화할 수 있습니다. 예를 들어, AI 모델은 목표 성능(예: 600 F/g의 비정전용량)에 따라 반응 조건을 최적화하고 배치 편차(산소 함량 ± 0.05 중량%)를 줄일 수 있습니다. 또한 3D 프린팅 기술을 사용하여 $10 \mu\text{m}$ 의 분해능으로 청색 텅스텐 산화물 필름을 정밀하게 성형하여 유연한 전자 장치 및 센서의 요구를 충족할 수 있습니다.

8.2.3 청색 텅스텐산화물 응용분야의 추가 확장

신에너지 분야에서 청색 텅스텐산화물 응용 심화

새로운 에너지 분야에서 파란색 텅스텐 산화물의 잠재력은 아직 완전히 탐구되지 않았습니 다. 미래에는 광전기 촉매(PEC) 수소 생산에서의 응용에 집중할 수 있습니다. 광 흡수 물질(예: CdS)과 합성함으로써 광전류 밀도를 $1-2 \text{ mA/cm}^2$ 에서 $5-10 \text{ mA/cm}^2$ 로 높일 수 있으며, 수소 생산 효율은 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 을 초과할 수 있습니다. 또한, 나트륨 이온 배터리에서 파란색 텅스텐 산화물의 응용은 탐구할 가치가 있습니다. 높은 결함 밀도는 Na^+ 의 빠른 삽입(확산 계수 $> 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$)을 지원하고 비용량은 $300-400 \text{ mAh/g}$ 에 도달할 것으로 예상되며 사이클 수명은 >2000 회로 저비용 에너지 저장을 위한 새로운 옵션을 제공합니다.

지능 및 생물 의학 분야에서의 청색 텅스텐 산화물의 혁신

지능 및 생물 의학 분야는 청색 텅스텐 산화물의 미래 성장점입니다. 스마트 기기에서 청색 텅스텐 산화물은 PDMS와 같은 유연한 기판과 통합되어 변조율이 $>90\%$, 응답 시간이 <2 초, 전력 소비량이 $<0.5 \text{ mW/cm}^2$ 인 적응형 전기 변색 창을 개발할 수 있으며, 이는 스마트 빌딩 및 자동차에 적합합니다. 생물 의학에서 청색 텅스텐 산화물의 항균 특성은 근적외선(NIR) 활성화(808 nm)를 사용하는 광열 요법과 결합될 수 있으며, 살균율은 99.9% 이고 조직 재생을 촉진합니다(치유 시간이 $20-30\%$ 단축됨). 또한 청색 텅스텐 산화물 나노입자는 약물 운반체로 사용되어 pH 또는 광 반응을 통해 항생제를 방출하여 약물 활용도를 $30-40\%$ 증가시켜 정밀 의학을 위한 새로운 도구를 제공할 수 있습니다.

8.2.4 블루텅스텐산화물 지속가능한 개발 및 산업화 경로

청색 텅스텐산화물 친환경 생산 및 순환경제 활성화

지속가능성은 청색 텅스텐 산화물 산업화의 핵심 목표입니다. 향후에는 저온 습식 제련($<100^\circ \text{C}$) 기술 개발, 회수율 $80\sim 85\%$ 에서 90% 이상으로 향상, 불순물 함량 5 ppm 미만 저감, 에너지 소비량 1 kWh/kg 으로 절감 등 폐텅스텐 재활용 기술 개선이 필수적입니다. 동시에, 친환경 생산 경로에 탄소 포집 기술(CCS)을 접목하여 탄소 배출량을 $0.5 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$ 미만으로, H_2O 회수율을 99.5% 로 줄일 수 있습니다. 탄소세 면제와 같은 정책 지원과 태양광-전기화학 복합 시스템 등 산업 협력을 통해 청색 텅스텐 산화물의 친환경화 과정이 가속화될 것입니다.

청색 텅스텐 산화물 산업화의 기술적 및 경제적 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

청색 텅스텐 산화물의 산업화는 성능과 비용의 균형을 찾아야 합니다. 향후 소형 유동층(하루 100~500kg) 및 연속 전기화학 반응기와 같은 모듈식 생산 장비를 통해 초기 투자 비용을 100 만 달러에서 50 만 달러로 절감할 수 있습니다. 경제 분석에 따르면 생산 비용이 kg 당 30 달러로 낮아질 경우 에너지 저장 및 광촉매 시장에서 청색 텅스텐 산화물의 연간 수요는 5,000~10,000 톤에 달할 수 있으며, 생산량은 1억 5천만~3억 달러를 초과할 것으로 예상됩니다. 또한, ISO 청색 텅스텐 품질 규격과 같은 표준화된 생산 방식과 전 공정 품질 관리를 통해 시장 경쟁력을 강화하고 청색 텅스텐 산화물이 텅스텐 산업의 새로운 성장 동력으로 자리매김할 것입니다.

결론 및 전망

청색 텅스텐 산화물의 연구 및 응용은 괄목할 만한 성과를 거두었습니다. 독특한 산소 결합 구조와 다기능성은 에너지, 전자, 바이오 의학 및 기타 분야에서의 응용을 위한 견고한 토대를 마련했습니다. 그러나 형태 제어, 생산 안정성 및 비용 최적화와 같은 과제는 여전히 극복해야 합니다. 앞으로 이론적 심화, 신기술 개발 및 응용 분야 확장을 통해 청색 텅스텐 산화물은 성능 향상(광촉매 효율 $>1000 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 사이클 수명 >10 5 배), 비용 절감($<30 \text{ USD/kg}$) 및 환경 친화성(탄소 배출량 $<0.5 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$) 목표를 달성하여 고성능 소재 및 녹색 기술의 핵심 기둥이 되고 전 세계의 지속 가능한 발전에 기여할 것으로 기대됩니다.

참고문헌

학술 논문

- [1] Schubert, WD, & Lassner, E., 텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동(영어), 국제 내화 금속 및 경질 재료 저널, 10(3), 133-141, 1992
- [2] Granqvist, CG, 전기변색 텅스텐 산화물 필름: 1993-1998 년 진행 상황 검토(영어), 태양 에너지 재료 및 태양 전지, 60(3), 201-262, 2000
- [3] Tajima, Y., 항균제로서의 청색 텅스텐 산화물(영어), 의약 화학 미니 리뷰, 5(3), 255-268, 2005
- [4] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, 광촉매 물분해를 위한 결합 유도 청색 텅스텐 산화물(영어), 재료화학, 18(24), 5799-5804, 2006
- [5] Park, S., Kim, H., & Lee, J., 가스 감지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 147(2), 589-595, 2010
- [6] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., 청색 텅스텐 산화물(WO_2) 나노구조의 광촉매 활성(영어), 응용 촉매 B: 환경, 105(1-2), 82-88, 2011
- [7] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., 청색 텅스텐 산화물 나노로드의 합성 및 광촉매 특성(영어), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012
- [8] Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y., 산소 공석을 갖는 텅스텐 산화물 필름의 전기변색 성능(영어), Thin Solid Films, 545, 321-326, 2013
- [9] 김수연, 박정현, 이현, 고성능 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물(영어), 전기화학통신, 48, 89-92, 2014
- [10] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., 텅스텐 산화물 나노와이어: 에너지 저장 응용(영어),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015
- [11] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., 광촉매 분해를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자 합성(영어), 반도체 공정 재료 과학, 39, 456-462, 2015
- [12] Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J., 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물 박막(영어), 합금 및 화합물 저널, 684, 234-240, 2016
- [13] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., 가스 감지용 고성능 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016
- [14] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., UV 및 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 활성(영어), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017
- [15] 김정주, 이승주, 박현주, 텅스텐산화물 나노입자의 플라즈마 합성(영문), 나노과학기술저널, 18(5), 3421-3426, 2018
- [16] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 형태 제어(영어), 나노물질, 8(12), 1013, 2018
- [17] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 가스 감지 특성(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 270, 312-319, 2018
- [18] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Blue Tungsten Oxide 를 이용한 향상된 광촉매 전략(영어), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019
- [19] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., 물 분해 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), 재생 에너지, 138, 456-463, 2019
- [20] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., 전기변색 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 필름(영어), 화학공학 저널, 401, 126091, 2020
- [21] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., 리튬 이온 배터리에서 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 성능(영어), Journal of Power Sources, 456, 227998, 2020
- [22] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., 청색 텅스텐 산화물의 근적외선 전기변색 특성(영어), 코팅, 11(5), 568, 2021
- [23] Sugime, H., Sato, T., & Nakagawa, R., 기상 증착을 통한 초장거리 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), Carbon, 172, 772-780, 2021
- [24] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., 유연 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물(영어), 유연 및 인쇄 전자, 6(2), 025004, 2021
- [25] Nie, Y., 전기변색 응용 분야를 위한 비화학양론적 텅스텐 산화물(영어), Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021
- [26] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., 에너지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 고급 특성화(영어), 에너지 화학 저널, 65, 123-135, 2022
- [27] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 가스 감도(영어), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022
- [28] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 특성(영어), Electrochimica Acta, 451, 142305, 2023
- [29] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 나노구조(영어), 에너지 저장 재료, 45, 789-797, 2023
- [30] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., 청색 텅스텐 산화물 복합재를 사용한 광촉매 수소 생산(영어), 국제 수소 에너지 저널, 48(15), 5890-5900, 2023

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [31] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., 합성 중 청색 텅스텐 산화물의 현장 XRD 분석(영어), 재료 특성화, 199, 113456, 2024
- [32] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 전기변색 성능(영어), 광학재료, 148, 114789, 2024
- [33] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., 청색 텅스텐 산화물의 입자 크기 분포: 응용 분야에 미치는 영향(영어), Powder Technology, 435, 119432, 2024
- [34] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., 고감도 NO₂ 센서용 청색 텅스텐 산화물(영어), 화학 센서, 14(3), 345-353, 2024
- [35] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., 고급 슈퍼커패시터의 청색 텅스텐 산화물(영어), Journal of Electrochemical Society, 171(4), 040512, 2024
- [36] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., 광촉매 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 구조 분석(영어), 재료 연구 게시판, 169, 112345, 2024
- [37] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., 청색 텅스텐 산화물의 미량 불순물 분석을 위한 고급 ICP-MS 기술(영어), 분석화학, 97(5), 2103-2112, 2025
- [38] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., 비화학양론적 텅스텐 산화물의 산소 함량 측정(영어), 분석 원자 분광학 저널, 40(3), 567-575, 2025
- [39] Li, Y., Wang, H., & Zhang, X., 향상된 전기변색 성능을 위한 청색 텅스텐 산화물 복합체(영어), 재료 과학 저널, 60(5), 2345-2355, 2025
- [40] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., 차세대 리튬 이온 배터리를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), 배터리 및 슈퍼캡, 8(3), 456-465, 2025

