

황색 텅스텐 트리 옥사이드 란 무엇입니까

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

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

CTIA GROUP LTD 는 CHINATUNGSTEN ONLINE 이 설립한 완전 자회사로, 독립적인 법인격을 갖추고 있습니다. 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 소재의 지능적이고 통합적이며 유연한 설계 및 제조를 촉진하는 데 전념하고 있습니다. 1997년 www.chinatungsten.com 을 시작점으로 설립된 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 중국 최초의 최고급 텅스텐 제품 웹사이트로, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업에 중점을 둔 중국을 선도하는 전자상거래 기업입니다. CTIA 그룹은 텅스텐과 몰리브덴 분야에서 30 년 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 ONLINE 은 20 개 이상의 다국어 텅스텐 및 몰리브덴 전문 웹사이트를 구축하여 20 개 이상의 언어를 지원하고 있으며, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 뉴스, 가격, 시장 분석 자료를 백만 페이지 이상 보유하고 있습니다. 2013 년부터 위챗 공식 계정인 "CHINATUNGSTEN ONLINE"은 4 만 건 이상의 정보를 게시하여 약 10 만 명의 팔로워를 확보 하고 전 세계 수십만 명의 업계 전문가에게 매일 무료 정보를 제공하고 있습니다. 웹사이트 클러스터와 공식 계정 누적 방문자 수가 수십억 회를 기록하며, CHINATUNGSTEN ONLINE 은 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업 분야에서 세계적으로 인정받는 권위 있는 정보 허브로 자리매김했습니다. 24 시간 다국어 뉴스, 제품 성능, 시장 가격, 시장 동향 서비스를 제공합니다.

CTIA 그룹은 CHINATUNGSTEN ONLINE 의 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 개봉, 시제품 제작, 마무리, 포장 및 물류에 이르는 전 공정 통합 서비스를 제공합니다. 지난 30년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 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 GROUP 의 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

1 장 소개

- 1.1 배경
- 1.2 연구목적 및 혁신
- 1.3 국내외 연구현황

2 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 기본 정보

- 2.1 황색 삼산화 텅스텐의 정의
- 2.2 현재 텅스텐의 형태와 분포
- 2.3 황색 삼산화 텅스텐 및 산소 빈 텅스텐 산화물 / 결합 텅스텐 산화물
 - 2.3.1 황색 삼산화 텅스텐 및 청색 텅스텐 산화물
 - 2.3.2 텅스텐 및 자주색 텅스텐 산화물
 - 2.3.3 텅스텐 및 갈색 텅스텐 산화물
- 2.4 텅스텐 특성은 산소 함량과 관련이 있습니다.
 - 2.4.1 황색 삼산화 텅스텐의 구조와 산소 함량의 관계
 - 2.4.2 황색 삼산화 텅스텐의 특성과 산소 함량의 관계
 - 2.4.3 황색 삼산화 텅스텐의 제조 및 산소 함량 조절

3 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 분류

- 3.1 순도에 따른 황색 삼산화 텅스텐의 분류
 - 3.1.1 일반 황색 텅스텐 삼산화물
 - 3.1.2 고순도 황색 텅스텐 삼산화물
- 3.2 결정 구조에 따른 황색 삼산화 텅스텐의 분류
 - 3.2.1 단사정 텅스텐
 - 3.2.2 사방정계 텅스텐
 - 3.2.3 육각형 텅스텐
 - 3.2.4 입방 결정질 / 정방형 결정질 황색 텅스텐 삼산화물
 - 3.2.4 삼원 텅스텐
- 3.3 물리적 형태에 따른 황색 삼산화 텅스텐의 분류
 - 3.3.1 텅스텐 나노 입자
 - 3.3.2 텅스텐 나노 시트
 - 3.3.3 텅스텐 나노 와이어
 - 3.3.4 텅스텐 나노로드
 - 3.3.5 텅스텐 나노 플라워
 - 3.3.6 텅스텐 나노 튜브
 - 3.3.7 텅스텐 중공 공
- 3.4 입자 크기에 따른 황색 삼산화 텅스텐의 분류
 - 3.4.1 거친 황색 텅스텐 삼산화물
 - 3.4.2 초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물
 - 3.4.3 마이크론 황색 텅스텐 삼산화물
 - 3.4.4 서브미크론 크산트레이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.4.5 나노 옐로우 텅스텐 삼산화물
- 3.4.6 서브 나노 옐로우 텅스텐 삼산화물

제 4 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조

- 4.1 황색 텅스텐 삼산화물의 결정 구조의 기본 이론
 - 4.1.1 텅스텐의 원자 배열
 - 4.1.2 텅스텐 결정학의 기본 지식 (결정 시스템, 격자 등).
 - 4.1.3 텅스텐이 속하는 결정 구조의 종류
- 4.2 텅스텐의 결정 구조에 영향을 미치는 요인
 - 4.2.1 텅스텐의 결정 구조에 대한 준비 조건의 영향
 - 4.2.1.1 텅스텐 결정의 구조에 대한 반응 온도의 영향
 - 4.2.1.2 텅스텐의 결정 구조에 대한 반응 압력의 영향
 - 4.2.1.3 텅스텐 결정의 구조에 대한 반응 시간의 영향
 - 4.2.1.4 텅스텐의 결정 구조에 대한 반응 분위기의 영향
 - 4.2.1.5 텅스텐 결정의 구조에 대한 반응 속도의 영향
 - 4.2.1.6 텅스텐의 결정 구조에 대한 전구체의 영향
 - 4.2.1.7 텅스텐 결정의 구조에 대한 용매의 영향
 - 4.2.2 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조에 대한 외부 자극의 영향
 - 4.2.2.1 텅스텐 결정의 구조에 대한 광학 방사선의 영향
 - 4.2.2.2 텅스텐 결정의 구조에 대한 전기장의 영향
 - 4.2.2.3 텅스텐 결정의 구조에 대한 자기장의 영향
- 4.3 텅스텐 결정의 구조와 특성 사이의 본질적인 관계
 - 4.3.1 텅스텐의 결정 구조와 전자 구조 수준의 관계
 - 4.3.1.1 텅스텐 결정 구조가 전자 수송에 미치는 영향
 - 4.3.1.2 텅스텐 밴드 구조와 결정 구조의 관계
 - 4.3.2 텅스텐 결정의 구조와 이온 수송 평면 사이의 관계
 - 4.3.2.1 텅스텐 결정 구조가 이온 확산에 미치는 영향
 - 4.3.2.2 텅스텐 결정의 구조적 안정성에 대한 이온 삽입/추출 공정의 영향
 - 4.3.3 텅스텐 결정 구조와 표면 특성의 관계
 - 4.3.3.1 텅스텐 결정 구조가 표면 흡착에 미치는 영향
 - 4.3.3.2 텅스텐 결정 구조와 표면 전자 상태의 관계
 - 4.3.4 텅스텐 결정 구조와 기계적 특성의 관계
 - 4.3.5 텅스텐 결정 구조와 광학 특성의 관계
 - 4.3.6 텅스텐 결정 구조와 촉매 특성의 관계
- 4.4 텅스텐의 결정 구조의 실험적 측정
 - 4.4.1 X-ray 회절 기술의 원리
 - 4.4.2 구조 결정에 중성자 회절 기술의 적용

5 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 물리적 및 화학적 특성

- 5.1 텅스텐의 외관과 색상
- 5.2 텅스텐의 밀도/비중
- 5.3 황색 삼산화 텅스텐의 열 안정성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.3.1 황색 삼산화 텅스텐의 녹는점
- 5.3.2 텅스텐의 분해 온도
- 5.3.3 텅스텐의 열팽창 계수
- 5.4 황색 삼산화 텅스텐의 용해도
- 5.5 황색 삼산화 텅스텐의 촉매 특성
- 5.6 텅스텐의 비 표면적
- 5.7 텅스텐의 느슨한 밀도
- 5.8 황색 삼산화 텅스텐의 광학적 성질
- 5.8.1 텅스텐의 광 흡수 및 광촉매 특성
- 5.8.2 텅스텐의 광변색 특성
- 5.9 황색 삼산화 텅스텐의 전기적 성질
- 5.9.1 텅스텐 황색의 반도체 성질
- 5.9.2 텅스텐의 전기 변색 특성
- 5.10 황색 삼산화 텅스텐의 열적 특성
- 5.10.1 텅스텐의 열적 안정성
- 5.10.2 텅스텐의 열팽창 특성
- 5.11 황색 삼산화 텅스텐의 가스 감도
- 5.12: 황색-텅스텐 산화 환원 반응
- 5.13 황색 삼산화 텅스텐의 산 - 염기 반응

6 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 제조 방법

- 6.1 황색 텅스텐 삼산화물의 전통적인 제조 방법
- 6.1.1 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법 - 고온 고체상 반응 방법
- 6.1.2 황색 텅스텐 삼산화물 - 졸 - 겔 방법의 전통적인 제조 방법
- 6.1.3 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법 - 열수 법
- 6.1.4 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법 - 암모늄 텅스텐 산염 법
- 6.1.5 황색 텅스텐 트리옥사이드의 전통적인 제조 방법 - 텅스텐 산염의 염산 분해 방법
- 6.1.6 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법 - 파라 텅스텐 산 암모늄의 열분해 방법
- 6.2 황색 텅스텐 삼산화물의 새로운 제조 방법
- 6.2.1 황색 삼산화 텅스텐에 대한 새로운 제조 방법 - 전기 화학 증착
- 6.2.2 황색 삼산화 텅스텐에 대한 새로운 제조 방법 - 증기 증착 방법
- 6.2.3 황색 삼산화 텅스텐의 새로운 제조 방법 - 생물학적 템플릿 방법

Chapter 7 황색 삼산화 텅스텐 생산 설비

- 7.1 고온 고체상 반응 방법에 의한 황색 삼산화 텅스텐 제조를 위한 핵심 장비
- 7.1.1 원료 취급 장비
- 7.1.1.1 크러셔
- 7.1.1.2 볼 밀
- 7.1.2 성형 장비
- 7.1.2.1 타블렛 프레스
- 7.1.3 고온 소결 장비
- 7.1.3.1 고온로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.3.1 온도 제어 시스템
- 7.1.4 분위기 제어 장비
 - 7.1.4.1 대기로
 - 7.1.4.2 가스 공급 시스템
- 7.1.5 냉각 장비
 - 7.1.5.1 자유 냉각 장치
 - 7.1.5.2 강제 냉각 장비
- 7.1.6 후처리 장비
 - 7.1.6.1 연삭 장비
 - 7.1.6.2 스크리닝 장비
- 7.2 줄 - 겔 법에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조를위한 핵심 장비
 - 7.2.1 혼합 장비
 - 7.2.1.1 기계식 교반기
 - 7.2.2 난방 기구
 - 7.2.2.1 자동 온도 조절 수조
 - 7.2.2.2 오븐
 - 7.2.3 반응 용기
 - 7.2.3.1 반응기
 - 7.2.4 연삭 장비
 - 7.2.4.1 절구와 절구공
 - 7.2.4.2 행성 공 선반
 - 7.2.5 여과 및 세척 장비
 - 7.2.5.1 흡입 여과 장치
 - 7.2.5.2 원심분리기
- 7.3 전기 화학 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조를위한 핵심 장비
 - 7.3.1 전해조
 - 7.3.2 전극
 - 7.3.3 전원 공급 장치
 - 7.3.4 전해질의 구성 및 보관 장비
 - 7.3.4.1 혼합 장비
 - 7.3.4.2 스토리지 컨테이너
 - 7.3.5 가열 및 냉각 장치
 - 7.3.6 여과 장비
 - 7.3.7 분석 및 테스트 장비
- 7.4 물리적 기상 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐 제조를위한 핵심 장비
 - 7.4.1 증발 소스 장비
 - 7.4.2 진공 시스템
 - 7.4.3 기판 가열 및 냉각 장치
 - 7.4.4 박막 두께 모니터링 장비
- 7.5 화학 기상 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐 제조를위한 핵심 장비
 - 7.5.1 반응 챔버
 - 7.5.2 가스 공급 시스템

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.5.3 난방 시스템
- 7.5.4 진공 시스템
- 7.5.5 배기 가스 처리 시스템
- 7.6 생물학적 템플릿 방법에 의한 황색 삼산화 텅스텐 제조를 위한 핵심 장비
- 7.6.1 반응 용기
- 7.6.2 난방 기구
- 7.6.3 혼합 장비
- 7.6.4 온도 제어 장비
- 7.6.5 여과 장비
- 7.6.6 건조 장비
- 7.7 특성화 장비
- 7.7.1 X 선 회절분석기
- 7.7.2 주사 전자 현미경
- 7.7.3 투과 전자 현미경
- 7.7.4 UV-Vis 분광 광도계

제 8 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 검출 원리에 관한 연구

- 8.1 텅스텐 검출 - 분광학
- 8.1.1 황색 삼산화 텅스텐 검출 - X 선 형광 분광법 분석
- 8.1.2 텅스텐 검출 - 라만 분광법
- 8.2 텅스텐 검출 - 전기 화학 분석
- 8.2.1 황색 삼산화 텅스텐 검출 - 화산 전류
- 8.3 기타 황색 삼산화 텅스텐 검출 방법
- 8.3.1 텅스텐 검출 - 열중량 분석

9 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 응용 분야

- 9.1 텅스텐 제품에 황색 삼산화 텅스텐 적용
- 9.1.1 텅스텐 분말의 제조에 황색 텅스텐 삼산화물의 적용
- 9.1.2 텅스텐 와이어 생산에 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.1.3 텅스텐 바 제조에 황색 텅스텐 삼산화물의 적용
- 9.1.4 텅스텐 구리 합금에 황색 삼산화 텅스텐 적용
- 9.1.5 텅스텐-니켈-철 합금에 황색 삼산화 텅스텐 적용
- 9.1.6 초경합금에 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.2 환경 분야에서의 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.2.1 공기 정화에 황색 삼산화 텅스텐 적용
- 9.2.2 하수 처리에 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.3 스마트 재료 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.3.1 전기 변색 장치에 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.3.2 가스 센서에 텅스텐 적용
- 9.4 전자 정보 분야에서의 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.4.1 전계 효과 트랜지스터에 텅스텐의 적용
- 9.4.2 메모리 장치에 텅스텐 플라범 적용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.5 기계 제조 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용
 - 9.5.1 공구 코팅에 텅스텐 적용
 - 9.5.2 내마모성 부품에 텅스텐 적용
- 9.6 생물 의학 응용 분야의 텅스텐
 - 9.6.1 바이오 센서에 텅스텐 적용
 - 9.6.2 광열 요법에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.7 광학 디스플레이 분야에서의 황색 삼산화 텅스텐의 적용
 - 9.7.1 디스플레이에 텅스텐 적용
- 9.8 촉매 지지체에 황색 삼산화 텅스텐 적용
 - 9.8.1 지지 촉매에 황색 삼산화 텅스텐의 적용
- 9.9 내화 직물 분야에서 황색 텅스텐 삼산화물의 적용
 - 9.9.1 산업 분야에서 텅스텐 내화 직물의 적용
 - 9.9.2 일상 생활에서 텅스텐 내화 직물의 적용
 - 9.9.3 대중 교통에서 텅스텐 내화 직물의 적용
- 9.10 농업 필름에 황색 삼산화 텅스텐 적용
- 9.11 에너지 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용
 - 9.11.1 리튬 이온 배터리에 황색 삼산화 텅스텐 적용
 - 9.11.2 슈퍼 커패시터에 텅스텐 적용
 - 9.11.3 수소로 분할되는 광촉매 물에 황색 삼산화 텅스텐의 적용

10 장 황색 삼산화 텅스텐의 안전 및 환경 보호

- 10.1 텅스텐의 안전 문제
- 10.2 황색 삼산화 텅스텐의 환경 보호
- 10.3 황색 삼산화 텅스텐에 대한 안전 데이터 시트 (MSDS)

Chapter 11 황색 삼산화 텅스텐에 대한 국내외 표준

- 11.1 중국 국가 표준
- 11.2 국제 표준
- 11.3 유럽, 미국 및 전 세계 다른 국가의 황색 텅스텐 삼산화물 표준

Chapter 12 황색 삼산화 텅스텐 사실 및 수치

- 12.1 텅스텐의 주요 사실은 무엇입니까?
- 12.2 텅스텐의 모든 데이터 (물리 화학적 특성, 생산 및 응용 기술 매개 변수)

부록: 황색 삼산화 텅스텐 용어의 다국어 용어집 (중국어, 영어, 일본어, 한국어)

참조

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO₃) Product Introduction

1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO₃ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO ₃ content (wt%)	≥99.95
Impurities (wt%, max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm ³)
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO₃ content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website www.tungsten-powder.com. For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

1 장 소개

중요한 기능성 재료 인 삼산화 텅스텐 (WO_3)은 우수한 물리적 및 화학적 특성 (예 : 밴드 갭 2.6-2.8 eV, 밀도 7.16 g / cm^3) 및 다양한 응용 시나리오로 인해 재료 과학, 에너지, 환경 및 전자 분야에서 많은 관심을 끌었습니다. 텅스텐 옐로우의 독특한 특성으로 인해 전기 변색($70\% >$ 광 투과율 변화), 광촉매(수소 생성 $>1 \text{ mmol/h} \cdot \text{g}$), 전기화학적 활성(비정전용량 $>500 \text{ F/g}$) 및 열 안정성(분해 온도 $>1700^\circ\text{C}$)은 스마트 재료, 에너지 저장 장치 및 촉매에 이상적입니다. 이 장에서는 연구 배경, 연구 목표 및 혁신, 국내외 연구 상태의 세 가지 측면에서 황색 삼산화 텅스텐의 연구 중요성과 과학적 가치를 체계적으로 설명하여 후속 장의 토대를 마련합니다.

1.1 배경

텅스텐 화합물 계열의 중요한 구성원 인 황색 텅스텐 삼산화물은 텅스텐 산염 광물 (예 : scheelite, WO_3 함량 >50)에서 널리 발견됩니다. wt%)로 정제하고 습식 제련(수율 $>95\%$) 또는 고온 로스팅(순도 $>99.9\%$)으로 정제합니다. 글로벌 텅스텐 자원 매장량은 약 350 만 톤이며 주로 중국 ($>50\%$), 러시아 및 호주에 분포되어 있으며 연간 생산량은 약 8-100,000 톤이며, 그 중 황색 삼산화 텅스텐은 텅스텐 제품 (텅스텐 분말, 텅스텐 와이어) (시장 규모 >10 억 달러 / 년)의 전구체로서 중요한 위치를 차지합니다. 최근 몇 년 동안 나노 기술의 발전으로 스마트 윈도우 (에너지 절약 $>20\%$), 리튬 이온 배터리 (용량 200 mAh / g) 및 광촉매 물 분할 (태양 에너지 이용률 $>5\%$)과 같은 첨단 기술 분야에서 황색 텅스텐 나노 물질 (입자 크기 20-200 nm, 비 표면적 $\gg 50 \text{ m}^2 / \text{g}$)의 적용이 빠르게 확대되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 엘로우의 연구 배경은 글로벌 에너지 위기, 환경 오염 및 지능형 제조에 대한 요구와 밀접한 관련이 있습니다. 에너지 부문에서는 청정 에너지(예: 수소, 시장 수요 성장률이 연간 10% 이상)와 효율적인 에너지 저장(예: 슈퍼 커패시터, 전력 밀도 > 10kW/kg)이 광촉매 수소 생산 및 전극 재료에서 텅스텐의 사용을 주도하고 있습니다. 환경 분야에서는 황색 삼산화 텅스텐의 광촉매 분해 (유기물 제거율 > 90%) 및 가스 감지 (검출 한계 < 0.1ppm)는 공기 정화 및 폐수 처리를 위한 솔루션을 제공합니다. 스마트 소재 분야에서 텅스텐의 전기 변색 및 가스 민감 특성(스마트 디스플레이 (응답 시간 < 1 초) 및 센서 (감도 > 100)의 개발을 지원합니다. 또한 내화 직물(LOI > 30%), 농업용 필름(온도 상승 > 2°C) 및 생물 의학(광열 살균률 > 99%)과 같은 신흥 분야에 텅스텐을 적용함으로써 시장 잠재력(성장률 > 8%/년)을 더욱 확대했습니다.

그러나 높은 에너지 소비 (1-5 kWh/kg), 폐기물 배출 (W < 0.5 mg/L) 및 나노 물질 (먼지 < 10 mg/m³)의 안전성을 포함하여 황색 삼산화 텅스텐의 생산 및 적용에는 문제가 있습니다. 이러한 문제로 인해 학계와 산업계는 결정 구조(단사정, 육각형 등), 준비 방법(열수법, 증착) 및 성능 최적화(전도도를 > 30% 증가시키기 위한 도핑)를 연구하게 되었습니다. 따라서 황색 삼산화 텅스텐의 특성, 제조 및 적용에 대한 체계적인 연구는 과학적으로 중요할뿐만 아니라 녹색 제조 및 지속 가능한 개발 (탄소 배출 목표 < 0.1 kg/kg)을 촉진하는 데 실용적인 가치가 있습니다.

1.2 연구목적 및 혁신

이 연구의 목적은 황색 삼산화 텅스텐의 기본 특성, 제조 기술, 검출 방법 및 다분야 응용을 종합적이고 체계적으로 탐구하고 과학적 연구 및 산업화에 대한 이론적 지침과 실용적인 참고 자료를 제공하는 것입니다. 구체적인 연구 목적은 다음과 같은 측면을 포함합니다 : 첫째, 황색 삼산화 텅스텐의 물리 화학적 특성 (밴드 갭, 밀도, 용해도)과 결정 구조 (단사정 및 육각형) 사이의 내부 관계를 밝히고 구조 - 특성 관계 (전자 수송, 이온 확산)를 밝히는 것입니다. 둘째, 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 (고온 고체상 법, 졸 - 겔 법) 및 새로운 준비 방법 (전기 화학 증착, 생물학적 템플릿 법)을 분류하고 공정 매개 변수 (에너지 소비 < 1 kWh/kg, 수율 > 95%)를 분류했다. 셋째, 텅스텐 제품 (카바이드 경도 > 90 HRA), 에너지 (배터리 용량 > 200 mAh/g), 환경 (분해 속도 > 90%) 및 스마트 재료 (착색 효율 > 50 cm²/C) 분야에서 텅스텐의 적용 가능성을 분석하고 성능 개선 전략 (도핑 및 배합)을 제안했습니다. 마지막으로, 황색 삼산화 텅스텐의 안전성 (LD50 > 2000 mg/kg) 및 환경 영향 (폐기물 W < 0.1 mg/L)을 평가하고 녹색 생산 및 표준화 (순수율 > 95%)에 대한 제안을 제시했습니다.

이 연구의 혁신은 다음과 같습니다.

1. 구조-성능 상관 관계 시스템 분석: X 선 회절(XRD, 각도 정확도 ± 0.01°) 및 1 원자 계산(정확도 ± 0.1 eV)을 통해 텅스텐 결정 구조(단사 및 육각형)가 전자 대역(밴드 갭 2.6-2.8 eV), 이온 수송(확산 계수 > 10⁻¹² cm²/s) 및 촉매 성능(TOF > 10 s⁻¹)에 미치는 영향을 밝혀 특성화 연구(문헌 적용 범위 < 50%)의 nanoWO₃ 갭을 메웁니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이. 새로운 준비 공정의 최적화 : 생물학적 템플릿 방법 (비용 < US \$ 50 / kg) 및 저온 열수 방법 (<150 ° C)은 nano-WO₃의 효율적인 합성 (입자 크기 <50 nm, 수율 > 90%), 에너지 소비 감소 (<0.5 kWh / kg) 및 형태 제어 성 (편차 <5%)을 개선하기 위해 제안되었습니다.

삼. 교차 도메인 응용에 대한 통합 연구 : 처음으로 내화 직물 (LOI>30%), 농업 필름 (근적외선 >흡수 80%) 및 생물 의학 (광열 효율 >40%)과 같은 신흥 분야에서 황색 텅스텐 삼산화물의 응용 데이터 및 복합 전략 (예 : WO₃ / 그래핀)을 개선하여 성능 (20-30%)을 개선했습니다.

사. 안전 및 환경 보호에 대한 종합적인 평가: MSDS 및 환경 보호 표준(GB 25466-2010)과 결합하여 황색 삼산화 텅스텐 생산(CO₂<0.5kg/kg, W 배출량<0.05mg/L)의 환경 영향을 정량화하고 지속 가능한 개발(시장 잠재력 20억 달러/년)을 돕기 위해 폐기물 재활용(>85%) 및 친환경 공정 솔루션을 제안했습니다(시장 잠재력 >연간 20억 달러).

1.3 국내외 연구현황

국내 연구 현황

중국은 세계 최대의 텅스텐 생산국이며 텅스텐 제품, 에너지 및 환경에 대한 연구에 중점을 두고 있습니다. University of Science and Technology Beijing 과 Central South University 는 황색 삼산화 텅스텐 (순도 > 99.95%) 및 텅스텐 분말 준비 (입자 크기 0.5-5 μm)의 정제, 습식 야금 (수율 > 95%) 및 환원 공정 (H₂ 소비량 < 10 L / g)을 최적화합니다. 칭화대학교(Tsinghua University)와 중국과학원(Chinese Academy of Sciences)은 나노-WO₃의 제조(열수, 입자 크기 20-200nm) 및 응용(광촉매 분해율>90%)을 주도하고 있으며, 도핑 기술(예: N, Ti, 가시광선 반응을 30% 향상)을 개발했다.

에너지 분야에서 Zhejiang University 는 리튬 배터리 (>용량 200 mAh / g) 및 슈퍼 커패시터 (특정 커패시턴스 > 500 F / g) 및 제안된 복합 전극 (WO₃/C)에 WO₃의 적용을 연구했습니다. /C, 1000 주기>). 환경 분야에서는 푸단대학교가 대기질 모니터링(민감도 > 100)을 위한 WO₃ 기반 센서(NO₂ 감지 한계 < 0.1ppm)를 개발했습니다. 그러나 국내 연구에서 텅스텐의 결정 구조-성능 상관 관계 분석은 불충분하고(문헌 설명 <30%) 새로운 준비 방법(예: 생물학적 템플릿 방법)은 아직 실험실 단계(스케일 < 1kg/배치)에 있으며 환경 보호 공정(에너지 소비 < 1kWh/kg)을 돌파해야 합니다.

해외 연구 현황

외국 연구는 미국, 유럽 연합 및 일본에 초점을 맞추고 있으며 황색 삼산화 텅스텐의 나노 특성 및 고급 응용 분야에 중점을 둡니다. MIT (Massachusetts Institute of Technology)는 WO₃ 전기 변색 장치 (착색 효율 > 50cm² / C)의 선두 주자이며 유연한 스마트 윈도우 (광 투과율 변화 70% 및 > 5000 사이클의 수명)을 개발했습니다. 유럽 연합 (예 : 독일의 막스 플랑크 연구소)은 도핑 및 이종 접합 (WO₃ / TiO₂)을 통해 광촉매 수소 생산 (수소 생산 > 1mmol / h · g) 및 유기 분해 (효율 >90%)에서 진전을 이루었습니다.)을 사용하여

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

양자 수율(>5%)을 높일 수 있습니다. 일본 도쿄 대학은 박막 준비(증착, 두께 10-100nm)를 최적화하기 위해 가스 센서(NH₃ 검출 한계 < 0.1ppm) 및 전계 효과 트랜지스터(이동성 > 10cm²/V·s)에 WO₃를 적용하는 방법을 조사했습니다. 한국 서울대학교는 생물의학(광열살균률>99%)과 난연성 직물(LOI>30%)에서 WO₃의 잠재력을 탐구하여 나노복합체 코팅(10-100μm 두께)을 개발하고 있습니다. 해외 연구의 장점은 고정밀 특성화(XRD, TEM, 분해능 < 0.1nm)와 이론적 시뮬레이션(DFT, 오차 < 0.1eV)이지만 생산 규모가 작고(< 1000 톤/년) 비용이 높고(> 100 USD/kg)하여 산업화가 제한됩니다.

국내외 연구의 비교와 단점

국내외 연구 모두 황색 삼산화 텅스텐의 나노 화 (입자 크기 < 200 nm)와 기능화 (성능 향상 >20 %)에 주목했지만 차이점이 있습니다. 중국은 생산 규모(전 세계 생산량의 80% >)와 저비용 공정(US\$<50/kg)이라는 장점이 있으나, 기초 연구(예: 구조-성능 연계)는 미약하다(500 개 논문/년<). 외국은 첨단 응용(스마트 소재, 생물의학) 및 이론 모델링(시뮬레이션 정확도± 0.05eV)에서 선두를 달리고 있지만 대규모 생산 능력(차지 <20%)이 부족합니다. 일반적인 단점으로는 nano-WO₃에 대한 표준화된 데이터 부족(편차 > 10%), 새로운 제조 방법의 산업화 지연(전환율 <10%), 환경 영향 평가 부족(<폐액 W<0.05 mg/L 연구의 경우 30%)이 있습니다. 또한, 신형 분야 (예 : 농업 필름 및 내화 직물)에서 황색 삼산화 텅스텐에 대한 체계적인 연구는 거의 없으며(문헌은 <10%를 차지함) 이는 더욱 확장되어야 합니다.

연구 전망

황색 삼산화 텅스텐에 대한 향후 연구는 다음과 같은 방향에 초점을 맞추어야 합니다 : 1) 생물학적 템플릿 방법 및 저온 열수 방법 (<150 ° C)과 같은 저 에너지 준비 기술 (<0.5 kWh / kg)의 개발; 2) 고처리량 계산(>1000 개 그룹/일) 및 현장 특성화(시간 해상도<1ms)를 결합하여 구조-성능 연관성을 심화합니다. 3) 내화 직물(LOI>32%), 농업용 필름(광 투과율>85%) 및 바이오센서(감도>100)와 같은 새로운 응용 분야를 확장합니다. 4) 탄소 배출(<0.1kg/kg) 및 폐기물 배출(W<0.01mg/L)을 줄이기 위한 녹색 생산 시스템을 구축합니다. 5) 황색 삼산화 텅스텐 (순도 > 99.95 %, 입자 크기 편차 <5 %)에 대한 국제 표준을 공식화하여 글로벌 경쟁력을 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

2 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 기본 정보

2.1 황색 삼산화 텅스텐의 정의

텅스텐 및 황색 텅스텐 삼산화물은 텅스텐과 산소로 구성된 무기 화합물이며 화학식은 WO_3 입니다. 텅스텐의 산화물 중 하나 인 텅스텐은 산업 및 과학 연구에서 중요한 위치를 차지하고 있으며 독특한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 널리 사용됩니다. 텅스텐 옐로우는 일반적으로 밝은 노란색 또는 황록색 결정 성 분말로 나타나는 외관에서 그 이름을 파생 시키며, 이는 텅스텐의 산화 상태 및 결정 구조와 밀접한 관련이있는 색상 특성입니다. 국가 표준 (GB / T 3457-1998)에서 텅스텐은 청색 텅스텐 산화물 또는 자주색 텅스텐 산화물과 같은 다른 형태의 텅스텐 산화물과 구별하기 위해 삼산화 텅스텐으로 명확하게 정의됩니다.

화학적 관점에서 볼 때, 황색 삼산화 텅스텐의 텅스텐 원소는 텅스텐의 가장 일반적인 산화 상태 중 하나 인 +6 산화 상태에 있습니다. 분자식 WO_3 는 각 텅스텐 원자가 3 개의 산소 원자와 결합되어 안정한 화학 구조를 형성한다는 것을 나타냅니다. 텅스텐의 결정 구조는 온도에 따라 변하며 일반적으로 실온에서 단사정이며 고온(예: $740^{\circ}C$ 이상)에서 정방계 결정 시스템으로 변경됩니다. 이러한 결정 구조의 다양성은 고온에서 노란색에서 주황색으로 색을 변경하고 냉각되면 원래 모양으로 돌아가는 것과 같은 다양한 조건에서 텅스텐에 독특한 특성을 부여합니다. 황색 삼산화 텅스텐은 상대 밀도가 7.16, 용점이 최대 $1473^{\circ}C$, 끓는점이 $1750^{\circ}C$ 이상으로 우수한 열 안정성을 보여줍니다.

전이 금속 산화물로서, 황색 텅스텐 삼산화물은 자연에서 수화물 형태로 존재할뿐만 아니라 (텅스텐 광석의 텅스텐 산 광물과 같은) 인공 합성에 의해 제조 될 수도 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산업적으로 텅스텐은 일반적으로 암모늄 과라 텅스텐 산업 또는 텅스텐 산이소 프리커체가 특정 온도에서 분해되어 제조됩니다. 이 과정에는 과라 텅스텐 산 암모늄이 400 ° C 이상으로 가열 될 때 암모니아 및 수증기가 방출되는 것과 같은 복잡한 화학 반응이 포함되어 황색 삼산화 텅스텐이 형성됩니다. 준비 조건(예: 온도, 대기)의 차이는 텅스텐의 입자 크기, 결정 형태 및 순도에 큰 영향을 미칠 수 있습니다.

산업 응용 분야에서 텅스텐은 텅스텐 금속 분말, 텅스텐 카바이드 및 텅스텐 합금 생산에서 중요한 중간체입니다. 그것은 분말 야금 분야에서 핵심적인 역할을 합니다., 예를 들어 초경 절삭 공구의 제조에서, 고온 내마모성 재료, 등. 또한 텅스텐은 광학 및 전기적 특성으로 인해 광촉매, 전기 변색 재료 및 가스 센서에도 사용됩니다. 예를 들어, 노란색 삼산화 텅스텐의 반도체 특성은 수소를 생산하기 위해 광촉매 물을 분해 할 수 있는 잠재력을 제공하는 반면, 풍부한 노란색은 세라믹 및 페인트 산업에서 사용하기 위한 안료이기도 합니다.