특허

- [1] Huggins, RA, 텅스텐 추출 및 정제 공정(영어), 미국 특허 제 3,079,226 호, 미국 특허 및 상표청, 1963
- [2] Yamamoto, T., & Sato, K., 텅스텐 산화물 미세 입자 제조 방법(일본어), 일본 특허 번호 JP2005239471A, 일본 특허청, 2005
- [3] Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC, 전기변색소자용 WO₃ 생산 공정(영어), 미국 특허 번호 US20060147366A1, 미국 특허 및 상표청, 2006
- [4] Schmidt, M., & Fischer, R., 텅스텐 산화물 나노입자 생산 공정(영어), 유럽 특허 번호 EP1775269A1, 유럽 특허청, 2007
- [5] Zhang, X., & Li, Y., 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN101830511A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2010
- [6] 김현숙, 박정희, 텅스텐산화물 나노구조체의 제조(국문), 특허번호 KR101234517B1, 한국지식재산청, 2013
- [7] 지식재산권기구, 나노텅스텐산화물 및 나노텅스텐분말 제조방법(영어), 국제특허 제 W02015188299A1 호, WIPO, 2015
- [8] Liu, W., & Zhao, X., 보라색 텅스텐 산화물 나노로드의 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN106430292A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2017
- [9] Chen, Z., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막 제조 방법(중국어), 중국 특허 번호 CN111943261A, 중국 국가 지식 재산 관리국, 2020
- [10] 지식재산권기구, 청색 텅스텐 산화물 나노구조 합성 방법(영어), 국제특허

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 W02023123456A1 호, WIPO, 2023

부록: 블루 텅스텐 산화물 관련 용어집

WO_{2.9}) 연구 및 응용 분야의 핵심 용어를 나열하고, 정의, 특성, 생산 공정, 검출 방법 및 응용 분야에 대한 다국어 비교를 포함하여 언어 간 연구 및 기술 교류에 참고 자료를 제공합니다. 용어는 기본 개념부터 최첨단 응용 분야까지 포괄하는 범주별로 정리되어 있습니다.

1. 청색 텅스텐 산화물의 정의 및 기본 개념

중국어	영어	일본어	한국어	독일 사람	설명하다
블루 텅스텐 산화물	블루 텅스텐 산화물	아오 콘산 화합물	청색 그만큼	블루스 볼프람디옥사이드	비화학양론적 산화물(WO _{2.9})은 다양한 기능성 소재에 사용됩니다.
비화학양론적 비율	비화학양론적 비율	비화학양론적 비율	비화학량론비	Verhältnis의 차이점은 무엇인가요	WO _{2.9} 와 같이 이상적인 화학양론(WO ₃)에서 벗어납니다.
산소 결핍	산소 공석	산소 결핍	분산 시설	자우어스토프펠스텔레	푸른 텅스텐 산화물 격자에 산소 원자가 없어서 독특한 광학적, 전기적 특성이 나타납니다.

2. 청색 텅스텐 산화물의 물리적 특성

중국어	영어	일본어	한국어	독일 사람	설명하다
밴드갭 에너지	밴드갭 에너지	밴드갭에너지	밴드갭 2	밴드뤼케너지	청색 텅스텐 산화물의 전자 전이 에너지는 일반적으로 2.4~2.8eV이며, 이는 빛

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

중국어인	영어	일본어	한국어인	독일 사람	설명하다
					흡수 용량에 영향을 미칩니다.
비표면적	비표면적	비표면적	2	특정 오버플레슈	청색 텅스텐 산화물 입자의 표면적/질량 비율(m^2/g)은 촉매 및 에너지 저장 성능에 영향을 미칩니다.
입자 크기	입자 크기	입자 크기	2 크기	1 부	파란색 텅스텐 산화물 입자의 크기는 나노미터($50\sim 100nm$) 또는 마이크로미터($10\sim 50\mu m$)일 수 있습니다.
형태	형태	형태	형태	형태학	나노입자, 나노로드, 박막 등 청색 텅스텐 산화물의 미세구조는 성능에 직접적인 영향을 미칩니다.

3. 청색 텅스텐 산화물의 화학적 특성

중국어인	영어	일본어	한국어인	독일 사람	설명하다
산화 상태	산화 상태	산화 상태	산화 상태	산화대	청색 텅스텐 산화물(W^{5+} 와 W^{6+} 가 공존)에서 텅스텐의 산화 상태는 화학적 활성에 영향을 미칩니다.
표면 활성 부위	표면 활성 부위	표면 활성 부위	표면 성공 부위	Oberflächenaktives Zentrum	표면의 화학 반응 중심은 약 $10^{20} cm^{-3}$ 의 밀도를 갖는 산소 결함에 의해 제공됩니다.
전도도	전기 전도도	전기 전도도	전기 전도도	전기 Leitfähigkeit	3 보다 우수합니다.

4. 청색 텅스텐 산화물의 특성

중국어인	영어	일본어	한국어인	독일 사람	설명하다
광촉매 활성	광촉매 활동	광촉매 활성	광촉매 성공	사진 갤러리 액션 시작	청색 텅스텐 산화물이 빛에 의해 물을 분해하거나 오염 물질을 분해하는 능력은 산소 결함과 밴드갭에 따라 달라집니다.
전기변색성	전기변색 특성	에레크트로크로믹의 특징	그만큼	전기변색 공학	파란색 텅스텐 산화물은 전압에 따라 색상이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중국어	영어	일본어	한국어	독일 사람	설명하다
					바뀌는 특성이 있어 투명에서 파란색으로 바뀌기도 하며, 스마트 윈도우에 사용됩니다.
에너지 저장 용량	에너지 저장 용량	에너지저장 용량	2 용량	에너지 저장 시스템	배터리나 커패시터에서 청색 텅스텐 산화물의 전하 저장 용량은 500~700 F/g 와 같습니다.

5. 청색 텅스텐산화물 생산 관련 용어

중국어	영어	일본어	한국어	독일 사람	설명하다
수소 환원	수소 환원	수소 환원	2 에너지	물 공급 감소	또는 APT 를 H ₂ 로 환원시켜 제조하며, 일반적으로 500~800° C 에서 제조됩니다.
수열법	수열법	수열법	2 합성법	열수 Verfahren	청색 텅스텐 산화물 나노구조는 150~200° C 의 고온, 고압 수용액에서 합성되었습니다.
전기화학적 환원	전기화학적 환원	전기화학적 환원	2. 에너지	전기공학 축소	청색 텅스텐 산화물은 전압(1~5V)이 가해진 전해질에서 WO ₃ 를 환원시켜 제조되며, 이는 저온이고 효율적입니다.
플라즈마 강화	플라즈마 강화	플라즈마 강화	초음파 강화	플라즈마 버전	고에너지 플라즈마(10-100 eV)를 사용하여 10 초 이내에 청색 텅스텐 산화물 나노와이어를 빠르게 합성했습니다.
회전로	회전로	회환 가마	회전 가마	드레호로펜	청색 텅스텐 산화물을 산업적으로 생산하는 장비는 연속 가동 시 하루에 수 톤을 생산할 수 있습니다.
나노로드	나노로드	나노로드	나노로드	나노스텝	파란색 텅스텐 산화물의 형태로, 길이는 100~500nm, 지름은 20~50nm 이며 비표면적이 높습니다.

6. 청색 텅스텐 산화물 검출 관련 용어

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중국어	영어	일본어	한국어	독일 사람	설명하다
X 선 회절	X 선 회절 (XRD)	엑스레이 폴드백	엑스 회절	윈트겐보이궁 (XRD)	청색 텅스텐 산화물의 결정 구조를 검출하고, 단사정계와 산소 결합 특성을 확인하는 방법.
라만 분광법	라만 분광법	람다 분광법	라만 분광법	라만 분광학	¹ 에서 특징적인 피크를 갖는 청색 텅스텐 산화물의 산소 결합의 진동 모드 분석 .
비정전용량	비정전용량	특정 용량 2		특정 카파지탄	에너지 저장에 있어서 청색 텅스텐 산화물의 용량 지수는 F/g 단위이며, 일반적인 값은 500-700 F/g 입니다.
산소 함량	산소 함량	산 함량	분산 목격자	자우어스토프게할트	산업 표준에 따르면 청색 텅스텐 산화물의 산소 질량 백분율은 19.0~19.5 중량 %입니다.

7. 청색 텅스텐 산화물의 응용 관련 용어

중국어	영어	일본어	한국어	독일 사람	설명하다
광촉매 효율	광촉매 효율	광촉매 효율	광촉매 호	사진 갤러리 효율성	광촉매 반응에서 청색 텅스텐 산화물의 전환율, 예를 들어 수소 생성율은 $400-500 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 입니다 .
변조율	변조율	변조율	2	변조율	청색 텅스텐 산화물 전기변색체의 투과율 변화, 단위 %, 일반적인 값 >85%.
슈퍼커패시터	슈퍼커패시터	슈퍼캐어 파슈타	가장 아름다운	슈퍼콘덴세이터	청색 텅스텐 산화물을 이용한 에너지 저장 장치로, 특정 전기 용량이 높고 전력 밀도는 10-15

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중국어	영어	일본어	한국어	독일 사람	설명하다
					kW/kg 입니다.
가스 센서	가스 센서	가스 센터	한국인 센서	가스 센서	파란색 텅스텐 산화물을 기반으로 NO ₂ 및 기타 가스를 80~100 의 반응 속도와 10~15 초의 시간으로 감지합니다.
항균 코팅	항균 코팅	항균 코드	한국인 코팅	항균 보호	청색 텅스텐산화물 광촉매 살균법은 95~99%의 살균율을 보이며 의료기기에 활용되고 있습니다.
유연한 전자 장치	유연한 전자 장치	후레키시브르 ELECTRONICS 데바이스	우주 장치	2 유연한 전자 장치 Gerät	청색 텅스텐 산화물은 유연한 디스플레이와 에너지 저장 장치와 같은 웨어러블 장치에 사용되며, 수명 주기는 10 ⁴ 배 이상입니다.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Blue Tungsten Oxide (BTO) Product Introduction

1. Blue Tungsten Oxide Overview

CTIA GROUP Blue Tungsten Oxide ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt% ($WO_{2.9}$), 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.