역사적인 관점에서 볼 때, 황색 삼산화 텅스텐에 대한 연구는 텅스텐 화학의 발전과 밀접한 관련이 있습니다. 일찍이 1841 년에 화학자 로버트 옥스랜드 (Robert Oxland)는 삼산화 텅스텐의 제조를 처음으로 제안했기 때문에 체계적인 텅스텐 화학의 창시자로 간주됩니다. 그 이후로, 텅스텐의 특성과 응용은 특히 현대 나노 기술의 부상 이후 더 탐구되었으며, 나노 스케일 텅스텐은 높은 비 표면적과 우수한 화학 활성으로 인해 많은 관심을 끌었습니다. 예를 들어, 나노 옐로우 텅스텐 삼산화물 (약 50nm 의 입자 크기)은 리튬 이온 배터리 양극 재료에서 높은 이론적 비 용량과 우수한 사이클링 안정성을 나타내기 때문에 신 에너지 자동차 분야의 연구 핫스팟이 되었습니다.

황색 삼산화 텅스텐의 정의는 화학적 조성 및 물리적 형태에 국한되지 않고 자연과 산업에서의 역할도 포함합니다. 텅스텐 산업 체인의 중요한 부분으로서, 황색 삼산화 텅스텐은 텅스텐 광석 정제에서 최종 제품으로의 변형 과정에서 다리 역할을 합니다. 그 안정성으로 인해 공기 중에서 분해되기 어렵지만 알칼리 조건에서 텅스텐 산 이온 (WO_4^{2-})을 형성하기 위해 용해되며, 이는 추가 화학 처리를 용이하게 하는 특성입니다. 또한, 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조에서 WO_6 팔면체의 배열은 광학 및 전기적 특성을 결정하므로 기초 연구에서도 중요합니다.

일반적으로 다기능 화학 물질로서 황색 삼산화 텅스텐의 정의는 단순한 분자식 " WO_3 "에 국한되지 않고 물리적 형태, 화학적 특성, 결정 구조 및 광범위한 응용 값을 포함합니다. 산업 원료에서 첨단 재료에 이르기까지 텅스텐의 중요성은 기술 발전과 함께 점점 더 중요해지고 있습니다. 텅스텐 제품의 선구자로서 또는 새로운 에너지 분야의 혁신적인 응용 프로그램으로서, 텅스텐은 재료 과학에서 독특한 정체성을 가지고 있습니다.

2.2 현재 텅스텐의 형태와 분포

옐로우 텅스텐 트리옥사이드라고도 알려진 옐로우 텅스텐 트리옥사이드는 자연 및 인공 환경에서 다양한 형태로 존재하며 그 분포는 텅스텐 및 산업 생산의 지구 화학적 특성과 밀접한 관련이 있습니다. 삼산화 텅스텐 (WO_3)의 한 형태로서, 황색 삼산화 텅스텐은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

주로 자연에서 광물의 형태로 발생하는 반면, 산업에서는 분말 또는 결정의 형태로 제조 및 적용됩니다. 다음은 황색 삼산화 텨스텐의 존재 형태와 자연 및 인간 활동에서의 분포에 대한 자세한 논의입니다.

텨스텐 품미는 형태로 존재합니다.

텨스텐은 순수한 WO_3 의 형태로 자연에 직접 존재하지 않지만 수화물 또는 복합 미네랄의 형태로 존재합니다. 가장 일반적인 자연 형태는 텨스텐 스톤 ($WO_3 \cdot nH_2O$)과 같은 텨스텐 산염 광물입니다. H_2O , 물 텨스텐 스톤 ($WO_3 \cdot 2H_2O$) 등. 이러한 광물은 일반적으로 텨스텐 광상의 산화물 영역에서 형성되는 2 차 텨스텐 광물이며 볼프 라마이트 및 scheelite 와 같은 1 차 텨스텐 광석의 풍화 산물입니다. 텨스텐 스톤은 색상이 노란색 또는 황록색이며 노란색 삼산화 텨스텐의 인공 형태와 유사하지만 텨스텐 스톤은 수분 함량이 높기 때문에 약간 다릅니다. 이러한 광물의 결정 구조는 WO_6 팔면체를 기반으로 하지만 물 분자의 통합으로 인해 특정 복잡성을 나타냅니다.

인공 합성에서 텨스텐은 일반적으로 밝은 노란색 결정성 분말의 형태로 존재하며 입자 크기와 결정 형태는 제조 공정에 따라 다릅니다. 예를 들어, 파라 텨스텐 산 암모늄의 소성에 의해 제조된 황색 텨스텐 삼산화물은 일반적으로 단사정 결정 시스템이며, 사방 정계 형태 WO_3 는 고온 (예 : 약 $700^\circ C$)에서 소성 할 때 얻을 수 있습니다. 결정 형태의 변화는 황색 삼산화 텨스텐의 색상과 밀도에 영향을 미칠뿐만 아니라 용해도 및 촉매 활성과 같은 물리적 특성도 변화시킵니다. 또한, 나노 스케일 황색 텨스텐 삼산화물은 최근 몇 년 동안 연구 핫스팟이며, 입자 크기는 수십 나노 미터만큼 작을 수 있으며 비 표면적과 반응성이 높으며 첨단 기술 분야에서 자주 사용됩니다.

황색 삼산화 텨스텐의 화학적 안정성으로 인해 실온에서 다른 물질과 반응 할 가능성이 적지만 고온 또는 환원 대기과 같은 특정 조건에서는 다른 형태의 텨스텐 산화물로 전환 될 수 있습니다. 예를 들어, 수소 분위기에서 가열 될 때, 황색 텨스텐 삼산화물은 청색 텨스텐 산화물 ($W_{20}O_{58}$) 또는 자주색 텨스텐 산화물 ($W_{18}O_{49}$)로 환원 될 수 있으며, 이는 WO_3 보다 산소가 적고 산소가 없는 텨스텐 산화물의 일종이다. 이 변환 과정은 텨스텐의 다형성을 반영하고 산업 생산을 위한 다양한 원료를 제공합니다.

텨스텐 품미의 분포

자연에서 텨스텐 관련 광물의 분포는 텨스텐 광상의 지리적 위치와 밀접한 관련이 있습니다. 텨스텐은 지구의 지각에서 덜 풍부한 원소로 평균 풍부도는 약 1.3ppm이며 주로 볼프 램 ($FeMnWO_4$) 및 scheelite ($CaWO_4$) 형태로 화강암 또는 페그마타이트에 저장됩니다. 이러한 1 차 광물의 산화는 황색 삼산화 텨스텐을 포함하는 2 차 광물의 형성을 초래할 수 있습니다. 세계의 주요 텨스텐 광물에는 중국, 러시아, 캐나다, 호주 및 볼리비아가 포함되며, 그 중 중국은 세계 최대 텨스텐 생산국으로 세계 매장량의 50% 이상을 차지합니다. 중국의 텨스텐 광석은 주로 후난, 장시, 광둥 및 후난의 감 Zhuyuan 광상과 장시의 Dajishan 광상과 같은 기타 지역에 분포하며, 이는 황색 삼산화 텨스텐 관련 광물의 잠재적 인 공급원 일 수도 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산업 부문에서 텅스텐 옐로우의 분포는 텅스텐 제품의 생산 체인에 달려 있습니다. 중간체로서, 텅스텐 옐로우는 주로 텅스텐 제련소 및 분말 야금 기업에서 생산되고 사용됩니다. 텅스텐 농축액에서 황색 삼산화 텅스텐으로의 전환은 일반적으로 알칼리 가수 분해, 중화 및 소성과 같은 단계를 포함합니다. 예를 들어, 텅스텐 농축액은 수산화 나트륨으로 처리되어 텅스텐 산 나트륨 용액을 생성 한 다음 산성화되어 텅스텐 산 침전물을 형성하고 마지막으로 황색 삼산화 텅스텐으로 열분해됩니다. 이 공정은 Hunan Zhuzhou Cemented Carbide Group 및 Xiamen Tungsten Industry 와 같은 대기업과 같은 중국의 텅스텐 가공 회사에서 특히 일반적입니다.

2.3 황색 삼산화 텅스텐 및 산소 빈 텅스텐 산화물 / 결합 텅스텐 산화물

전형적인 텅스텐 산화물로서 황색 텅스텐 삼산화물 (Yellow tungsten trioxide, WO_3)은 산소 빈 텅스텐 산화물 또는 결합이있는 텅스텐 산화물 (예 : 청색 텅스텐 산화물 및 보라색 텅스텐 산화물)과 함께 사용되며 밀접한 연결 및 구별이 있습니다. 이러한 화합물의 특성과 응용은 산소 함량, 결정 구조 및 결합 상태에 따라 다릅니다. 이 섹션에서는 화학적 조성, 구조적 특성, 제조 방법 및 적용 차이점을 포함하여 황색 삼산화 텅스텐과 산소 빈 텅스텐 산화물의 관계에 대해 자세히 설명합니다.

텅스텐의 기본 특성

황색 삼산화 텅스텐의 분자식은 WO_3 이고 산소 지수는 3 으로 텅스텐이 +6 산화 상태에 있음을 나타냅니다. 그것의 결정 구조는 주로 실온에서 단사정이며 고온에서 직계 또는 정방형 결정 시스템으로 변형 될 수 있는 coangular 또는 colateral 연결을 통해 WO_6 팔면체로 구성됩니다. 텅스텐의 색상은 일반적으로 밝은 노란색이며, 이는 전자 구조에서 산소 원자의 포화 배당으로 인한 광학 흡수 특성 때문입니다. n 형 반도체로서 텅스텐은 약 2.6-2.8 eV 의 밴드 갭을 가지므로 광 촉매, 전기 변색 및 기타 분야에서 잠재력이 있습니다. 황색 삼산화 텅스텐은 화학적 안정성이 높고 공기 중에서 분해되기 쉽지 않지만 환원 조건에서 변할 수 있습니다.

산소의 정의와 종류 빈 텅스텐 산화물

산소 빈 텅스텐 산화물은 결정 격자에 산소 원자가 누락 된 텅스텐 산화물을 말하며, 일반적으로 블루 텅스텐 산화물 ($W_{20}O_{58}$, 산소 지수 약 2.9) 및 자주색 텅스텐 산화물 ($W_{18}O_{49}$, 산소 지수 약 2.72)과 같은 비 화학 양 론적 화합물입니다. 이러한 화합물은 결정 구조에 산소 공극이 존재하기 때문에 결합이있는 텅스텐 산화물로도 알려져 있으며, 이로 인해 텅스텐의 산화 상태가 +5 에서 +6 사이입니다. 산소 결핍이 있으면 물질의 전자 구조가 변경되고 자유 전자의 농도가 증가하여 전도성과 화학적 활성이 크게 향상됩니다.

- **블루 텅스텐 산화물** : 분자식은 $W_{20}O_{58}$, 진한 파란색 또는 청색-검정색입니다. 결정 구조에서 산소 공극의 분포는 비교적 균일하며, 이는 일반적으로 약한 환원 분위기 (예 : 수소)에서 황색 삼산화 텅스텐의 부분 환원에 의해 준비됩니다. 블루

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텨스텐 산화물의 입자 형태는 원료의 특성을 상속하지만 내부 구조는 더 느슨합니다.

- **자주색 텨스텐 산화물** : 분자식은 $W_{18}O_{49}$ 이며 자주색이며 미세하게 분쇄됩니다. 그것의 결정 구조는 바늘 모양 또는 막대 모양의 입자에 의해 지배되며, 이는 균열과 산소 공극이 풍부합니다. 이 구조는 미세 텨스텐 분말의 생산에 적합하고 것과 같은 환원 반응에서 우수한 성능을 나타낼 수 있습니다.

텨스텐과 산소 공극 텨스텐 산화물의 화학적 및 구조적 차이점

주요 차이점은 산소 함량과 결정 결함입니다. 황색 삼산화 텨스텐의 WO_3 구조에서 산소 원자는 완전히 포화되고 결정 격자는 규칙적인 반면, 산소 공극 텨스텐 산화물은 산소 원자의 부재로 인해 결함 상태를 형성합니다. 이러한 산소 공극은 구조적으로 불완전할 뿐만 아니라 재료에 고유한 물리화학적 특성을 부여합니다. 예를 들어, 산소 공극의 존재는 재료의 밴드 갭을 줄여 파란색과 보라색 텨스텐 산화물을 더 어둡고 전도성으로 만듭니다. 또한 산소 결핍은 전자 공여체로 작용하여 이러한 물질을 촉매 반응에서 더 활발하게 만듭니다.

결정 구조 측면에서, 황색 삼산화 텨스텐의 WO_6 팔면체는 밀접하게 배열되어 있으며, 파란색과 자주색 텨스텐 산화물은 산소 손실로 인해 팔면체가 연결되는 방식으로 왜곡되거나 파손됩니다. 예를 들어, 자주색 텨스텐 산화물의 바늘 모양의 구조와 내부 균열은 더 큰 비 표면적을 가질 수 있게하여 가스 분자의 침투와 반응 물질의 확산을 용이하게합니다. 이 구조적 차이는 산업 환원 공정에서 두 가지의 동작에 직접적인 영향을 미친다 : 황색 삼산화 텨스텐 환원의 반응은 주로 표면에서 시작되는 반면, 자주색 텨스텐 산화물은 균열의 존재로 인해 내부 및 표면에서 동시에 반응 할 수 있습니다.

황색 삼산화 텨스텐과 산소 빈 텨스텐 산화물의 제조 및 변형 관계

Yellowschet 은 산소 빈 텨스텐 산화물의 전구체이며, 두 개는 반응 조건을 제어하여 서로 변환 될 수 있습니다. 산업적으로 황색 텨스텐 삼산화물은 암모늄 파라 텨스텐 산염 또는 텨스텐 산을 소성하여 생산되는 반면, 산소 빈 텨스텐 산화물은 환원 분위기에서 추가 처리해야 합니다.

- **텨스텐에서 청색 텨스텐 산화물** : 300-600 °C 의 수소 분위기에서 텨스텐은 산소 원자의 일부를 잃어 $W_{20}O_{58}$ 를 형성합니다. 산소 지수는 온도가 증가하고 환원성이 증가함에 따라 점차 감소합니다.
- **텨스텐에서 자주색 텨스텐 산화물** : 더 강한 환원 조건 (예 : 산소의 낮은 분압)에서 텨스텐은 $W_{18}O_{49}$ 로 더 변환 될 수 있습니다. 자주색 텨스텐 산화물의 독특한 형태는 제조 중 빠른 산소 손실 및 결정 재구성과 관련이 있습니다.

이 변환 과정은 산화 텨스텐의 다형성을 반영하고 산업 생산에 유연성을 제공합니다. 예를 들어, 자주색 텨스텐 산화물은 높은 반응성으로 인해 초 미세 텨스텐 분말의 제조에 자주 사용되는 반면, 황색 텨스텐 삼산화물은 안정한 중간체로 더 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 옐로우와 산소 빈 텅스텐 산화물의 적용 비교

황색 삼산화 텅스텐과 산소 공허 텅스텐 산화물은 자체 강조점이 있습니다. 안정성으로 인해 텅스텐은 분말 야금 (예 : 텅스텐 합금 생산), 광촉매 및 안료에 널리 사용됩니다. 나노 옐로우 텅스텐 삼산화물은 리튬 배터리 양극 재료에서 높은 비용량 및 화학적 안정성을 나타내며 이는 에너지 저장 연구에 적합합니다. 산소가 없는 텅스텐 산화물은 결합 상태에 의해 유발되는 높은 활성으로 인해 특정 시나리오에 더 적합합니다.

- 블루 텅스텐 산화물은 높은 환원성 때문에 텅스텐 분말 및 촉매 생산에 일반적으로 사용됩니다.
- 자주색 텅스텐 산화물은 독특한 구조로 인해 미세한 텅스텐 분말 및 가스 센서를 제조하는 데 장점이 있습니다.

2.3.1 황색 삼산화 텅스텐 및 청색 텅스텐 산화물

황색 삼산화 텅스텐 (황색 텅스텐 삼산화물, WO_3) 및 청색 텅스텐 (청색 텅스텐 산화물, 일반적으로 $W_{20}O_{58}$ 로 표시)은 텅스텐 산화물 계열의 두 가지 중요한 형태이며 화학 조성, 결정 구조, 제조 방법 및 응용 분야에 상당한 차이가 있습니다. 텅스텐 산업 체인의 핵심 물질인 황색 삼산화 텅스텐과 청색 텅스텐 사이의 관계는 산화 텅스텐의 다형성을 반영할 뿐만 아니라 산업 및 과학 연구에서의 다양한 역할을 반영합니다. 다음은 두 가지 측면을 자세히 비교한 것입니다.

황색 텅스텐 삼산화물 및 청색 텅스텐 산화물의 화학 조성 및 산화 상태

황색 삼산화 텅스텐의 화학식은 WO_3 이며, 여기서 텅스텐은 +6 산화 상태이고 산소 지수는 3 으로 산소 원자가 완전히 포화되었음을 나타냅니다. 블루 텅스텐 산화물의 화학식은 일반적으로 $W_{20}O_{58}$ 로 작성되며 산소 지수는 약 2.9 이므로 텅스텐의 평균 산화 상태가 +6 보다 약간 작습니다. 이 차이는 청색 텅스텐 결정 격자의 산소 공극, 즉 산소 원자의 부분적 부재로 인해 비 화학량론적 비율의 구조가 생성되기 때문입니다. 산소 공극의 존재는 블루 텅스텐에 더 높은 전자 농도와 전도성을 제공하는 반면, 옐로우 텅스텐 트리옥사이드는 산소 포화로 인해 강한 화학적 안정성을 나타냅니다.

황색 텅스텐 삼산화물과 청색 텅스텐 산화물의 결정 구조 및 물리적 특성

텅스텐은 실온에서 단사정 결정 시스템으로, WO_6 팔면체에 의해 형성된 정형 격자 구조로 형성되며, 색상은 밝은 노란색 또는 황록색이며, 밴드 갭은 약 2.6-2.8 eV 이며, 이는 n 형 반도체에 속합니다. 블루 텅스텐의 결정 구조는 산소 결핍으로 인해 약간 왜곡되며 여전히 WO_6 팔면체를 기반으로 하지만 일부 산소 원자의 손실로 인해 격자 결함이 증가합니다. 블루 텅스텐은 진한 파란색 또는 청색-검정색을 가지며 밴드 갭은 노란색 삼산화 텅스텐 (약 2.4-2.6 eV)보다 약간 낮으며 색상 변화는 산소 공극으로 인한 전자 전이 흡수 스펙트럼의 적색 편이로 인한 것입니다. 또한, 블루 텅스텐 (약 7.1 g / cm^3)의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

밀도는 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드 (7.16 g / cm³)의 밀도보다 약간 낮고 입자 형태가 더 느슨합니다.

황색 삼산화 텅스텐 및 청색 텅스텐 산화물의 제조 방법

황색 삼산화 텅스텐은 일반적으로 400-600 °C 의 산화 분위기에서 암모늄 파라 텅스텐 산염 또는 텅스텐 산, 예를 들어 파라 텅스텐 산 암모늄 (NH₄) [H₂ (WO₄)₆] → WO₃ + NH₃ + H₂O↑. 블루 텅스텐은 약한 환원 조건 (예 : 수소 대기, 300-500 °C) 하에서 황색 텅스텐 삼산화물로부터 부분적으로 환원됩니다 : WO₃ + H₂ → W₂₀O₅₈ + H₂O. 블루 텅스텐을 제조 할 때, 온도, 수소 농도 및 반응 시간은 금속 텅스텐 또는 자주색 텅스텐 산화물을 형성하기 위해 교환을 피하기 위해 정밀하게 제어되어야 합니다. 산업에서 블루 텅스텐은 황색 텅스텐 삼산화물보다 환원성이 우수하기 때문에 텅스텐 분말 생산의 중간체로 자주 사용됩니다.

황색 삼산화 텅스텐과 청색 텅스텐 산화물의 변환 관계

텅스텐은 청색 텅스텐의 전구체이며, 둘 사이의 변환은 산화 텅스텐의 산화 환원 동적 평형을 반영합니다. 환원 조건 (예 : 수소의 분압 및 온도)을 조정함으로써 텅스텐은 점차적으로 산소 원자를 잃어 푸른 텅스텐을 형성 할 수 있습니다. 이 공정은 산업 생산에서 일반적인 뿐만 아니라 산소 결핍이 재료 특성에 미치는 영향을 연구하기 위한 실험적 기초를 제공합니다. 예를 들어, 블루 텅스텐의 진한 파란색은 환원 정도의 시각적 지표 역할을 하는 반면, 텅스텐의 노란색은 완전히 산화 된 상태를 나타냅니다.

2.3.2 텅스텐 및 자주색 텅스텐 산화물

텅스텐 (WO₃)과 자주색 텅스텐 (자주색 텅스텐 산화물, W₁₈O₄₉)은 텅스텐 산화물의 두 가지 전형적인 화합물이며 화학적 조성, 구조적 특성 및 적용 시나리오는 크게 다릅니다. 독특한 바늘 모양의 구조와 높은 반응성으로 인해 보라색 텅스텐은 특정 분야에서 황색 삼산화 텅스텐보다 우수한 성능을 보여주었습니다. 둘 사이의 유사점과 차이점은 아래에 자세히 설명되어 있습니다.

황색 삼산화 텅스텐과 자주색 텅스텐 산화물의 화학 조성 및 산화 상태

황색 삼산화 텅스텐의 화학식은 WO₃이고, 텅스텐은 +6 산화 상태이며, 산소 지수는 3이며, 구조에 험기성 공석이 없다. 보라색 텅스텐의 화학식은 W₁₈O₄₉이고 산소 지수는 약 2.72 로 산소 함량이 청색 텅스텐보다 더 낮고 텅스텐의 평균 산화 상태가 +5 에서 +6 사이임을 나타냅니다. 보라색 텅스텐의 산소 공극 수는 청색 텅스텐의 산소 공극 수보다 높으며,이 결합 상태 구조로 인해 전자 전도성과 화학 활성이 더 높습니다. 텅스텐의 자주색은 산소 결핍으로 인한 강한 흡수 대역 때문이며, 이는 텅스텐의 밝은 노란색과 뚜렷한 대조를 이룹니다.

황색 삼산화 텅스텐과 자주색 텅스텐 산화물의 결정 구조 및 물리적 특성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐의 단사정 구조는 일반적으로 블록 또는 분말 형태의 입자를 가진 일반 WO₃ 판면체로 구성됩니다. 보라색 텅스텐은 독특한 바늘 모양 또는 막대 모양의 결정 형태를 가지고 있으며 결정 격자에 많은 수의 균열과 산소 공극이 있습니다. 이 구조는 황색 삼산화 텅스텐보다 비표면적을 훨씬 높게 만들어 반응 분자의 흡착 및 확산에 도움이 됩니다. 보라색 텅스텐은 약 2.2-2.4 eV의 밴드 갭을 가지며 이는 노란색 삼산화 텅스텐 (2.6-2.8 eV)보다 낮으며 광학 흡수 범위가 넓고 깊은 자주색을 띕니다. 자주색 텅스텐의 밀도는 약 7.0g/cm³로 황색 삼산화 텅스텐보다 약간 낮으며 열 안정성도 좋지 않으며 고온에서 더 감소하기 쉽습니다.

황색 삼산화 텅스텐과 자주색 텅스텐 산화물의 제조 방법

텅스텐은 소성 암모늄 메타 텅스텐 산염 또는 텅스텐 산 제제이며, 공정이 성숙하고 제품이 안정적입니다. 자주색 텅스텐은 WO₃ + H₂ (저산소의 분압, 400-600 °C) → W₁₈O₄₉ + H₂O 와 같은 더 강한 환원 조건에서 황색 텅스텐 삼산화물에서 전환해야 합니다. 텅스텐의 바늘 같은 구조는 빠른 산소 손실 및 결정 재구성과 관련이 있으며, 다른 상의 형성을 피하기 위해 준비 과정에서 대기압과 온도를 제어해야 합니다. 산업적으로 자주색 텅스텐은 초 미세 텅스텐 분말의 생산에 적합하기 때문에 특정 조건에서 암모늄 과라 텅스텐 산염의 열 분해로부터 직접 제조되는 경우가 많습니다.

황색 삼산화 텅스텐과 자주색 텅스텐 산화물의 성능 및 적용 비교

텅스텐은 안정성으로 인해 광촉매, 안료 및 분말 야금에 널리 사용되는 반면, 텅스텐의 높은 활성은 미세한 텅스텐 분말의 제조에 유리합니다. 보라색 텅스텐의 바늘 모양의 구조와 내부 균열은 수소 환원 중에 표면과 내부에서 동시에 반응을 일으키고 텅스텐 분말의 입자 크기는 0.1-0.5 미크론만큼 작을 수 있으며 이는 고정밀 텅스텐 제품에 적합합니다. 또한 보라색 텅스텐은 가스 센서 분야에서 탁월하며 산소 결핍은 일산화탄소 또는 수소 감지와 같은 가스 환원에 대한 민감도를 향상시킬 수 있습니다. 대조적으로, 텅스텐 함은 이러한 응용 분야에서 덜 반응합니다.

황색 삼산화 텅스텐과 자주색 텅스텐 산화물의 변형 관계

황색 삼산화 텅스텐은 단계적 환원에 의해 자주색 텅스텐으로 전환 될 수 있으며, 이는 청색 텅스텐의 생성보다 더 강한 환원 조건을 필요로 한다. 자주색 텅스텐의 형성은 높은 수준의 산소 공극을 표시하며, 그 독특한 형태와 특성은 텅스텐 산화물 중에서 특별한 경우이기도 합니다. 반대로, 자주색 텅스텐은 산화 분위기에서 가열 될 때 황색 삼산화 텅스텐으로 부분적으로 복원 될 수 있지만, 이 공정은 산업에서 거의 사용되지 않습니다.

2.3.3 텅스텐 및 갈색 텅스텐 산화물

텅스텐 옐로우 (WO₃)와 갈색 텅스텐은 텅스텐 산화물 중 산화 상태의 차이가 가장 큰 두 가지 형태이며 화학적 특성, 구조적 특성 및 적용 시나리오가 완전히 다릅니다. 저산화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텨스텐 산화물로서 텨스텐 브라운은 텨스텐 산업 체인에서 독특한 위치를 차지합니다. 둘을 어떻게 비교하는지 자세히 살펴보겠습니다.

황색 삼산화 텨스텐과 갈색 텨스텐 산화물의 화학 성분 및 산화 상태

황색 삼산화 텨스텐의 화학식은 WO_3 , 텨스텐은 +6 산화 상태, 산소 지수는 3, 완전히 산화 된 상태입니다. 텨스텐 브라운의 화학식은 WO_2 , 산소 지수는 2, 텨스텐은 +4 산화 상태이며, 이는 산소 함량이 황색 삼산화 텨스텐보다 현저히 낮다는 것을 나타냅니다. WO_2 에는 산소 공극이 없지만 산소 원자의 배위수가 감소하고 텨스텐의 화학적 환경이 크게 변합니다. 갈색 텨스텐의 갈색은 전자 구조의 현저한 변화로 인한 것으로, 이는 노란색 삼산화 텨스텐의 밝은 노란색과 뚜렷하게 대조됩니다.

황색 삼산화 텨스텐과 갈색 텨스텐 산화물의 결정 구조 및 물리적 특성

황색 삼산화 텨스텐의 단사정 결정 시스템은 WO_6 팔면체로 구성되며 규칙적이고 안정적인 구조를 가지고 있습니다. 텨스텐 브라운은 WO_4 사면체 또는 왜곡된 WO_6 단위로 구성된 단사정 또는 사방 정계 결정 시스템이며 격자 배열은 비교적 느슨합니다. 갈색 텨스텐은 짙은 갈색 또는 황갈색이며 약 1.8-2.0 eV의 밴드 갭을 가지며 이는 노란색 삼산화 텨스텐 (2.6-2.8 eV)보다 훨씬 낮고 더 강한 광 흡수를 나타냅니다. 텨스텐 브라운의 밀도는 약 $7.2g/cm^3$ 로 황색 삼산화 텨스텐보다 약간 높지만 열 안정성이 좋지 않으며 산화 분위기에서 WO 로 쉽게 전환됩니다.

황색 삼산화 텨스텐 및 갈색 텨스텐 산화물의 제조 방법

텨스텐 품미 텨스텐 산 또는 암모늄 과라 텨스텐 산업 소성 및 텨스텐 갈색은 강한 환원 조건 하에서 황색 텨스텐 삼산화물에서 전환해야 합니다: $WO_3 + 2H_2$ (高温, 700-900 °C) \rightarrow $WO_2 + 2H_2O$.

산업적으로, 갈색 텨스텐은 또한 텨스텐 금속 분말의 생산에서 중간체로서 텨스텐 정광의 직접 환원에 의해 제조된다. 산소의 분압은 다른 중간 산화물의 형성을 피하기 위해 갈색 텨스텐을 준비 할 때 엄격하게 제어되어야 한다.

황색 삼산화 텨스텐과 갈색 텨스텐 산화물의 성능 및 적용 비교

황색 삼산화 텨스텐의 응용은 주로 OS 때문에 광촉매, 안료 및 분말 야금에 사용되는 반면, 갈색 텨스텐은 주로 낮은 산화 상태와 높은 반응성으로 인해 텨스텐 금속 분말 및 텨스텐 화합물의 제조에 사용됩니다. 갈색 텨스텐은 수소 환원에서 매우 빠르게 반응하여 고성능 텨스텐 제품에 적합한 초미세 텨스텐 분말을 생성할 수 있습니다. 또한, 갈색 텨스텐은 낮은 밴드 갭과 높은 전도성으로 인해 촉매 및 전극 재료에 잠재력이 있습니다.

텨스텐 플라보나와 갈색 텨스텐 산화물 사이의 변환 관계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Yellowscheter 는 강한 환원에 의해 갈색 텅스텐으로 전환 될 수 있으며, 이는 산화 조건 (예 : 공기 중 가열)에서 WO 로 점진적으로 산화 될 수 있습니다. 이 변환 과정은 산화 상태의 동적 변화를 반영하는 텅스텐 제련에서 중요한 연결 고리입니다.

2.4 텅스텐 특성은 산소 함량과 관련이 있습니다.

중요한 산화 텅스텐으로서 황색 삼산화 텅스텐 (WO_3)의 특성은 산소 함량과 밀접한 관련이 있습니다. 산소 함량은 황색 삼산화 텅스텐의 화학적 조성 및 결정 구조를 결정할 뿐만 아니라 물리적 특성, 화학적 특성 및 제조 공정에 직접적인 영향을 미칩니다. 다음은 황색 삼산화 텅스텐의 특성과 산소 함량의 세 가지 측면에서 구조, 특성 및 제제 사이의 상관 관계에 대해 자세히 설명합니다.

2.4.1 황색 삼산화 텅스텐의 구조와 산소 함량의 관계

황색 삼산화 텅스텐의 화학식은 WO_3 이며, 이는 산소 지수가 3 이고 텅스텐이 +6 산화 상태이며 산소 함량이 포화 상태에 도달했음을 나타냅니다. 산소 함량은 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조와 안정성을 직접 결정하며, 구조의 변화는 성능과 응용에 더 많은 영향을 미칩니다.

결정 구조의 기본 특성

황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조는 주로 WO_6 팔면체로 구성되며, 이는 3 차원 네트워크를 형성하기 위해 같은 각도 또는 같은 측면 연결로 연결됩니다. 실온에서 텅스텐은 일반적으로 $P2_1/n$ 의 공간군을 가진 단사정을 나타냅니다. 온도가 증가함에 따라 구조는 예를 들어 $330^\circ C$ 이상에서 사교도로, $740^\circ C$ 이상에서 정방형으로 상 변형을 겪을 수 있습니다. 이러한 상전이는 산소 원자의 배위 환경과 밀접한 관련이 있지만 산소 함량 자체는 일정하게 유지되고 격자 대칭만 조정됩니다.

산소 함량의 포화

황색 삼산화 텅스텐의 WO_3 구조에서 산소 함량은 포화되고 각 텅스텐 원자는 6 개의 산소 원자와 배위 하며 산소 공석이 없습니다. 이 포화 상태는 황색 삼산화 텅스텐에 높은 구조적 안정성을 제공하여 공기 중에서 분해되거나 자발적으로 구조적 변화를 겪을 가능성을 줄입니다. 블루 텅스텐 산화물 $W_{20}O_{58}$ 또는 자주색 텅스텐 산화물 $W_{18}O_{49}$ 와 같이 산소 함량이 낮은 텅스텐 산화물과 비교할 때, 황색 삼산화 텅스텐은 격자 규칙성이 높고 결함 상태가 거의있다. 이 규칙성은 산소 원자의 적절한 배위에서 비롯되며, WO_6 팔면체의 대칭 배열은 격자 응력을 줄입니다.

산소함량 변화의 영향

텅스텐 자체는 WO_3 이지만 준비 또는 가공 중 산소 함량에 약간의 변화가 있으면(예: 산소 원자의 부분적 손실) 그 구조가 이상적인 상태에서 빠르게 벗어날 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

예를 들어, 환원 분위기 (예 : 수소)에서 텅스텐은 소량의 산소를 잃을 수 있으며, WO_3 에서 $W_{20}O_{58}$ 또는 $W_{18}O_{49}$ 로 결정 구조의 변화를 일으키는 산소 공극을 생성 할 수 있습니다. 이 전이는 팔면체 연결 패턴의 단선 또는 왜곡을 동반하며 결정 격자에 결합 부위가 나타납니다. 예를 들어, 청색 텅스텐 산화물의 산소 지수는 2.9 로, 자주색 텅스텐 산화물은 2.72 로 떨어지고 결정 구조는 일반 단사정에서 느슨한 바늘 또는 균열 형태로 바뀝니다. 대조적으로, 황색 삼산화 텅스텐의 포화 산소 함량은 구조적 무결성과 안정성을 보장합니다.

미세구조와 산소의 관계

나노 스케일 황색 삼산화 텅스텐에서는 산소 함량이 구조에 미치는 영향이 더 중요합니다. 나노 입자의 표면 효과는 외부 조건(예: 대기, 온도)에 더 취약하게 만듭니다. 표면에 산소 원자가 없으면 결정에 국소 결함이 발생하여 특정 표면적이 증가하고 형태가 변경될 수 있습니다. 연구에 따르면 나노 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드는 진공 열처리 중에 산소 공극을 형성하여 벌크에서 다공성 구조로 변할 수 있습니다. 이러한 변화가 전체 WO_3 조성을 변화시키지는 않았지만, 국소 구조의 재편성은 산소 함량의 미세 조정과 밀접한 관련이 있었다.

2.4.2 황색 삼산화 텅스텐의 특성과 산소 함량의 관계

텅스텐의 물리적 및 화학적 특성은 산소 함량과 밀접한 관련이 있습니다. 산소 함량의 포화는 색상, 광학적 특성 및 전도성과 같은 물리적 특성을 결정할 뿐만 아니라 화학적 안정성 및 촉매 활성과 같은 화학적 특성에도 영향을 미칩니다.

텅스텐의 물리적 특성

- 일. **색상** : 텅스텐의 밝은 노란색 또는 황록색은 포화 산소 함량과 전자 구조의 특성에서 비롯됩니다. n 형 반도체로서 텅스텐은 약 2.6-2.8 eV의 밴드 갭을 가지며 광 흡수는 주로 자외선 및 근가시 영역에 집중되어 있습니다. 산소 함량이 감소하면 (예 : 파란색 또는 자주색 텅스텐 산화물이 생성됨) 밴드 갭이 좁아지고 (2.4eV 이하) 색상이 파란색 또는 자주색으로 어두워집니다. 이러한 색상 변화는 산소 결핍이 증가함에 따라 전자 전이 에너지가 감소한 결과입니다.
- 이. **밀도 및 용점** : 텅스텐은 밀도가 $7.16g/cm^3$ 이고 용점이 최대 $1473^\circ C$ 이며 높은 산소 함량에서 결정 격자의 소형화와 열 안정성을 반영합니다. 대조적으로, 산소 함량이 낮은 산화 텅스텐 (예 : WO_2 , 밀도 $7.2g/cm^3$)은 구조가 느슨하고 열 안정성이 감소합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 화학적 성질

- 일. **안정성** : 황색 삼산화 텅스텐은 공기 중에서 우수한 화학적 안정성을 가지며 포화 산소 함량으로 인해 쉽게 산화되거나 분해되지 않습니다. 알칼리성 조건에서 황색 삼산화 텅스텐은 용해되어 텅스텐 산 이온 (WO_4^{2-})을 형성하지만 산성 또는 중성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

환경에서는 반응성이 적습니다. 대조적으로, 산소 함량이 낮은 산화 텅스텐 (예 : WO_2)은 산화 분위기에서 WO_3 로 쉽게 산화되어 안정성이 좋지 않습니다.

이. **촉매 활성** : 황색 삼산화 텅스텐의 광촉매 특성 (예 : 수소를 생산하기 위해 물 분해)은 산소 함량 및 밴드 갭과 관련이 있습니다. 포화 산소 상태는 활성을 온건하게 만드는 반면, 산소 공극 텅스텐 산화물은 결합 부위의 증가로 인해 더 높은 촉매 활성을 갖는다. 예를 들어, 자주색 텅스텐 산화물은 광촉매 반응에서 황색 삼산화 텅스텐보다 효율적입니다.

삼. **환원성** : 황색 삼산화 텅스텐은 수소 분위기에서 저 산소 텅스텐 산화물 또는 텅스텐 금속으로 환원 될 수 있으며, 환원율은 산소 함량과 직접적인 관련이 있습니다.

2.4.3 황색 삼산화 텅스텐의 제조 및 산소 함량 조절

황색 삼산화 텅스텐의 제조 공정은 텅스텐 광석에서 최종 제품까지의 다단계 반응을 포함하며 산소 함량 제어는 화학 조성 (WO_3) 및 안정적인 특성을 보장하는 열쇠입니다.

황색 삼산화 텅스텐의 제조 방법

일. **소성 방법** : 산업적으로 황색 삼산화 텅스텐은 주로 다음과 같은 삼산화 텅스텐 전구체를 소성하여 제조됩니다.

- 암모늄 파라 텅스텐 산염 ($(NH_4)_6H_5 [H_2 (WO_4)_6]$)은 $400-600^\circ C$ 에서 공기 중에서 분해됩니다 : $\rightarrow WO_3 + NH_3\uparrow + H_2O\uparrow$.
- 텅스텐 산 (H_2WO_4) $500-700^\circ C$ 에서 소성 : $\rightarrow WO_3 + H_2O\uparrow$. 이러한 반응은 산화 분위기에서 일어나므로 산소 함량이 포화되고 순수한 WO_3 가 생성됩니다.

이. **습식 화학 방법** : 텅스텐 산 침전물은 텅스텐 산 나트륨 용액의 산성화에 의해 생성 된 다음 황색 삼산화 텅스텐을 열처리에 의해 제조한다. 이 방법을 사용하면 산소 함량을 정밀하게 제어할 수 있으며 불순물 감소로 인한 간섭을 피할 수 있습니다.

삼. **나노 옐로우 텅스텐 삼산화물의 제조** : 산소의 분압 및 온도를 조절하기 위해 용매 감열법 또는 기상 증착 방법을 사용하여 안정한 산소 함량을 갖는 Nano- WO_3 를 제조했다.

황색 삼산화 텅스텐 산소 함량 조절의 열쇠

일. **분위기 제어**: 산소 함량 감소를 방지하기 위해 준비 과정에서 산화 분위기(예: 공기 또는 산소)를 유지해야 합니다. 환원 분위기 (예 : 수소)를 사용하는 경우 텅스텐은 $W_{20}O_{58}$ 또는 $W_{18}O_{49}$ 로 전환 될 수 있습니다. 예를 들어, $500^\circ C$ 에서 소량의 수소를 주입하면 산소 지수가 3 에서 2.9 로 떨어질 수 있습니다.

이. **온도 제어** : 소성 온도가 너무 높을 경우 (예 : $800^\circ C$ 이상), 특히 산소의 분압이 낮을 때 산소 휘발이 발생할 수 있으며 WO_3 구조를 유지하기 위해 엄격하게 제어해야 합니다. 낮은 온도($400-600^\circ C$)는 산소 포화도를 선호합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

삼. 원료의 순도 : 과라 텅스텐 산 암모늄 또는 텅스텐 산의 불순물 (예 : 탄소 또는 황)은 분해 중에 특성을 감소시키고 산소 함량을 감소시킬 수 있으므로 고순도 원료를 사용해야 합니다.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

en.com

www.chinatungsten.com

www.ch

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO₃) Product Introduction

1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO₃ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO ₃ content (wt%)	≥99.95
Impurities (wt%, max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm ³)
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO₃ content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website www.tungsten-powder.com. For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

3 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 분류

황색 삼산화 텅스텐 (WO_3)은 다른 표준에 따라 다양한 방법으로 분류 될 수있는 중요한 텅스텐 산화물이다. 그 중 순도 기반 분류는 순도가 성능과 응용 범위에 직접적인 영향을 미치기 때문에 산업 및 과학 연구에서 일반적으로 사용되는 방법 중 하나입니다. 이 장에서는 일반 황색 텅스텐 삼산화물과 고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 두 가지 범주로 나뉘는 황색 텅스텐 삼산화물의 순도 기반 분류에 중점을 둘 것입니다.

3.1 순도에 따른 황색 삼산화 텅스텐의 분류

황색 삼산화 텅스텐의 순도는 그 안에있는 WO_3 의 비율을 나타내며, 이는 일반적으로 불순물이 제거 된 후의 양으로 측정됩니다. 순도는 원료의 출처, 생산 공정 및 후처리 기술에 따라 다릅니다. 순도 수준에 따라 황색 텅스텐 삼산화물은 일반 황색 텅스텐 삼산화물과 고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 두 가지 범주로 나눌 수 있으며, 각각 화학 성분, 물리적 특성 및 용도가 다릅니다.

3.1.1 일반 황색 텅스텐 삼산화물

일반 황색 텅스텐 삼산화물은 상대적으로 순도가 낮은 황색 텅스텐 삼산화물을 말하며 일반적으로 WO_3 함량은 98 % -99.5 % 사이이며 철 (Fe), 몰리브덴 (Mo), 실리콘 (Si), 알루미늄 (Al) 등과 같은 일정량의 불순물을 포함합니다 일반 황색 텅스텐 삼산화물은 제조 비용이 낮기 때문에 산업 생산에 널리 사용되며 순도가 낮은 시나리오에 적합합니다.

일반 황색 텅스텐 삼산화물의 화학 성분 및 불순물

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

일반 황색 삼산화 텅스텐의 WO_3 함량은 일반적으로 국가 표준 (예 : GB / T 3457-1998)에 지정된 최소 요구 사항, 즉 98 % 이상을 충족합니다. 불순물은 주로 텅스텐 광석 또는 준비 중 오염에서 파생됩니다. 예를 들어, 텅스텐 광석의 몰리브덴은 MoO_3 의 형태로 남을 수 있으며 함량은 일반적으로 0.01%에서 0.05% 사이입니다. 철은 약 0.005%-0.02%의 함량으로 산화물 또는 규산염의 형태로 존재할 수 있습니다. 또한 준비 공정에 사용되는 첨가제(예: 탄산나트륨) 또는 장비 마모로 인해 일반적으로 0.03% 미만인 실리콘(SiO_2) 또는 칼슘(CaO)과 같은 미량 불순물이 발생할 수도 있습니다.

일반 황색 삼산화 텅스텐의 물리적 특성

일반 황색 삼산화 텅스텐은 외관상 밝은 황색에서 황록색 분말을 가지고 있으며, 철 함량이 높을 때 황갈색과 같은 불순물로 인해 색상이 약간 벗어날 수 있습니다. 입자 크기는 일반적으로 1-10 마이크론이고 비 표면적은 중간 (약 $2-5m^2 / g$)입니다. 일반 황색 삼산화 텅스텐의 밀도는 약 $7.16g / cm^3$ 로 이론 값과 일치하지만 불순물의 존재로 인해 미세 구조에서 약간 다르지 않을 수 있습니다. 융점은 $1473^{\circ}C$ 이지만 불순물은 고온에서 산화철과 같은 열 안정성을 감소시켜 국부 분해를 유발할 수 있습니다.

일반 황색 삼산화 텅스텐의 제조 방법

일반 황색 텅스텐 삼산화물은 일반적으로 소성 암모늄 파라 텅스텐 산 염 또는 텅스텐 산이며, 그 과정은 비교적 간단합니다.

- 텅스텐 농축액은 알칼리에 의해 침출되어 텅스텐 산 나트륨 용액을 생성한다.
- 산성화는 텅스텐 산 (H_2WO_4)으로 침전된다.
- $500-700^{\circ}C$ 에서 공기 중 소성으로 WO 를 생성합니다. 이 공정은 복잡한 정제 단계의 필요성을 제거하여 소량의 불순물을 유지하여 생산 비용을 절감할 수 있습니다.

일반 황색 삼산화 텅스텐의 응용 분야

일반 황색 텅스텐 삼산화물은 주로 텅스텐 금속 분말 및 텅스텐 카바이드 생산을 위한 원료로 텅스텐의 야금 분야에서 사용됩니다. 예를 들어, 수소 환원법에 의한 텅스텐 분말의 제조에서, 일반 황색 삼산화 텅스텐의 불순물은 최종 제품의 성능에 거의 영향을 미치지 않으며, 이는 초경합금 공구, 내마모성 부품 등의 제조에 적합합니다.

일반 황색 텅스텐 삼산화물의 특성과 한계

일반 황색 삼산화 텅스텐의 장점은 비용 효율적이고 성숙한 생산 공정을 가지고 있으며 대규모 산업 응용 분야에 적합하다는 것입니다. 그러나 불순물 함량은 고온 감소 시 텅스텐 분말의 순도에 영향을 줄 수 있는 몰리브덴 불순물 또는 제품의 기계적 강도를 감소시키는 철 불순물과 같은 불안정한 특성을 유발할 수 있습니다. 따라서 일반 황색

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

삼산화 텅스텐은 순도가 낮은 전통적인 산업 시나리오에 더 적합합니다.

3.1.2 고순도 황색 텅스텐 삼산화물

고순도 황색 텅스텐 삼산화물은 WO_3 함량이 99.9 % 이상인 황색 텅스텐 삼산화물을 말하며 불순물 함량은 매우 낮으며 일반적으로 ppm 수준으로 측정됩니다. 이 고순도 황색 삼산화 텅스텐은 전자 산업 및 새로운 에너지 재료와 같은 까다로운 재료 특성을 가진 첨단 기술 분야에 적합합니다.

고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 화학 성분 및 불순물

고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 WO_3 함량은 일반적으로 99.95 % -99.999 % 사이이며 불순물 함량은 엄격하게 제어됩니다. 예를 들어, 철(Fe) 함량이 10ppm 미만, 몰리브덴(Mo)이 5ppm 미만, 실리콘(Si) 및 알루미늄(Al)이 20ppm 미만인 경우. 이러한 낮은 수준의 불순물은 이온 교환 또는 용매 추출과 같은 고급 정제 기술에 의해 달성되며, 이는 원료에서 관련 원소를 제거합니다. 또한, 고순도 황색 삼산화 텅스텐에서 나트륨 (Na) 및 칼륨 (K)과 같은 알칼리 금속의 함량도 전자 재료의 요구를 충족시키기 위해 5ppm 이하로 제어해야 합니다.

고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 물리적 특성

고순도 황색 텅스텐 삼산화물은 균일 한 밝은 노란색 분말, 순수한 색이며 명백한 불순물로 인한 색상 차이가 없습니다. 입자 크기는 일반적으로 0.5-5 미크론 사이의 수요에 따라 조정할 수 있으며, 나노 스케일 고순도 황색 텅스텐 삼산화물은 50 나노미터 이하에 도달 할 수 있으며 비 표면적은 10-20 m^2 / g 만큼 높을 수 있습니다. 밀도는 여전히 7.16g/cm³이지만 결정 구조가 더 규칙적이고 결합이 적습니다. 밴드갭(2.6-2.8eV)과 광학 특성이 더 안정적이어서 광학 및 전기 응용 분야에 적합합니다. 우수한 열 안정성, 고온에서 명백한 분해 또는 상 변화가 없습니다.

고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 제조 방법

고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 제조는 일반 황색 텅스텐 삼산화물 공정을 기초로 정제 단계를 추가해야 합니다.

- 텅스텐 농축액에서 텅스텐 산 나트륨 용액을 추출 한 후, 이온 교환 수지를 사용하여 불순물 이온을 제거합니다.
- 여러 번의 산성화-침전 주기를 통해 몰리브덴, 철 및 기타 원소의 함량이 더욱 감소했습니다.
- 산소 함량이 포화되고 무공해인지 확인하기 위해 600-800°C 에서 깨끗한 공기 또는 산소에서 소성됩니다. 실험실에서 고순도 황색 텅스텐 삼산화물은 기상 증착 또는 용매 열 방법, 예를 들어 고순도 텅스텐 산염을 전구체로 사용하여 엄격하게

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

통제된 조건에서 WO 로 분해될 수도 있습니다. 이 방법은 입자 형태 및 순도를 정밀하게 제어하며 나노 물질 연구에 일반적으로 사용됩니다.

고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 응용 분야

고순도 황색 텅스텐 트리 옥사이드는 낮은 불순물과 높은 안정성으로 인해 첨단 기술 분야에서 널리 사용됩니다.

- **전자 산업:** 박막 트랜지스터(TFT) 또는 태양 전지용 투명 전도성 필름을 준비하는 데 사용되는 스퍼터링 타겟.
- **새로운 에너지 :** 나노 고순도 황색 텅스텐 삼산화물은 리튬 이온 배터리 양극 재료에서 높은 비용량 (약 693 mAh/g)과 우수한 사이클링 안정성을 나타냅니다.
- **광촉매 :** 고순도 황색 삼산화 텅스텐은 균일한 밴드 갭과 낮은 결합물로 인해 수소 생산 또는 유기 오염 물질의 분해를 위한 광촉매 수 분할에 더 효율적입니다.
- **광학 재료:** 전기 변색 유리의 제조에 사용되며 순도는 색상 변화의 균일성과 내구성을 보장합니다.

고순도 황색 텅스텐 삼산화물의 특성과 한계

고순도 황색 삼산화 텅스텐의 강점은 정밀 제조 및 최첨단 기술의 요구 사항을 충족시킬 수 있는 우수한 성능과 광범위한 고급 응용 분야에 있습니다.

그러나 준비 공정은 복잡하고 비용이 많이 들며, 예를 들어 이온 교환 및 청정 소성은 고가의 장비 및 에너지 투자가 필요하므로 대규모 산업 생산보다는 주로 소량, 고부가가치 시나리오에 사용됩니다.

3.2 결정 구조에 따른 황색 삼산화 텅스텐의 분류

황색 삼산화 텅스텐 (WO₃)의 결정 구조는 분류의 중요한 기초 중 하나이며, 다양한 결정 형태는 물리적 특성, 화학적 거동 및 응용 분야에 직접적인 영향을 미칩니다.

황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조는 주로 WO₆ 팔면체의 배열에 의해 결정되며 단사정 결정 형태, 사방 정계 결정 형태, 육각형 결정 형태, 입방 결정 형태 / 정방정 결정 형태 및 삼원 결정 형태를 포함하여 온도, 압력 및 준비 조건의 영향으로 다양한 결정 형태를 형성할 수 있습니다. 다음은 각 유형의 결정 형태의 특성과 차이점에 대한 자세한 설명입니다.

3.2.1 단사정 텅스텐

단사정 텅스텐은 실온에서 텅스텐의 가장 일반적이고 안정적인 결정 구조 형태이며 자연 및 산업 제품에서 널리 발견되며 안정성 때문에 연구 및 응용의 초점이되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

단사정 텅스텐의 구조적 특성

단사정 텅스텐은 단사정 결정 시스템에 속하고 공간 그룹은 $P2_1/n$ 이며 격자 매개변수는 일반적으로 $a=7.306 \text{ \AA}$, $b=7.540 \text{ \AA}$, $c=7.692 \text{ \AA}$ 및 $\beta=90.91^\circ$ 입니다. 그 구조는 직각 연결로 연결된 WO_6 팔면체로 구성되어 약간 기울어 진 3 차원 네트워크를 형성합니다. 팔면체의 약간의 뒤틀림은 단사정 결정 형태의 주요 특징이며, 이러한 비대칭은 산소 원자의 불균일한 분포에서 비롯됩니다.

단사정 텅스텐의 물리적 특성

단사정 텅스텐은 연한 노란색 또는 황록색이며 밀도는 7.16g/cm^3 이고 밴드 갭은 약 2.6-2.8eV 입니다. 녹는점이 1473°C 이며 실온에서 높은 열적 및 화학적 안정성을 가지고 있습니다. 입자 형태는 대부분 울퉁불퉁하거나 가루이며 크기는 일반적으로 1-10 마이크로미터입니다. 단사정 텅스텐의 장점은 열역학적 안정성으로 실온에서 상 변화를 쉽게 겪지 않으며 대부분의 산업 및 과학 연구 시나리오에 적합합니다. 그러나 밴드 갭이 크고 광촉매 효율이 제한적입니다.

단사정 텅스텐의 준비 및 조건

단사정 텅스텐은 일반적으로 $400\text{-}600^\circ\text{C}$ 의 공기 중에서 제조되는 암모늄 파라 텅스텐 산염입니다. 이 온도 범위는 산소 함량의 포화와 안정적인 단사정 구조의 형성을 보장합니다. 온도가 330°C 보다 낮으면 불안정한 전이 상태가 형성될 수 있습니다. 740°C 를 초과하면 다른 결정 형태로 변할 수 있습니다.

단사정 텅스텐의 응용

단사정 텅스텐은 텅스텐 분말 및 초경합금 생산의 원료로 안정성으로 인해 분말 야금에 널리 사용됩니다. 또한 반도체 특성으로 인해 수소를 위한 물 분할과 같은 광촉매와 스마트 윈도우 유리와 같은 전기 변색 재료에서 우수합니다. 또한, 단사정 결정 형태의 규칙적인 구조는 세라믹 안료로 적합하여 안정적인 황색 색조를 제공합니다.

3.2.2 사방정계 텅스텐

사방 정계 텅스텐은 더 높은 온도에서 황색 텅스텐 삼산화물의 결정 구조로, 단사정 결정 형태보다 대칭성이 높으며 적용 시나리오가 다릅니다. 사방정계 텅스텐은 사방정계 결정계에 속하고, 공간군은 $Pnma$ 이며, 격자 매개변수는 약 $a=7.341 \text{ \AA}$, $b=7.570 \text{ \AA}$, $c=7.754 \text{ \AA}$ 이다. WO_6 팔면체의 배열은 단사정 결정 형태보다 대칭적이며 왜곡 정도가 감소하여보다 규칙적인 3 차원 프레임 워크를 형성합니다.

사방정계 텅스텐의 물리적 특성

황색 텅스텐 삼산화물의 사방 정계 형태는 색이 약간 더 어둡고 황색 - 주황색 일 수

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있으며 단사 정 형태 (약 2.5-2.7 eV)보다 약간 낮은 밴드 갭이 있습니다. 밀도는 7.16g/cm³에 가깝고 열 안정성은 단사정 결정보다 약간 열등하여 330°C 이하로 냉각되면 단사정으로 다시 변환됩니다. 사방정계 텅스텐은 대칭이 높아 고온 응용 분야에 적합하지만 불안정성으로 인해 실온에서 사용 범위가 제한됩니다.

사방정계 텅스텐의 준비 및 조건

사방 정계 텅스텐은 330-740 °C 의 온도 범위에서 형성됩니다 (예 : 단사정 텅스텐을 500 °C 로 가열하고 따뜻하게 유지). 준비 과정에서 산소 함량 감소로 인한 결정 형태의 변화를 피하기 위해 산화 분위기를 유지해야 합니다.

사방정계 텅스텐의 적용 분야

고온 환경에서 사방 정계 텅스텐의 안정성은 고온 촉매 또는 전극 재료의 중간체로 적합합니다. 예를 들어, 단사정보다 광촉매 반응에서 약간 더 활성이며 유기 오염 물질을 분해하는 데 사용할 수 있습니다. 또한, 사방 정계 결정 형태는 WO₃의 상전이 거동을 연구하는 데에도 사용됩니다.

3.2.3 육각형 텅스텐

육각형 텅스텐은 일반적으로 특정 조건(예: 도핑 또는 열수 합성)에서 형성되고 고유한 기공 구조를 갖는 희귀 결정 구조입니다.

육각형 텅스텐은 육각형 결정 시스템에 속하고 공간 그룹은 P6 / mmm 이며 격자 매개 변수는 약 $a = 7.298 \text{ \AA}$ 및 $c = 3.899 \text{ \AA}$ 입니다. 그 구조는 WO₆ 팔면체로 육각형 채널로 둘러싸여 1 차원 채널 네트워크를 형성합니다. 이 개방형 구조는 높은 비표면적을 제공합니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 물리적 특성

육각형 텅스텐은 밝은 노란색이며 밴드 갭은 약 2.7eV 이고 밀도는 단사정 (약 7.1g / cm³)보다 약간 낮습니다. 기공 구조로 인해 흡착 용량과 이온 전도성이 높지만 열 안정성이 좋지 않고 고온에서 다른 결정 형태로 쉽게 변형됩니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 제조 및 조건

육각형 황색 텅스텐 삼산화물은 일반적으로 텅스텐 산 나트륨과 같은 열수 또는 용매 열 방법으로 제조되며 180-220 °C 에서 구조 지시제 (예 : 요소)와 합성됩니다. Na⁺ 또는 NH₄⁺와 같은 도핑된 원소는 육각형 구조를 안정화합니다.

육각형 결정질 텅스텐 응용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

육각형 황색 텅스텐 삼산화물은 기공 구조로 인해 가스 센서 및 이온 전도체(예: CO 또는 H₂ 검출)에 탁월합니다. 높은 비표면적은 또한 광촉매 분야에서 잠재력을 제공합니다. 또한 육각형 형태는 리튬 배터리 전극 재료의 템플릿으로 사용할 수 있습니다.

3.2.4 입방 결정질 / 정방형 결정질 황색 텅스텐 삼산화물

입방 및 정방형 텅스텐은 고온 또는 고압에서 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조로, 높은 대칭성으로 인해 특별한 특성을 가지고 있습니다.

정방형 황색 텅스텐 삼산화물의 구조적 특성

- **정방정 결정 형태** : 공간 그룹은 P4/nmm 이고 격자 매개 변수는 약 $a=5.272 \text{ \AA}$ 및 $c=7.832 \text{ \AA}$ 이며 740 °C 이상에서 형성됩니다.
- **입방체 결정 형태** : 공간 그룹은 Pm3m 으로 매우 드물며 일반적으로 고압 또는 도핑에 의해 유도되어야 합니다. 둘 다 WO₆ 팔면체로 구성되어 있으며 왜곡을 최소화한 매우 대칭적인 배열로 구성되어 있습니다.

정방정 텅스텐의 물리적 특성

정방정 텅스텐은 주황색-노란색이며 밴드 갭은 약 2.4-2.6eV 이고 밀도는 거의 7.16g/cm³입니다. 입방체 결정 형태는 색이 더 어둡고 본질적으로 비슷하지만 더 불안정합니다. 이 둘의 전도성은 고온에서 향상되지만 냉각 후 단사정 결정 형태로 쉽게 변할 수 있습니다. 입방체/정방계 텅스텐은 대칭성이 높아 고온 적용에 적합하지만 실온에서는 불안정하고 실제 적용에는 제한이 있습니다.

정방형 황색 텅스텐 삼산화물의 준비 및 조건

정방 텅스텐은 단사정 결정 형태를 740-900 °C 로 가열하여 제조되며, 산소 함량을 유지하기 위해 산화 분위기가 필요합니다. 입방체 결정 형태는 고압(예: 10 GPa) 또는 도핑(예: Nb⁵⁺)에 의해 유도되며 일반적으로 실험실에서 합성됩니다.

정방정 텅스텐의 응용 분야

정방형 텅스텐은 고온 전극 재료 및 촉매에 사용되며 높은 대칭성은 전기 전도성을 향상시킵니다. 그 희귀성으로 인해 입방체 결정 형태는 WO의 상 변환 메커니즘을 탐구하기 위한 기초 연구에 주로 사용됩니다.

3.2.5 삼원 텅스텐

Triclinic 결정 텅스텐은 저온에서 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조이며 대칭이 가장 낮고 상대적으로 드뭅니다. 삼원 텅스텐은 삼원 결정 시스템에 속하고 공간 그룹은 P1 이며 격자 매개변수는 복잡합니다($a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$). WO₆ 팔면체는 심하게 왜곡되고 격자

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

비대칭이 가장 높습니다.

triclinic 텅스텐의 유형 자산

Triclinic 텅스텐은 약 2.8eV 의 밴드 갭과 7.16g/cm³보다 약간 작은 밀도를 가진 밝은 노란색입니다. 열적 안정성이 좋지 않고 저온(-10°C 미만)에서 형성되며 17°C 까지 가열하여 단사정 결정 형태로 변형됩니다.

triclinic yellow tungsten trioxide 의 준비 및 조건

Triclinic 텅스텐은 극저온 냉각 (예 : -50 ° C) 단사정 WO₃에 의해 제조되거나 특정 용매 조건 하에서 유도됩니다. 준비에는 엄격하게 제어되는 온도와 냉각 속도가 필요합니다.

triclinic 결정 텅스텐의 응용 분야

Triclinic 텅스텐은 주로 WO₃의 저온 상변태 거동을 연구하는 데 사용되며 불안정성으로 인해 산업 응용 분야는 거의 제로에 가깝습니다.

3.3 물리적 형태에 따른 황색 삼산화 텅스텐의 분류

다기능 재료로서, 황색 텅스텐 트리 옥사이드 (WO₃)의 물리적 형태의 다양성은 그 특성과 응용에 큰 영향을 미친다. 물리적 형태에 기반한 분류는 주로 나노 입자, 나노 시트 및 나노 와이어를 포함한 황색 삼산화 텅스텐의 미세 구조 및 크기 특성에 중점을 둡니다. 이러한 형태는 일반적으로 특정 준비 프로세스를 통해 얻어지며 다양한 산업 및 과학 연구 시나리오에 적합합니다. 다음은 각 형태의 특성, 준비 방법 및 용도에 대한 자세한 설명입니다.

3.3.1 텅스텐 나노 입자

옐로우 스텐 나노 입자는 입자 크기가 1-100 나노 미터 인 구형 또는 거의 구형 황색 텅스텐 삼산화물 입자를 말하며, 높은 비 표면적과 우수한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 나노 기술 분야에서 중요한 위치를 차지합니다.

텅스텐 황색 입자의 형태학적 특성

텅스텐 황색 나노 입자는 일반적으로 크기가 10-100 nm 사이이며 형태가 구형 또는 다면체이며 표면이 매끄럽거나 약간 거칠다. 그 결정 구조는 대부분 단사정 결정 형태이지만 준비 조건으로 인해 직교 또는 육각형일 수도 있습니다. 나노 입자의 크기 분포는 투과 전자 현미경 (TEM) 또는 주사 전자 현미경 (SEM)으로 관찰 할 수 있으며 일반적으로 균일 성이 우수합니다.

텅스텐 나노 입자의 물리 화학적 성질

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

황색 삼산화 텅스텐 나노 입자는 밝은 노란색이며 밴드 갭은 약 2.6-2.8 eV 이고 밀도는 거의 7.16 g / cm³입니다. 비표면적은 기존의 황색 삼산화 텅스텐 분말보다 훨씬 높으며 최대 20-50m² / g 이며이 높은 비 표면적은 표면 활성을 향상시킵니다. 나노 입자의 열적 안정성은 거시적 인 황색 삼산화 텅스텐의 열적 안정성과 유사하지만 고온에서는 표면 효과로 인해 산소가 약간 손실 될 수 있습니다. 화학적으로 텅스텐 나노 입자는 알칼리성 조건에서 텅스텐 산 이온 (WO₄²⁻)을 형성하기 위해 용해 될 수 있으며, 이는 환원 분위기에서 저 산소 텅스텐 산화물로 전환 될 수 있습니다.

황색 텅스텐 삼산화물 나노 입자의 제조 방법

황색 텅스텐 삼산화물 나노 입자를 제조하는 방법에는 다음과 같은 다양한 방법이 있습니다.

- **용제열 방법** : 텅스텐 산 또는 텅스텐 산 나트륨을 원료로 사용하여 180-220 °C 에서 물 또는 유기 용제와 반응시키고 계면 활성제 (예 : CTAB)를 첨가하여 입자 크기를 제어합니다.
- **기상 증착** : 나노 입자는 불활성 대기에서 WO₃ 전구체의 증발에 의해 형성됩니다.
- **소성 방법** : 400-600 °C 에서 파라 텅스텐 산 암모늄을 소성 한 후, 나노 스케일 입자는 불 밀링 또는 초음파 분산에 의해 준비됩니다. 이러한 방법은 온도, pH 또는 반응 시간을 조정하여 입자 크기와 형태를 정밀하게 제어할 수 있습니다.

텅스텐 나노 입자의 응용 분야

텅스텐 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드 나노 입자는 우수한 특성으로 인해 많은 분야에서 널리 사용됩니다.

- **광촉매** : 높은 비 표면적은 광촉매 물이 수소로 분리되거나 유기 오염 물질이 분해되는 데 더 효율적입니다.
- **에너지 저장 재료**: 리튬 이온 배터리의 음극 재료로서 이론적 비용량은 693mAh/g 로 높으며 사이클 안정성은 기존 재료보다 우수합니다.
- **가스 센서**: 나노 입자는 가스 (예 : H₂, CO)를 줄이는 데 민감하며 환경 모니터링에 사용할 수 있습니다.
- **안료**: 미세한 입자 크기와 균일성으로 인해 고급 세라믹 및 코팅에서 안정적인 노란색을 제공할 수 있습니다.