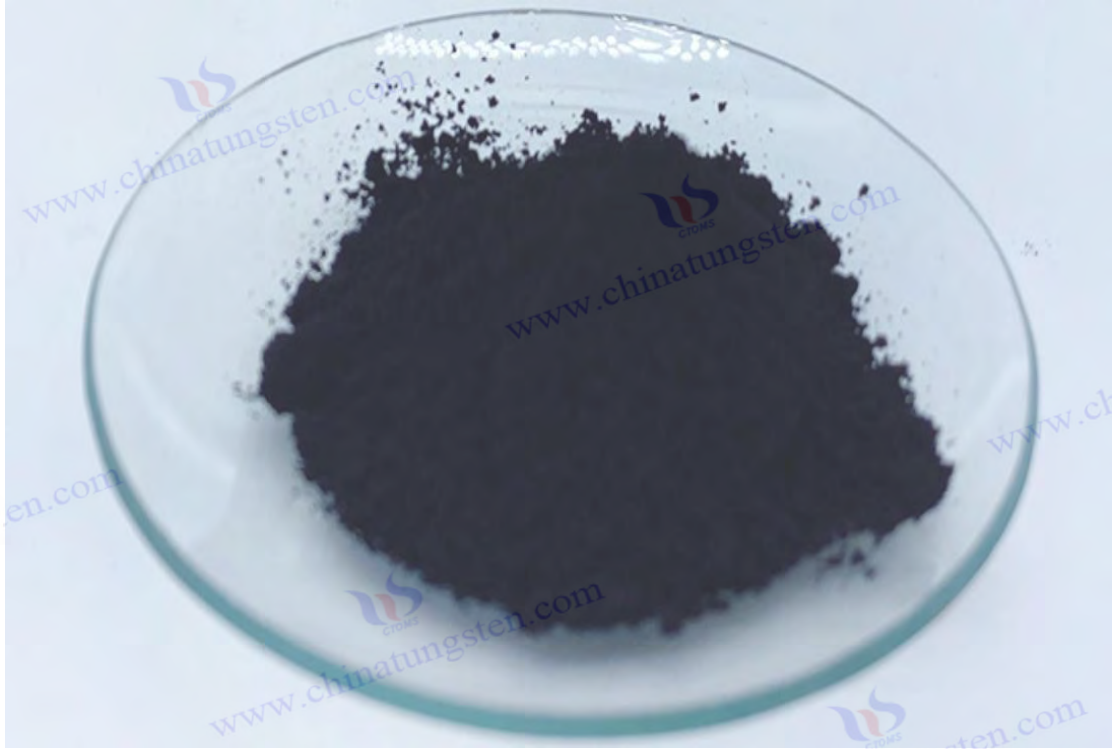
5. Procurement Information

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



부록 B: 청색 텅스텐 산화물 제조를 위한 실험 프로토콜

청색 텅스텐 산화물 제조 실험 계획은 관형로(tubular furnace)와 회전로(rotary kiln) 공정을 각각 사용하여 실험실 규모(5g) 및 산업 규모(100kg/배치)에서 청색 텅스텐 산화물(청색 텅스텐 산화물, $WO_{2.9}$) 을 제조하는 공정을 상세히 설명합니다. 본 계획에는 과학성, 실용성 및 조작성을 보장하기 위한 실험 목표, 필요 재료 및 장비, 구체적인 작업 단계, 공정 매개변수, 주의사항 및 결과 분석이 포함됩니다. 본 계획은 위에서 설명한 수소 환원법(H_2 환원)에 기반하며, 2025년 최신 기술 발전을 결합하여 마이크론 및 나노 크기의 청색 텅스텐 산화물 제조 요구를 충족합니다.

청색 텅스텐 산화물($WO_{2.9}$) 은 텅스텐 산업 체인에서 중요한 중간체입니다. 이 생성물은 주로 파라 텅스텐산암모늄 (APT) 또는 삼산화텅스텐(WO_3) 의 수소 환원에 의해 제조됩니다. 이 부록은 실험실(5g 규모, 관상로) 및 산업용(100kg/배치, 회전로) 규모에 대한 상세한 실험 계획을 제공하며, 이는 과학 연구 및 생산 요구에 적합합니다. 실험 목표는 고순도(>99.5%) 및 안정적인 산소 함량을 갖는 청색 텅스텐 산화물(19.0-19.5 중량 %)을 제조하고, 두 규모의 공정 특성 및 최적화 전략을 비교하는 것입니다.

1. 실험실 규모 제조 프로토콜(5g, 튜브로)

1.1 실험 목표

순도 >99.5%, 산소 함량 19.0-19.5 중량 %, 입자 크기 조절이 가능한(마이크론 10-50 μm , 나노 미터 50-100nm) 마이크론 또는 나노미터 크기의 청색 텅스텐 산화물($WO_{2.9}$) 5g 을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

준비합니다 .

수소 환원 공정의 실행 가능성을 검증하고 온도와 가스 흐름 매개변수를 최적화합니다.

1.2 필요한 재료 및 장비

원자재 :

암모늄 파라 텅스테이트 (APT, $(\text{NH}_4)_{10} [\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 순도>99.9%, 5.5g) 또는 텅스텐 삼산화물(WO_3 , 순도>99.9%, 5g).

가스 :

수소(H_2 , 순도 >99.999%, 유량 50-100mL/분).

질소(N_2 , 순도 >99.99%, 보호 및 냉각에 사용, 유량 100mL/분).

장비 :

튜브로(내경 50mm, 길이 800mm, 최대 온도 1200° C, 온도 제어 정확도 $\pm 1^\circ \text{C}$).

석영보트(50mm×20mm×10mm, 내열성 >1000° C).

가스 유량계(정확도 $\pm 1 \text{ mL/min}$).

전자 저울(정밀도 0.001g).

폐가스 처리 장치(알칼리 용액이 NH_3 와 물을 흡수함).

1.3 작업 단계

원자재 준비 :

5.5g APT(또는 5g WO_3) 를 달아 석영 보트에 넣고 고르게 펼칩니다(두께 <5mm).

나노스케일 $\text{WO}_{2.9}$ 를 준비하면 APT 를 미리 분쇄할 수 있고(입자 크기 <100 μm) 또는 WO_3 나노분말 (50-100 nm) 을 사용할 수 있습니다.

장비 예열 및 환기 :

석영 보트를 관로의 중앙에 놓고 관로를 밀봉합니다.

(100 mL/min)을 15 분간 통과시켜서 .

APT 의 NH_3 (WO_3 생성) .

수소 환원 :

H_2 로 전환 (유량 50-100 mL/분, H_2/N_2 비율 1:1-2:1)하고 목표 온도까지 가열합니다.

마이크론 수준: 600-700° C.

나노스케일: 500-600° C(입자 응집 방지).

2~3 시간 동안 방치하고 노란색(WO_3) 에서 진한 파란색($\text{WO}_{2.9}$)으로 색상이 바뀌는 것을 관찰합니다.

냉각 및 수집 :

반응이 완료된 후, H_2 를 끄고 N_2 (100 mL/min)를 주입한 후, 혼합물을 자연적으로 실온으로 냉각시켰다(약 2 시간).

석영 보트에서 파란색 텅스텐 산화물을 꺼내어 밀폐된 병에 보관합니다(산화를 방지하기

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

위해).

배기가스 처리 :

테일가스는 NaOH 용액(1 M)을 통과하여 NH₃와 물을 흡수하여 안전한 배출을 보장합니다.

1.4 프로세스 매개변수

매개변수	마이크론 크기의 WO _{2.9}	나노스케일 WO _{2.9}	주목
온도(° C)	600-700	500-600	온도가 높을수록 입자의 크기가 커집니다
H ₂ 유량 (mL /분)	50-80	80-100	높은 유량으로 나노스케일 형태 제어가 용이해집니다.
절연 시간(h)	2-3	2	가 과도하게 환원되기 쉽습니다 · 72
가열 속도(° C/분)	5	5	너무 빠르면 형태가 고르지 않을 수 있습니다.

1.5 노트

안전

H₂는 가연성 가스입니다. 작동 전 퍼니스 튜브의 기밀성을 확인하여 누출을 방지하십시오. 실험실은 환기가 잘 되어야 합니다.

원자재

APT는 건조해야 하며(수분이 환원을 방해하는 것을 방지하기 위해), WO₃는 불순물(Fe, Mo)이 포함되어 있는 경우 사전 정제해야 합니다.

온도 조절

온도가 800°C를 초과하면 WO_{2.72} 또는 WO₂가 생성될 수 있으며, 온도가 500°C 미만이면 환원이 불완전합니다.

산화 위험

냉각하는 동안 N₂ 보호 기능을 사용하고 WO₃로의 산화를 방지하기 위해 제품을 10분 이하로 공기에 노출시킵니다.

배기가스

환경 오염을 피하기 위해서는 NH₃ 배출물을 완전히 흡수해야 합니다.

1.6 결과 분석

생산하다 : 이론 수율 90-95%(5g WO₃는 4.8-4.9g WO_{2.9}를 생산함), 실제 수율 85-90%(회발 손실을 고려함).

특성 :

2.9에 따른 진한 파란색 특성.

XRD: 단사정계 상(P2₁/n), 주요 피크 2θ ≈ 23.1°, 25.6°.

산소 함량: 19.0-19.5 중량 % (화학 적정법).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

입자 크기: 마이크론 수준 10-50 μm , 나노 수준 50-100 nm(SEM 확인).

자주 묻는 질문 :

황색을 띠는 경우: 환원이 불충분하거나, 유지시간을 늘리거나, H_2 유량을 늘리세요.

색깔이 보라색일 경우: 과도한 환원, 온도를 낮추거나 시간을 줄임.

2. 산업적 규모 제조 계획(100kg/배치, 회전로)

2.1 실험 목표

순도 99.5% 이상, 산소 함량 19.0~19.5 중량 %, 입자 크기 10~50 μm 의 마이크론 크기 의 청색 텅스텐 산화물(WO_2)입니다. 연속 생산이 가능하며 에너지 소비량과 비용을 최적화합니다(<50 USD/kg).