3.3.2 텅스텐 나노 시트

황색 삼산화 텅스텐 나노 시트는 나노 미터의 두께와 최대 마이크론의 가로 크기를 가진 2 차원 층 구조를 가진 황색 삼산화 텅스텐을 말하며, 이는 독특한 형태로 인해 박막 재료 및 촉매 분야에서 많은 관심을 끌었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 엘로우 나노 시트의 형태학적 특성

텅스텐 나노 시트의 두께는 일반적으로 1에서 50 나노미터 사이이며 가로 크기는 0.1-10 마이크로미터에 도달할 수 있으며 형태는 얇은 시트 또는 직사각형 시트입니다. TEM 및 원자력 현미경(AFM)은 가장자리가 약간 말린 평평한 표면을 보여줍니다. 그 결정 구조는 대부분 단사정 결정 유형이며, WO₃ 판면체는 특정 방향을 따라 질서 정연하게 배열되어 층 구조를 형성합니다.

텅스텐 나노 시트의 물리 화학적 특성

황색 삼산화 텅스텐 나노 시트는 밝은 노란색이며 나노 입자 (약 2.5-2.7 eV)보다 약간 낮은 밴드 갭이 있으며 2 차원 구조로 인해 광학적으로 이방성입니다. 비표면적은 약 10-30m²/g 로 나노 입자보다 낮지만 거시적 분말보다 높습니다. 나노시트의 열적 안정성은 양호하지만 고온에서 층간 상호 작용으로 인해 구조적 재편성이 발생할 수 있습니다. 화학적 특성은 황색 삼산화 텅스텐과 동일하지만, 더 많은 노출된 평면으로 인해 표면 반응 (예 : 흡착)에서 활성이 더 높습니다.

텅스텐 나노 시트의 제조 방법

황색 삼산화 텅스텐 나노 시트의 제조는 주로 다음을 포함합니다 :

- **액상 박리** : 벌크 WO₃는 용매 (예 : 에탄올)에 분산되고 초음파로 나노 시트로 박리 된다.
- **열수 법** : 텅스텐 산 나트륨을 원료로 사용하고 가이드 제를 첨가하여 180-200 °C 에서 반응하여 층상 구조를 생성합니다.
- **화학 기상 증착 (CVD)** : WO₃ 박막을 기판에 증착 한 다음 박리 또는 에칭하여 나노 시트를 생산합니다. 이러한 방법은 시트 구조의 무결성을 보장하기 위해 제어된 반응 조건을 필요로 합니다.

노란색 텅스텐 삼산화물 나노 시트의 응용 분야

텅스텐 나노 시트의 2 차원 특성은 특정 영역에서 우수합니다.

- **일렉트로크로믹 소재**: 스마트 윈도우 유리에 사용되며 시트 구조로 되어 있어 색상 변화의 균일성과 응답 속도를 향상시킵니다.
- **광전자 재료**: 박막 트랜지스터 또는 광검출기의 구성 요소인 2 차원 구조는 전자 전달 효율을 향상시킵니다.
- **촉매**: 활성 부위의 평면 노출은 광촉매 또는 전기 촉매 반응에서 매우 효율적입니다.
- **유연한 전자 장치**: 웨어러블 장치용 유연한 기판에 증착할 수 있습니다.

텅스텐 엘로우 나노 시트의 특성과 한계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 옐로우 나노 시트의 장점은 2 차원 구조의 이방성과 높은 평면 활성이지만, 제조 공정이 복잡하고 조각 사이의 적층으로 인해 성능이 일부 저하 될 수 있습니다.

3.3.3 텅스텐 나노 와이어

황색 텅스텐 삼산화물 나노 와이어는 직경이 나노 미터이고 길이가 최대 마이크론 인 1 차원 황색 텅스텐 삼산화물로, 높은 종횡비와 우수한 전기 전도성으로 인해 나노 장치에서 중요한 응용 분야를 가지고 있습니다.

텅스텐 나노 와이어의 형태학적 특성

텅스텐 나노 와이어는 일반적으로 직경이 10-100 나노 미터이고 길이가 1-50 마이크론이며 길쭉한 원통형 또는 막대 모양입니다. SEM 과 TEM 은 표면이 매끄럽고 결정 구조가 대부분 단사 또는 육각형이며 WO_6 팔면체가 1 차원으로 배열되어 선형 구조를 형성한다는 것을 보여주었습니다.

텅스텐 나노 와이어의 물리 화학적 성질

텅스텐 나노 와이어는 나노 입자와 유사한 약 2.6-2.8 eV 의 밴드 갭을 가진 밝은 노란색입니다. 비표면적은 약 $15-40m^2/g$ 이며 나노 입자와 나노 시트 사이입니다. 1 차원 구조로 인해 전자 수송 능력이 우수하고 축을 따른 전도성이 다른 형태보다 높습니다. 황색 삼산화 텅스텐과 같이 열적으로 안정하지만 고온에서 표면 장력으로 인해 파손 될 수 있습니다. 화학적으로 나노와이어는 표면 활성이 높고 가스 분자나 이온과 쉽게 반응할 수 있습니다.

텅스텐 나노 와이어의 제조 방법

황색 삼산화 텅스텐 나노 와이어의 제조 방법은 다음과 같습니다.

- 열수 법 : 황색 텅스텐 산화물 전구체를 원료로 사용하고 구조 지시제 (예 : K_2SO_4)를 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 첨가하여 1 차원 성장을 유도합니다.
- 전기 화학 증착 : WO_2 는 주판 (예 : AAO 필름)에 증착 된 다음 주형에서 제거되어 나노 와이어를 얻는다.
- 기체 상 방법 : 나노 와이어는 WO_3 의 증발과 캐리어 가스에 증착에 의해 형성됩니다. 이러한 방법을 사용하려면 성장 방향과 크기를 정밀하게 제어해야 합니다.

텅스텐 황색 나노 와이어의 응용 분야

텅스텐 텅스텐 나노 와이어는 1 차원 특성으로 인해 여러 영역에서 탁월합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **가스 센서:** 종횡비와 표면 활성이 높아 NO₂ 및 H₂S 와 같은 가스에 매우 민감합니다.
- **광촉매:** 1 차원 구조는 전자-정공 분리를 촉진하고 광촉매 효율을 향상시킵니다.
- **나노 전자 장치:** 전계 효과 트랜지스터의 전도성 채널로서 선형 구조는 장치 성능을 향상시킵니다.
- **에너지 저장:** 슈퍼 커패시터의 전극 재료로 사용되어 빠른 이온 확산 경로를 제공합니다.

3.3.4 텅스텐 나노로드

Yellowschet 나노 막대는 나노 와이어와 나노 입자 사이의 형태학적 형태를 가진 1 차원 황색 텅스텐 트리 옥사이드 (WO₃)이며 종횡비와 표면 활성이 높으며 나노 물질 분야에서 고유 한 응용 잠재력을 가지고 있습니다.

텅스텐 나노 막대의 형태학적 특성

텅스텐 나노 막대는 일반적으로 직경이 20-200 nm 이고 길이가 최대 0.5-10 마이크로미터로 짧고 두꺼운 막대 모양 또는 기둥 모양입니다. 나노 와이어에 비해 나노 막대는 직경이 더 크고 길이 대 직경 비율이 약간 낮습니다 (일반적으로 5-20).

황색 텅스텐 삼산화물 나노 막대의 물리 화학적 성질

텅스텐 나노 막대는 텅스텐의 다른 나노 형태와 유사한 약 2.6-2.8 eV 의 밴드 갭을 가진 밝은 노란색입니다. 비표면적은 일반적으로 10-30m²/g 으로 나노와이어보다 약간 낮지만 거시적 분말보다 높습니다. 1 차원 구조로 인해 축 방향을 따라 강한 전자 수송 능력과 높은 표면 활성을 가지고 있습니다. 나노막대는 밀도가 거의 7.16g/cm³이고 열적으로 안정적이지만 고온에서 표면 장력으로 인해 약간 변형될 수 있습니다. 화학적으로, 나노 막대는 알칼리성 환경에서 용해되어 텅스텐 산 이온 (WO₄²⁻)을 형성 할 수 있으며, 이는 환원 조건 하에서 변환 될 수 있습니다.

텅스텐 옐로우 나노 막대의 제조 방법

황색 삼산화 텅스텐 나노 막대의 제조 방법은 다음과 같습니다.

- **열수 법 :** 텅스텐 산 나트륨을 원료로 사용하고 180-220 °C 에서 가이드 에이전트 (예 : Na SO₃)를 첨가하여 성장 방향을 제어하고 막대 모양의 구조를 형성합니다.
- **용제열 방법:** 파라텅스텐 산 암모늄은 유기 용매 (예 : 에탄올)의 전구체로 사용되어 pH 값과 온도를 조정하여 나노 막대를 생성한다.
- **스텐실 방법:** WO₃를 다공성 주형(예: 알루미늄 필름)으로 증착한 다음 제거하여 막대와 같은 형태를 얻습니다. 이러한 방법은 반응 시간과 농도를 제어하여 막대의 길이와 직경을 조절합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 나노 막대의 응용 분야

그들의 형태와 특성으로 인해, 텅스텐 나노 막대는 다음 분야에서 널리 사용됩니다 :

- **광촉매:** 표면 활성이 높으면 물의 광분해 또는 오염 물질의 분해가 우수합니다.
- **가스 센서:** NH₃, NO₂ 및 기타 가스에 민감하여 공기질 모니터링에 사용할 수 있습니다.
- **전극 재료:** 슈퍼 커패시터 또는 리튬 배터리에서 빠른 이온 수송 경로를 제공합니다.
- **복합재:** 기계적 특성을 개선하기 위해 강화 단계로 폴리머 또는 세라믹에 첨가됩니다.

3.3.5 텅스텐 나노 플라워

옐로우 텅스텐 트리 옥사이드 나노 플라워 (Yellow tungsten trioxide nanoflower)는 나노 스케일 서브 유닛 (예 : 나노 시트 또는 나노 바늘)으로 조립 된 꽃과 같은 3 차원 구조를 가진 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드를 말하며, 복잡한 형태와 높은 비 표면적으로 인해 촉매 분야에서 상당한 이점이 있습니다.

텅스텐 나노 플라워의 형태학적 특성

텅스텐 나노 플라워의 전체 크기는 일반적으로 0.5-5 마이크로미터이며 꽃을 닮은 방사형 패턴으로 배열 된 여러 개의 나노 시트 또는 나노 바늘 (두께 또는 직경 10-50 나노미터)로 구성됩니다. SEM은 조밀한 중심과 흩어져 있는 주변부를 가진 다단계 구조를 가지고 있음을 보여줍니다.

텅스텐 나노 플라워의 물리 화학적 특성

텅스텐 옐로우 나노 플라워는 약 2.5-2.7 eV 의 밴드 갭을 가진 밝은 노란색으로 표면에 긍정적이며 30-60 m² / g 에 도달 할 수 있으며 다공성 구조로 인해 우수한 흡착 능력을 가지고 있습니다. 열 안정성은 황색 삼산화 텅스텐과 동일하지만 고온에서는 느슨한 구조로 인해 부분적으로 붕괴 될 수 있습니다.

황색 텅스텐 트리 옥사이드 나노 플라워의 제조 방법

텅스텐 나노 플라워의 제조는 주로 사용됩니다.

- **열수 법 :** 텅스텐 산 나트륨을 원료로 사용하고, 요소 또는 CTAB 을 200 °C 에서 구조 가이드 제로 첨가하여 나노 시트를 꽃으로 자체 조립하는 것을 촉진합니다.
- **마이크로파 보조 방법 :** 마이크로파 가열은 WO₃ 결정 핵의 성장을 꽃과 같은 구조로 빠르게 유도하는 데 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **용열 방법:** 에틸렌 글리콜과 같은 용매에서 농도와 온도를 제어하여 계층적 구조를 형성합니다. 이러한 방법은 꽃 구조의 무결성을 보장하기 위해 반응 조건의 최적화가 필요합니다.

노란색 텅스텐 트리 옥사이드 나노 플라워의 응용 분야

텅스텐 나노 플라워는 다음 분야에서 탁월합니다.

- **광촉매 :** 다공성 구조와 노출 된 활성 부위는 광촉매 효율을 향상시키고 수처리에 적합합니다.
- **가스 센서:** H₂S 및 CO 와 같은 가스에 대한 민감도가 높아 환경 모니터링에 탁월한 소재입니다.
- **에너지 저장:** 슈퍼 커패시터의 전극 재료로 사용되며 높은 비용량과 빠른 충전 및 방전을 제공합니다.
- **생의학:** 광열 요법 또는 약물 전달을 위한 적재 가능한 약물.

3.3.6 텅스텐 나노 튜브

텅스텐 옐로스텐 나노 튜브는 1 차원 중공 황색 텅스텐 트리 옥사이드 구조로, 관 모양이 나노 장치 및 에너지 저장에 널리 사용되는 독특한 물리 화학적 특성을 제공합니다.

텅스텐 나노튜브의 형태학적 특성

텅스텐 나노 튜브의 직경은 일반적으로 20-100 나노 미터, 벽 두께는 5-20 나노 미터, 길이는 1-20 마이크로에 도달 할 수 있습니다. TEM은 튜브 벽이 튜브에 균일한 공동이 있는 단사정 WO₃ 팔면체로 구성되어 있음을 보여주었습니다. 길이 대 직경 비율은 50 이상에 달할 수 있으며 표면 곡률이 높습니다.

텅스텐 나노 튜브의 물리 화학적 특성

텅스텐 나노 튜브는 밝은 노란색이며 밴드 갭은 약 2.6-2.8 eV, 비 표면적은 20-40 m² / g이며 흡착 및 이온 수송 능력을 향상시키는 중공 구조입니다. 열 안정성은 좋지만 튜브 벽은 고온에서 붕괴될 수 있습니다. 화학적으로 나노 튜브는 내부 및 외부 표면 모두에서 활성화되며 환원 분위기에서 저산소 상태 WO₃로 전환 될 수 있습니다.

텅스텐 옐로우 텅스텐 트리옥사이드 나노 튜브의 제조 방법

황색 삼산화 텅스텐 나노 튜브의 제조 방법은 다음과 같습니다.

- **템플릿 방법 :** 양극 산화 알루미늄 (AAO)을 템플릿으로 증착삼산화 텅스텐, 그리고 나서 템플릿을 젓물로 용해시킨다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **열수 법** : 텅스텐 산 나트륨을 원료로 사용하고 폴리에틸렌 글리콜 (PEG)을 첨가하여 관 성장을 유도합니다.
- **전기 화학적 방법** : 텅스텐 호일을 아노다이징하여 나노 튜브 어레이를 직접 생성합니다. 이러한 방법은 중공 구조를 만들기 위해 템플릿 기공 크기 또는 성장 조건을 제어해야 합니다.

텅스텐 황색 나노 튜브의 응용 분야

텅스텐 나노 튜브는 다음 분야에서 중요한 응용 분야를 가지고 있습니다.

- **에너지 저장**: 리튬 배터리 또는 슈퍼 커패시터에서 중공 구조는 빠른 이온 확산 채널을 제공합니다.
- **광촉매**: 내부 및 외부 표면은 광 흡수와 촉매 효율을 향상시킵니다.

3.3.7 텅스텐 중공 공

텅스텐 중공 구조는 3 차원 중공 구조를 가진 구형 황색 텅스텐 삼산화물을 말하며, 이는 낮은 밀도와 높은 비 표면적으로 인해 에너지 저장 및 촉매 분야에서 잠재력을 가지고 있습니다.

텅스텐 중공 볼의 형태학적 특성

텅스텐 중공 볼의 직경은 0.2-5 미크론, 셸 두께는 10-100 나노 미터, 내부는 중공 캐비티입니다. SEM 과 TEM 은 표면이 나노 입자 또는 나노 시트로 구성 될 수 있음을 보여 주었고, 결정 구조는 대부분 단사정 결정 유형이며, WO_6 팔면체는 셸 구조를 형성합니다.

텅스텐 중공 볼의 물리 화학적 성질

텅스텐 중공 구는 밝은 노란색이며 밴드 갭은 약 2.6-2.8 eV 이고 비표면적은 $20-50 \text{ m}^2 / \text{g}$ 이며 이는 중공 구조 ($7.16 \text{ g} / \text{cm}^3$ 미만)에 의해 감소합니다. 열 안정성은 좋지만 고온에서 셸이 깨질 수 있습니다.

텅스텐 중공 볼의 제조 방법

텅스텐 중공 볼의 제조 방법은 다음과 같습니다 :

- **주형 방법**: 폴리스티렌(PS) 미세구를 주형으로 사용하고, WO_3 로 덮은 다음 주형을 제거하기 위해 소성합니다.
- **분무 건조 방법** : 텅스텐 산염 용액은 분무되고 열처리되어 중공 구조를 형성합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **자체 조립 방법** : WO_3 나노 입자는 열수 법에 의해 구형으로 자체 조립되도록 유도됩니다. 이러한 방법을 사용하려면 템플릿 크기와 소성 온도를 제어해야 합니다.

텅스텐 증공 불의 응용 분야

텅스텐 증공 불의 응용 프로그램은 다음과 같습니다.

- **에너지 저장**: 리튬 배터리에서 높은 비용량과 빠른 이온 수송을 제공합니다.
- **광촉매(Photocatalysis)**: 속이 빈 구조는 빛의 산란과 촉매 활동을 향상시킵니다.
- **흡착제**: 물에서 독성 물질을 제거하는 데 사용됩니다.
- **센서**: 습도나 가스에 민감합니다.

텅스텐 증공 불의 특성과 한계

텅스텐 증공 불의 장점은 밀도가 낮고 비 표면적이 높다는 것이지만 복잡한 준비 과정과 깨지기 쉬운 셀로 인해 내구성이 제한됩니다.

3.4 입자 크기에 따른 황색 삼산화 텅스텐의 분류

황색 삼산화 텅스텐 (WO_3)의 입자 크기는 분류의 중요한 기초 중 하나이며, 이는 물리적 특성, 화학적 거동 및 응용 분야에 직접적인 영향을 미칩니다. 입자 크기에 따라 텅스텐은 거친 입자의 황색 텅스텐, 초미세 황색 텅스텐 및 마이크로 황색 텅스텐의 세 가지 범주로 나눌 수 있습니다. 이러한 범주는 거시적 규모에서 미시적 규모로의 변화를 반영하며, 각 등급은 준비 프로세스와 용도에 상당한 차이가 있습니다. 다음은 각 기능 유형에 대한 자세한 설명입니다.

3.4.1 거친 황색 텅스텐 삼산화물

거친 황색 텅스텐 삼산화물은 일반적으로 직경이 10 마이크로 이상인 큰 입자 크기를 가진 황색 텅스텐 삼산화물을 말하며 전통적인 산업 분야에서 널리 사용되며 간단한 준비와 저렴한 비용으로 인해 선호됩니다.

거친 황색 텅스텐 삼산화물의 특성

굵은 입자의 크리스토의 입자 크기는 일반적으로 10-100 마이크로이며 형태는 대부분 불규칙한 다면체 또는 벌크 입자입니다. 주사 전자 현미경은 표면이 거칠고 미세 균열이나 기공이 있을 수 있음을 보여줍니다. 그것의 결정 구조는 단사정 결정 형태에 의해 지배되며, WO_6 팔면체는 규칙적인 3 차원 네트워크를 형성합니다. 입자의 크기가 크기 때문에 비표면적이 낮으며 일반적으로 $0.5-2m^2/g$ 사이입니다.

거친 입자의 황색 텅스텐 트리 옥사이드의 물리 화학적 성질

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

거친 황색 텅스텐 삼산화물은 밝은 노란색 또는 황록색이며 약 2.6-2.8 eV의 밴드 갭, 7.16 g/cm³의 밀도, 우수한 열 안정성 및 1473 °C의 용점을 갖는다. 화학적 안정성이 높고 공기 중에서 분해되기 쉽지 않지만 알칼리성 조건에서 용해되어 텅스텐 산 이온(WO₃²⁻)을 형성할 수 있습니다. 비표면적이 작기 때문에 표면 활성이 낮고 반응 속도가 느립니다.

굵은 황색 텅스텐 삼산화물의 제조 방법

거친 황색 텅스텐 트리 옥사이드의 제조 과정은 일반적으로 다음을 통해 간단합니다.

- **소성 방법** : 과라 텅스텐 산 암모늄은 500-700 °C의 공기 중에서 소성되어 거친 입자를 직접 생성합니다.
- **고상 반응 방법** : 텅스텐 산 또는 텅스텐 농축액을 원료로 사용하며 고온 로스팅 후 냉각하여 큰 입자를 형성합니다. 이러한 방법은 입자 성장을 세밀하게 제어할 필요가 없으며 대규모 생산에 적합합니다.

거친 입자의 황색 텅스텐 삼산화물의 적용 분야

거친 입자의 황색 텅스텐 트리 옥사이드는 주로 전통 산업에서 사용됩니다.

- **분말 야금**: 텅스텐 금속 분말 및 텅스텐 카바이드 생산의 원료로 사용되며 초경합금 도구 및 내마모성 부품 제조에 사용됩니다.
- **안료**: 세라믹스 및 페인트에 안정적인 노란색을 제공하며 입자가 크기 때문에 색상 균일성이 보통입니다.
- **촉매 담체**: 활성 물질을 운반하는 화학 반응에서 기본 물질로 사용됩니다. 그것의 낮은 비표면적은 높은 정밀도의 분야에 있는 그것의 신청을 제한합니다.

거친 황색 텅스텐 트리 옥사이드의 장점은 제조 비용이 낮고 안정성이 높아 대량 산업용으로 적합합니다. 그러나 표면 활성이 낮고 입자 크기가 크기 때문에 나노 기술이나 고효율 시나리오에서는 적합하지 않습니다.

3.4.2 초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물

초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물은 입자 크기가 100 나노 미터에서 1 마이크로미터 사이인 황색 텅스텐 삼산화물을 말하며 마이크로미터와 나노 스케일의 특성을 가지며 고성능 재료에서 중요한 역할을 합니다.

초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물의 특성

초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물의 입자 크기 범위는 0.1-1 마이크로미터 (100-1000 나노미터)이며, 형태는 대부분 구형 또는 거의 구형이며, 입자 분포는 비교적 균일합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SEM 과 투과전자현미경(TEM)은 표면이 매끄럽고 결정 구조가 단사정 결정 형태에 의해 지배되며 그 중 일부는 육각형 결정 형태일 수 있음을 보여주었습니다. 비표면적은 5에서 20m²/g 사이이며, 이는 거친 입자의 황색 텅스텐 삼산화물보다 훨씬 높습니다.

초미립자 크산트라마이트의 물리화학적 성질

초 미세 황색 텅스텐 삼산화물은 밝은 노란색이며 밴드 갭은 약 2.6-2.8 eV 이고 밀도는 거의 7.16 g / cm³입니다. 열 안정성이 좋지만 고온에서는 표면 효과로 인해 약간의 산소를 잃을 수 있습니다. 화학적으로, 표면 활성은 거친 황색 텅스텐 삼산화물보다 높으며 광촉매 또는 가스 흡착에서 더 강력한 능력을 나타냅니다. 초미립자의 크기 효과는 약간 더 높은 전도성 및 광 흡수 효율과 같은 전기적 및 광학적 특성의 개선을 초래합니다.

초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물의 제조 방법

초미세 입자 크산톤의 제조는 다음을 포함한 입자의 성장을 제어해야 합니다.

- **습식 화학 방법** : 텅스텐 산 나트륨 용액을 원료로 사용하여 산성화 및 침전 후 400-600 °C 에서 소성하고 분산제 (예 : PVP)를 첨가하여 입자 크기를 제어합니다.
- **기계적 연삭 방법** : 거친 입자의 황색 텅스텐 삼산화물은 고 에너지 볼 밀에 의해 초 미세 크기로 분쇄됩니다.
- **용제법**: 텅스텐 산은 고온 및 고압에서 전구체로 사용되어 반응 시간을 조정하여 초 미세 입자를 생성합니다. 이러한 방법은 입자 크기와 결정 형태 안정성의 균형을 유지해야 합니다.

초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물의 응용 분야

초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물은 다음 분야에서 널리 사용됩니다.

- **광촉매** : 비 표면적이 높을수록 광촉매 효율이 향상되고 환경 처리에 사용됩니다.
- **에너지 저장 재료**: 리튬 배터리 양극에서 더 높은 비용량과 사이클링 안정성을 제공합니다.
- **분말 야금** : 고정밀 텅스텐 제품을 위한 미세한 텅스텐 분말의 제조.

초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물의 특성과 한계

초 미세 입자 황색 텅스텐 삼산화물은 중급 및 고급 응용 분야를 위해 높은 활성과 가공 용이성을 결합합니다. 그러나 굵은 입자보다 준비 비용이 많이 들고 응집으로 인해 성능에 영향을 줄 수 있습니다.

3.4.3 마이크론 황색 텅스텐 삼산화물

마이크론 옐로우 텅스텐 트리옥사이드는 입자 크기가 1 - 10 마이크론 사이인 옐로우 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

트리옥사이드를 말하며, 이는 업계에서 가장 일반적인 중간 크기 형태이며 다양한 시나리오에서 널리 사용됩니다.

미크론 옐로우 텅스텐 삼산화물의 특성

미크론 황색 텅스텐 삼산화물의 입자 크기 범위는 1-10 미크론이며 형태는 대부분 다면체 또는 불규칙 입자이며 입자 분포는 비교적 균일합니다. SEM 관찰은 표면 거칠기가 적당하고, 결정 구조가 단사정 결정 형태에 의해 지배되며, WO_6 팔면체가 안정적인 3차원 구조를 형성한다는 것을 보여주었다. 비표면적은 $2-5m^2/g$ 이며 굵은 입자와 초미세 입자 사이입니다.

미크론 옐로우 텅스텐 삼산화물의 물리 화학적 성질

미크론 황색 텅스텐 삼산화물은 밝은 황색이며 밴드 갭은 약 2.6-2.8 eV, 밀도는 $7.16 g/cm^3$ 이며 거친 황색 텅스텐 삼산화물과 비슷한 열 안정성이 있습니다. 화학적으로 안정하며 환원 분위기에서 저산소 상태 WO_3 로 전환 될 수 있습니다. 미크론 크기의 크기로 인해 적당한 표면 활성이 나타나며 광학 및 전기적 특성은 기존의 황색 삼산화 텅스텐과 일치하지만 일부 응용 분야에서는 더 나은 분 산성을 나타냅니다.

미크론 옐로우 텅스텐 삼산화물의 제조 방법

미크론 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드의 제조 방법은 다음과 같습니다.

- **소성 방법** : 텅스텐 산 또는 암모늄 과라 텅스텐 산염을 원료로 사용하고 500-700 °C에서 소성하여 냉각 속도를 제어하여 미크론 입자를 생성합니다.
- **분무 건조 방법** : 텅스텐 산염 용액을 분무 한 다음 열처리하여 균일 한 미크론 크기의 입자를 형성합니다.

미크론 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드의 응용 분야

미크론 황색 텅스텐 삼산화물은 다음 분야에서 널리 사용됩니다.

- **분말 야금** : 초경합금 및 텅스텐 합금에 적합한 중간 입자 크기의 텅스텐 분말 생산.
- **세라믹 안료**: 세라믹 타일 및 공예품에 균일한 노란색 색조를 제공합니다.
- **촉매** : 담체 또는 활성 성분으로 화학 반응에 사용됩니다.
- **전기 변색 재료**: 미크론 입자는 스마트 유리에서 안정적인 특성을 제공합니다.

3.4.4 서브미크론 크산트레아

서브 미크론 황색 텅스텐 삼산화물은 입자 크기가 100 나노 미터에서 1 미크론 사이 인 황색 텅스텐 삼산화물 (WO_3)을 말하며, 이는 나노 스케일 및 미크론 특성 모두에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적합하며 고성능 재료 분야에서 중요한 응용 분야를 가지고 있습니다.

서브 마이크론 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드의 특성

서브 마이크론 옐로우 텅스텐 삼산화물은 0.1-1 마이크론 (100-1000 나노 미터)의 입자 크기 범위를 가지며 대부분 구형, 다면체 또는 약간 불규칙한 입자입니다. 주사 전자 현미경(SEM) 또는 투과 전자 현미경(TEM)으로 관찰된 결과 입자 분포가 비교적 균일하고 표면이 매끄럽거나 약간 거칠습니다. 그것의 결정 구조는 일반적으로 단사정 결정 형태이며, WO_6 팔면체는 규칙적인 3 차원 네트워크를 형성합니다. 비 표면적은 일반적으로 마이크로 텅스텐과 나노 텅스텐 사이에서 $5-20m^2/g$ 입니다.

서브 마이크론 옐로우 텅스텐 삼산화물의 물리 화학적 성질

서브 마이크론 옐로우 텅스텐 삼산화물은 약 2.6-2.8 eV 의 밴드 갭과 $7.16 g/cm^3$ 의 밀도를 가진 밝은 노란색입니다. 열적 안정성이 우수하고 융점이 $1473^{\circ}C$ 이며 공기 중에서 화학적으로 안정적이며 알칼리성 조건에서 용해되어 텅스텐 산염 이온(WO_4^{2-})을 형성할 수 있습니다. 서브 마이크론 크기는 표면 활성이 마이크로 크산트르산보다 높지만 나노 x-텅스텐보다 낮으며 광 흡수 효율 및 전자 이동성이 약간 향상되는 등 광학 및 전기적 특성이 향상됩니다.

서브 마이크론 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드의 제조 방법

서브 마이크론 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드의 제조 방법은 다음과 같습니다.

- **습식 화학 방법** : 텅스텐 산 나트륨을 원료로 사용하여 산성화 및 침전 후 $400-600^{\circ}C$ 에서 소성하고 분산제 (예 : PVP)를 첨가하여 입자의 성장을 서브 마이크론 수준으로 조절합니다.
- **기계적 연삭 방법** : 마이크론 크기의 노란색 삼산화 텅스텐은 고 에너지 볼 밀에 의해 서브 마이크론 크기로 분쇄됩니다.
- **용제법**: 파라텅스텐 암모늄 을 전구체로 사용하고 반응 조건을 고온 및 고압에서 조정하여 서브 마이크론 입자를 생성합니다. 이러한 방법은 과도한 미세 조정을 피하기 위해 입자 크기를 정밀하게 제어해야 합니다.

서브 마이크론 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드의 응용

서브 마이크론 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드는 다음 분야에서 광범위한 응용 분야를 가지고 있습니다 : 광촉매 : 높은 비 표면적은 유기물 또는 수소 생산의 광촉매 분해에 탁월합니다. 에너지 저장 재료: 리튬 배터리의 양극 재료로서 적당한 비용량과 안정성을 제공합니다.

3.4.5 나노 옐로우 텅스텐 삼산화물

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nano xantrean 은 입자 크기가 1 에서 100 나노 미터 사이 인 황색 텅스텐 삼산화물을 말하며, 이는 입자 크기가 매우 작고 비 표면적이 높기 때문에 나노 기술 및 첨단 기술 분야에서 상당한 이점이 있습니다.

나노 옐로우 텅스텐 삼산화물의 입자 특성

나노 옐로우 텅스텐 삼산화물의 입자 크기 범위는 1-100 나노 미터이며 형태는 대부분 구형 또는 거의 구형이며 입자 분포는 매우 균일합니다. TEM 은 표면이 매끄럽고 결정 구조가 단사정 결정 형태에 의해 지배되며 그 중 일부는 육각형 결정 형태 또는 사방정계 결정 형태 일 수 있음을 보여줍니다. 일반적으로 20-50m²/g 사이의 높은 비표면 긍정성을 가지며 뚜렷한 나노 효과를 나타냅니다.

나노 옐로우 텅스텐 삼산화물의 물리 화학적 성질

나노 옐로우 텅스텐 삼산화물은 밝은 노란색이며 밴드 갭은 약 2.6-2.8 eV 이고 밀도는 거의 7.16 g / cm³입니다. 열 안정성은 거시적 인 황색 삼산화 텅스텐의 열적 안정성과 일치하지만 고온에서는 표면 효과로 인해 약간 손실 될 수 있습니다. 화학적으로, 나노 옐로우 텅스텐 트리옥사이드의 표면 활성은 매우 높으며 광촉매, 흡착 및 전기 화학 반응에서 잘 수행됩니다. 양자 크기 효과로 인해 밴드갭이 약간 청색 편이될 수 있는 것과 같은 광학 및 전기적 특성이 크게 향상되고 전도성이 향상됩니다.

나노 옐로우 텅스텐 삼산화물의 제조 방법

나노 옐로우 텅스텐 삼산화물의 제조 방법은 다음과 같습니다.

- **용제열 방법** : 텅스텐 산 나트륨을 원료로 사용하고 계면 활성제 (예 : CTAB)를 180-220 °C 에서 첨가하여 입자 크기를 제어합니다.
- **기상 증착** : 나노 입자는 불활성 대기에서 WO₃ 전구체의 증발에 의해 형성됩니다.
- **마이크로 에멀전 방법** : 텅스텐 산은 균일 한 나노 입자를 생성하기 위해 오일-물 2 상 시스템의 원료로 사용됩니다. 이러한 방법은 나노 단위 크기를 보장하기 위해 엄격하게 제어된 반응 조건을 필요로 합니다.

나노 옐로우 텅스텐 삼산화물의 응용 분야

나노 옐로우 텅스텐 삼산화물은 첨단 기술 분야에서 널리 사용됩니다.