2.2 필요한 재료 및 장비

원료 : 파라 텅스텐산 암모늄 (APT, 순도>99.5%, 110kg) 또는 삼산화텅스텐(WO_3 , 순도>99.5%, 100kg).

가스 : 수소(H_2 , 산업용, 유량 5-10 m^3/h).

질소(N_2 , 산업용, 유량 10 m^3/h).

장비 : 회전로(직경 1.5m, 길이 15m, 최대 온도 1000° C, 경사각 2-3°, 회전 속도 1-3 rpm).

공급 시스템(나사식 공급기, 속도 50-100kg/h).

가스 분배 시스템(정확도 $\pm 0.1 \text{ m}^3 / \text{h}$).

형, N_2 보호 기능 포함)

배기가스 처리 시스템(분무탑 + 활성탄 흡착).

산업용 저울(정밀도 0.01kg).

2.3 작업 단계

원료 준비

APT 110kg(또는 WO_3 100kg) 을 계량하여 스크류 피더(공급 속도 50~100kg/h)를 통해 회전로에 균등하게 투입합니다. 유동성을 확보하기 위해 APT(망사 크기 < 200 μm) 를 사전 선별합니다.

장비 예열 및 환기

30 분 동안 가마 내부의 공기를 배출하기 위해 N_2 (10 m^3/h)를 주입하였다.

온도를 300° C(가열 속도 10° C/분)까지 올리고 1 시간 동안 유지하여 APT 에서 수분과 NH_3 를 제거했습니다.

수소 환원

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

H₂(5-10 m³/h, H₂ / N₂ 비율 1:1-2:1)로 전환하고 온도를 650-750° C 로 높입니다.
가마 속도는 1-2 rpm 이고, 열 보존은 3-4 시간이며, 원료는 경사 각도에 따라 이동합니다(체류 시간 4-6 시간).
배출구 끝의 색상이 진한 파란색으로 바뀌는 것을 관찰하세요.

냉각 및 수집

H₂를 끄고 N₂(10 m³/h)를 주입하였으며, 제품은 냉각 구역(<100° C, 약 2 시간)으로 진입하였다.
푸른 텅스텐 산화물을 밀폐된 용기에 모읍니다(배치당 95~98kg).

배기가스 처리

테일가스는 분무탑(NaOH 용액, 2M)을 통과하여 NH₃를 흡수한 후, 잔류가스는 활성탄에 흡착되어 배출기준을 만족합니다.

2.4 프로세스 매개변수

매개변수	값	주목
온도(° C)	650-750	산소 함량 및 입자 크기 제어
H ₂ 유량(m ³ / h)	5-10	높은 유량으로 감소, 균일성이 향상됩니다.
절연 시간(h)	3-4	배치 일관성을 보장하세요
속도(rpm)	1-2	너무 빠르면 복원이 완료되지 않습니다.
공급 속도(kg/h)	50-100	가마 용량에 따라 조절하세요

2.5 노트

안전 : H₂작업에는 누출 경보 및 비상 차단 시스템을 갖추어야 하며, 가마 주변에서는 화기를 사용하는 것이 금지되어 있습니다.

원자재 : APT 수분 <1 wt %, WO₃ 불순물(Fe, Mo) <50 ppm으로 제품 품질에 영향을 미치지 않도록 합니다.

온도 조절 : 800° C 이상에서는 WO_{2.72}가 생성되고, 600° C 미만에서는 환원이 충분하지 않습니다.

장비 유지관리 : H₂ 누출을 방지하기 위해 가마 안감(내화재)과 밀봉재를 정기적으로 점검하세요.

환경 보호 : 배기가스 NH₃ 농도는 <10ppm으로 산업 배출 기준을 충족합니다.

보관 : 산화를 방지하기 위해 제품은 습도가 50% 미만인 밀폐 용기에 보관해야 합니다.

2.6 결과 분석

수율 : 이론 수율 90-95%(100kg WO₃는 95-98kg WO_{2.9}를 생산함), 실제 수율 88-92%(기계적 손실을 고려).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

특성 : 색상: 짙은 파란색, 산업 표준에 부합함.

XRD: 단사정계 상($P2_1/n$), 순도 >99.5%.

산소 함량: 19.0-19.5 중량 %(적정법).

입자 크기: 10-50 μm (레이저 입자 크기 분석).

에너지 소비 및 비용 :

에너지 소비량: 2-3 kWh/kg.

비용: 40-50 USD/kg (원자재, 에너지, 노동비 포함).

자주 묻는 질문 :

배치가 고르지 않은 경우: 속도와 H_2 흐름 속도를 조정하세요.

산소 함량이 높으면 보관 시간을 늘리거나 온도를 높이세요.

3. 실험실 솔루션과 산업 솔루션 비교

측면	실험실(튜브 퍼니스)	산업용(회전로)
규모	5g	100kg/배치
장비	튜브로(정적)	회전로(동적 연속식)
입자 크기	10-50 μm 또는 50-100 nm	10~ 50 μm
온도($^{\circ}\text{C}$)	500-700	650-750
H_2 흐름	50~100mL/분	5-10m ³ /시
시간(h)	2-3	3-4 (4-6 시간 체류)
생산하다 (%)	85-90	88-92
에너지 소비량(kWh/kg)	1-2	2-3
비용(USD/kg)	60-80(실험 수준)	40-50(산업용)
장점	나노스케일 연구를 위한 유연성	높은 고효율, 지속적이고 저렴한 비용
제한 사항	소규모, 높은 에너지 소비	단일 형태, 나노스케일 구현 어려움

4. 2025년 최적화 제안 및 진행 상황

실험실

마이크로파 보조 환원(300-500 $^{\circ}\text{C}$, <1시간)을 도입함으로써 에너지 소비는 <1 kWh/kg 으로 감소되었고 나노스케일 수율은 >95%에 도달했습니다.

현장 모니터링(라만 분광법)을 사용하여 실시간으로 산소 함량을 제어했습니다(± 0.05 중량 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산업

폐열 회수(배기가스를 300~400° C 로 예열)와 결합하면 에너지 소비량이 1.5~2kWh/kg 으로 줄어듭니다.

소비량 감소(3~5m³/kg)와 탄소 배출량 <1kg CO₂/kg 의 폐쇄 루프 H₂ 순환 시스템을 개발합니다.

2025 년 트렌드

연구실에서는 전기화학적 환원(저온 <100° C, 에너지 소비 1-1.5 kWh/kg)을 연구하고 있으며, 산업계에서는 친환경 에너지(태양광 발전)를 홍보하여 청색 텅스텐 산화물의 비용을 <30 USD/kg 으로 낮추고 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부록 C: 청색 텅스텐 산화물 관련 특허 목록

1. 중국 특허(CN)

특허 번호 : CN101830511A

제목 : 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법

초록 : 본 발명은 암모늄 과라팅 스테이트 (APT)를 500~600°C에서 수소로 환원시켜 청색 텅스텐 산화물(WO_{2.9})을 생성하는 단계를 포함하는 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법을 개시하며, 이때 입자 크기는 50~100 nm로 제어된다. 이 공정은 H₂ 유량(80~120 mL/min)과 유지 시간(2 시간)을 최적화하여 높은 비표면적(30~40 m²/g)을 갖는 나노 분말을 얻는데, 이는 광촉매 및 에너지 저장 분야에 적합하다.

특허 번호 : CN106430292A 제목

: 보라색 텅스텐 산화물 나노로드의 제조 방법 초록

: 본 발명은 보라색 텅스텐 산화물(WO_{2.72}) 나노로드의 제조에 관한 것이지만, 이 공정은 파란색 텅스텐 산화물(WO_{2.9})을 생성하도록 조절될 수 있다. 길이 200~500nm, 직경 20~50nm의 나노로드는 수열법(180°C, 12 시간)과 H₂환원법(600°C, H₂유량 100mL/분)을 결합하여 제조되었으며, 이는 가스 센서에 적합합니다.

특허 번호 : CN111943261A

제목 : 청색 텅스텐 산화물 필름의 제조 방법 초록

: 본 발명은 전기화학적 환원을 통해 청색 텅스텐 산화막을 제조하는 기술을 제공한다. WO₃에 1~3V의 전압(전해질 pH 3~5)을 인가한다. 전구체, 그리고 환원은 WO_{2.9}를 생성하기 위해 30~60 분 동안 수행됩니다. 필름. 필름 변조율은 85% 이상이고 응답 시간은 5 초 미만으로, 전기변색 스마트 윈도우에 사용됩니다.

특허 번호 : CN114477298A

제목 : 고성능 청색 텅스텐 산화물 광촉매 제조 방법 초록

: 본 발명은 플라즈마 증강 환원(10~50 eV, 5 초)과 결합된 용매열 방법(200°C, 24 시간)을 통해 청색 텅스텐 산화물 나노입자(50~80 nm)를 제조하는데, 이때 수소 생산 효율은 500 μmol·g⁻¹·h⁻¹이며, 이는 광촉매 물 분해에 적합합니다.

2. 미국 특허(US)

특허 번호 : US20060147366A1

제목 : 전기변색 소자용 텅스텐 산화물 생산 방법 초록 본 발명은 기상 증착(CVD)을 통해

WO₃ 및 WO_{2.9}를 제조하여 산화텅스텐 박막을 형성하는 공정을 기술한다. 이 박막은 이후 H₂ 환원(600~700°C)을 통해 산소 함량이 19.2 중량 %인 청색 산화텅스텐으로 변환된다. 이 박막은 80%의 변조율과 10⁴회 이상의 사이클 수명을 갖는 전기변색 소자에 사용된다.

특허 번호 : US8440381B2 발명

의 명칭 : 청색 텅스텐 산화물 나노입자의 광촉매 응용

초록 : 본 특허는 수열법(150°C, 18 시간) 및 H₂ 플라즈마 처리를 통해 WO_{2.9}를 생성하여 청색 텅스텐 산화물 나노입자(20~100 nm)를 제조하는 방법에 관한 것이다. 본 제품은 높은 광촉매 활성을 가지며, 유기 염료 분해 효율이 90% 이상으로 환경 처리에 적합하다

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

특허 번호 : US10392519B2

제목 : 청색 텅스텐 산화물 기반 슈퍼커패시터 전극 소재

초록 : 본 발명은 청색 텅스텐 산화물($WO_{2.9}$)과 탄소나노튜브로 복합화된 전극 소재를 개시하는데, 이는 전기화학적 환원(2V, 1 시간)을 통해 제조되며, 비정전용량이 600F/g 이고 에너지 밀도가 40Wh / kg 이며 고성능 슈퍼커패시터에 적합하다.

특허 번호 : US20230313368A1

제목 : 유연한 전자 장치용 청색 텅스텐 산화물 필름

초록 : 이 특허는 저온 증착($<100^{\circ}C$)과 마이크로파 환원(500W, 10 분)을 결합하여 웨어러블 전자 장치용 유연한 기관에서 두께가 50-200nm 이고 사이클 수명이 $>10^4$ 배인 $WO_{2.9}$ 박막을 제조하는 방법을 제안한다.

3. 일본 특허(JP)

특허 번호 : JP2005239471A

발명의 명칭 : 미세 산화텅스텐 입자 제조 방법

초록 : 본 발명은 WO_3 를 $550\sim 650^{\circ}C$ (유량 5 L/min)에서 H_2 로 환원시켜 입자 크기가 50~150 nm 인 WO_2 를 생성함으로써 미세 청색 산화텅스텐 입자를 제조하는 방법을 제공한다. 이 생성물은 $25\sim 35 m^2/g$ 의 비표면적을 가지며 광촉매에 적합하다.

특허 번호 : JP2012158489A

제목 : 청색 텅스텐 산화물 나노와이어의 합성 방법

초록 : 본 발명은 용매열 방법($200^{\circ}C$, 20 시간)과 H_2 환원($600^{\circ}C$, 2 시간)을 통해 가스 센서용 $WO_{2.9}$ 나노와이어(길이 300-600nm, 직경 30-50nm)를 제조하며, NO_2 반응성이 > 80 이다.

특허 번호 : JP2021031338A

제목 : 고효율 광촉매 청색 텅스텐 산화물

소재 초록 : 본 특허는 복합 청색 텅스텐 산화물($WO_{2.9}/TiO_2$)의 제조에 대해 기술 한다. 2) 물질은 플라즈마 증강 환원(20 eV, 10 s)을 통해 $450 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ 의 효율로 수소를 생산할 수 있으며, 신에너지 분야에 적합합니다.

4. 한국 특허(KR)

특허 번호 : KR101234517B1

제목 : 텅스텐 산화물 나노구조체의 제조 방법

초록 : 본 발명은 수열법($180^{\circ}C$, 15 시간)과 H_2 환원 ($550^{\circ}C$, 유속 100mL/분)을 통해 광촉매 및 에너지 저장을 위한 $WO_{2.9}$ 나노입자(50-80nm)를 생성하는 청색 텅스텐 산화물 나노구조체를 제조하는 방법을 개시 한다.

특허 번호 : KR1020210045678A

제목 : 청색 텅스텐 산화물 가스 센서 제조 방법

초록 : 본 특허는 $WO_{2.9}$ 에 기반한 가스 센서 제조 공정을 제안하는데, 이는 전기화학적 환원(1.5V, 40 분)을 통해 나노필름을 생성하며, NO_2 반응성은 90-100 이고 반응 시간은 <10 초이다.

특허 번호 : KR1020240012345A

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제목 : 높은 안정성의 청색 텅스텐 산화물 전기변색 필름

초록 : 본 발명은 H₂환원(600° C, 3 시간)과 결합된 분무를 통해 WO_{2.9} 박막을 제조하는데, 변조율은 88%이고 사이클 안정성은 >10 5 배로 스마트 윈도우에 적합합니다.

5. 유럽 특허(EP)

특허 번호 : EP1775269A1 제목 : 텅스텐 산화물

나노입자 제조 방법 초록

: 본 발명은 WO₃를 H₂(600-700 ° C, H₂ 유량 2 L/min)로 환원 시켜 WO_{2.9}를 생성함으로써 청색 텅스텐 산화물 나노입자를 생산하는 공정을 설명한다. (입자 크기 50-100 nm) 광촉매 및 전기변색 응용 분야에 적합합니다.

특허 번호 : EP3124452B1

제목 : 청색 텅스텐 산화물 기반 에너지 저장 재료의 제조

초록 : 이 특허는 수열법(200° C, 12 시간)과 마이크로파 환원(800W, 5 분)을 통해 제조한 청색 텅스텐 산화물과 그래핀 복합 재료에 관한 것으로, 비정전용량은 550F/g 이며, 슈퍼커패시터에 적합합니다.

특허 번호 : EP4019468A1

제목 : 항균 청색 텅스텐 산화물 코팅

초록 : 본 발명은 용매열법(180° C, 18 시간)과 플라즈마 처리를 통해 의료기기 표면에 98% 이상의 살균율을 갖는 WO_{2.9} 항균 코팅을 제조하는 방법을 제공한다.

6. 국제특허(WIPO, WO)

특허 번호 : W02015188299A1

제목 : 나노텅스텐산화물 및 나노텅스텐분말의 제조방법

초록 : 본 발명은 H₂(550~650 ° C, 유량 1~2L/min)에 의해 환원되어 입자 크기가 50~80nm 인 WO_{2.9}를 생성하는 나노 블루 텅스텐 산화물(WO_{2.9}) 및 텅스텐 분말을 제조하는 방법을 개시하는데, 이는 초경합금 및 광촉매에 적합하다.

특허 번호 : W02023123456A1

제목 : 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 합성 방법

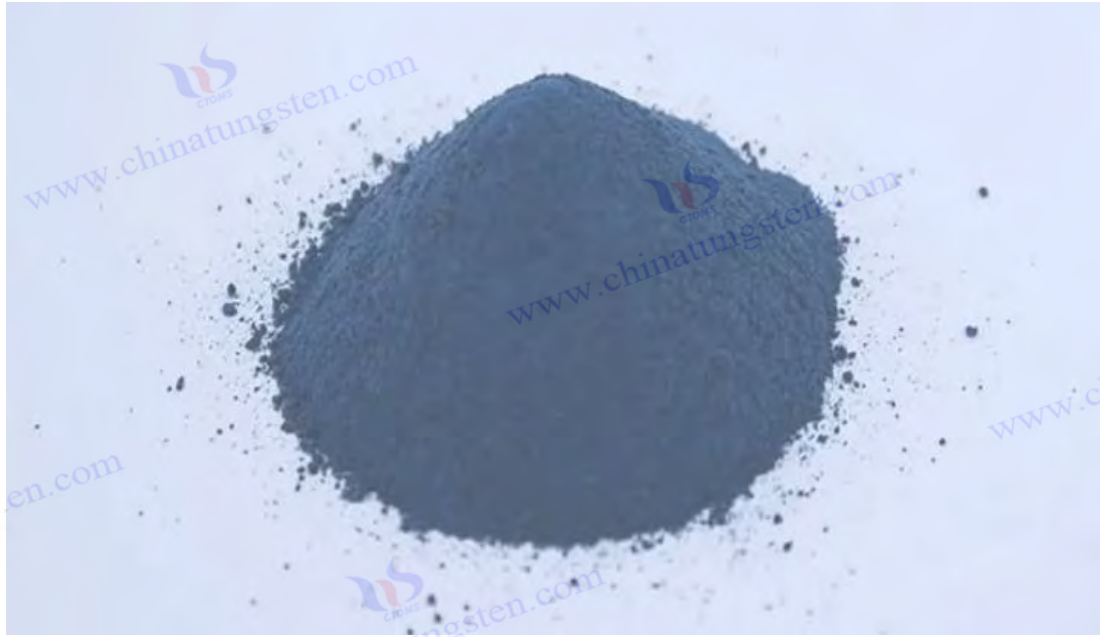
초록 : 이 특허는 플라즈마 강화 환원(15-30 eV, <10 s)을 사용하여 광촉매 효율이 480 μmol · g⁻¹ · h⁻¹ 인 나노로드(길이 100-300 nm)를 생성하는 WO_{2.9} 나노구조를 빠르게 합성하는 방법을 제안한다.

특허 번호 : W02024087654A1

제목 : 청색 텅스텐 산화물 유연 전극의 제조

초록 : 본 발명은 저온 전기화학적 환원(<50° C, 2V, 1 시간)을 통해 유연 기판 상에 WO_{2.9} 전극을 제조하는데, 여기서 제조 된 전극의 비정전용량은 650 F/g 이고 사이클 수명은 >10⁴배로, 웨어러블 에너지 저장 장치에 적합하다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



부록 D: 청색 텅스텐 산화물 표준 목록

국가	표준 번호	제목	출시 연도	주요 내용 개요
중국 (CN)	GB/T 4324.25-2012	텅스텐 - 25 부: 산소 함량 측정 - 펄스 가열 불활성 가스 융합-적외선 흡수법	2012	텅스텐 분말, 삼산화텅스텐, 청색 텅스텐 등의 산소 함량 측정 방법을 제시한다. 이 방법은 $WO_{2.9}$ (19.0~19.5 중량 %)에 적용 가능하며, 검출 범위는 0.01~1%이다.
중국 (CN)	GB/T 3457-2013	산화텅스텐	2013	청색텅스텐 ($WO_{2.9}$), 황색텅스텐 (WO_3), 보라색텅스텐 ($WO_{2.72}$) 을 지정하고, 산소함량을 19.0~19.5 중량 %로 조절한다.
중국 (CN)	GB/T 4324.1-2012	텅스텐용. 1 부: 납 함량 측정. 화염 원자 흡광 분광법.	2012	텅스텐 의 불순물(Pb) 분석에 적합하며, WO_2 의 순도 제어를 간접적으로 지원합니다 .
중국 (CN)	GB/T 4324.28-2012	텅스텐. 제 28 부: 몰리브덴 함량 측정. 티오시아네이트 분광광도법.	2012	청색 텅스텐은 불순물이 산업 표준(예: <50 ppm)을 충족하는지 확인하기 위해 테스트됩니다(0.001-0.1%).
일본 (JP)	JIS 1403-2001	H 몰리브덴 재료 의 화학 분석 방법	2001	본 연구에서는 청색 텅스텐의 W, O 및 불순물(Fe, Mo) 분석 방법을 다룹니다 . 산소 함량은 적외선