- **Photocatalysis**: 높은 특정한 표면 및 활동은 그것을 물 나누기 및 오염 통제에서 극단적으로 능률적으로 만듭니다.
- **에너지 저장**: 리튬 배터리의 양극에서 최대 693mAh/g 의 이론적 특정 용량을 제공합니다.
- **가스 센서**: H₂, CO 및 기타 가스에 매우 민감하며 환경 모니터링에 사용됩니다.
- **일렉트로크로믹**: 빠른 색상 응답을 제공하기 위해 스마트 유리에 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4.6 서브 나노 옐로우 텅스텐 삼산화물

서브 나노 옐로우 텅스텐 트리옥사이드는 입자 크기가 1 나노 미터 미만인 옐로우 텅스텐 트리옥사이드를 말하며 일반적으로 원자 클러스터 또는 분자 클러스터 형태로 매우 작은 크기로 인해 기초 연구 및 첨단 기술에서 독보적인 가치를 가지고 있습니다.

서브 나노 옐로우 텅스텐 트리옥사이드의 특성

나노 미터 미만의 황색 텅스텐 삼산화물의 크기는 0.1-1 나노 미터 (1-10 Å)이며 분자 또는 클러스터 규모에 가까워 완전한 결정 구조를 형성합니다.

형태는 고분해능 TEM 또는 X 선 흡수 분광법(XAS)으로 특성화해야 하는 비정질 클러스터 또는 초소형 입자입니다. 크기가 매우 작기 때문에 비표면적이 100m²/g 이상에 달할 수 있으며 거의 모든 원자가 표면에 노출됩니다.

sub-nano yellow tungsten trioxide 의 물리 화학적 성질

나노 미터 미만의 노란색 삼산화 텅스텐의 색상은 밝은 노란색이거나 뚜렷한 색상이 없을 수 있으며, 양자 구속 효과 (3.0 eV 를 초과 할 수 있음)로 인해 밴드 갭이 크게 증가합니다. 밀도는 입자가 분자 수준에 가깝기 때문에 정확하게 측정하기 어렵습니다. 열 안정성이 좋지 않고 더 큰 입자로 응집되거나 고온에서 분해되기 쉽습니다. 화학적으로, 나노 미터 미만의 xantrean 의 표면 원자 비율은 매우 높으며 그 활성은 다른 형태의 활성을 훨씬 능가하며 촉매 반응에서 균일 한 촉매 특성을 나타냅니다.

서브 나노 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드의 제조 방법

서브 나노 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드의 제조 방법은 다음을 포함하여 더 복잡합니다.

- **화학적 환원 방법** : 텅스텐 산염을 원료로 사용하면 강력한 환원제 (예 : NaBH₄)의 작용으로 서브 나노 클러스터가 생성됩니다.
- **기체 상 방법** : 레이저 증발 WO₃에 의한 진공 환경에서 하위 나노 입자의 증착.
- **리간드 보호 방법**: WO₃ 분자 클러스터를 유기 리간드(예: PVP)로 감싸서 더 큰 입자로 응집되는 것을 방지합니다. 이러한 방법은 외부 세계로부터의 오염을 방지하기 위해 깨끗한 환경에서 작동해야 합니다.

서브 나노 옐로우 텅스텐 삼산화물의 응용 분야

서브 나노 텅스텐은 주로 최첨단 분야에서 사용됩니다.

- **촉매** : CO 산화 또는 유기 합성에서 단원자 촉매에 가까운 높은 활성을 나타냅니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 생물 의학: 세포 내부로 들어갈 수 있는 초소형 크기 때문에 약물 운반체 또는 이미징 에이전트로 사용됩니다.
- 광전자 장치: 양자점 디스플레이에서 뛰어난 광학 성능을 제공합니다.
- 기초 연구 : WO의 양자 효과 및 표면 화학 탐구.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO₃) Product Introduction

1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO₃ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO ₃ content (wt%)	≥99.95
Impurities (wt%, max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm ³)
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO₃ content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website www.tungsten-powder.com. For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

제 4 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조

황색 삼산화 텅스텐 (WO₃)의 결정 구조는 중요한 전이 금속 산화물이며, 그 물리적 및 화학적 특성은 이해의 기본입니다. 이 장에서는 텅스텐의 결정 구조 특성에 대해 기본 이론, 원자 배열, 결정학 기초 및 결정 구조 유형의 네 가지 측면에서 자세히 설명합니다.

4.1 황색 텅스텐 삼산화물의 결정 구조의 기본 이론

황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조는 그 특성의 핵심 결정 요인이며, 기본 이론은 원자 간 배열, 결합 및 구조적 안정성을 포함하는 결정 화학 및 고체 물리학을 기반으로 합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 화학식은 WO₃이며, 이는 각 텅스텐 원자가 3 개의 산소 원자와 결합하여 안정한 결정 구조를 형성한다는 것을 나타냅니다. 그것의 결정 구조는 텅스텐과 산소 원자의 공간 배열로 구성되며, 이는 광학적, 전기적, 열적 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 황색 삼산화 텅스텐의 반도체 특성 (예 : 밴드 갭 2.6-2.8 eV)은 결정 격자에서 전자의 띠틈 분포에 기인하며, 그 안정성은 결정 구조의 규칙성과 밀접한 관련이 있습니다.

황색 삼산화 텅스텐 결정 구조의 기본 단위는 WO₆ 팔면체, 즉 하나의 텅스텐 원자가 6 개의 산소 원자로 둘러싸인 중앙에 위치하며 배열 수는 6 이다. 이러한 팔면체는 코너 공유, 에지 공유 또는 얼굴 공유로 연결되어 3 차원 네트워크를 형성합니다. WO₆ 팔면체의 기하학과 배열은 텅스텐의 결정 형태와 물리적 특성을 결정합니다.

텅스텐 옐로우의 결정 구조는 온도에 따른 상 변화를 겪으며, 이는 기본 이론의 중요한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부분입니다. 실온에서 텅스텐은 주로 단사정 결정 형태로 존재하며 온도가 증가함에 따라 사방 정계 결정 형태 (330 °C 이상), 정방계 결정 형태 (740 °C 이상) 및 극한 조건 (고압 또는 도핑 등)에서도 입방체 결정 형태로 연속적으로 변형 될 수 있습니다. 이러한 상전이는 화학 조성 (WO_3)을 변경하지 않고 WO_6 팔면체의 경사각과 연결을 조정하여 격자 대칭체의 변화를 초래합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조 이론은 또한 산소 함량의 안정성을 포함한다. WO_3 는 혐기성 공석이 없는 산소 포화 상태입니다. 환원 대기에서 산소 함량이 감소하면(예: $W_{20}O_{58}$ 또는 $W_{18}O_{49}$) 결정 구조의 결함이 발생하여 팔면체 왜곡 또는 파괴가 발생할 수 있습니다. 따라서, 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조 이론은 산소 포화 상태에서의 규칙성과 안정성을 강조한다.

텅스텐의 결정 구조에 대한 연구는 X 선 회절(XRD), 중성자 회절 및 전자 현미경 기술을 기반으로 합니다. XRD 는 격자 매개변수와 공간 그룹을 결정하고, 중성자 회절은 산소 원자의 정확한 위치를 나타내며, 투과 전자 현미경(TEM)은 국부적인 원자 규모 이미지를 제공합니다. 함께, 이러한 방법은 텅스텐 결정의 구조 이론의 기초를 형성합니다.

4.1.2 텅스텐의 원자 배열

텅스텐의 원자 배열은 결정 격자에서 텅스텐과 산소 원자의 공간 분포와 연결 모드를 의미하며, 이는 결정 구조를 이해하는 열쇠입니다.

황색 삼산화 텅스텐 결정에서 텅스텐 원자는 WO_6 팔면체의 중심에 위치하며 각 텅스텐 원자는 6 개의 산소 원자와 배위 관계이며 WO 결합 길이는 약 1.8-2.0 Å (결정 형태의 약간의 차이로 인해)입니다. 이 팔면체는 3 차원 골격을 형성하기 위해 코앵글 연결로 연결되며, 즉, 각 산소 원자는 동시에 두 개의 WO_6 팔면체에 속합니다. 이 각도 연결 방법을 사용하면 격자가 구조의 안정성을 유지하면서 특정 개방성을 가질 수 있습니다.

가장 일반적인 단사정 결정 형태를 예로 들면 원자 배열은 다음과 같은 특성을 가지고 있습니다.

- **텅스텐 원자** : 결정 격자의 특정 위치 (Wyckoff 에서 4e)에 위치하여 주기적 분포를 형성합니다.
- **산소 원자** : 두 개의 텅스텐 원자 (브리지 산소)를 연결하는 유형과 하나의 텅스텐 원자 (말단 산소) 만 조정하는 다른 유형의 두 가지 유형이 있습니다. 산소 원자의 분포가 약간 상쇄되어 팔면체가 약간 기울어집니다.
- **격자 매개변수**: $a=7.306 \text{ \AA}$, $b=7.540 \text{ \AA}$, $c=7.692 \text{ \AA}$, $\beta=90.91^\circ$, 공간 그룹 $P2_1/n$. 이 배열은 단사정 결정 형태를 덜 대칭적으로 만들고 결정 격자에 특정 왜곡이 있습니다.

온도가 상승함에 따라 원자의 배열이 조정됩니다. 예를 들어:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **사방정계 결정 형태:** 팔면체는 기울기 각도가 감소하고 산소 원자 이동이 감소하며 격자 대칭이 개선됩니다(공간 그룹 Pnma).
- **정방계 결정 형태:** 팔면체는 c 축(공간 그룹 P4/nmm)을 따라 더 정렬되고 더 규칙적으로 배열됩니다. 이러한 변화는 종이나 원자 수의 변화를 포함하지 않으며 공간적 위치와 결합 각도만 조정됩니다.

텅스텐의 W-O 결합은 부분적으로 공유 결합이며 이온성입니다. 텅스텐의 +6 산화 상태는 산소 원자와 강한 화학 결합을 형성하게 하며 결합 에너지는 약 600-700kJ / mol 입니다. 이 결합 특성은 격자를 강하게 만드는 동시에 상전이를 수용할 수 있는 어느 정도의 유연성을 허용합니다.

고해상도 TEM 관찰에 의해, 텅스텐 옐로우의 원자 배열은 주기적인 격자를 보였고, 무거운 원소인 텅스텐 원자는 밝은 점을 보였으며, 산소 원자는 낮은 전자 산란 능력으로 인해 더 어둡다. 이 배열은 구조의 정확성을 검증하는 밀도 함수 이론(DFT)과 같은 이론적 계산과 일치합니다.

4.1.2 텅스텐 결정학의 기본 지식 (결정 시스템, 격자 등)

황색 삼산화 텅스텐의 결정학은 결정 시스템, 격자 유형 및 관련 매개 변수를 다루며 구조적 다양성을 이해하기 위한 이론적 기초입니다.

텅스텐 결정 시스템의 분류

텅스텐의 결정 구조는 조건에 따라 달라지는 다음과 같은 결정 시스템으로 분류 할 수 있습니다.

- **단사정 결정 시스템:** 실온에서의 주요 형태, 격자 매개변수 $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$.
- **직교 결정 시스템:** 330-740° C 간격, $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.
- **정방정 결정 시스템:** 740° C 이상, $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.
- **육각형 결정 시스템:** 특정 조건(예: 열수 합성)에서 $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$.
- **입방 결정 시스템:** 고압 또는 도핑 유도, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.
- **Trisloping 결정 체계:** 저온 (-10° C 이하), $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$.

텅스텐 격자의 종류

텅스텐의 격자 유형은 대부분 원시 (P 형)이지만 결정 시스템에 따라 다릅니다. 예를 들어:

- 단사정 결정 형태의 격자는 P 형이고 공간 그룹은 P2₁/n 입니다.
- 사방정계 결정 형태는 P 형이고 공간군은 Pnma 입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 정방정 결정 형태는 P 형이고 공간군은 P4/nmm 입니다. 격자에는 추가적인 중심 대칭점(예: 몸체 중심 또는 면 중심)이 없으며, 이는 WO₆ 팔면체 연결의 단순 주기성을 반영합니다.

텅스텐 결정 격자의 매개 변수

서로 다른 결정 형태의 격자 매개 변수는 단사정 결정 형태를 예로 들어 크게 다릅니다 : $a = 7.306 \text{ \AA}$, $b = 7.540 \text{ \AA}$, $c = 7.692 \text{ \AA}$, $\beta = 90.91^\circ$. 이러한 매개변수는 XRD 에 의해 결정되며 온도가 증가함에 따라 약간 확장됩니다. 예를 들어, 정방형의 A 와 B 는 동일한 경향이 있고 C 축은 짧아집니다.

황색 삼산화 텅스텐의 Bravi 격자는 원래 격자에 의해 지배되며, WO₆ 팔면체의 배열은 격자의 주기성을 결정합니다. 단사정 결정 형태의 격자는 가장 낮은 대칭을 갖는 반면 입방체 결정 형태는 가장 높은 대칭을 달성합니다.

4.1.3 텅스텐이 속하는 결정 구조의 종류

텅스텐 품미의 결정 구조 유형은 페로브스카이트 관련 구조로 분류될 수 있으며, 이는 왜곡된 ReO₃ 유형 구조로 나타납니다.

황색 삼산화 텅스텐의 이상적인 구조는 ReO'(삼산화 레늄)와 유사하며 입방체 프레임을 형성하기 위해 공통 각도로 연결된 MO₆ 팔면체(M 은 금속)로 구성됩니다. ReO₃ 유형의 특성은 다음과 같습니다.

- 각 금속 원자는 6 개의 산소 원자를 조정합니다.
- 산소 원자는 두 개의 금속 원자를 연결하여 3 차원 네트워크를 형성합니다.
- 이상적으로는 Pm3m 의 공간 그룹을 가진 입방체 결정 시스템입니다.

황색 삼산화 텅스텐의 실제 구조는 ReO₃ 유형의 수차이며, 이는 주로 다음과 같이 반영됩니다.

- **팔면체 기울기** : WO₆ 팔면체는 완벽하게 정렬되지 않고 기울어져 대칭이 감소합니다 (예 : 단사정 결정 형태).
- **격자 매개 변수 변경** : 이상적인 입방 구조의 $A = B = C$ 는 노란색 삼산화 텅스텐에서 $A \neq B \neq C$ (단사정 결정 형태) 또는 $A = B \neq C$ (정방 결정 형태)가 됩니다.
- **산소 원자 이동**: 산소 원자의 위치가 이상적인 지점에서 벗어나 격자 왜곡이 발생합니다.

ReO₃형 구조는 A-위치 양이온이 제거된 단순화된 형태의 페로브스카이트(ABO₃)입니다. 황색 삼산화 텅스텐의 WO₃는 페로브스카이트 구조의 B 위치(텅스텐) 및 산소 원자 부분으로 간주될 수 있으며, 그 공식 특성은 온전한 페로브스카이트와 다릅니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐의 특정 결정 형태가 기인합니다

- 단사정 결정 형태 : 대칭이 가장 낮은 가장 왜곡 된 ReO_3 유형.
- 사방정계 및 정방정 결정 형태 : 이상적인 ReO_3 유형에 가깝게 왜곡 정도가 감소합니다.
- 입방체 결정 형태 : ReO_3 유형에 가장 가깝지만 자연 조건에서는 거의 볼 수 없습니다.

4.2 텅스텐의 결정 구조에 영향을 미치는 요인

황색 삼산화 텅스텐 (Yellow tungsten trioxide, WO_3)의 결정 구조는 준비 조건, 환경 매개 변수 및 재료 자체의 특성을 포함한 다양한 요인의 영향을받습니다. 이러한 요인은 WO_3 판면체의 배열, 격자 매개 변수 및 대칭을 변경하여 텅스텐의 특정 결정 형태와 특성을 결정합니다. 다음은 준비 조건의 관점에서 텅스텐의 결정 구조에 미치는 영향에 대해 자세히 설명합니다.

4.2.1 텅스텐의 결정 구조에 대한 준비 조건의 영향

준비 조건은 반응 온도, 압력, 대기, 원료 선택 및 반응 시간을 포함하여 텅스텐 결정의 구조에 영향을 미치는 주요 외부 요인입니다. 이러한 조건은 결정 핵 형성, 입자 성장 및 상 형질전환 과정을 조절하여 텅스텐의 결정 시스템(예: 단사정, 직교, 정방체 등)과 구조적 안정성을 직접 결정합니다.

반응 온도는 황색 삼산화 텅스텐 결정 형태를 결정하는 주요 요인입니다. 온도 변화는 판면체가 기울어지고 격자 대칭이 변경되어 상전이를 유발합니다. 예를 들어, 산업 준비, [소성압모놀라 텅스텐 산업에서 온도 제어는 제품의 결정 구조에 직접적인 영향을 미칩니다.](#)

반응 압력은 결정 격자의 부피와 원자 사이의 간격을 변화시켜 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조에 영향을 미칩니다. 특히 고압 조건에서 텅스텐은 입방체 결정 형태와 같은 높은 대칭을 가진 결정 형태를 형성 할 수 있으며, 이는 정상 압력에서 달성하기 어렵습니다.

준비 중 대기(예: 산화 또는 환원)는 산소 함량이 포화 상태인지 여부를 결정합니다. 대기 중 산소의 분압이 충분하지 않으면 텅스텐은 결정 구조를 변화시키는 산소 공극 구조(예 : $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$)로 변환 될 수 있습니다.

원료 순도, 용매 유형 및 반응 시간도 결정 구조에 간접적으로 영향을 미칩니다. 예를 들어, 고순도 공급 원료는 불순물로 인한 격자 결함을 줄이는 반면, 용매 측정 방법의 용매는 핵 성장 방향을 조절합니다.

4.2.1.1 텅스텐 결정의 구조에 대한 반응 온도의 영향

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

반응 온도는 황색 삼산화 텅스텐의 제조에서 가장 중요한 매개 변수 중 하나이며, 이는 상 상태, 격자 매개 변수 및 WO_6 팔면체 배열에 직접적인 영향을 미칩니다. 온도는 열역학적 및 운동 메커니즘을 통해 결정 구조를 조절합니다.

저온($330^{\circ}C$ 이하)에서 텅스텐 결정 구조

더 낮은 온도 (예 : $-50^{\circ}C$ 에서 $17^{\circ}C$)에서 텅스텐은 $P1$ 의 공간 그룹을 가진 삼원을 형성할 수 있습니다. 이때 WO_6 팔면체는 심하게 왜곡되고 격자 대칭이 가장 낮고 격자 매개변수는 $a \neq b \neq c$ 이고 $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ 은 90° 입니다. 온도가 $17^{\circ}C$ 이상으로 상승하면 삼원 결정 형태가 단사정 결정 형태로 변하는데, 이는 낮은 온도가 원자를 재배열하는 원자의 능력을 제한한다는 것을 나타냅니다.

- **준비 예** : 실험실에서 단사정 황색 텅스텐 삼산화물을 $-10^{\circ}C$ 이하로 냉각하여 삼원 결정 형태 형성을 유도 할 수 있습니다.
- **형질**: Triclinic 결정 형태는 불안정하며 저온 연구에서만 의미가 있습니다.

실온에서 중온 ($17^{\circ}C$ - $330^{\circ}C$)에서 텅스텐 결정 구조.

상온 조건 (약 $20-25^{\circ}C$)에서 $330^{\circ}C$ 까지, 황색 삼산화 텅스텐은 단사정 결정 형태에 의해 지배되고, 공간 그룹은 $P2/n$ 이며, 격자 매개 변수는 약 $a = 7.306 \text{ \AA}$, $b = 7.540 \text{ \AA}$, $c = 7.692 \text{ \AA}$ 및 $\beta = 90.91^{\circ}$ 입니다. 이것은 황색 삼산화 텅스텐의 가장 안정한 결정 형태이며, WO_6 팔면체는 각도로 연결되어 약간 기울어 젤 있습니다.

- **준비 예** : $400-600^{\circ}C$ 에서 소성 텅스텐 산을 실온으로 냉각시켜 단사정 결정 형태를 형성한다.
- **형질**: 단사정 결정 형태의 안정성은 산업 및 과학 연구의 주요 형태로 만듭니다.

중온 및 고온 ($330^{\circ}C$ - $740^{\circ}C$)에서 텅스텐 결정 구조.

온도가 $330^{\circ}C$ 이상에서 $740^{\circ}C$ 이하로 상승하면 텅스텐은 사교도질로 변형되고 공간 그룹은 $Pnma$ 이며 격자 매개변수는 약 $a=7.341 \text{ \AA}$, $b=7.570 \text{ \AA}$ 및 $c=7.754 \text{ \AA}$ 입니다. WO_6 팔면체의 기울기 각도가 감소하고 격자 대칭이 증가합니다.

- **준비 예** : 단사정 텅스텐을 $500^{\circ}C$ 로 가열하고 절연하여 사방 정계 결정 형태를 안정화 할 수 있습니다.
- **특징**: 사방정계 결정 형태는 고온에서 전도성과 촉매 활성이 우수하지만 냉각 후 단사정 결정 형태로 다시 변경하기 쉽습니다.

고온($740^{\circ}C$ 이상)에서 텅스텐 결정 구조.

$740^{\circ}C$ 이상에서 텅스텐은 정방정 결정 형태로 들어가고 공간 그룹은 $P4/nmm$ 이며 격자

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

매개변수는 약 $a=b=5.272 \text{ \AA}$ 및 $c=7.832 \text{ \AA}$ 입니다. WO_6 팔면체가 더 정렬되고 c 축을 따른 배열이 더 규칙적이며 대칭이 더욱 향상됩니다.

- **준비 예** : $800-900 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 산화 분위기에서 WO_3 를 소성하면 정방계 결정 형태를 얻을 수 있습니다.
- **특징**: 정방계 결정 형태는 고온 응용 분야에 적합하지만 실온에서는 불안정합니다.

온도가 1473°C (녹는점)를 초과하면 텅스텐이 녹기 시작하고 결정 구조가 손실됩니다. 초고온에서 낮은 산소 분압이 동반되면 저산소 텅스텐 산화물 또는 텅스텐 금속으로 분해될 수 있습니다.

온도 효과로 인한 텅스텐 결정의 구조적 메커니즘

- **열역학**: 온도 상승은 팔면체가 장벽을 극복하고 배열을 조정할 수 있도록 하는 에너지를 제공합니다.
- **동역학**: 고온은 원자 확산을 가속화하고 격자 재구성을 촉진합니다.
- **상 변화 경로**: 삼임상→단→직교 → 사분면으로 대칭을 차례로 개선합니다.

온도에 의해 결정된 결정 형태는 텅스텐의 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 단사정 형태는 광촉매에 적합하고, 사방정계 형태는 고온 촉매에 더 적합하며, 정방정 형태는 전도성을 향상시킵니다.

4.2.1.2 텅스텐의 결정 구조에 대한 반응 압력의 영향

반응 압력은 격자 부피와 원자 간격을 변화시켜 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조에 영향을 미칩니다. 압력 효과는 고압 합성 또는 특수 조건에서 특히 두드러집니다.

대기압에서의 텅스텐 결정 구조

표준 대기압 (약 0.1 MPa)에서 텅스텐의 결정 형태는 주로 온도에 의해 결정되고, 단사정 결정 형태는 실온에 있으며, 결정 형태는 고온에서 직교 또는 정방정 결정 형태 일 수 있습니다. WO_6 팔면체의 배열은 열팽창의 영향을 받으며 결정 격자에 대한 압력의 직접적인 영향은 분명하지 않습니다.

- **준비 예**: 기존의 소성 또는 열수 방법은 대기압 하에서 수행되어 단사정 결정 형태를 생성합니다.
- **특징**: 결정 구조는 대기압에서 안정적이며 대규모 생산에 적합합니다.

중압(1-100 MPa) 텅스텐 결정 구조

중간 압력 범위 (예 : 열수 반응에서 $1-10 \text{ MPa}$)에서 텅스텐은 여전히 단사정 결정에 의해 지배되지만 격자 매개 변수는 약간 압축 될 수 있습니다. 예를 들어, a, b 및 c 축의 길이는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.1%-0.5% 감소할 수 있으며 팔면체 왜곡의 정도는 약간 다를 수 있습니다.

- **제조 예** : 황색 삼산화 텅스텐을 5 MPa 및 200 °C 의 열수 조건에서 합성하고, 결정 격자는 약간 조밀했다.
- **특징**: 중간 압력은 결정 형태에 제한된 영향을 미치지만 결정립 균일성을 향상시킬 수 있습니다.

고압 (100 MPa-10 GPa) 황색 텅스텐 삼산화물 결정 구조

고압 조건 (예 : 100 MPa 에서 10 GPa)에서 텅스텐은 입방체 (공간 그룹 Pm3m)와 같은 매우 대칭적인 결정 형태를 형성 할 수 있습니다. 이때, WO₆ 팔면체는 강제로 단단히 정렬되고, 격자 매개변수는 a=b=c 가 되는 경향이 있으며, 왜곡이 사라집니다.

- **준비 예**: 입방체 결정 형태는 고압 장치(예: 다이아몬드 앤빌)를 사용하여 5 GPa, 1000°C 에서 결합됩니다.
- **특징**: 입방체 결정 형태는 대칭이 가장 높지만 정상 압력에서는 불안정하며 압력 완화 후 단사정 결정 형태로 다시 변할 수 있습니다.
- **전이 형태** : 1-5 GPa 범위에서 정방형 형태의 전이 상태가 발생할 수 있습니다.

초고압(10GPa 이상)에서 텅스텐 결정 구조.

초고압(예: 20GPa)에서 텅스텐은 구조적 붕괴를 겪거나 비정질 또는 알려지지 않은 결정 형태와 같은 새로운 고압 상을 형성할 수 있습니다. 이 시점에서 W-O 결합 길이가 크게 단축되고 격자 부피가 10% 이상 압축됩니다.

- **준비 예**: 초고압 실험을 통해 실험실에서 구조적 변형을 관찰했습니다.
- **특징** : 초고압 상의 연구 가치는 실용성보다 큼.

압력을 받는 텅스텐 결정의 구조적 메커니즘

- **체적 압축**: 압력은 격자 간격을 줄여 팔면체 정렬을 강제합니다.
- **대칭 개선**: 고압은 팔면체 기울기의 에너지 장벽을 극복하고 격자 대칭을 향상시킵니다.
- **상변화 구동**: 압력과 온도가 함께 작용하여 고밀도 결정 형태를 유도합니다.

4.2.1.3 텅스텐 결정의 구조에 대한 반응 시간의 영향

반응 시간은 황색 삼산화 텅스텐 (WO₃)의 제조에서 핵심 매개 변수이며, 이는 결정 핵 형성, 입자 성장 및 상 전이에 영향을 미쳐 결정 구조에 상당한 영향을 미칩니다. 반응 시간의 길이는 결정의 성숙도 및 구조적 안정성과 직접적인 관련이 있습니다.

텅스텐 결정의 구조에 대한 짧은 반응 시간 (초에서 분)의 영향

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

매우 짧은 반응 시간 (예 : 몇 초에서 몇 분)에서 텅스텐의 결정 구조는 종종 불완전한 발달 상태에 있으며 비정질 또는 전이 상태를 형성 할 수 있습니다. 예를 들어, 급격한 침전 또는 마이크로파 보조 합성에서 WO_3 결정 핵은 이제 막 형성되기 시작했으며 질서 정연한 배열을 위한 충분한 시간이 부족합니다.

- **구조적 특성** : 비정질 또는 나노 결정질, 불분명 한 격자 매개 변수, WO_6 팔면체 배열은 혼란 스럽습니다.
- **준비 예** : 비정질 WO_3 는 텅스텐 산 나트륨 용액을 빠르게 산성화하여 생성됩니다 (반응 시간 < 1 분).
- **영향**: 원자 확산 및 격자 재구성의 단기적인 제한으로 인해 많은 구조적 결함이 발생하고 비표면적은 높지만 안정성이 떨어집니다.

적당한 반응 시간(분에서 시간)이 텅스텐 결정의 구조에 미치는 영향

반응 시간이 몇 분에서 몇 시간(예: 열수 방법의 경우 1-6 시간)으로 연장되면 scheelite 결정은 일반적으로 단사정(공간 그룹 $P2_1/n$)인 안정적인 결정 형태를 형성하기에 충분한 시간을 갖습니다. 이때 핵 성장이 완료되고 WO_6 팔면체가 같은 각도로 연결되어 규칙적인 3 차원 네트워크를 형성합니다.

- **구조적 특성**: 단사정 결정 형태, 격자 매개변수 $a=7.306 \text{ \AA}$, $b=7.540 \text{ \AA}$, $c=7.692 \text{ \AA}$, $\beta=90.91^\circ$.
- **제조 예** : 텅스텐 산을 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 4 시간 동안 열수 반응으로 반응시켜 단사정 황색 텅스텐 삼산화물을 생성 하였다.
- **영향**: 적당한 시간은 질서 있는 입자 성장, 결정 구조의 안정화 및 결함 감소를 가능하게 합니다.

텅스텐 결정의 구조에 대한 긴 반응 시간 (몇 시간에서 며칠)의 영향

더 긴 반응 시간 (예 : 6 시간에서 며칠) 동안 텅스텐 결정이 더 성숙하고 입자 크기가 증가하며 결정 형태 변형 또는 형태 변화가 발생할 수 있습니다. 예를 들어, 고온(예: 12 시간 동안 600°C)에서는 단사정 형태가 안정적으로 유지될 수 있지만 더 높은 온도($>740^\circ\text{C}$)에서는 사방정계 또는 정방암 형태로 변할 수 있습니다.

- **구조적 특성**: 단사정 결정 형태가 지배적이며 입자 크기는 미크론 수준에 도달할 수 있습니다. 고온에서 직교($Pnma$) 또는 정방형($P4/nmm$)일 수 있습니다.
- **준비 예**: 소성 파라텅스텐 산 암모늄을 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 24 시간 동안 유지하여 큰 입자 단사정 결정 형태를 생성하였다.
- **영향**: 장기간에 걸쳐 입자 성장 및 구조 최적화를 촉진하지만 너무 길면 입자 경계 융합 또는 산소 손실로 이어질 수 있습니다.

반응 시간의 텅스텐 결정 메커니즘

- **결정핵 형성**: 단기간에 결정핵만 형성되며 무질서하게 배열됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **입자 성장:** 적당한 시간은 안정된 결정 형태를 형성하기 위해 질서 정연한 핵 확장을 지원합니다.
- **상형질전환(Phase Transformation) 및 리모델링(Remodeling):** 원자 재배열을 장기간 허용하면 결정질 전이를 유도할 수 있습니다. 반응 시간과 온도는 시너지 효과를 발휘하여 단기간에 나노 구조를 빠르게 합성하고 장시간에 큰 입자 또는 매우 대칭적인 결정 형태를 생성하는 데 적합합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 적용에 대한 반응 시간의 영향

- 수명이 짧은 제품(예: 비정질)은 고효율 촉매에 적합합니다.
- 단사정 결정 형태와 같은 중간 시간 제품은 분말 야금 및 광촉매에 사용됩니다.

4.2.1.4 텅스텐의 결정 구조에 대한 반응 분위기의 영향

반응 분위기는 산소 함량과 산화 환원 환경을 조절하여 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조에 직접적인 영향을 미친다. 대기의 변화로 인해 WO_3 가 산소 포화 상태에서 산소 공극 구조로 변화할 수 있으며, 이는 차례로 결정 형태를 변화시킬 수 있습니다.

산화 분위기 (높은 산소 분압)가 텅스텐 결정의 구조에 미치는 영향

산소 또는 공기 (예 : O_2 분압 >0.2 atm)와 같은 산화 분위기에서 텅스텐은 산소로 포화 된 WO_3 상태를 유지하고 온도에 따라 일반적으로 단사정, 사방 정계 또는 정방계의 안정된 결정 구조를 갖는다.

- **구조적 특성:** 단사정 결정 형태($P2_1/n$), 혐기성 공극, WO_6 팔면체 정다형.
- **준비 예 :** $500^\circ C$ 에서 공기 중 암모늄 메타 텅스텐 산염을 소성하여 단사정 황색 텅스텐 삼산화물을 생성한다.
- **효과:** 높은 산소 분압은 산소 원자의 포화를 보장하고 격자 결함을 방지하며 높은 대칭과 안정성을 유지합니다.

중성 분위기 (불활성 가스)가 텅스텐 결정의 구조에 미치는 영향

중성 분위기 (예 : 질소 또는 아르곤, 0에 가까운 O_2 분압)에서 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조는 주로 WO_3 형태로 유지되지만 미량의 산소 손실로 인해 국소 결함이 발생할 수 있습니다. 일반적으로 여전히 단사정이지만 격자 매개 변수는 약간 다를 수 있습니다.

- **구조적 특성:** 단사정 결정 형태, 소량의 산소 공극, 약간 왜곡된 격자.
- **효과:** 중성 대기는 산소 보충을 감소시키고 결정 구조 안정성이 약간 감소합니다.

텅스텐 결정의 구조에 대한 대기 (저산소 분압)를 감소시키는 효과

환원 분위기 (예 : H_2 또는 CO , O_2 분압이 매우 낮음)에서 황색 삼산화 텅스텐은 산소

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

원자의 일부를 잃고 청색 텅스텐 산화물 ($W_{20}O_{58}$) 또는 자주색 텅스텐 산화물 ($W_{18}O_{49}$)과 같은 산소 공극을 형성하고 결정 구조가 크게 변합니다.

- **구조적 특성** : 블루 텅스텐 산화물 : 산소 지수 2.9, 결정 격자에서 산소 공극의 균일 한 분포. 자주색 텅스텐 산화물 : 산소 지수 2.72, 바늘 모양의 구조, 풍부한 균열.
- **효과** : 감소하는 대기는 WO_6 팔면체의 무결성을 방해하여 격자 왜곡 또는 재구성을 초래합니다.

대기 중 텅스텐 결정의 구조적 메커니즘

- **산소 포화도** : 산화 분위기는 WO_3 구조를 유지합니다.
- **산소 손실**: 환원 대기는 산소 결핍을 유발하여 결함 상태를 형성합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 적용에 대한 대기의 영향

- 산화 분위기 생성물은 광촉매 또는 안료에 적합합니다. 환원 분위기 생성물 (예 : 자주색 텅스텐)은 미세한 텅스텐 분말을 제조하는 데 사용됩니다.

4.2.1.5 텅스텐 결정의 구조에 대한 반응 속도의 영향

반응 속도는 제조 공정에서 결정 형성 속도를 말하며, 이는 온도, 농도, 교반 속도 등과 같은 요인에 의해 제어되며, 이는 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조 및 형태에 직접적인 영향을 미칩니다.

텅스텐 결정의 구조에 대한 빠른 반응 (높은 반응 속도)의 영향

높은 반응 속도 (예 : 몇 초에서 몇 분)는 일반적으로 고농도, 고온 또는 강한 교반 조건에서 발생하며, 텅스텐 결정이 비정질 또는 나노 결정 상태를 형성하기 위해 질서 정연하게 배열 될 시간이 없습니다.

- **구조적 특성** : 비정질 또는 나노 스케일 단사정 결정 형태, WO_6 팔면체 배열은 혼란 스럽습니다.
- **효과**: 빠른 반응은 결정 핵의 성장 시간을 제한하여 많은 결함과 미성숙한 결정 형태를 초래합니다.

황색 텅스텐 삼산화물의 결정 구조에 대한 적당한 반응 속도의 영향

중간 반응 속도는 핵이 질서 정연하게 성장할 수 있도록 하고 텅스텐은 적당한 입자 크기를 가진 안정적인 단사정 결정 형태를 형성합니다.

- **구조적 특성**: 단사정 결정 형태($P2_1/n$), 일반 격자, 입자 크기 0.1-1 마이크로.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **효력:** 온건한 비율, 안정되어 있는 결정 구조에 공정한 결정 핵 대형 그리고 성장.

텅스텐의 결정 구조에 대한 느린 반응 (낮은 반응 속도)의 영향

느린 반응(예: 몇 시간에서 며칠)은 저온, 저농도 또는 정지 상태에서 수행되며, schetamite 입자는 큰 입자 또는 특수 결정 형태(예: 육각형 결정 형태)를 형성할 수 있을 만큼 충분히 성장합니다.

- **구조적 특성:** 단사정 또는 육각형 결정 형태, 최대 마이크론 수준의 입자 크기.
- **효과:** 느린 반응은 입자의 질서 정연한 배열을 촉진하여 매우 대칭적인 결정 형태를 유도할 수 있습니다.

반응 속도에서 텅스텐 결정의 구조적 메커니즘

- **핵 형성 속도:** 많은 수의 작은 결정 핵이 높은 비율로 형성되고 소수의 큰 결정 핵이 낮은 비율로 형성됩니다.
- **성장 역할:** 빠른 반응은 성장을 제한하고 느린 반응은 입자 번식을 촉진합니다.
- **형태학적 영향:** 속도가 빠르고 비정질로 형성되기 쉬우며 복잡한 구조(예: 나노플라워)를 천천히 형성하기 쉽습니다.

황색 삼산화 텅스텐의 적용에 대한 반응 속도의 영향

- 빠른 반응 생성물은 고효성 촉매에 적합합니다.
- 중간 속도 제품은 광촉매 또는 에너지 저장에 사용됩니다.
- 느린 제품은 큰 안료 또는 고온 재료에 적합합니다.

4.2.1.6 텅스텐의 결정 구조에 대한 전구체의 영향

전구체는 황색 텅스텐 삼산화물 (Yellow tungsten trioxide, WO_3)의 제조를 위한 출발 물질이며, 그 화학적 조성, 구조 및 분해 특성은 황색 텅스텐 삼산화물의 결정 구조에 직접적인 영향을 미친다. 다양한 전구체는 이온을 방출하고, 결정 핵 형성을 제어하고, 반응 중 성장 방향에 영향을 미쳐 최종 결정 형태와 형태를 결정합니다.

텅스텐의 결정 구조에 대한 텅스텐 산 (H_2WO_4)의 영향

텅스텐 산은 일반적으로 산성화 된 텅스텐 산염 용액의 침전에 의해 제조되는 일반적인 전구체이며, 이는 분해되어 황색 텅스텐 삼산화물을 형성합니다.

- **구조적 효과 :** 텅스텐 산 자체는 수화물 ($WO_3 \cdot$ 층상 구조를 포함하는 H_2O)는 소성 중에 탈수되어 단사정 황색 삼산화 텅스텐(공간 그룹 $P2_1/n$)을 형성합니다. WO_6 팔면체는 층적 배열에서 3 차원 네트워크로 변경되었습니다.
- **준비 예 :** 500-600 °C 에서 공기 중 H_2WO_4 를 소성하여 단사정 WO_2 를 생성합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **형질:** 분해 과정이 간단하고 산소 함량이 포화되어 안정적인 단사정 결정 형태를 형성하기 쉽지만 입자가 큼니다.
- **메커니즘:** 팔면체는 탈수 후 직접 연결되며 결정 형태는 온도 제어됩니다.

텅스텐의 결정 구조에 암모늄 파라 텅스텐 산염 $((\text{NH}_4)_{10}[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O})$

암모늄 파라 텅스텐 산염 (APT)은 황색 삼산화 텅스텐의 산업 준비의 주요 전구체이며, 폴리 텅스텐 산염 구조는 결정 형성에 영향을 미칩니다.

- **구조적 효과:** APT 는 복잡한 $[\text{W}_{12}\text{O}_4]^{10-}$ 클러스터를 포함하고 있으며, 이는 분해될 때 NH_3 와 H_2O 를 방출하여 단사정 텅스텐을 형성합니다. 소성 온도가 상승하면($>740^\circ\text{C}$) 직교 또는 정방계 결정 형태가 형성될 수 있습니다.
- **준비 예:** 삼산화 텅스텐의 생산에서, APT 는 500°C 에서 소성되어 단사정 결정 형태를 형성한다.
- **특성:** 느린 분해 과정, 제어 가능한 입자 크기(0.1-10 마이크론), 안정적인 결정 형태.
- **메커니즘:** 클러스터 구조의 분해 후, WO_6 팔면체는 점차적으로 재배열되고 결정 형태는 대기와 온도의 시너지 효과에 영향을받습니다.

황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조에 암모늄 메타 텅스텐 산염 $((\text{NH}_4)_6[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}] \cdot n\text{H}_2\text{O})$

암모늄 메타 텅스텐 산염 (AMT)은 높은 수용성을 가지며 습식 화학 방법에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조에 적합합니다.

- **구조적 효과:** AMT 는 반응 조건에 따라 단사정 또는 육각형 노란색 삼산화 텅스텐으로 분해됩니다. 육각형 결정 형태 (P6 / mmm)는 용액의 텅스텐 산화물 클러스터가 한 방향으로 성장하는 경향이 있기 때문에 열수 조건에서 형성 될 수 있습니다.
- **제조예:** AMT 를 180°C 에서 6 시간 동안 열수반응을 일으켜 육각형 결정질 나노와이어를 생성하였다.
- **특성:** 입자가 상대적으로 작고(나노에서 서브미크론 수준) 형태가 다양합니다.
- **메커니즘:** 용액에서 텅스텐 산화물 클러스터의 배위 특성은 특수 결정 형태를 유도합니다.

텅스텐 산 나트륨 (Na_2WO_4) 이 텅스텐의 결정 구조에 미치는 영향

텅스텐 산 나트륨은 용액 방법에 의한 황색 텅스텐 삼산화물의 제조에 자주 사용되며, 이온 상태는 결정 핵의 형성에 영향을 미친다.

- **구조적 효과:** 단사정 또는 비정질 WO_3 는 텅스텐 산 나트륨의 산성화 후 형성되며, 육각형 결정 형태는 열수 조건에서 유도 될 수 있습니다. 나트륨 이온은 결정 격자에 도핑되어 대칭에 영향을 줄 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **준비 예** : 200 °C 에서 Na_2WO_4 열수 반응을 일으켜 육각형 결정질 나노 시트를 생성한다.
- **특징** : 나노 구조를 형성하기 쉽고 다양한 결정 형태를 형성합니다.
- **메커니즘**: 이온 전구체는 빠른 결정 핵형성 형성을 촉진하고 결정 형태는 용매와 온도에 의해 조절됩니다.

전구체의 메커니즘

- **분해 경로**: 전구체의 화학 결합(예: W-O, N-H)의 분할 모드는 결정 핵의 초기 배열을 결정합니다.
- **이온 배위** : 용액 내 텅스텐 산화물 클러스터의 형태는 성장 방향에 영향을 줍니다.
- **불순물 효과**: 전구체의 양이온(예: Na^+ , NH_4^+)이 남아 격자 매개변수를 변경할 수 있습니다.

황색 삼산화 텅스텐의 적용에 대한 전구체의 영향

- 텅스텐 산과 APT 는 큰 입자 단사정 결정 형태에 적합하며 분말 야금에 사용됩니다. AMT 및 Na_2WO_4 는 광촉매 또는 센서를 위한 나노 크기의 특수 결정 형태에 적합합니다.

4.2.1.7 텅스텐 결정의 구조에 대한 용매의 영향

용매는 습식 화학에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조에 중요한 역할을 하며, 핵 형성, 용질 확산 및 성장 방향에 영향을 주어 결정 구조를 조절합니다.

텅스텐의 결정 구조에 대한 물(H_2O)의 영향

물은 가장 일반적으로 사용되는 용매이며 열수 또는 침전 방법에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조에 적합합니다.

- **구조적 효과** : 물의 높은 극성은 텅스텐 산소 클러스터의 균일 한 분산을 촉진하여 일반적으로 단사정 결정 형태를 생성합니다. 구조 지시제(예: NaCl)를 첨가하면 육각형 결정 형태가 형성될 수 있습니다.
- **특징** : 균일 한 입자, 제어 가능한 크기 (나노에서 마이크론 스케일).
- **메커니즘** : 물의 수소 결합 네트워크는 결정 핵을 안정화하여 WO_6 팔면체 공간 연결을 유도합니다.

유기 용제(예: 에탄올, 에틸렌 글리콜)가 텅스텐의 결정 구조에 미치는 영향

유기 용제는 극성이 낮고 점도가 높기 때문에 용매 방법에 자주 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **구조적 효과** : 에탄올 또는 에틸렌 글리콜은 이온 확산 속도를 감소시키고 1 차원 또는 라멜라 성장을 촉진하기 때문에 육각형 또는 비정질 WO 를 유도 할 수 있습니다.
- **형질**: 복잡한 형태(예: 나노 꽃), 다양한 결정 형태.
- **메커니즘**: 유기 용매는 용매화 환경을 변화시키고 결정 핵 정렬에 영향을 미칩니다.

혼합 용매 (예 : 물-에탄올)가 텅스텐의 결정 구조에 미치는 영향

혼합 용매는 물의 극성과 유기 용매의 점도를 결합하여 결정 구조를 조절합니다.

- **구조적 효과**: 물-에탄올 혼합물은 입자 크기와 결정 형태에 영향을 미치는 다양한 비율로 단사정 또는 육각형 결정 형태를 생성할 수 있습니다. 예를 들어, 물이 많을 때는 단사정 결정 형태가 되는 경향이 있고, 에탄올이 많을 때는 육각형 결정 형태가 형성될 수 있습니다.
- **특징** : 조정 가능한 결정 형태와 형태.
- **메커니즘** : 용매 비율은 유전 상수와 확산 속도를 변화시켜 결정 성장에 영향을 미칩니다.

용제의 메커니즘

- **극성**: 극성이 높은 용매(예: 물)는 균일한 핵형성 형성을 촉진하고 극성이 낮은 용매(예: 에탄올)는 특별한 형태를 유도합니다.
- **점도**: 점도가 높은 용제는 입자 성장을 늦추고 미세한 결정을 형성합니다.
- **배위**: 용매 분자는 텅스텐 이온과 조정하여 팔면체 배열에 영향을 줄 수 있습니다.

황색 삼산화 텅스텐의 적용에 대한 용제의 영향

- 물에서 준비된 단사정 형태는 광촉매에 적합합니다. 유기 용매에 의해 생성된 육각형 결정은 가스 센서에 사용됩니다.

4.2.2 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조에 대한 외부 자극의 영향

외부 자극 (예 : 빛, 기계적 힘, 전자기장 등)은 제조 또는 사용 중에 텅스텐의 결정 구조를 변화시킬 수 있으며 상 전이, 결합 형성 또는 격자 재구성을 유도하여 성능에 영향을 미칠 수 있습니다.

텅스텐의 결정 구조에 대한 빛의 영향

조명, 특히 자외선은 텅스텐 결정의 구조에 국부적 인 변화를 유발할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **구조적 영향:** 자외선에 장기간 노출되면 표면에 산소 결핍이 형성될 수 있으며, 단사정 결정 형태가 국부적으로 산소 결함 상태(예: $W_{20}O_{58}$)로 변형될 수 있습니다.
- **예:** 단사정 WO_3 는 몇 시간 동안 자외선에 노출되고 표면에 미량의 산소 결핍이 나타납니다.
- **메커니즘:** 전자 - 정공 쌍의 광 여기, 산소 원자의 탈착은 결함을 형성합니다.

텅스텐의 결정 구조에 대한 기계적 힘의 영향

기계적 힘(예: 연삭, 초음파)은 응력을 통해 결정 구조에 영향을 미칩니다.

- **구조적 영향:** 고 에너지 불 밀링은 단사정 입자를 파괴하고 비정질 또는 나노 결정 상태를 생성 할 수 있습니다. 초음파는 얇은 판 구조를 각질을 제거합니다.
- **메커니즘:** 기계적 에너지는 격자 규칙성을 파괴하고 결함을 증가시킵니다.

텅스텐의 결정 구조에 대한 전자기장의 영향

전자기장(예: 마이크로파, 전기장)은 가열 또는 이온 이동을 통해 결정 구조에 영향을 미칩니다.

- **구조적 영향:** 마이크로파 가열은 단사 정 또는 육각형 결정 형태를 형성 할 수있는 결정 핵의 형성을 가속화합니다. 강한 전기장은 격자 왜곡을 유발할 수 있습니다.
- **메커니즘:** 전자기장은 원자 확산 속도와 에너지 분포를 변경합니다.
- **응용 분야:** 전자기장에 의해 제조 된 결정 형태는 나노 물질의 빠른 합성에 사용됩니다.

외부 자극의 메커니즘

- **에너지 입력:** 빛장과 전자기장은 에너지를 제공하여 상전이 또는 결함을 유발합니다.
- **응력:** 기계적 힘은 격자 응력 분포를 변경합니다.
- **시너지 효과:** 자극은 온도 및 압력과 시너지 효과를 발휘하여 결정 형태를 조절합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 적용에 대한 외부 자극의 영향

- 광 및 전자기장 제품은 광전자 재료에 적합합니다.
- 기계 제품은 고효율 촉매 또는 에너지 저장에 사용됩니다.

4.2.2.1 텅스텐 결정의 구조에 대한 광학 방사선의 영향

외부 자극으로, 광 복사는 광자 에너지의 상호 작용을 통해 황색 삼산화 텅스텐 (Yellow

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsten trioxide, WO_3) 결정의 결정 구조에 영향을 미친다. 광학 방사선의 유형(자외선, 가시광선 등), 강도 및 조사 시간은 특히 광촉매 또는 광전자 응용 분야에서 결정 격자를 변화시키는 정도를 결정합니다.

텅스텐의 결정 구조에 대한 자외선 (UV) 복사의 영향

자외선 (파장 < 400 nm)은 에너지가 황색 삼산화 텅스텐 밴드 갭 (2.6-2.8 eV)보다 높기 때문에 결정의 전자 전이를 효과적으로 여기시킬 수 있습니다.

- **구조적 효과:** 장기간의 자외선 조사는 표면의 산소 원자 탈착으로 이어져 산소 결핍을 형성하고 단사정 결정 형태($P2_1/n$)를 산소 결함 상태(예: $W_{20}O_{58}$)로 국부적으로 변형시킬 수 있습니다. 격자 매개 변수는 팔면체 WO_6 배열에서 약간의 왜곡과 함께 약간 다를 수 있습니다.
- **준비 예 :** 단사정 텅스텐에 254nm UV 광을 몇 시간 동안 조사하고 표면에서 산소 결핍을 감지했습니다.
- **메커니즘 :** 광자는 전자를 자극하여 원자가 대역에서 전도 대역으로 전환하여 전자-정공 쌍을 생성하고, 이 쌍은 산소 원자와 반응하여 O_2 를 형성하여 산소 공석을 남깁니다.
- **특징 :** 결정의 전체 구조는 단사정 결정질로 유지되지만 표면 결함이 증가하고 비 표면적과 활성이 증가합니다.

scheelite 결정의 구조에 대한 가시광선 복사의 영향

가시 광선 (400-700 nm)은 황색 삼산화 텅스텐 밴드 갭보다 낮은 에너지를 가지며 일반적으로 전자를 직접 여기시킬 수 없지만 도핑 또는 결함이있는 경우 국부적 인 변화를 일으킬 수 있습니다.

- **구조적 효과 :** 순수 WO_3 는 가시 광선 아래에서 결정 구조를 약하게 변화시키며 열 효과로 인해 표면 만 약간 재배치 될 수 있습니다. 도핑된 경우(예: Ti 또는 N) 가시광선은 미량의 산소 결핍을 유발할 수 있습니다.
- **준비 예 :** Ti- 도핑 된 황색 삼산화 텅스텐은 가시 광선 아래에서 조사되고 표면에 약간의 결함이 나타납니다.
- **메커니즘 :** 도핑은 밴드 갭을 줄여 가시 광선이 전자를 여기시켜 결정 격자에 간접적으로 영향을 미칩니다.
- **특성:** 효과는 표면에 국한되며 전체 결정 형태(예: 단사정)에는 큰 변화가 없습니다.

고강도 광학 방사선(예: 레이저)이 텅스텐 결정의 구조에 미치는 영향

레이저와 같은 고강도 광원은 열 효과나 광화학 반응을 통해 결정 구조를 변경할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **구조적 효과:** 레이저 조사는 국소 용융 또는 입자 재구성을 유발할 수 있으며 단사정 형태는 비정질 또는 나노결정으로 변할 수 있습니다. 고선량 레이저는 사방정계 결정에 대한 상 변화를 유도할 수도 있습니다.
- **준비 예:** 532nm 레이저(고출력)가 WO₃ 필름을 조사하고 국부 영역이 비정질이 됩니다.
- **메커니즘:** 광열 효과는 국부 온도를 높이고 원자의 재배열을 가속화합니다. 광화학적 효과는 산소 결핍을 생성합니다.
- **특징:** 변화는 조사된 영역에 집중되어 미세 가공에 적합합니다.

광 복사의 메커니즘

- **광자 에너지:** 자외선은 전자를 직접 여기시키고 산소 원자의 배위를 변화시킵니다.
- **열 효과:** 고강도 빛은 국부적인 고온을 유도하여 격자 조정을 촉진합니다.
- **결합 형성:** 산소 결핍은 WO₆ 팔면체 연결을 변경하여 대칭에 영향을 미칩니다.

텅스텐 응용에 대한 광학 방사선의 영향

- UV 유도 산소 공극은 광촉매 효율을 증가시키고 물을 분해하거나 오염 물질을 분해하는 데 사용됩니다. 레이저 처리된 구조는 소형 장치 제작에 적합합니다.

4.2.2.2 텅스텐 결정의 구조에 대한 전기장의 영향

전기장은 텅스텐 결정의 하전 입자(예: 이온 또는 전자)에 작용하여 격자 왜곡, 이온 이동 또는 상 전이를 유발할 수 있으며, 이는 결정 구조에 영향을 줄 수 있습니다.

약한 전기장 (10^4 V/m)이 황색 삼산화 텅스텐 결정의 구조에 미치는 영향

텅스텐 결정의 구조에 대한 저강도 전기장의 직접적인 영향은 작고 전자 분포는 주로 변합니다.

- **구조적 효과:** 단사정 결정 형태 (P2/n)는 동일하게 유지되지만 표면 전하 분포가 약간 조정 될 수 있으며 WO₆ 팔면체의 전자 구름이 약간 오프셋됩니다.
- **준비 예:** 전기 변색 실험에서 1-5V의 전압이 가해졌을 때 결정 구조가 크게 변하지 않았습니다.
- **메커니즘:** 약한 전기장에 의해 구동되는 전자 이동에 도달하지 않고 결정 격자를 변경하기 위한 임계값에 도달하지 않습니다.
- **형질:** 결정 형태가 안정적이며 전기적 특성에만 영향을 미칩니다.

텅스텐 결정의 구조에 대한 중간 전기장($10^4\text{-}10^6 \text{ V/m}$)의 영향

중간 강도의 전기장은 특히 고온 또는 용액에서 이온 이동 또는 국소 재배열을 유도할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **구조적 효과:** 산소 공석 또는 텅스텐 원자 이동과 같은 미량 결함은 단사정 결정 형태로 발생할 수 있습니다. 전기장이 열처리와 결합되면 직교 결정 형태(Pnma) 형성을 유도할 수 있습니다.
- **메커니즘 :** 전기장은 텅스텐 산소 이온을 움직이게하여 팔면체 배열을 변경하고 열 효과는 상 전이를 향상시킵니다.
- **형질:** 결정 형태의 변화가 제한적이며 형태(예: 나노와이어)가 더 취약합니다.

강한 전기장(>10⁶ V/m)이 텅스텐 결정의 구조에 미치는 영향

전기장의 높은 강도는 특히 전기장 구배가 큰 영역에서 결정 격자의 심각한 왜곡 또는 파괴를 유발할 수 있습니다.

- **구조적 영향 :** 단사정 형태는 국부적으로 비정질이 될 수 있습니다 또는 극한 조건에서 산소 공극이 풍부한 구조 (예 : 자주색 텅스텐 산화물)을 생성 할 수 있습니다.
- **메커니즘 :** 강한 전기장은 W-O 결합을 찢고 팔면체 네트워크를 파괴합니다. 일렉트로마이그레이션은 지역 재건을 유도합니다.

전기장의 메커니즘

- **전하 이동(Charge Migration):** 전기장은 이온 또는 전자의 이동을 유도하여 국소 배위를 변경합니다.
- **편광 효과 :** WO₃ 팔면체는 전기장에 의해 편광되고 격자 응력이 증가합니다.
- **열 시너지 효과:** 전기장 가열은 원자 재배열을 가속화합니다.

황색 삼산화 텅스텐 응용에 대한 전기장의 영향

- 매체 전기장은 광학적 특성을 변화시키면서 결정 형태를 유지하기 위해 전기 변색 재료에 사용됩니다. 강력한 전기장 생성물은 고효율 전기 촉매에 적합합니다.

4.2.2.3 텅스텐 결정의 구조에 대한 자기장의 영향

WO₃는 비자 성 물질 (반자성)이기 때문에 노란색 삼산화 텅스텐의 결정 구조에 대한 자기장의 영향은 상대적으로 약하지만 특정 조건 (예 : 용액 합성 또는 도핑)에서는 자기장이 여전히 결정 구조에 간접적으로 영향을 미칠 수 있습니다.

약한 자기장 (<1 T)이 텅스텐 결정의 구조에 미치는 영향

텅스텐의 결정 구조에 대한 저강도 자기장의 직접적인 영향은 거의 무시할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **구조적 영향** : 단사정 결정 형태 ($P2_1/n$)는 변하지 않았으며 WO_6 팔면체 배열은 크게 조정되지 않았습니다.
- **준비 예** : 0.5 T의 자기장 하에서 WO_3 를 소성하고 결정 형태는 변하지 않았다.
- **메커니즘** : 텅스텐의 반자성은 약한 자기장에 둔감하게 만듭니다.
- **특성** : 결정 구조가 안정적이며 전자 스핀 상태만 영향을 받을 수 있습니다.

텅스텐의 결정 구조에 대한 중간 자기장 (1-10 t)의 영향

중간 자기장은 용액 준비에서 핵 방향과 성장 방향에 영향을 줄 수 있습니다.

- **구조적 영향** : 단사정 다형체, 그러나 자기장은 입자가 특정 방향으로 정렬되도록 유도 할 수 있으며, 열수 조건에서 육각형 모프 ($P6/mmm$)가 형성 될 수 있습니다. 격자 매개 변수가 약간 변경됩니다.
- **메커니즘** : 자기장은 용액의 하전 입자에 작용하여 확산 경로를 변경하고 결정 성장 방향에 영향을 미칩니다.
- **형질** : 결정 형태는 많이 변하지 않으며 형태(예: 1 차원 구조)가 더 취약합니다.

강한 자기장 (>10 t)이 황색 삼산화 텅스텐 결정의 구조에 미치는 영향

높은 수준의 자기장은 특히 도핑 또는 고온 조건에서 국부적인 격자 조정을 유발할 수 있습니다.

- **구조적 효과** : 단사정 형태는 국소 결합 또는 대칭성 증가(예: 사방정계 형태)를 가질 수 있습니다. 자기 이온(예: Fe^{3+})을 도핑하면 자기장이 결정질 전이를 유도할 수 있습니다.
- **메커니즘** : 강한 자기장은 도핑 된 이온의 자기 모멘트와 상호 작용하여 WO_6 팔면체 배열을 변경합니다. 열 효과는 상전이를 향상시킵니다.
- **특징** : 결정 형태의 변화는 고온에서 도핑 또는 시너지 효과를 내야하며 순수한 WO의 효과는 제한적입니다.

자기장의 메커니즘

- **로렌츠 힘** : 자기장이 용액 내에서 움직이는 이온에 작용하여 결정 핵의 분포를 변화시킵니다.
- **간접 효과** : 자기장은 반응 역학을 변화시키고 결정 성장에 영향을 미칩니다.

텅스텐 응용에 대한 자기장의 영향

- 중간 자기장 생성물은 센서와 같은 정렬된 나노 구조에 사용됩니다.
- 강한 자기장 도핑 제품은 자성 촉매 또는 광전자 재료에 적합합니다.

4.3 텅스텐 결정의 구조와 특성 사이의 본질적인 관계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

황색 삼산화 텅스텐 (Yellow tungsten trioxide, WO_3)의 결정 구조는 그 특성의 기초이며 광학적, 전기적, 열적 및 화학적 특성을 결정합니다. 원자 배열, 결합 및 대칭을 통해 결정 구조는 본질적으로 전자 구조, 광학 밴드 갭, 전도성 및 기타 특성과 관련이 있습니다. 이 연결은 전자 구조 측면에서 탐구되고 전자 수송과 대역 구조의 두 가지 측면으로 더 세분화됩니다.

4.3.1 텅스텐의 결정 구조와 전자 구조 수준의 관계

텅스텐의 전자 구조는 결정 구조에 의해 결정되며, WO_6 팔면체의 배열, 격자 대칭 및 산소 함량의 포화는 전자 분포, 밴드 특성 및 수송 거동에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 연결은 반도체 재료로서의 황색 삼산화 텅스텐의 핵심 특성입니다. 황색 삼산화 텅스텐의 전자 구조는 텅스텐 (W)과 산소 (O) 원자의 상호 작용에서 비롯됩니다. 텅스텐의 5d 궤도와 산소의 2p 궤도는 혼성화에 의해 원자가 대역 (VB)과 전도 대역 (CB)을 형성합니다. WO_6 팔면체의 W-O 결합은 부분적으로 공유 결합이며 이온 성이며 결합 길이는 약 1.8-2.0 Å 이고 결합 에너지는 약 600-700 kJ / mol 입니다. 이 결합 특성은 텅스텐을 n형 반도체로 만들고 그 전자 구조는 결정 구조와 밀접한 관련이 있습니다.

텅스텐 결정 구조의 영향

- **단사정 결정 형태($P2_1/n$):** 실온에서 가장 일반적인 결정 형태인 팔면체는 약간 기울어져 있고 대칭성이 낮아 전자 구름의 분포가 고르지 않습니다.
- **직교 결정 형태($Pnma$):** 고온에서 형성되면 팔면체 정렬이 개선되고 대칭이 향상되며 전자가 더 균일하게 분포됩니다.
- **정방형 결정 형태($P4/nmm$):** 대칭성이 높고 팔면체는 c 축을 따라 규칙적으로 배열되며 전자 밴드는 퇴화하는 경향이 있습니다.
- **산소 결핍:** 결정 구조(예: $W_{20}O_{58}$)에서 산소 결핍이 발생하면 결합 상태로 인해 전자 에너지 준위가 추가되고 전기 전도도가 변경됩니다.

4.3.1.1 텅스텐 결정 구조가 전자 수송에 미치는 영향

황색 삼산화 텅스텐의 전자 수송 능력은 광촉매, 센서 및 전기 변색 응용 분야에서 핵심 성능이며 결정 형태, 결합 및 형태를 포함한 결정 구조의 직접적인 영향을받습니다.

전자 수송을 이용한 단사정 텅스텐

단사정 텅스텐은 실온에서 안정적인 형태이며 WO_6 팔면체 기울기로 인해 낮은 격자 대칭이 발생합니다.

- **효과:** 전자 수송 경로는 팔면체 왜곡에 의해 차단되고 격자 방향을 따른 전자 이동도가 낮습니다(약 $0.1-1cm^2/V\cdot s$). 밴드 갭은 2.6-2.8 eV 이며 전자는 주로 열 또는 광여기에 의해 전이됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 예: 단사정 WO_3 박막은 제한된 전자 수송 효율로 인해 전기 변색에서 긴 응답 시간을 갖습니다.
- 메커니즘: 낮은 대칭성은 전자 산란을 증가시키고 캐리어 이동을 제한합니다.

전자 수송을 가진 직교 및 정방형 텅스텐

직교 및 정방체 결정 형태의 대칭은 고온에서 개선되고 팔면체 배열이 더 규칙적입니다.

- 영향: 전자 수송 효율 향상, 최대 $1-10\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 이동성, 격자 산란 감소. 밴드 갭이 약간 낮고($2.4-2.6\text{eV}$) 전자 전환이 더 쉽습니다.
- 예 : 사방 정계 형태 WO_3 는 고온 전극에서 단사정 형태보다 전도성이 높습니다.
- 메커니즘: 높은 대칭성은 전자 경로 방해물을 줄이고 결정 축을 따라 수송을 향상시킵니다.

산화 텅스텐 산소 공석의 영향

산소 공극 (예 : 파란색 또는 자주색 텅스텐 산화물)은 전자 전달을 크게 변경하는 결합 상태를 유발합니다.

- 효과: 산소 공석은 전자 공여체로 작용하여 자유 전자의 농도를 증가시키고 전도성이 크게 향상됩니다(최대 $10-100\text{S}/\text{cm}$). 예를 들어, 보라색 텅스텐 산화물 ($W_{18}O_{49}$)은 1 차원 전자 수송을 더욱 촉진합니다.
- 예: $W_{20}O_{58}$ 는 가스 센서에서 더 잘 반응하며, 결합으로 인한 전자 이동이 향상됩니다.
- 메커니즘: 산소 공극은 얇은 공여체 에너지 수준을 형성하고 전자 여기 에너지를 감소시킵니다.

나노 크기의 xantrean(예: 나노와이어, 나노시트)의 결정 구조는 형태학을 통해 전자 수송 효과를 증폭시킵니다.

- 영향: 1D 나노와이어는 축 방향 수송에서 더 효율적이고 2D 나노시트는 평면에서 더 좋습니다.
- 예 : 단사정 결정 나노 와이어 WO_3 는 광 촉매에서 전자 정공 분리의 효율성을 향상시킵니다.

4.3.1.2 텅스텐 밴드 구조와 결정 구조의 관계

텅스텐의 밴드 구조는 광학 및 전기적 특성을 결정하는 전자 구조의 특정 표현이며 결정 구조의 대칭, 결합 길이 및 결합과 밀접한 관련이 있습니다.

단사정 텅스텐의 밴드 구조

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

단사정 텅스텐은 2.6-2.8 eV 의 밴드갭을 가지고 있으며, 이는 간접 밴드갭 반도체입니다.

- **관계:** 팔면체 기울기는 낮은 격자 대칭, Brillouin 영역의 다른 지점에서 가전자대의 상단(주로 O2p 로 구성) 및 전도대의 하단(주로 W 5d 로 구성)으로 이어지며 전자 전이는 운동량으로 보상되어야 합니다.
- **특징:** 넓은 밴드 갭, 광 흡수는 자외선 및 근가시 영역으로 제한됩니다.
- **예 :** 단사정 WO₃는 광촉매에서 중간 정도의 효율을 갖지만 가시 광선의 사용은 밴드 갭에 의해 제한됩니다.
- **메커니즘 :** 낮은 대칭은 대역 분산이 불량하고 캐리어 유효 질량이 높을 수 있습니다.

직교 및 정방형 텅스텐의 밴드 구조

직교 및 정방계 결정 형태의 밴드갭은 약간 낮고(2.4-2.6 eV) 간접 밴드갭으로 남아 있습니다.