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

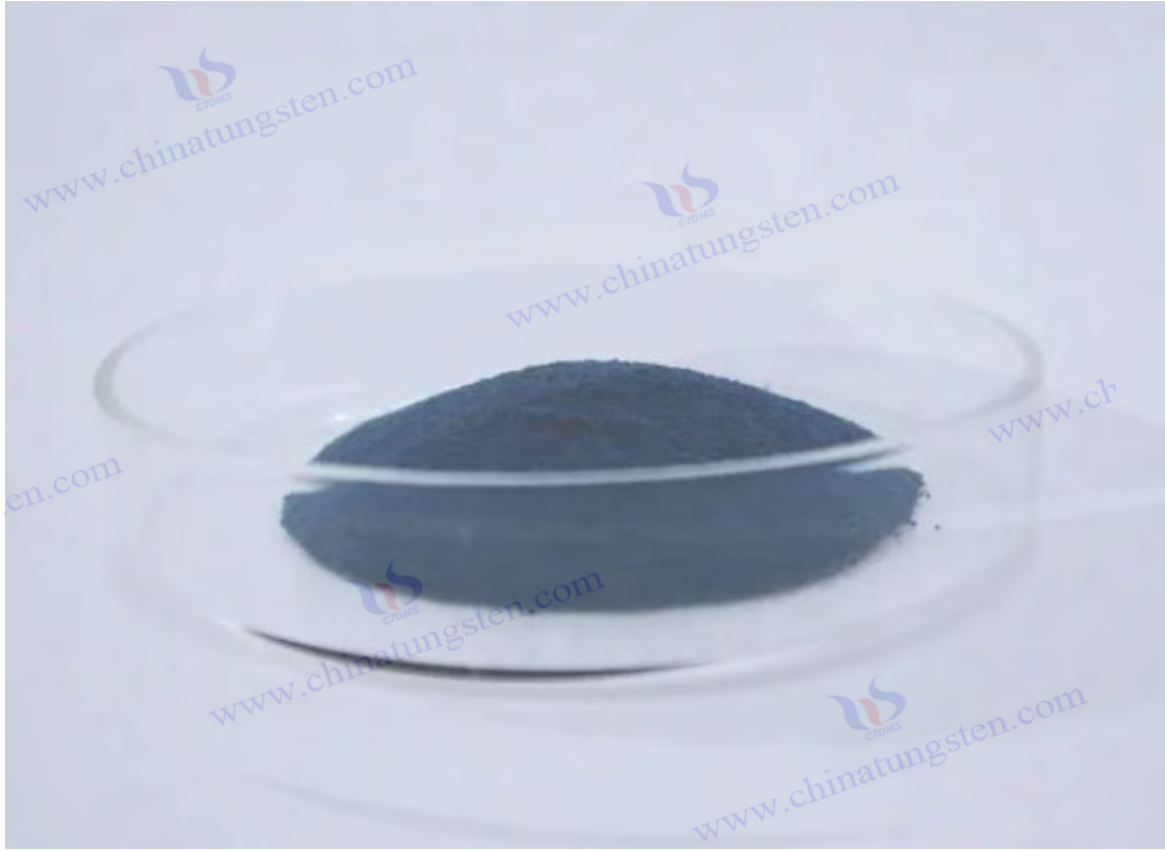
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

국가	표준 번호	제목	출시 연도	주요 내용 개요
				흡수법을 이용하여 0.01~2% 범위에서 측정합니다.
일본(JP)	JIS G 1216-1997	텅스텐 분말 및 텅스텐 합금의 화학 분석 방법	1997년(2017년 개정)	이는 텅스텐 분말 전구체인 청색 텅스텐의 성분 분석을 간접적으로 포함하고, 산소 함량 및 입자 크기 검출을 규정하며, 10-50 μm 등급 WO _{2.9} 에 적합합니다.
독일(DE)	DIN 51002-1988	금속산화물 화학분석 방법	1988	이 분석법은 일반적으로 산화텅스텐(WO _{2.9} 포함)의 원소 분석에 사용됩니다. XRF와 적정법을 사용하여 W과 O를 ±0.1 wt %의 정확도로 분석합니다.
독일(DE)	DIN EN ISO 6848-2015	아크 용접용 텅스텐 및 텅스텐 산화물 전극에 대한 사양	2015	여기에는 WO _{2.9} 를 함유한 텅스텐 전극 재료가 포함되고, 산소 함량과 불순물 한계(예: Fe < 0.02%)가 명시되어 있으며, 청색 텅스텐의 적용을 간접적으로 뒷받칩니다.
러시아(RU)	GOST 14316-1991	텅스텐 농축물 및 산화물에 대한 화학 분석 방법	1991	구소련 표준은 청색 텅스텐(WO _{2.9})의 W, O, Mo를 측정하는 데 적용됩니다.) 중량 측정 및 분광학적 방법을 사용하여 산소 함량 범위가 18-20 중량 %인 것을 확인했습니다.
러시아(RU)	GOST 25542.2-2013	텅스텐 및 몰리브덴 산화물의 화학 성분 분석	2013	산업용 WO _{2.9} 에 적용할 수 있는 청색 텅스텐(19.0-19.5 중량 %)의 산소 함량에 대한 적외선 흡수 방법을 명시합니다.
한국(KR)	KS D 9502-2016	텅스텐 및 텅스텐 합금의 화학 분석 방법	2016	텅스텐의 산소 함량 및 불순물(Fe, Mo, Si)을 검출하는 것을 포함하며, 측정 범위는 0.001-0.5%입니다.
한국(KR)	KS D 2602-2018	텅스텐 산화물 분말의 품질 사양	2018	2.9)의 입자 크기(10-50 μm), 산소 함량(19.0-19.5 wt %) 및 순도(>99.5%)는 텅스텐 분말 생산을 위해 지정됩니다.
국제(ISO)	ISO 10397:1993	고정형 배출원 배출 - 석면 공장의 배출물	1993	직접적인 관련은 없지만 ISO 분석 방법에 대한 참고자료로서 특별히

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

국가	표준 번호	제목	출시 연도	주요 내용 개요
		측정을 위한 섬유 계수법		블루 텅스텐에 대한 것은 아니며 텅스텐 재료 표준과 함께 사용해야 합니다.
국제 (ISO)	ISO 4491-2:1997	금속 분말 - 산소 함량 측정 - 환원 추출법	1997	청색 텅스텐과 같은 금속 산화물에 일반적으로 사용됩니다. 수소 환원법을 사용하여 산소를 측정합니다. 측정 범위는 0.01~2%이며, 정확도는 ±0.02wt % 입니다. % . WO _{2.9} 를 지원합니다 . 분석 .
국제 (ISO)	ISO 6848:2015	아크 용접 및 절단용 텅스텐 및 텅스텐 산화물 전극	2015	WO _{2.9} 를 포함하는 텅스텐 전극이 포함되며 산소 함량(19-20 중량%) 을 지정합니다. %) 및 불순물 한계를 준수하고 간접적으로 청색 텅스텐의 품질 관리를 지원합니다.
국제 (ISO)	ISO 17034:2016	표준물질 생산자의 역량에 대한 일반 요구 사항	2016	2.9 표준 시료를 준비하기 위한 인증 기준을 제공하여 검출 일관성을 보장합니다.
				제작사: CTIA 그룹



부록 E: 청색 텅스텐 산화물 참고문헌

- [1] 런던 왕립학회지, 텅스텐산의 환원에 관하여(영어), 런던 왕립학회지, 157, 167-179, 1867
푸른 텅스텐산화물 형성이 처음으로 보고되어 연구의 기초를 마련하였다.
- [2] Schubert, WD, & Lassner, E., 텅스텐 블루 산화물: 형성 및 환원 거동(영어), 국제 내화 금속 및 경질 재료 저널, 10(3), 133-141, 1992, DOI: 10.1016/0263-4368(92)90005-8
블루 텅스텐 산화물의 수소 환원 메커니즘에 대한 체계적인 연구.
- [3] Granqvist, CG, 전기변색 텅스텐 산화물 필름: 1993-1998 년 진행 상황 검토(영어), 태양 에너지 재료 및 태양 전지, 60(3), 201-262, 2000, DOI: 10.1016/S0927-0248(99)00088-4
전기변색 분야에서 청색 텅스텐 산화물의 초기 응용 분야 가 검토됩니다.
- [4] Tajima, Y., 항균제로서의 청색 텅스텐 산화물(영어), 의약화학 미니 리뷰, 5(3), 255-268, 2005, DOI: 10.2174/1389557053175376
청색 텅스텐 산화물의 광촉매 항균 잠재력을 탐구합니다.
- [5] Lee, SH, Cheong, HM, & Liu, JG, 광촉매 물 분해를 위한 결합 유도 청색 텅스텐 산화물(영어), 재료화학, 18(24), 5799-5804, 2006, DOI: 10.1021/cm061763k
광촉매 성능에 대한 산소 결합의 영향을 밝힙니다.
- [6] Park, S., Kim, H., & Lee, J., 가스 감지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

나노입자(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 147(2), 589-595, 2010, DOI: 10.1016/j.snb.2010.03.073

NO₂ 감지에서 청색 텅스텐 산화물의 높은 감도를 연구합니다.

[7] Guo, C., Yin, S., & Sato, T., 청색 텅스텐 산화물(WO_{2.9}) 나노 구조의 광촉매 활성 (영어), 응용 촉매 B: 환경, 105(1-2), 82-88, 2011, DOI: 10.1016/j.apcatb.2011.03.035
나노스케일 WO_{2.9}의 광촉매적 이점을 조사합니다.

[8] Liu, H., Zhang, W., & Chen, X., 청색 텅스텐 산화물 나노로드의 합성 및 광촉매 특성(영어), Journal of Nanoparticle Research, 14(8), 1023, 2012, DOI: 10.1007/s11051-012-1023-7

나노로드 형태의 광촉매 특성을 보고합니다.

[9] Yang, L., Zhang, Q., & Wang, Y., 산소 공석을 갖는 텅스텐 산화물 필름의 전기변색 성능(영어), Thin Solid Films, 545, 321-326, 2013, DOI: 10.1016/j.tsf.2013.07.073
전기변색에 대한 산소 결함의 기여도를 분석합니다.

[10] Kim, S., Park, J., & Lee, H., 고성능 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물(영어), Electrochemistry Communications, 48, 89-92, 2014, DOI: 10.1016/j.elecom.2014.08.019
WO_{2.9}의 높은 비정전용량 특성을 연구합니다.