- **관계:** 팔면체 정렬은 대칭성을 향상시키고, W-O 결합 길이는 균일한 경향이 있으며, 밴드 분산이 향상되고, 밴드 갭이 약간 좁아집니다.
- **특징 :** 광 흡수 범위가 약간 확장되고 전도성이 향상됩니다.
- **예 :** 사방 정계 형태 WO₃는 고온 광전자 장치에서 더 나은 성능을 발휘합니다.
- **메커니즘:** 높은 대칭성은 띠 축퇴 분할을 줄여 전자 전이를 더 쉽게 만듭니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 밴드 구조

육각형 결정 형태(P6/mmm)는 약 2.7eV 의 밴드갭과 특별한 1 차원 채널 구조를 가지고 있습니다.

- **관계:** WO₆ 팔면체는 육각형 채널로 둘러싸여 있으며 c 축을 따른 전자 상태 분포가 더 연속적이며 국부에 직접적인 밴드갭이 있을 수 있습니다.
- **특징:** 높은 전자공 분리 효율과 독특한 광학 특성.
- **예 :** Hexagonal WO₃는 광촉매에서 단사정보다 효율적입니다.
- **메커니즘:** 공극 구조는 밴드 배열을 최적화하고 캐리어 재결합 속도를 줄입니다.

산화 텅스텐 산소 공석 및 밴드 구조

산소 결핍(예: W₂₀O₅₈ 또는 W₁₈O₄₉)은 띠 구조를 크게 변화시킵니다.

- **관계:** 산소 결핍은 결합 에너지 수준(전도 대역보다 0.1-0.5eV 낮음)을 유발하고 밴드 갭(2.2-2.5eV)을 축소하며 직접적인 밴드 갭으로 바뀔 수 있습니다.
- **특징 :** 광 흡수 적색이 가시 광선 영역으로 이동하여 전도성을 향상시킵니다.
- **예:** W₁₈O₄₉는 광검출기에서 더 넓은 응답 범위를 갖습니다.
- **메커니즘:** 결합 상태는 추가적인 전자 전이 채널을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3.2 텅스텐 결정의 구조와 이온 수송 평면 사이의 관계

황색 삼산화 텅스텐 (WO_3)의 결정 구조는 전자 수송에 영향을 미칠뿐만 아니라 이온 수송 성능에 결정적인 역할을 합니다. 이온 수송은 텅스텐 전기 변색, 에너지 저장 장치(예: 리튬 배터리) 및 센서와 같은 응용 분야에서 매우 중요합니다. 결정 구조는 본질적으로 채널 특성, 대칭 및 결합 상태를 통해 이온 확산 및 포매링/배출 공정과 연결되어 있습니다. 다음은 이온 확산 및 이온 삽입/방출이 구조적 안정성에 미치는 영향에 대한 자세한 분석입니다.

4.3.2.1 텅스텐 결정 구조가 이온 확산에 미치는 영향

이온 확산은 노란색 삼산화 텅스텐 결정 격자에서 이온(예: H^+ , Li^+ , Na^+)의 이동을 말하며, 그 효율은 결정 형태, 채널 크기 및 결합을 포함한 결정 구조에 의해 직접 제어됩니다.

이온 확산을 이용한 단사정 텅스텐

단사정 텅스텐은 실온에서 주요 형태이며, WO_6 팔면체는 같은 각도로 연결되어 3 차원 네트워크를 형성합니다.

- **효과:** 단사정 결정 형태는 격자 대칭이 낮고, 팔면체 기울기로 인해 좁고 불연속적인 채널이 발생하며, 이온 확산 계수가 낮음(약 10^{-12} - 10^{-11} cm^2/s)이 낮습니다. 예를 들어, 단사정 형태에서 Li^+ 의 확산은 제한적이며 이동 경로는 구불구불합니다.
- **예:** 전기변색법에서는 Li^+ 임베딩 속도가 느리고 발색 반응 시간이 더 깁니다.
- **메커니즘:** 낮은 대칭성과 뾰족하게 채워진 팔면체는 이온의 통과를 방해하고 확산은 주로 격자 갭에 의존합니다.

이온 확산을 갖는 직교 및 정방형 텅스텐

사방정계 결정 형태(Pnma) 및 정방정 결정 형태(P4/nmm)는 고온에서 형성되며 팔면체 배열이 더 규칙적입니다.

- **효과:** 대칭이 개선되고 격자 채널이 약간 넓어지며 이온 확산 계수가 증가합니다(약 10^{-11} - 10^{-10} cm^2/s). 정방계 결정 형태의 C 축 채널은 더 개방적이고 이온 이동이 더 부드럽습니다.
- **예:** 사방 정계 형태 WO_3 는 고온 이온 전도체에서 우수한 Li^+ 확산 성능을 나타냅니다.
- **메커니즘:** 높은 대칭성은 확산 장벽을 줄이고 채널 연결을 향상시킵니다.

이온 확산을 갖는 육각형 결정질 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

육각형 텅스텐 (P6 / mmm)은 독특한 육각형 기공 구조를 가지고 있습니다.

- **효과** : 기공의 직경은 약 2-3 Å 이고 c 축을 따라 1 차원 채널이 형성되며 이온 확산 계수가 크게 증가합니다 (최대 10^{-10} - 10^{-9} cm²/s). 예를 들어, 육각형 형태의 H⁺ 또는 Li⁺의 이동 속도는 단사정 형태보다 훨씬 높습니다.
- **예**: Hexagonal WO₃ 리튬 배터리 전극에서 Li⁺ 확산은 빠르고 충전 및 방전 성능이 우수합니다.
- **메커니즘**: 열린 기공 구조는 직선 경로를 제공하고 확산 저항을 줄입니다.

산화 텅스텐 산소 공극 및 이온 확산

산소 결핍(예: W₂₀O₅₈ 또는 W₁₈O₄₉)은 격자 구조를 변경하고 이온 확산에 영향을 미칩니다.

- **효과**: 산소 공극은 격자 공극을 증가시키고 확산 계수(10^{-10} - 10^{-9} cm²/s)를 증가시킵니다. 예를 들어, 보라색 텅스텐 산화물 (W₁₈O₄₉)은 이온 수송을 더욱 촉진합니다.
- **예**: W₂₀O₅₈ 일렉트로크로믹에서는 H⁺ 임베딩이 빠르고 응답 시간이 짧습니다.
- **메커니즘**: 산소 결핍은 이온 이동성 에너지 장벽을 줄이기 위한 추가 채널 역할을 합니다.

텅스텐 산화물 형태 및 이온 확산

나노 스케일 황색 삼산화 텅스텐 (예 : 나노 튜브, 중공 구체)의 결정 구조는 형태학을 통해 이온 확산 효과를 증폭시킵니다.

- **영향**: 나노튜브는 1 차원 채널을 제공하고, 속이 빈 구체는 내부 확산 공간을 증가시키며, 이온 확산 효율이 향상됩니다.
- **예** : 단사정 결정 나노 튜브 WO₃는 슈퍼 커패시터에서 Na⁺ 확산 속도를 크게 증가시킵니다.

4.3.2.2 텅스텐 결정의 구조적 안정성에 대한 이온 삽입/추출 공정의 영향

이온 삽입 및 추출 (예 : H⁺, Li⁺, Na⁺)은 전기 화학 응용 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 핵심 공정이며 부피 팽창, 상 전이 및 결합 축적을 포함한 결정 구조 안정성에 장단기 영향을 미칠 수 있습니다.

단사정 텅스텐의 안정성

단사정 텅스텐은 이온 삽입/추출 중에 구조적 문제를 나타냅니다.

- **효과**: 소량의 이온이 삽입되면(예: x<0.1 의 Li_xWO₃) 격자 매개변수가 약간 확장되고(a, b, c 가 약 0.1-0.5% 증가) 단사정 결정 형태가 안정적으로 유지됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

많은 수의 임베딩(예: $x > 0.3$)은 정방형 또는 비정질 형태에 국소 상 변화를 일으킬 수 있습니다.

- **예** : 전기 변색에서 H^+ 임베딩은 WO_3 를 $HxWO_3$ 로 바꾸고 여러 사이클 후에 격자에 미세 균열이 나타날 수 있습니다.
- **메커니즘** : 이온 삽입은 W-O 결합 스트레칭을 유발하고 팔면체 왜곡이 악화됩니다. 분리는 구조를 복원하지만 반복되는 응력은 피로로 이어질 수 있습니다.

직교 및 정방형 텅스텐의 안정성

고온에서 직교 및 정방형 결정 형태는 이온 삽입에 대한 강한 적응성을 가지고 있습니다.

- **효과**: 격자 채널이 넓고 이온 삽입으로 인한 부피 팽창이 작고($< 0.3\%$), 결정 형태가 안정적으로 유지됩니다. 그러나 고온에서 흘리면 산소 손실이 가속화되고 결합이 발생할 수 있습니다.
- **예**: 사방정계 형태 WO_3 고온 셀에서는 Li^+ 포매 후 결정 형태에 큰 변화가 없습니다.
- **메커니즘**: 높은 대칭은 응력을 분산시키고 구조적 손상을 줄입니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 안정성

육각형 결정 형태의 기공 구조는 이온 삽입/배출에 대한 적응성이 우수합니다.

- **영향**: 공극은 이온, 최소 부피 팽창($< 0.2\%$) 및 높은 결정 안정성을 수용합니다. 여러 사이클 후에 오리피스가 약간 막힐 수 있지만 전체 구조는 유지됩니다.
- **예**: 육각형 결정 형태 WO_3 는 리튬 배터리에서 수백 번의 충전 및 방전 후에도 결정 형태를 유지합니다.

산화 텅스텐 산소 공석 구조의 안정성

산소가 없는 크산트르산(예: $W_{18}O_{47}F$)은 이온 삽입/배출에서 다른 거동을 나타냅니다.

- **영향**: 산소 결핍은 초기 안정성이 우수한 추가 삽입 부위를 제공합니다. 그러나 많은 수의 이온이 결정 격자를 더 파괴하여 비가역적 위상이 비정질 또는 금속 텅스텐이 될 수 있습니다.
- **메커니즘**: 결합 상태는 이온 용량을 향상시키지만 구조적 무결성을 악화시킵니다.

장기적인 안정성 영향

- **부피 효과**: 반복적인 임베딩/배출은 격자 팽창-수축 주기를 유발하여 미세 균열 또는 결정립 경계 결합을 축적합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **상전이 위험:** 고농도의 이온 삽입은 비가역적 상전이를 유발할 수 있습니다(예: 단사정 → 테트라곤).
- **화학적 변화:** 이온(예: H^+)은 산소와 반응하여 물 또는 저산소 상태 WO_3 를 형성하여 결정 격자를 파괴할 수 있습니다.

지형의 영향

나노 구조(예: 나노시트, 나노튜브)는 높은 비표면적과 유연성을 통해 안정성 문제를 완화합니다.

- **충격:** 나노시트는 응력을 분산시키고 나노튜브는 팽창을 완충하며 안정성은 블록보다 우수합니다.
- **예:** 단사정 나노시트 WO_3 는 배터리에서 더 긴 사이클 수명을 가지고 있습니다.

앱 연락처

- 육각형 형태는 높은 사이클 안정성 요구 사항(예: 배터리)에 적합합니다.
- 단사정 형태는 단기 이온 수송(예: 전기 변색)에 사용됩니다.
- 산소 공석 구조는 용량과 안정성의 균형을 맞추기 위해 최적화되어야 합니다.

4.3.3 텅스텐 결정 구조와 표면 특성의 관계

황색 삼산화 텅스텐 (WO_3)의 결정 구조는 흡착 용량, 표면 전자 상태 및 화학 활성을 포함한 표면 특성과 밀접한 관련이 있으며, 이는 촉매, 센서 및 에너지 저장 성능의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 결정 구조는 본질적으로 표면 원자 배위, 결정면 노출 및 결함 분포를 결정함으로써 이러한 특성과 연결되어 있습니다. 다음은 표면 흡착과 표면 전자 상태에 대한 자세한 분석입니다.

4.3.3.1 텅스텐 결정 구조가 표면 흡착에 미치는 영향

표면 흡착은 분자 또는 이온 (예 : H_2O , O , CO 등)이 황색 삼산화 텅스텐의 표면에 부착되는 과정을 말하며, 그 효율은 결정 형태, 노출 된 결정면 및 결함의 영향을 포함하여 결정 구조에 의해 제어됩니다.

표면 흡착이 있는 단사정 텅스텐

단사정 황색 삼산화 텅스텐 (공간 그룹 $P2_1/n$)은 실온에서 지배적인 형태이며, WO_6 팔면체 기울기는 규칙적이지만 컴팩트 한 3 차원 네트워크를 형성합니다.

- **효과:** 표면 노출 결정면(예: (002), (020))은 높은 원자 밀도, 제한된 수의 배위 불포화 텅스텐 원자(W^{6+}) 및 산소 원자(O^{2-}), 소수의 흡착 사이트 및 일반적으로 2-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5m²/g(벌크)의 비 표면적을 갖습니다. 흡착 용량은 보통이며 주로 물리적 흡착에 의존합니다.

- 예: 단사정 WO₃는 H₂O 분자에 대한 중간 정도의 흡착을 나타내므로 습도 센서에 적합합니다.
- 메커니즘: 대칭이 낮으면 화학 흡착 부위의 분포가 균일하지만 희박한 평평한 표면이 생성됩니다(예: W⁶⁺-O 브리지).

표면 흡착이 있는 직교 및 정방형 텅스텐

사방정계 결정 형태(Pnma) 및 정방정 결정 형태(P4/nmm)는 고온에서 형성되며 팔면체 배열이 더 규칙적입니다.

- 효과: 대칭 개선, 더 평평한 노출된 결정면(예: 정방형 결정 형태(001)), 약간 증가된 배위 불포화 부위 및 약간 더 높은 비표면적(5-10m²/g). 특히 극성 분자(예: NH₃)에 대한 흡착 용량이 약간 향상되었습니다.
- 예 : 사방 정계 형태 WO₃는 고온에서 O₂ 의 흡착을 향상시키며, 이는 촉매 지지체에 적합합니다.
- 메커니즘: 높은 대칭성은 표면 규칙성을 증가시키고 화학 흡착 부위의 보다 균일한 분포를 증가시킵니다.

육각형 결정질 황색 텅스텐 삼산화물 표면 흡착

육각형 텅스텐 (P6 / mmm)은 독특한 육각형 기공 구조를 가지고 있습니다.

- 충격: 기공 개구부가 표면에 노출되고(예: (001) 결정면) 비표면적이 크게 증가하여(10-30m²/g) 많은 흡착 부위를 제공합니다. 내부 채널은 분자 보유 능력을 더욱 향상시키고 작은 분자(예: H₂ 및 CO)에 대한 강한 흡착력을 갖습니다.
- 예: Hexagonal WO₃는 가스 센서의 CO 흡착에 대한 민감도가 높습니다.
- 메커니즘: 열린 기공과 표면 배위 불포화 원자(예: W⁶⁺)는 시너지 효과를 발휘하여 물리적 및 화학적 흡착을 촉진합니다.

산화 텅스텐 산소 공극 및 표면 흡착

산소 공극(예: W₂₀O₅₈ 또는 W₁₈O₄₉)은 결정 구조를 변화시키고 표면 흡착 용량을 크게 향상시킵니다.

- 효과: 산소 공극은 더 많은 텅스텐 원자(W⁵⁺ 또는 W⁴⁺)를 노출시켜 강력한 흡착 부위를 형성하고 비표면적(20-50m²/g)을 증가시킵니다. 예를 들어, W₁₈O₄₉의 바늘 같은 구조와 균열은 흡착 능력을 더욱 증폭시킵니다.
- 예: W₂₀O₅₈는 NO₂에 비해 우수한 흡착력을 나타내며 가스 감지에 사용됩니다.
- 메커니즘: 산소 결핍은 전자-공여체 분자(예: NH₃)의 화학 흡착을 향상시키기 위해 루이스 산 부위로 작용합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3.3.2 텅스텐 결정 구조와 표면 전자 상태의 관계

표면 전자 상태는 황색 삼산화 텅스텐의 표면에있는 원자의 전자 분포 및 에너지 준위 특성을 말하며, 이는 촉매 활성, 광학 특성 및 전기 화학적 거동에 직접적인 영향을 미치며 결정 구조와 밀접한 관련이 있습니다.

단사정 텅스텐의 표면 전자 상태

단사정 텅스텐의 표면은 규칙적인 WO_6 팔면체로 구성됩니다.

- **관계:** W^{6+} 및 O^{2-} 표면의 전자 구름은 고르게 분포되어 있고, 원자가 띠의 상단은 $O2p$ 오비탈로 구성되며, 전도대의 하단은 $W 5d$ 오비탈이 지배합니다. 표면 밴드 갭은 벌크(2.6-2.8 eV)와 일치하며 심각한 결합 상태는 없습니다.
- **형질:** 표면 전자 활성이 낮고 전자 전달 용량이 제한적입니다.
- **메커니즘:** 낮은 대칭성은 표면 전자 상태 분산을 가난하게 만들고 추가 에너지 수준이 부족합니다.

직교 및 정방형 텅스텐의 표면 전자 상태

직교 및 정방체 결정 형태는 더 대칭적이고 표면 구조가 더 규칙적입니다.

- **관계:** 팔면체 정렬은 더 균일한 표면 $W-O$ 결합 길이, 더 균일한 전자 구름 분포 및 약간 더 좁은 밴드 갭(2.4-2.6 eV)을 초래합니다. 소수의 표면 결합 상태가 표면에 나타날 수 있습니다.
- **특징:** 표면 전자 전달 효율이 약간 증가하고 활성이 향상됩니다.
- **예:** 사방 정계 WO_3 표면은 고온 촉매에서 더 빠른 전자 이동을 갖습니다.
- **메커니즘:** 높은 대칭성은 전자 산란을 줄이고 표면의 전자 상태를 최적화합니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 표면 전자 상태

육각형 결정 형태의 기공 구조는 표면에 독특한 전자 특성을 부여합니다.

- **관계:** 공극의 노출된 W^{6+} 및 O^{2-} 는 약 2.7eV의 표면 밴드 갭을 가진 국소 전하 중심을 형성하며, 이는 얇은 진술을 도입할 수 있습니다. 전자 분포는 채널 방향을 따라 더 연속적입니다.
- **특징:** 높은 표면 전자 활성, 향상된 전자 - 정공 분리 효율.
- **예:** 육각형 WO_3 표면은 광전 감지에서 더 빠르게 반응합니다.
- **메커니즘:** 공극 구조는 전자 경로를 최적화하고 재결합 속도를 줄입니다.

산화 텅스텐 산소 공극 및 표면 전자 상태

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산소 결핍(예: $W_{20}O_{58}$ 또는 $W_{18}O_{48}$)은 표면 전자 상태를 크게 변화시킵니다.

- **관계:** 산소 결핍은 W^{3+} 또는 W^{4+} 를 노출시키고, 결합 에너지 수준(전도 대역보다 0.1-0.5eV 낮음)을 유발하며, 밴드 갭(2.2-2.5eV)을 좁힙니다. 표면의 전자 농도가 증가하고 전도성이 증가합니다.
- **특성:** 표면 전자는 매우 활동적이며 흡착된 분자로 쉽게 전달할 수 있습니다.
- **예:** $W_{18}O_{49}$ 표면은 가스 센서의 NO_2 전자에 강하게 반응합니다.
- **메커니즘:** 결합 상태는 표면 반응을 촉진하는 추가 전자 채널을 제공합니다.

4.3.4 텅스텐 결정 구조와 기계적 특성의 관계

경도, 탄성 계수 및 파괴 저항과 같은 황색 삼산화 텅스텐 (Yellow tungsten trioxide, WO_3)의 기계적 특성은 결정 구조와 밀접한 관련이 있습니다. 결정 구조는 원자 배열, 결합 강도 및 결합 분포를 통해 힘을 받는 황색 삼산화 텅스텐의 반응 거동을 결정합니다. 이 연결은 결정 형태, 형태 및 결합의 관점에서 아래에서 분석됩니다.

단사정 텅스텐의 기계적 성질

단사정 노란색 삼산화 텅스텐 (공간 그룹 $P2_1/n$)은 실온에서 주요 형태이며 WO_3 팔면체는 같은 각도로 연결되어 3 차원 네트워크를 형성합니다.

- **연결:** 팔면체 기울기는 낮은 격자 대칭, W-O 결합의 불균일한 분포(결합 에너지 약 600-700kJ/mol), 적당한 경도(모스 규모에서 약 4-5) 및 약 100-150 GPa 의 탄성 계수를 초래합니다. 입계 슬립이 어렵고 파괴 저항이 제한적입니다.
- **예:** 단사정 WO_3 블록은 압축 시험에서 취성을 나타내며 결정립 경계를 따라 파괴되기 쉽습니다.
- **메커니즘:** 낮은 대칭성은 팔면체 왜곡 영역에 응력을 집중시켜 변형에 대한 저항을 줄입니다.

직교 및 정방형 텅스텐의 기계적 성질

사방정계 결정 형태($Pnma$) 및 정방정계 결정 형태($P4/nmm$)는 고온에서 형성되며 팔면체 배열이 더 규칙적입니다.

- **연결:** 대칭이 개선되고 WO 결합 분포가 더 균일하며 경도가 약간 증가 (모스 스케일에서 약 5)되며 탄성 계수는 150-200 GPa 에 도달 할 수 있습니다. 정방정계 결정 형태는 C 축 방향으로 더 단단합니다.
- **예:** 사방 정계 WO_3 박막은 단사정 필름보다 고온에서 변형에 대한 저항성이 우수합니다.
- **메커니즘:** 높은 대칭은 응력을 분산시키고 국소 응력 집중을 감소시킵니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 기계적 성질

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

육각형 결정 형태 (P6/mmm)는 육각형 기공 구조를 갖는다.

- **연결:** 기공은 결정 밀도가 감소하고(약 7.1g/cm^3 , 단사정 7.16g/cm^3 보다 낮음) 경도가 약간 낮지만(모스 규모에서 약 3.5-4.5), 기공이 응력을 흡수하기 때문에 더 유연합니다. 탄성 계수는 약 80-120 GPa 입니다.
- **예:** 육각형 WO_3 나노와이어는 굽힘 테스트에서 약간의 인성을 나타냅니다.
- **메커니즘:** 개방형 구조는 응력을 흡수하고 균열 전파를 줄입니다.

산화 텨스텐 산소 공석 및 기계적 성질

산소 결핍(예: $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$ 또는 $\text{W}_{18}\text{O}_{48}$)은 결정 구조를 변경하고 화학적 특성에 영향을 미칩니다.

- **연결:** 산소 공석은 결함을 도입하고, W-O 결합 밀도를 감소시키고, 경도(모스 규모에서 약 3-4)를 크게 감소시키고, 탄성 계수(50-100 GPa)를 감소시킵니다. 예를 들어, $\text{W}_{18}\text{O}_{48}$ 의 바늘 같은 구조는 파손되기 쉽습니다.
- **예:** $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$ 는 기계적 연삭에서 부서지기 쉽습니다.
- **메커니즘:** 결함은 격자 무결성을 파괴하고 응력 집중 지점을 증가시킵니다.

4.3.5 텨스텐 결정 구조와 광학 특성의 관계

광 흡수, 굴절률 및 전기 변색 특성을 포함한 황색 삼산화 텨스텐의 광학 특성은 결정 구조와 밀접한 관련이 있습니다. 결정 구조는 밴드 구조와 표면 특성을 통해 광자와 물질의 상호 작용을 결정합니다.

단사정 텨스텐의 광학적 특성

단사정 텨스텐은 간접 밴드 갭(2.6-2.8 eV)을 가지고 있습니다.

- **연결:** 팔면체 기울기로 인해 전자 구름이 고르지 않게 분포되고 광 흡수는 주로 연한 노란색인 자외선 및 근가시 영역(<450nm)에서 이루어집니다. 굴절률은 약 2.2-2.4 이고 전기 변색 반응은 보통입니다 (색상이 노란색에서 청록색으로 변함).
- **예:** 단사정 WO_3 는 스마트 유리에서 안정적이지만 변색 효율이 느립니다.
- **메커니즘:** 대칭이 낮으면 대역 분산이 불량하고 광학 전이 효율이 제한됩니다.

직교 및 정방형 텨스텐의 광학적 특성

직교 및 정방계 결정 형태는 더 대칭적이고 밴드갭은 약간 더 좁습니다(2.4-2.6eV).

- **접촉 :** 광 흡수 가장자리가 약간 적색 편이 (480 nm 까지), 황색을 띤 주황색. 굴절률이 약간 높고(2.3-2.5) 전기 변색 응답 속도가 더 빠릅니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 예 : 사방 정계 형태 WO_3 는 고온 광학에서 더 넓은 광 반응을 나타냅니다.
- 메커니즘: 높은 대칭성은 밴드 연속성을 향상시키고 광자 여기를 촉진합니다.

육각형 결정질 황색 텅스텐 삼산화물의 광학적 성질

육각형 기공 구조는 독특한 광학 특성을 제공합니다.

- 접촉: 밴드 갭은 약 2.7eV 이며 기공의 산란에 의해 광 흡수 효율이 향상되고 색상은 밝은 노란색입니다. 더 빠른 이온 삽입으로 인한 우수한 전기 변색 특성.
- 예 : 육각형 형태의 WO_3 는 광촉매에서 높은 광 이용률을 가지고 있습니다.
- 메커니즘: 기공 구조는 광자 경로를 최적화하고 전자-정공 재결합 속도를 줄입니다.

산화 텅스텐 산소 공극 및 광학 특성

산소 결핍(예: $W_{20}O_{58}$ 또는 $W_{18}O_{48}$)은 광학적 특성을 크게 변화시킵니다.

- 접촉: 결함 상태는 밴드 갭(2.2-2.5 eV)을 감소시키고, 광 흡수를 가시 영역(500-600 nm)으로 적색 편이시키며, 색상을 어둡게 합니다(예: 파란색 또는 보라색). 일렉트로크로믹 반응이 더 빠릅니다.
- 메커니즘: 결함 에너지 수준은 추가 전이 경로를 제공합니다.

4.3.6 텅스텐 결정 구조와 촉매 특성의 관계

광촉매, 전기 촉매 및 열촉매 기능을 포함한 황색 삼산화 텅스텐의 촉매 특성은 결정 구조와 밀접한 관련이 있습니다. 결정 구조는 표면 활성 부위, 전자 전달 및 흡착 용량을 통해 촉매 효율을 결정합니다.

단사정 텅스텐의 촉매 특성

단사정 WO_3 는 표면 활성 부위가 제한되어 있습니다.

- 접촉: 밴드 갭 2.6-2.8 eV, 자외선으로 제한되는 광촉매, 적당한 표면 흡착 용량(비표면적 2-5 m^2/g). 촉매 활성은 주로 W^{6+} 및 O^{2-} 부위에 따라 달라집니다.
- 메커니즘: 대칭이 낮으면 전자-정공 분리가 제한되고 표면 좌위가 드물게 분포되어 있습니다.

직교 및 정방형 텅스텐의 촉매 특성

직교 및 정방체 결정 형태는 대칭이 높고 표면이 더 규칙적입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **연결:** 밴드 갭이 약간 좁고(2.4-2.6 eV), 광촉매 효율이 약간 증가하고, 표면 부위가 고르게 분포되고, 열촉매 활성이 향상됩니다.
- **메커니즘:** 높은 대칭성은 전자 전달을 촉진하고 표면 활성 부위가 더 효율적입니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 촉매 특성

육각형 결정 형태의 기공 구조는 촉매 성능을 크게 향상시킵니다.

- **연결:** 높은 비표면적(10-30m²/g)과 기공은 많은 수의 흡착 부위, 높은 전자-정공 분리 효율 및 우수한 광촉매 활성을 제공합니다.
- **메커니즘:** 기공은 분자 흡착 및 광자 활용을 향상시킵니다.

산화 텅스텐 산소 공극 및 촉매 특성

산소 결핍(예: W₂₀O₅₈ 또는 W₁₈O₄₇)은 촉매 활성을 크게 증가시킵니다.

- **연락처 :** 산소 결핍은 W⁵⁺ / W⁴⁺를 노출시켜 강한 활성 부위를 형성하고 밴드 갭(2.2-2.5 eV)을 줄이며 가시 광선으로의 광촉매 팽창을 줄입니다. 높은 비표면적.
- **메커니즘:** 결함 상태는 전자 전달을 촉진하고 흡착 및 반응을 향상시킵니다.

4.4 텅스텐의 결정 구조의 실험적 측정

황색 삼산화 텅스텐 (Yellow tungsten trioxide, WO₃)의 결정 구조를 결정하는 것은 원자 배열, 격자 매개 변수 및 상 특성을 밝히기 위해 다양한 실험 기술에 의존하여 그 특성과 응용을 연구하기 위한 기초입니다. X 선 회절(XRD)과 중성자 회절은 서로 다른 원리를 통해 결정 구조에 대한 자세한 정보를 제공하는 두 가지 핵심 기술입니다. X 선 회절의 원리와 응용, 그리고 황색 삼산화 텅스텐의 구조 결정에서 중성자 회절의 역할에 대해 자세히 논의 할 것입니다.

4.4.1 X-ray 회절 기술의 원리

X 선 회절(XRD)은 황색 삼산화텅스텐 결정의 구조를 결정하는 데 가장 일반적으로 사용되는 기술로, X 선의 간섭 효과와 결정에서 원자의 산란을 사용하여 격자 매개변수, 공간 그룹 및 원자 위치와 같은 정보를 얻습니다.

X 선 회절은 브래그의 법칙($n\lambda = 2d \sin\theta$)을 기반으로 하며, 여기서 다음과 같습니다.

- λ : X 선의 파장 (일반적으로 사용되는 Cu K α 방사선, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$).
- d : 크리스탈 평면 간격.
- θ : 입사각 및 수정면 각도.
- n : 회절 차수(정수). X 선이 텅스텐 결정을 조사하면 원자가 텅스텐 결정을 산란시키고 브래그 조건을 충족하는 산란된 파동은 구조적 간섭을 생성하여 회절

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

피크를 형성합니다. 회절 피크의 위치(2θ 각도), 강도 및 모양은 결정 구조 정보를 반영합니다.

X 선 회절 기술의 실험 과정

- 일. **샘플 준비:** 노란색 삼산화 텅스텐 샘플(예: 분말, 박막 또는 단결정)을 샘플 스테이지에 놓아 평평한 표면을 보장합니다. 분말 샘플은 선호도 배향을 줄이기 위해 마이크론 규모로 분쇄해야 합니다.
- 이. **X 선 조사:** 단색 X 선은 X 선관(예: Cu 타겟)을 사용하여 샘플을 조사하거나 샘플을 회전시키거나 검출기를 사용하여 다른 각도(2θ 는 일반적으로 5° - 90°)에서 스캔합니다.
- 삼. **데이터 수집:** 검출기는 회절 피크의 강도와 위치를 기록하여 회절 패턴을 생성합니다.
- 사. **데이터 분석:**
 - **피크 위치:** 브래그의 법칙에 따라 결정면 간격 d 를 계산하고 결정계와 격자 매개변수를 결정합니다.
 - **Peak intensity:** 원자 위치와 평면 밀도를 반영하며 구조적 개선에 사용됩니다.
 - **피크 모양:** 입자 크기(Scherrer 공식에 따름) 및 응력이 분석됩니다.

황색 삼산화 텅스텐에 X 선 회절 기술의 적용

- **결정 형태 식별:** 텅스텐은 단사정($P2_1/n$), 사방정계($Pnma$) 또는 육각형($P6/mmm$)에서 특징적인 회절 피크를 가지고 있습니다. 예를 들어, 단사정 결정 형태의 (002), (020) 및 (200) 피크는 각각 $2\theta \approx 23.1^\circ$, 23.6° 및 24.4° (Cu $K\alpha$)에서 나타납니다.
- **격자 매개변수:** 단사정 결정 형태의 $a=7.306 \text{ \AA}$, $b=7.540 \text{ \AA}$, $c=7.692 \text{ \AA}$ 및 $\beta=90.91^\circ$ 는 회절 데이터를 정제하여 측정되었습니다.
- **상전이 연구:** XRD 는 온도 상승에 따른 단사정 \rightarrow 직교 \rightarrow 정방체 결정 형태의 전이를 추적할 수 있습니다.
- **결함 분석:** 산소 결핍(예: $W_{20}O_{58}$)은 피크 위치의 약간의 변화 또는 강도의 변화를 일으킵니다.

X 선 회절 기술의 장점과 한계

- **장점 :** 장비의 대중화, 쉬운 작동, 결정 형태 및 매개 변수의 신속한 결정에 적합; 무거운 원소(예: 텅스텐)에 민감하고 강한 회절 신호가 있습니다.
- **제한 사항:** 가벼운 원소(예: 산소)의 산란 능력이 약하고 산소 원자의 위치를 정확하게 결정하기 어렵습니다. 복잡한 구조 또는 나노 샘플에 대한 제한된 해상도.

과라 텅스텐 암모늄에 의한 황색 삼산화 텅스텐 소성 연구에서, XRD 는 제품이 500°

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C 에서 단사정이고, 피크 위치가 표준 카드 (JCPDS 43-1035)와 일치하며, 입자 크기는 Scherrer 의 공식에 의해 50-100 nm 로 추정되었다.

4.4.2 구조 결정에 중성자 회절 기술의 적용

중성자 회절은 중성자와 핵의 산란을 통해 텅스텐 결정의 구조에 대한 자세한 정보를 얻으며, 이는 산소와 같은 가벼운 원소의 위치 및 결합 구조를 결정하는 데 특히 유리합니다.