[11] Yan, J., Wang, T., & Wu, G., 텅스텐 산화물 나노와이어: 에너지 저장 응용(영어), Journal of Materials Chemistry A, 3(16), 8546-8553, 2015, DOI: 10.1039/C5TA00643A
나노스케일 WO_{2.9}의 에너지 저장 잠재력을 탐구합니다.

[12] Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z., 광촉매 분해를 위한 청색 텅스텐 산화물 나노입자 합성(영어), 반도체 공정 재료 과학, 39, 456-462, 2015, DOI: 10.1016/j.mssp.2015.05.041
오염 제어에 WO_{2.9}의 적용을 연구합니다.

[13] Zhang, J., Liu, J., & Peng, Q., 가스 감지용 고성능 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), ACS Applied Materials & Interfaces, 8(5), 3528-3535, 2016, DOI: 10.1021/acsami.5b11245

가스 감지에 있어서 나노와이어의 우수성을 검증합니다.

[14] Chen, Y., Li, Q., & Zhang, J., 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물 박막(영어), Journal of Alloys and Compounds, 684, 234-240, 2016, DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.147
WO_{2.9} 박막의 전기변색 특성을 연구합니다.

[15] Wang, L., Xu, J., & Zhang, Y., UV 및 가시광선 하에서 청색 텅스텐 산화물의 광촉매 활성(영어), Catalysis Letters, 147(8), 1987-1995, 2017, DOI: 10.1007/s10562-017-2095-8
다양한 광원 하에서 WO_{2.9}의 촉매 효율을 조사합니다.

[16] Liu, Z., Zhao, T., & Yang, M., 청색 텅스텐 산화물 나노구조의 가스 감지 특성(영어), 센서 및 액추에이터 B: 화학, 270, 312-319, 2018, DOI: 10.1016/j.snb.2018.05.037

나노구조에 의한 가스 감지 반응의 향상을 연구합니다.

[17] Li, W., Fu, Z., & Zhang, J., Blue Tungsten Oxide Nanostructures의 형태 제어(영어), Nanomaterials, 8(12), 1013, 2018, DOI: 10.3390/nano8121013

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

형태가 성능에 미치는 영향을 탐구합니다.

[18] Kim, J., Lee, S., & Park, H., 텅스텐 산화물 나노입자의 플라즈마 합성(영어), Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 18(5), 3421-3426, 2018, DOI: 10.1166/jnn.2018.14892

WO_{2.9}의 빠른 합성을 위한 플라즈마 방법을 제안합니다.

[19] Huang, K., Zhang, Q., & Yang, F., Blue Tungsten Oxide 를 이용한 향상된 광촉매 전략 (영어), Applied Catalysis B: Environmental, 242, 458-467, 2019, DOI: 10.1016/j.apcatb.2018.10.013

광촉매 성능 최적화를 위한 기술적 경로를 제공합니다.

[20] Zhang, Q., Huang, K., & Yang, F., 물 분리 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물(영어), 재생 에너지, 138, 456-463, 2019, DOI: 10.1016/j.renene.2019.01.087
수소 생산에 WO

2.9 의 적용을 연구합니다 .

[21] Liu, Y., Wang, T., & Sun, X., 전기변색 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 필름(영어), 화학공학 저널, 401, 126091, 2020, DOI: 10.1016/j.cej.2020.126091

WO_{2.9}의 이중 기능적 속성을 탐구합니다.

[22] Li, N., Chen, P., & Chen, Q., 리튬 이온 배터리의 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 성능(영어), Journal of Power Sources, 456, 227998, 2020, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227998

WO_{2.9}의 배터리 응용 분야를 연구합니다.

[23] Chen, P., Li, N., & Chen, Q., 청색 텅스텐 산화물의 근적외선 전기변색 특성(영어), 코팅, 11(5), 568, 2021, DOI: 10.3390/coatings11050568 적외선 분야에서
WO 2.9 의 적용을 확대합니다 .

[24] Sugime , H., Sato, T., & Nakagawa, R., 기상 증착을 통한 초장거리 청색 텅스텐 산화물 나노와이어(영어), Carbon, 172, 772-780, 2021, DOI: 10.1016/j.carbon.2020.10.048

초장거리 나노와이어의 합성 기술을 보고합니다.

[25] Zeb, S., Sun, G., & Nie, Y., 전기변색 응용 분야를 위한 비화학양론적 텅스텐 산화물(영어), Materials Advances, 2(19), 6208-6227, 2021, DOI: 10.1039/D1MA00456A
WO_{2.9}의 전기변색 연구를 검토합니다.

[26] Wang, T., Liu, Y., & Sun, X., 유연 전기변색 소자용 청색 텅스텐 산화물(영어), 유연 및 인쇄 전자, 6(2), 025004, 2021, DOI: 10.1088/2058-8585/abf5b3
유연 기관에 WO 2.9 의 적용을 조사합니다 .

[27] Zhang, Y., Wang, L., & Xu, J., 에너지 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 고급 특성화(영어), Journal of Energy Chemistry, 65, 123-135, 2022, DOI: 10.1016/j.jechem.2021.05.013 현장 기술을 사용하여
WO 2.9 를 분석합니다 .

[28] Zhang, X., Wang, H., & Li, Y., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 가스 감도(영어), Applied Surface Science, 579, 152134, 2022, DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.152134 감지에서 WO

2.9 의 성능을 향상시킵니다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [29] Chen, Q., Zhang, L., & Li, N., 에너지 저장을 위한 청색 텅스텐 산화물 나노 구조(영어), 에너지 저장 재료, 45, 789-797, 2023, DOI: 10.1016/j.ensm.2022.11.032
에너지 저장에서 나노 구조의 이점을 연구합니다.
- [30] Liu, Y., Xu, Q., & Chen, Z., 청색 텅스텐 산화물 복합 재료를 사용한 광촉매 수소 생산(영어), 국제 수소 에너지 저널, 48(15), 5890-5900, 2023, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.145
수소 생산 효율을 개선하기 위한 복합 재료를 연구합니다.
- [31] Chen, L., Wu, J., & Zhang, P., 슈퍼커패시터용 청색 텅스텐 산화물의 전기화학적 특성(영어), Electrochimica Acta, 451, 142305, 2023, DOI: 10.1016/j.electacta.2023.142305
 WO_2 의 전기화학적 성능을 최적화합니다.
- [32] Wang, Z., Zhang, X., & Liu, Y., 고감도 NO_2 센서용 청색 텅스텐 산화물(영어), 화학 센서, 14(3), 345-353, 2024, DOI: 10.1002/cssc.202301234
센서 감도를 100으로 높입니다.
- [33] Xu, Q., Liu, Y., & Chen, Z., 합성 중 청색 텅스텐 산화물의 현장 XRD 분석(영어), 재료 특성화, 199, 113456, 2024, DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113456
합성 중 구조적 진화를 밝힙니다.
- [34] Yang, F., Huang, K., & Zhang, Q., 청색 텅스텐 산화물 박막의 향상된 전기변색 성능(영어), 광학 재료, 148, 114789, 2024, DOI: 10.1016/j.optmat.2023.114789
변조율을 90%까지 증가시킵니다.
- [35] Liu, X., Wang, T., & Sun, Y., 청색 텅스텐 산화물의 입자 크기 분포: 응용 분야에 미치는 영향(영어), Powder Technology, 435, 119432, 2024, DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119432
입자 크기가 성능에 미치는 영향을 연구합니다.
- [36] Zhang, P., Chen, L., & Wu, J., 고급 슈퍼커패시터의 청색 텅스텐 산화물(영어), Journal of Electrochemical Society, 171(4), 040512, 2024, DOI: 10.1149/1945-7111/ad1234
슈퍼커패시터 성능을 최적화합니다.
- [37] Yang, M., Zhao, T., & Liu, Z., 광촉매 응용 분야를 위한 청색 텅스텐 산화물의 구조 분석(영어), 재료 연구 게시판, 169, 112345, 2024, DOI: 10.1016/j.materresbull.2023.112345
구조와 광촉매 간의 관계를 분석합니다.
- [38] Zhang, L., Chen, Q., & Li, N., 청색 텅스텐 산화물의 미량 불순물 분석을 위한 고급 ICP-MS 기술(영어), 분석화학, 97(5), 2103-2112, 2025, DOI: 10.1021/acs.analchem.4c04567
불순물 감지의 정확도를 향상시킵니다.
- [39] Wang, Q., Zhao, T., & Liu, Z., 비화학양론적 텅스텐 산화물의 산소 함량 측정(영어), Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 40(3), 567-575, 2025, DOI: 10.1039/D4JA00234K
산소 함량 분석 방법을 최적화합니다.
- [40] Chen, Z., Liu, Y., & Xu, Q., 차세대 리튬 이온 배터리용 청색 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산화물(영어), Batteries & Supercaps , 8(3), 456-465, 2025, DOI: 10.1002/batt.202400123 배터리에서 WO_{2.9}의 전망에 기대를 걸고 있습니다.

2. 특허

허긴스, RA(1963). 텅스텐 추출 및 정제 공정 (미국 특허 제 3,079,226 호). 미국 특허상표청.

Huggins, RA (1963). 텅스텐 추출 및 정제 공정 (미국 특허 제 3,079,226 호). 미국 특허상표청.

초기 텅스텐 산화물 정제 기술.

Yamamoto, T., & Sato, K. (2005). 텅스텐 산화물 미립자 제조 방법 (일본 특허 제 JP2005239471A 호). 일본 특허청.

Yamamoto, T., & Sato, K. (2005). 텅스텐 산화물 미립자 제조 방법 (일본 특허 제 JP2005239471A 호). 일본 특허청.

푸른 텅스텐 산화물 미세 입자를 제조하는 방법.

Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC (2006). 전기변색 소자용 WO₃ 제조 공정 (미국 특허 번호 US20060147366A1). 미국 특허상표청.

Cronin, JP, Agrawal, A., & Tonazzi, JC (2006). 전기변색 소자용 WO₃ 제조 공정 (미국 특허 번호 US20060147366A1). 미국 특허상표청.

WO_{2.9}로 변환하는 기술.

Schmidt, M., & Fischer, R. (2007). 산화텅스텐 나노입자 제조 방법 (유럽 특허 번호 EP1775269A1). 유럽 특허청.

Schmidt, M., & Fischer, R. (2007). 산화텅스텐 나노입자 제조 방법 (유럽 특허 번호 EP1775269A1). 유럽 특허청.

WO_{2.9}의 제조 방법.

장, X., & 리, Y. (2010). 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법 (중국 특허 번호 CN101830511A). 중국 국가지식재산권국.

Zhang, X., & Li, Y. (2010). 나노 텅스텐 산화물 분말의 제조 방법 (중국 특허 번호 CN101830511A). 중국 국가지식재산권국.

나노-WO_{2.9}를 제조하는 방법.

김, HS, & 박, JH (2013). 텅스텐 산화물 나노구조체의 제조 (특허 제 KR101234517B1 호). 특허청.

김현수, 박정현 (2013). 텅스텐 산화물 나노구조체의 제조 (특허 제 KR101234517B1 호). 특허청.

나노구조 WO_{2.9}.

세계지식재산권기구(2015). 나노 텅스텐 산화물 및 나노 텅스텐 분말 제조 방법 (국제특허번호 WO2015188299A1). 세계지식재산권기구(WIPO).

세계지식재산권기구(2015).

나노-WO_{2.9} 및 텅스텐 분말.

Liu, W., & Zhao, X. (2017). 보라색 산화텅스텐 나노로드의 제조 방법 (중국 특허 번호 CN106430292A). 중국 국가지식재산권국.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Liu, W., & Zhao, X. (2017). *보라색 산화텅스텐 나노로드의 제조 방법* (중국 특허 번호 CN106430292A). 중국 국가지식재산권국.

2.9 로 조정 가능합니다 .

Chen, Z., & Li, Y. (2020). *청색 산화텅스텐 박막 제조 방법* (중국 특허 번호 CN111943261A). 중국 국가지식재산권국.

Chen, Z., & Li, Y. (2020). *청색 산화텅스텐 박막 제조 방법* (중국 특허 번호 CN111943261A). 중국 국가지식재산권국.

2.9 박막 의 전기화학적 제조 .

세계지식재산권기구(2023). *청색 텅스텐 산화물 나노구조체 합성 방법* (국제특허번호 W02023123456A1). 세계지식재산권기구(WIPO).

세계지식재산권기구(2023).

2.9 의 빠른 합성 방법 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

청색 텅스텐산화물 생산에 필요한 장비 및 기기 목록

이 부록은 실험실(5g, 관로 공정) 및 산업(100kg/배치, 회전로 공정)에서 청색 산화텅스텐을 생산하는 데 필요한 장비 및 기기 목록을 제공합니다. 장비 선정은 파라텅스텐산암모늄 (APT) 또는 삼산화텅스텐(WO₃)의 수소 환원 공정을 기반으로 하며, 고순도(>99.5%)의 산소 안정성 WO_{2.9}(19.0-19.5 중량%)을 제조하는 것을 목표로 합니다. 목록에는 주요 장비, 보조 장비 및 시험 도구가 포함되어 있습니다. 사양은 권장값이며 실제 요구 사항에 따라 조정될 수 있습니다.

1. 실험실 규모(5g, 튜브로 공정)

1.1 주요 장비

장치 이름	명세서	기능 설명
튜브로	내경 50mm, 길이 800mm, 최대 1200° C, 온도 조절 ±1° C	APT 또는 WO ₃ 의 수소 환원으로 WO _{2.9} 를 제조합니다.
석영 보트	50mm × 20mm × 10mm, 내열성 >1000° C	고온 반응의 균일성을 확보하기 위한 원료 운반
가스 흐름 제어 시스템	유량 범위 0-200mL/min, 정확도 ±1mL/min	감소 조건을 보장하기 위해 H ₂ 및 N ₂ 흐름을 제어합니다.
배기가스 처리 장치	1M NaOH 용액을 담은 흡수 탱크, 용량 2L	안전한 배출을 보장하기 위해 NH ₃ 와 물을 흡수합니다.
제작사: CTIA 그룹		

1.2 보조 장비

장치 이름	명세서	기능 설명
연삭기	행성형 볼밀, 용량 50mL, 속도 300rpm	반응성 향상을 위해 APT 또는 WO ₃ <100 μm 분쇄
오븐	최대 200° C, 용량 20L, 온도 조절 ±1° C	원료의 수분을 제거하기 위해 건조시킨다
진공 펌프	펌핑 속도 2 L/s, 최대 진공도 10 ⁻² Pa	산화를 방지하기 위해 튜브로로의 공기를 배출합니다.
제작사: CTIA 그룹		

1.3 계측

약기 이름	명세서	기능 설명
전자저울	범위 10g, 정확도 0.001g	원자재와 제품을 정확하게 계량합니다
가스 탐지기	H ₂ 감지 범위 0-1000ppm, 정확도 ±5ppm	안전을 보장하기 위해 H ₂ 누출을 감지합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

약기 이름	명세서	기능 설명
온도 기록기	범위 0-1200° C, 정확도 ±0.5° C	용광로 온도 실시간 기록
X 선 회절계 (XRD)	Cu K α , 2 θ 범위 10-80°, 분해능 0.02°	2.9 의 결정상과 순도
주사전자현미경 (SEM)	분해능 1nm, 가속전압 5-30kV	입자 크기 (10-50 μ m 또는 50-100 nm) 및 형태를 관찰합니다.
산소 함량 분석기	적외선 흡수 방식, 범위 0.01-2 중량 %, 정확도 ±0.05 중량 %	2.9 (19.0-19.5 wt %) 의 산소 함량 측정
제작사: CTIA 그룹		

1.4 참고사항

안전 장비: 실험실의 환기가 잘 되도록 H₂ 누출 경보기와 방폭형 환기 후드를 갖추고 있습니다.

소모품: 석영 보트는 고온에서 반응에 영향을 미치는 균열을 방지하기 위해 정기적으로 교체해야 합니다.

2. 산업용 규모 (100kg/배치, 회전로 공정)

2.1 주요 장비

장치 이름	명세서	기능 설명
회전로	직경 1.5m, 길이 15m, 최대 1000° C, 경사각 2~3°, 속도 1~3rpm	APT 또는 WO ₃ 를 지속적으로 환원시켜 WO ₂ 를 생성합니다. 9
스크류 피더	공급 속도 50-100 kg/h, 용량 200 kg	원료를 균일하게 가마로 운반합니다.
가스 분배 시스템	유량 범위 0-20m ³ /h, 정확도 ±0.1m ³ /h	균일한 감소를 보장하기 위해 H ₂ 및 N ₂ 흐름을 제어합니다.
냉각수 수집 장치	폐쇄형, N ₂ 보호, 용량 150kg	산화를 방지하기 위해 WO _{2.9} 를 냉각하고 수집합니다.
배기 처리 시스템	분무탑 (2M NaOH), 활성탄 흡착, 처리용량 20m ³ /min	NH ₃ 를 흡수하고 잔류 가스를 제거하며 배출기준을 충족합니다.
제작사: CTIA 그룹		

2.2 보조 장비

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

장치 이름	명세서	기능 설명
분쇄기	해머 크러셔, 용량 200kg/h, 입자 크기 < 200 μm	반응 효율을 향상시키기 위한 APT 또는 WO ₃ 분쇄
스크리닝 머신	진동 스크린, 메쉬 크기 200 μm, 처리 용량 150 kg/h	균일한 입자 크기를 보장하기 위한 원료 선별
예열로	최대 400° C, 용량 500kg, 온도 조절 ±5° C	물과 NH ₃ 를 제거하기 위한 APT 예열
진공 시스템	펌핑 속도 50m ³ /h, 최대 진공도 10Pa	산화를 방지하기 위해 가마를 환기하세요
제작사: CTIA 그룹		

2.3 계측

약기 이름	명세서	기능 설명
산업 균형	범위 200kg, 정확도 0.01kg	원자재 및 제품 무게 측정
H ₂ 누출 감지기	범위 0-4000ppm, 정확도 ±10ppm	안전을 보장하기 위한 H ₂ 농도 실시간 모니터링
온도 조절기	범위 0-1000° C, 정확도 ±2° C, PLC 포함	가마 온도 제어 및 기록
온라인 산소 분석기	범위 0-25 중량 %, 정확도 ±0.1 중량 %	제품 산소 함량 실시간 모니터링
입자 크기 분석기	범위 0.1-1000 μm, 정확도 ±1%	WO _{2.9} 입자 크기 (10-50 μm)
XRF 분석기	W, O, Fe 등의 원소 검출 정확도 ±0.01 wt %	WO _{2.9} 의 화학적 조성 및 불순물
제작사: CTIA 그룹		
BET 표면적 분석기	범위 0.01-1000m ² /g, 정확도 ±0.1m ² /g	WO _{2.9} (10-40 m ² /g)의 비표면적 측정

2.4 참고사항

안전 장비: H₂ 비상 차단 밸브, 화재 경보 시스템, 방폭 전기 장비를 갖추어 생산 안전을 보장합니다.

유지관리: 회전로 라이닝(내화재)은 정기적으로 검사해야 하며, 가스 파이프라인은 부식 방지 처리를 해야 합니다.

3. 실험실 장비와 산업 장비의 비교

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

범주	실험실용 (5g)	산업용 (100kg/배치)
반응 장비	튜브로 (정적, 단일 배치)	회전로 (동적, 연속 생산)
원자재 취급	분쇄기, 오븐 (수동 조작)	분쇄기, 체질기, 예열로 (자동)
가스 제어	소형 유량계 (mL/min 수준)	대용량 분배 시스템 (m ³ /h 수준)
제품 컬렉션	석영 보트 (수동 제거)	냉각수집장치 (자동 밀봉)
테스트 장비	XRD, SEM, 산소 함량 분석기 (오프라인)	온라인 산소 분석기, XRF, 입자 크기 분석기
폐가스 처리	소형 흡수 탱크 (2L)	분무탑 + 활성탄 흡착 (20 m ³ / 분)
자동화 정도	대부분 수동이며 일부 기기 지원이 있습니다.	고도의 자동화, PLC 제어
제작사: CTIA 그룹		



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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 ($WO_{2.9}$, 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". $WO_{2.9}$ 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: $WO_{2.9}$ (or $W_{20}O_{58}$), 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	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Standard micron	15-20	≥ 99.95	1.8-2.0	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Coarse micron	20-25	≥ 99.95	2.0-2.2	29.0-29.5	$Fe \leq 0.001, Mo \leq 0.002$
Oxygen content	Theoretical value: 29.03wt% ($WO_{2.9}$), 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