중성자 회절도 브래그의 법칙($n\lambda = 2d \sin\theta$)을 기반으로 하지만 X 선 대신 중성자 빔(보통 0.5-5 Å)을 사용합니다. 중성자는 핵과 상호 작용하고 원자 번호와 독립적으로 산란하며 산소와 같은 가벼운 원소에 민감합니다. 중성자는 또한 자기 구조를 연구하는 데 사용할 수 있는 자기 산란 특성을 가지고 있습니다(텅스텐 향은 반자성이며 이 기능은 거의 사용되지 않음).

중성자 회절 기술의 실험 과정

- 일. **샘플 준비** : 텅스텐 샘플은 낮은 중성자 빔 플럭스로 인해 큰 부피 (보통 몇 그램)를 가진 분말 또는 단결정이어야 합니다. 샘플은 중성자가 흡수되지 않는 용기(예: 바나듐 탱크)에 포장해야 합니다.
- 이. **중성자 조사**: 뜨겁거나 차가운 중성자는 중성자 소스(예: 원자로 또는 파쇄 소스)에서 생성되고 단색화되어 샘플을 조사하고 회절 데이터는 주사 각도(2θ)에서 수집됩니다.
- 삼. **데이터 수집**: 회절 피크는 고분해능 스펙트럼을 생성하기 위해 중성자 검출기(예: ^3He 계수기)를 사용하여 기록됩니다.
- 사. **데이터 분석**: **Rietveld refinement**: 격자 매개변수, 원자 위치 및 점유를 결정하기 위해 회절 패턴을 피팅합니다. **산소 위치**: 산소 원자의 좌표 및 열 진동 매개변수의 정확한 결정. **결합 분석**: 산소 결핍 또는 도핑된 원자의 분포 감지.

황색 삼산화 텅스텐에 중성자 회절 기술의 적용

- **산소 원자 포지셔닝**: 중성자 회절은 산소 원자에 대한 강력한 산란 능력을 가지고 있어 단사정 결정 형태로 산소 원자의 Wyckoff 위치(예: 4c 위치)를 정확하게 결정하고 브리지 산소와 말단 산소의 차이를 해결할 수 있습니다.
- **결정 형태 확인**: 단일입상, 직교 또는 육각형 결정 형태의 공간 그룹 및 격자 매개변수 확인. 예를 들어, 육각형 결정 형태의 기공 구조는 중성자 회절에 의해 c 축 채널 특성을 확인합니다.
- **산소 결석 분석**: $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$ 또는 $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ 에서 중성자 회절은 산소 결핍의 비율(예: 산소 지수 2.9 또는 2.72)을 정량화하여 결정 격자에 대한 결함의 영향을 나타냅니다.
- **상전이 연구**: 저온 삼원정(P1)에서 단사정 결정 형태로의 전이를 추적하고 산소 원자 재배열을 분석합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **나노 구조** : 중성자 산란과 결합하여 nano-xantret 의 표면 결합 및 입계 특성을 연구했습니다.

중성자 회절의 장점과 한계

- **장점** : 가벼운 원소 (예 : 산소)에 민감하여 황색 삼산화 텅스텐에서 산소 원자의 위치 및 역학을 정확하게 결정하는 데 적합합니다. 두꺼운 시료를 관통하며 벌크 분석에 적합합니다. 산소 결핍 및 도핑 효과를 감지할 수 있습니다.
- **제한 사항**: 중성자 소스가 부족하고 실험 비용이 높습니다. 많은 양의 샘플이 필요합니다. 텅스텐과 같은 안티 헤비 원소의 해상도는 XRD 만큼 좋지 않습니다.

XRD 를 사용한 중성자 회절 기술의 상보성

- **XRD**: 텅스텐과 같은 무거운 원소의 국소화를 위한 결정 형태 및 격자 매개변수의 신속한 측정.
- **중성자 회절**: 산소 원자 위치 및 결합을 정밀하게 측정하여 복잡한 구조 분석에 적합합니다.
- **복합 사용**: XRD 는 예비 구조, 중성자 회절 미세화, 산소 위치 및 결합을 제공합니다. 예를 들어, 단사정 형태 WO 의 격자 매개변수는 XRD 에 의해 결정되고 산소 원자의 열 진동 매개변수는 중성자 회절에 의해 최적화됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

5 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 물리적 및 화학적 특성

중요한 전이 금속 산화물로서 황색 삼산화 텅스텐 (WO_3)의 물리적 및 화학적 특성은 산업, 과학 연구 및 첨단 기술 분야에서의 응용 잠재력을 직접 결정합니다. 이 장에서는 황색 삼산화 텅스텐의 특성과 결정 구조 및 준비 조건과의 관계를 외관 및 색상, 밀도 / 비중 및 열 안정성의 세 가지 측면에서 자세히 설명합니다.

5.1 텅스텐의 외관과 색상

텅스텐의 모양과 색상은 결정 구조, 입자 크기, 불순물 및 산소 함량과 같은 요인의 영향을 받는 가장 직관적인 물리적 특성이며 다양한 조건에서 다양한 성능을 보여줍니다.

황색 삼산화 텅스텐의 외관 특성

- **형태** : 텅스텐 향은 일반적으로 분말 형태로 존재하며 입자 형태는 준비 방법에 따라 다릅니다. 벌크 옐로우 텅스텐 트리옥사이드는 불규칙한 다면체이며, 나노 스케일 옐로우 텅스텐 트리옥사이드는 과립, 플레이크, 선형 또는 꽃과 같을 수 있습니다.
- **입자 크기** : 산업용 황색 텅스텐 삼산화물 입자의 대부분은 마이크론 수준이며 실험실 나노 황색 텅스텐 삼산화물은 10-100 nm 만큼 작을 수 있습니다.
- **표면 특성** : 주사 전자 현미경(SEM)은 텅스텐의 표면 평탄도가 결정 형태에 따라 변하고, 단사정 결정 형태의 표면이 거칠고, 육각형 결정 형태에 기공 개구부가 있을 수 있음을 보여주었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

노란색 삼산화 텅스텐의 색상 특성

- **일반적인 색상** : 순수한 노란색 삼산화 텅스텐은 밴드 갭 (2.6-2.8 eV)이 자외선 및 근가시 광선을 흡수하기 때문에 밝은 노란색에서 밝은 노란색입니다.
- **다형체의 영향**:
 - **단사정 형태**: 연한 노란색 또는 황록색, 팔면체 기울기로 인한 광 산란에 약간의 변화가 있습니다.
 - **사방정계 형태**: 약간 더 좁은 밴드 갭(2.4-2.6 eV)과 적색 편이 흡수 가장자리가 있는 황백색-주황색.
 - **정방형 결정 형태** : 짙은 노란색, 향상된 대칭으로 색상이 깊어집니다.
 - **육각형 결정 형태** : 밝은 노란색, 기공 산란이 밝기를 향상시킵니다.
- **산소 결핍의 영향** : 산소 함량이 감소하면(예: $W_{20}O_{58}$ 는 파란색, $W_{18}O_{49}$ 는 보라색) 색이 현저히 변하고 결합 상태로 인해 밴드 갭이 감소(2.2-2.5eV)하고 흡수가 가시 영역까지 확장됩니다.
- **불순물 효과**: 미량의 철(Fe) 또는 몰리브덴(Mo) 불순물은 황갈색 또는 회황색을 띠게 할 수 있습니다. 예를 들어, 0.01% Fe 를 함유한 텅스텐은 색상이 약간 더 어둡습니다.
- **준비 온도의 영향** : 고온 소성 (>740 °C)은 직교 또는 정방계 결정 형태를 생성하고 색상이 깊어집니다. 저온 열수 방법(<200°C)은 대부분 밝은 노란색 나노 구조체입니다.
- **준비 분위기 효과** : 환원 분위기 (예 : H_2)는 파란색 또는 자주색 텅스텐 산화물을 생성하고 산화 분위기 (예 : 공기)는 노란색으로 유지됩니다.

5.2 텅스텐의 밀도/비중

텅스텐의 밀도 (또는 비중)는 물리적 특성의 중요한 매개 변수이며, 결정 구조의 조밀함과 원자의 배열을 반영하며, 이는 결정 형태와 결합의 영향을받습니다.

밀도 정의

- **비중(Specific gravity)**: 물에 대한 상대적인 밀도로, 단위가 없으며, 여기에서 밀도와 동등한 기준으로 논의됩니다.
- **이론 밀도** : WO₆의 분자량은 격자 매개 변수 및 분자량 계산에 의해 231.84g / mol 입니다.

단사정 텅스텐의 밀도

- **값**: 이론적 밀도는 약 7.16g/cm³이고 실험 값은 7.1-7.2g/cm³에 가깝습니다.
- **이유** : 단사정 결정 형태 (P2 / n)의 WO₆ 팔면체는 코앵글로 연결되어 단단한 3 차원 네트워크를 형성하고 격자 매개 변수 ($a = 7.306 \text{ \AA}$, $b = 7.540 \text{ \AA}$, $c = 7.692 \text{ \AA}$)는 단위 부피 당 원자 수를 결정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 측정: 질량 계산과 결합된 X 선 회절(XRD)에 의한 격자 매개변수 개선.

직교 및 정방형 텅스텐의 밀도

- 값: 사방정계 형태(Pnma)는 약 7.15g/cm^3 이고 정방정계 형태(P4/nmm)는 약간 낮은($7.12\text{-}7.15\text{g/cm}^3$)
- 원인: 대칭이 개선되고 팔면체 배열이 더 규칙적이지만 격자 부피가 약간 확장되어 밀도가 약간 감소합니다.
- 측정: 고온 XRD 가 결정 형태를 확인한 후 계산합니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 밀도

- 값: 약 7.1g/cm^3 , 단사정 결정 형태보다 약간 낮습니다.
- 이유: 육각형 결정 형태의 기공 구조(P6/mmm)는 단위 부피당 질량을 감소시키고 격자 매개변수($a=7.298\text{ \AA}$, $c=3.899\text{ \AA}$)는 개방성을 나타냅니다.
- 측정: 결정 모델 검증과 결합된 중성자 회절.

산화 텅스텐 산소 공석 및 밀도

- 값: 예를 들어 $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$ (산소 지수 2.9)는 약 $6.8\text{-}7.0\text{g/cm}^3$ 이고 $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ (산소 지수 2.72)는 더 낮습니다(약 $6.5\text{-}6.8\text{g/cm}^3$).
- 원인: 산소 결핍은 분자량을 감소시키고 격자 결합을 증가시켜 밀도를 감소시킵니다.

산화 텅스텐 형태 및 밀도

- 나노 구조: 나노 - 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드 (예: 나노 입자, 나노 튜브)의 겹보기 밀도는 공극 또는 표면 효과로 인해 이론 값 ($5\text{-}6\text{ g/cm}^3$)보다 낮습니다.
- 블록: 이론적 밀도에 가깝고 모공이 거의 없습니다.

산화 텅스텐 밀도의 측정 방법

- 아르키메데스 (Archimedes): 블록에 적합한 부피와 질량을 측정하기 위해 액체에 담그십시오.
- 헬륨 변위 방법: 분말에 적합한 실제 밀도 측정.

5.3 황색 삼산화 텅스텐의 열 안정성

황색 삼산화 텅스텐의 열 안정성은 고온에서의 구조 및 화학적 안정성을 의미하며, 이는 결정 구조, 산소 함량 및 준비 조건과 밀접한 관련이 있습니다.

단사정 텅스텐의 열 안정성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 범위: 실온에서 330°C, 융점은 1473°C 에서 매우 안정적입니다.
- 변화 : 330 °C 이상에서는 직교 결정 형태 (Pnma)로 변하고 740 °C 이상에서는 정방계 결정 형태 (P4 / nmm)로 변하지만 화학 성분 (WO₃)은 변하지 않습니다.
- 예: 단사정 WO₃는 500°C 의 공기 중에서 몇 시간 동안 소성되고 구조는 그대로 유지됩니다.
- 메커니즘 : WO₆ 팔면체의 각도 연결은 높은 결합 에너지를 제공하고 산소 포화 상태는 분해를 방지합니다.

직교 및 정방정 텅스텐의 열 안정성

- 범위: 사방정계 결정 형태는 330-740 °C 에서 안정하고 정방정 결정 형태는 740-1473 °C 에서 안정적입니다.
- 변화: 단사정 결정 형태는 330°C 이하로 냉각된 후 복원되며, 이는 고온 결정 형태가 준안정임을 나타냅니다.
- 예 : 사방 정계 형태 WO₃는 분해되지 않고 몇 시간 동안 600 ° C 의 산화 분위기에서 보관됩니다.
- 메커니즘 : 매우 대칭적인 팔면체 배열은 고온에 적응하지만 호기성 대기는 유지됩니다.

육각형 황색 텅스텐 삼산화물의 열 안정성

- 범위 : 200-600 °C 에서 안정, 600 °C 이상에서는 단사정 결정 형태로 바뀔 수 있습니다.
- 변화: 기공 구조는 고온에서 붕괴되기 쉽고 육각형 특성을 잃습니다.
- 예 : 육각형 형태의 WO₃는 400 ° C 의 열수 생성물에서 안정적이며 800 ° C 에서 소성 후 단사정이됩니다.
- 메커니즘 : 모공의 밀도가 감소하고 열 진동이 열린 구조를 파괴하기 쉽습니다.

산화 텅스텐 산소 공극 및 열 안정성

- 범위: 산소 공극 구조(예: W₂₀O₅₈, W₁₈O₄₉)는 300-500°C 에서 더 안정적이며 이 범위 이상에서 산화되거나 분해되기 쉽습니다.
- 변화 : 산화 분위기에서 W₁₈O₄₉는 WO₃로 산화 될 수 있습니다. 환원 분위기에서는 W 또는 WO₂로 더 환원할 수 있습니다.
- 메커니즘: 산소 결핍은 결합 에너지를 감소시키고 열 안정성을 감소시킵니다.

산화 텅스텐의 열 안정성에 대한 준비 조건의 영향

- 분위기 : 산화하는 분위기 (예 : O₂)는 WO₃ 안정성을 유지하고 대기 (예 : H₂)를 감소시키면 안정성이 감소합니다.
- 온도: 고온은 상 변화 또는 분해를 유도합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **형태학:** 표면 효과로 인해 나노 구조의 열 안정성은 벌크체의 열 안정성보다 낮습니다.

산화 텅스텐의 열 안정성을 측정하는 방법

- **열중량 분석(TGA):** 분해점을 평가하기 위한 온도 함수로 질량을 측정합니다.
- **시차 주사 열량계(DSC):** 상 변화 온도를 감지합니다.
- **고온 XRD:** 다형체 변화를 실시간으로 추적합니다.

5.3.1 황색 삼산화 텅스텐의 녹는점

황색 삼산화 텅스텐 (Yellow tungsten trioxide, WO_3)의 용점은 극도의 고온에서 결정 구조의 물리적 한계를 반영하는 열 안정성의 중요한 지표입니다. 용점은 결정 형태, 결합 강도 및 실험 조건과 밀접한 관련이 있습니다.

황색 삼산화 텅스텐의 용점 값

- **표준 용점 :** 황색 삼산화 텅스텐의 용점은 일반적으로 $1473\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1746 K)로 결정되며, 이는 표준 대기압 (0.1 MPa)에서 단사 정 형태 WO_3 의 용융 온도입니다.
- **실험적 측정 :** 시차 주사 열량계 (DSC) 또는 고온로 실험에서 약 $1473\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 황색 삼산화 텅스텐이 고체 상태에서 액체 상태로 변하고 결정 구조를 잃었음을 확인했습니다.

황색 삼산화 텅스텐의 용점에 대한 결정 형태의 영향

- **단사정 결정 형태:** 실온에서 안정한 상으로서 용점은 $1473\text{ }^{\circ}\text{C}$ 입니다. WO_3 팔면체는 높은 결합 에너지 (약 $600\text{-}700\text{ kJ/mol}$ 의 WO_3 결합)를 제공하는 코앵글 연결의 3 차원 네트워크로 형성되어 고온에서 구조적 무결성을 유지할 수 있습니다.
- **직교 및 정방계 결정 형태:** 이러한 고온 상은 $330\text{-}740\text{ }^{\circ}\text{C}$ (직교) 및 $740\text{-}1473\text{ }^{\circ}\text{C}$ (정방계) 범위에서 안정적이지만 큰 용점 차이 없이 용점 근처에서 직접 용융됩니다.
- **육각형 결정 형태 :** 육각형 결정 형태의 기공 구조는 $600\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 단사정 결정 형태로 붕괴 될 수 있으며 최종 용점은 여전히 $1473\text{ }^{\circ}\text{C}$ 입니다.

황색 삼산화 텅스텐의 용점에 대한 준비 조건의 영향

- **분위기 :** 공기 또는 O_2 와 같은 산화성 분위기에서 용점은 $1473\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 안정적입니다. 환원 분위기 (예 : H_2)에서 텅스텐은 직접 용융되지 않고 저온에서 저산소 텅스텐 산화물 (예 : WO_2) 또는 금속 텅스텐 (W)으로 분해 될 수 있습니다.
- **압력:** 고압에서 용점은 약간 상승할 수 있으며 격자 압축에 의해 W-O 결합의 강도가 향상되지만 데이터가 부족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 불순물: 미량의 불순물(예: Fe, Mo)은 격자의 규칙성을 방해하기 때문에 용점을 몇도까지 낮출 수 있습니다.

텅스텐 용점의 측정 방법

- DSC: 샘플을 가열하여 녹이고 흡열 피크의 위치를 기록합니다.
- 고온 현미경: 샘플의 형태학적 변화를 관찰하고 용점을 확인합니다.
- 열중량 분석(TGA): 질량 변화와 결합되어 분해 간섭이 제외됩니다.

황색 삼산화 텅스텐의 용점의 메커니즘

높은 용점은 W-O 결합의 강한 공유 및 이온 특성과 WO_6 팔면체의 긴밀한 배열 때문입니다. 녹으면 팔면체 네트워크가 끊어지고 원자는 무질서한 액체 상태로 들어갑니다.

5.3.2 텅스텐의 분해 온도

황색 삼산화 텅스텐의 분해 온도는 특정 조건에서 산소 원자를 잃거나 다른 화합물로 변하는 온도를 말하며, 이는 열 안정성과 밀접한 관련이 있습니다. 분해 거동은 대기와 결정 형태의 영향을 크게 받습니다.

텅스텐의 분해 온도 값

- 산화 분위기 : 공기 또는 O_2 에서 황색 삼산화 텅스텐 (WO_3)은 용점 ($1473^\circ C$)까지 분해되지 않습니다. 산소 포화 상태로 인해 화학적으로 안정합니다.
- 환원 분위기 : H_2 또는 CO 분위기에서 황색 삼산화 텅스텐의 분해 온도가 현저히 감소하고 저산소 텅스텐 산화물 또는 텅스텐으로 분해됩니다
 - $WO_3 \rightarrow WO_2 \cdot 9(W_{20}O_{58})$: 약 $400-600^\circ C$.
 - $WO_3 \rightarrow WO_2$: $800-1000^\circ C$.
 - $WO_3 \rightarrow W$: $1000-1200^\circ C$.
- 진공 조건 : 저압에서 분해 온도는 약 $1200-1300^\circ C$ 이며 WO_2 또는 휘발성 WO_3 가스를 생성합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 분해 온도에 대한 결정 형태의 영향

- 단사정 결정 형태 : 산화 분위기에서 용점까지 안정화되고, 환원 분위기에서 $400^\circ C$ 에서 산소 손실이 발생할 수 있으며, 청색 텅스텐 산화물이 형성된다.
- 육각형 결정 형태 : 기공 구조로 인해 환원 분위기에서 산소를 쉽게 잃을 수 있으며 분해 온도가 약간 낮습니다 (약 $350-500^\circ C$).
- 산소 결석 구조: $W_{18}O_{49}$ 가 $300-400^\circ C$ 인 경우 이미 결합이 있기 때문에 더 분해될 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

황색 삼산화 텅스텐의 분해 온도에 대한 준비 조건의 영향

- **분위기:** 환원 가능성이 높을수록(예: H₂ 농도가 높을수록) 분해 온도가 낮아집니다. 산화 분위기는 분해를 억제합니다.
- **온도 속도:** 급격한 온난화는 운동 지연으로 인해 분해를 지연시킬 수 있습니다.
- **불순물:** Fe 또는 C 를 함유 한 황색 삼산화 텅스텐의 분해 온도는 불순물에 의해 촉매 된 산소의 손실로 인해 환원 조건에서 감소합니다.

텅스텐 분해 온도의 측정 방법

- **TGA:** 기록 품질은 온도에 따라 감소하고 분해의 시작점이 식별됩니다.
- **XRD:** WO₂ 또는 W 와 같은 제품 변형의 고온 실시간 분석.
- **질량 분석법(MS):** 분해에 의해 방출되는 가스(예: O₂)를 검출합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 분해 온도 메커니즘

분해 과정은 단계적 산소 손실 반응입니다.

- $WO_3 + H_2 \rightarrow WO_{3-x} + xH_2O$ (산소 공식 형성).
- $WO_3 + 3H_2 \rightarrow W + 3H_2O$ (완전 감소). 열역학적으로 산소의 분압이 감소하면 분해가 촉진되며, 분해는 대기와 온도에 의해 동적으로 제어됩니다.

5.3.3 텅스텐의 열팽창 계수

황색 삼산화 텅스텐의 열팽창 계수 (CTE)는 온도 증가에 따른 부피 또는 길이의 팽창 정도를 측정하며, 이는 결정 구조의 대칭 및 결합 특성과 관련이 있습니다.

텅스텐 품미의 열팽창 계수 값

- **단사정 결정 형태:**
 - 선형 열팽창 계수 (α): 약 $8-12 \times 10^{-6} K^{-1}$ (20-300 °C).
 - 이방성: a, b, c 축을 따라 약간의 차이가 있으며(a 축에서 약 $10 \times 10^{-6} K^{-1}$, c 축에서 약 $12 \times 10^{-6} K^{-1}$), 격자는 팔면체 경사로 인해 비대칭입니다.
- **사방정계 형태:** 약 $7-10 \times 10^{-6} K^{-1}$ (330-740°C), 대칭이 개선되고 팽창이 더 균일합니다.
- **정방형 형태:** 약 $6-9 \times 10^{-6} K^{-1}$ (740-1473°C), 약간 더 큰 c 축 확장.
- **육각형 형태:** 약 $10-14 \times 10^{-6} K^{-1}$, 기공 구조로 인해 팽창이 약간 높아집니다.

황색 삼산화 텅스텐의 열팽창 계수 값에 대한 결정 형태의 영향

- **단사정 결정 형태:** 낮은 대칭은 이방성 팽창으로 이어지고 W-O 결합 강성은 팽창을 제한합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 직교 및 정방계 결정 형태: 대칭이 높으면 더 균일한 팽창과 향상된 결합 길이 조정 능력이 있습니다.
- 육각형 결정 형태: 기공이 밀도를 감소시키고 열 진동으로 인해 팽창 계수가 약간 높아지지만 고온에서 구조가 붕괴 될 수 있습니다.

텅스텐 열팽창 계수의 값에 대한 준비 조건의 영향

- 온도 범위: 상전이 지점에서 팽창 계수가 갑자기 변하여 결정 형태의 변형으로 인해 부피 변화가 발생할 수 있습니다.
- 형태: 나노 텅스텐 (예: 나노 입자)은 표면 효과로 인해 약간 더 높은 팽창 계수 (10-15% 증가)를 가질 수 있습니다.
- 불순물: 도핑(예: Na⁺)은 결합 강도를 변경하고 팽창 거동에 영향을 줄 수 있습니다.

텅스텐의 열팽창 계수 값을 측정하는 방법

- 고온 XRD: 온도의 함수로 격자 매개변수를 결정하고 $\alpha = (1/L_0)(\Delta L/\Delta T)$ 를 계산합니다.
- 열기계 분석(TMA): 시료 길이 변화를 직접 측정합니다.
- 팽창계: 벌크 재료의 체적 팽창을 기록합니다.

열팽창은 W-O 결합의 증가된 열 진동으로 인한 것이며, 온도가 증가함에 따라 결합 길이(약 0.001-0.002 Å/100°C)가 약간 증가합니다. 고대칭 결정 형태는 진동 에너지를 고르게 분배하여 팽창 진폭을 줄입니다. 구멍이나 결합은 진동 효과를 증폭시킵니다.

5.4 황색 삼산화 텅스텐의 용해도

황색 삼산화 텅스텐 (Yellow tungsten trioxide, WO₃)의 용해도는 화학적 특성의 중요한 측면이며, 다양한 용매 및 조건에서의 안정성과 반응성을 반영합니다. 용해도는 결정 구조, 입자 크기 및 화학적 환경에 크게 영향을 받습니다.

물에 대한 황색 삼산화 텅스텐의 용해도

- 용해도: 순수한 물에 대한 황색 텅스텐 삼산화물의 용해도는 약 0.02g / L (20 ° C, pH ≈ 7)로 매우 낮으며 이는 잘 녹지 않는 화합물입니다.
- 이유: WO₃의 결정 구조는 WO₆ 팔면체의 등각 연결에 의해 형성되어 안정적인 3차원 네트워크를 형성하고 WO₃ 결합 (결합 에너지는 약 600-700 kJ / mol)은 물 분자에 의해 쉽게 끊어지지 않습니다.
- 메커니즘: 물 분자는 텅스텐 원자를 효과적으로 조정할 수 없으며 격자를 해리하기에 충분한 화학적 드라이브가 부족합니다.

산성 용액에 대한 황색 텅스텐 삼산화물의 용해도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **약산(예: 아세트산):** W-O 결합을 끊을 만큼 산성이 아니기 때문에 용해도(<0.1g/L)가 여전히 낮습니다.
- **강산 (예 : HCl, H₂SO₄) :** 용해도가 약간 증가하지만 여전히 제한적입니다 (약 0.1-0.5 g / L). 일부 WO₃는 용해성 텨스텐산 (H₂WO₄)으로 전환 될 수 있지만 반응은 느립니다.
- **메커니즘 :** 강산의 H⁺는 표면 산소 원자를 공격하여 H₂WO₄를 형성하지만 결정 격자의 내부 안정성은 높습니다.

알칼리성 용액에 대한 황색 텨스텐 삼산화물의 용해도

- **용해도 :** 강염기 (예 : NaOH, KOH)에서 황색 텨스텐 삼산화물의 용해도가 크게 향상되고 용해성 텨스텐 산염 (예 : Na₂WO₄)이 생성된다. 1M NaOH 에서 용해도는 수십 g / L 에 도달 할 수 있습니다.
- **反应:** WO₃ + 2NaOH → Na₂WO₄ + H₂O.
- **예 :** 단사정 형태 WO₂ 는 끓는 10 % NaOH 용액에 몇 시간 내에 완전히 용해됩니다.
- **메커니즘 :** OH⁻ 는 W-O 결합을 공격하고 팔면체 구조를 파괴하며 WO₃ 이온을 생성하며 알칼리 농도 및 온도가 증가함에 따라 용해도가 증가합니다.

유기 용제에 대한 텨스텐의 용해도

- **용해도:** 에탄올 및 아세톤과 같은 일반적인 유기 용제에 거의 녹지 않습니다.
- **이유:** 유기 용매는 강력한 배위 능력이 부족하여 WO₃ 격자를 해리할 수 없습니다.

황색 삼산화 텨스텐의 용해도에 영향을 미치는 요인

- **결정 형태:** 단사정 결정 형태는 조밀한 구조로 인해 용해도가 가장 낮고 육각형 결정 형태는 기공 구조로 인해 베이스에 약간 용해됩니다.
- **입자 크기:** Nano-xachetamite(예: 10-100nm)는 비표면적이 높기 때문에 마이크론보다 용해도가 약간 높습니다.
- **온도:** 고온은 특히 알칼리성 조건에서 용해를 가속화합니다.
- **산소 결핍:** W₁₈O₄₉와 같은 결합 증가로 인해 베이스에서 더 빨리 용해됩니다.

텨스텐의 용해도를 측정하는 방법

- **중량 측정 방법:** 용해 전후에 고체의 질량을 측정합니다.
- **분광법:** 용액의 텨스텐 함량 측정(예: ICP-MS).

5.5 황색 삼산화 텨스텐의 촉매 특성

황색 텨스텐 삼산화물의 촉매 특성은 광 촉매, 전기 촉매 및 열 촉매 기능을 포함하며, 이는 결정 구조, 표면 특성, 비 표면적 및 전자 상태와 밀접한 관련이 있는 기능성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료로서의 텅스텐 황색의 핵심 특성입니다. 이러한 특성으로 인해 수소 생산(수소 생산률 > 1mmol/h·g), 오염물질 분해(효율 > 90%), 연료 전지(과전위 < 500mV) 및 배기 가스 정화(전환율>90%). 황색 삼산화 텅스텐의 촉매 활성화는 n 형 반도체 특성, 표면 활성화 부위 및 결합 상태로 인한 것이며, 촉매 효율은 결정 형태, 형태 및 도핑을 최적화하여 크게 향상 될 수 있습니다 (> 50 %). 다음은 광촉매, 전기 촉매 및 열촉매 특성과 그 메커니즘, 형태학적 영향, 조건부 효과 및 적용 사례에 대한 일반적이지만 전문적인 분석으로, 촉매 응용에 대한 포괄적인 지침을 제공하기 위해 단락 형태로 제공됩니다.

황색 삼산화 텅스텐의 광촉매 성능은 광여기 전자 - 정공 쌍에 의해 산화 환원 반응을 유도하는 반도체 특성을 기반으로 합니다. 단사정 결정 형태 (P2₁/n)는 2.6-2.8 eV 의 밴드 갭을 가지며 자외선 (<450 nm) 만 흡수하며 분해 염료 (예 : 로다 민 B)에 대한 50-70 % 효율과 같은 중간 정도의 광촉매 활성을 가지고 있습니다. 기공 구조와 높은 비표면적(10-30m²/g)으로 인해 육각형 결정 형태(P6/mm)는 광자 이용률(산란 > 20% 증가) 및 흡착 용량(흡착률 >80%) 및 광촉매 효율이 80-90%에 도달하여 수생 H₂(수소 생산율 >1mmol/h·g)의 광분해에 적합합니다. 산소 공극 구조(예: W₂₀O₅₈)의 밴드 갭은 2.2-2.5eV 로 감소하고, 흡수는 가시 영역(500-600nm)으로 확장되며, 가시광선 촉매 효율은 70-85%로 유기물의 분해(분해율 >90%)에 탁월합니다. 나노 구조(예: 나노시트, 입자 크기 20-200nm)는 높은 비표면적(30-60m²/g)과 짧은 캐리어 확산 경로(<10nm)로 인해 광촉매 효율(>30%)을 더욱 향상시킵니다. 광촉매 메커니즘은 O₂p 원자가대에서 W 5d 전도대로의 광여기 전자의 전이, 전자-정공 쌍의 생성 및 정공 산화에 의한 H₂O 생성을 포함합니다. OH·, 전자 환원 O₂ 생성 ·O₂⁻, H₂O + h⁺ → ·아 + H⁺.

황색 삼산화 텅스텐의 전기 촉매 성능은 주로 전도성 및 표면 활성화 부위에 의존하는 산소 발생 반응 (OER) 및 수소 발생 반응 (HER)에 반영됩니다. 단사정 WO₃는 낮은 전도성(10⁻⁷ S/cm)으로 인해 전기 촉매 활성이 제한적입니다(OER 과전위 > 700mV). 직교(Pnma) 및 정방형(P4/nmm) 전도도는 약간 높지만(10⁻⁶-10⁻⁵ S/cm) 여전히 제한적입니다. 산소 공극 구조(예: W₁₈O₄F)는 높은 전도성(10⁻¹-10² S/cm) 및 결합 상태(>10¹⁷ cm⁻³)로 인해 전기 촉매 활성화(OER 과전위≈500mV)을 크게 증가시켰습니다. 높은 비표면적(30-60 m²/g)과 짧은 전하 수송 경로(<10 nm)로 인해 나노 구조(예: 나노튜브)는 산성 전해질(예: 0.5 M H₂SO₄)에서 약 500 mV 의 OER 과전위와 100-150 mV/dec 의 HER Tafel 기울기를 갖습니다. 전기 촉매 메커니즘은 전하 전달을 촉진하기 위해 W⁶⁺/W⁵⁺ 부위를 기반으로 하며, OER 공정은 2H₂O → O₂ + 4H⁺ + 4e⁻이며, 산소 공극은 OH⁻ 흡착을 향상시킵니다(흡착 에너지가 20% 감소>). Nano WO 는 연료 전지 (전류 밀도 > 10 mA / cm²)에서 잘 작동하며 Pt (0.1-1 wt %) (> 10 %)를 도핑하여 더욱 감소 할 수 있습니다.

황색 삼산화 텅스텐의 열 촉매 특성은 CO 산화 및 NO_x 환원과 같은 고온 산화 환원 반응에서 탁월합니다. 사방정계 형태는 안정적인 구조(온도 저항<740°C)와 적당한 비표면적(5-10m²/g)으로 인해 300-600°C 에서 CO 산화 및 NO_x 감소(전환율 > 90%)에 매우 효율적입니다. 산소 공극 구조(예: W₁₈O₄F)는 결합 부위(>10¹⁷ cm⁻³)로 인한 가스 흡착(흡착률 >80%)을 향상시키고 300°C>90%에서 CO 산화의 전환율을 촉매합니다. 육각형 결정 형태는 기공 구조(기공 크기 > 1nm)로 인해 기체 확산을 촉진하며, NO_x 저감 효율은 85% 이상입니다. 열촉매 메커니즘은 산소 공극에 의한 반응물(예: CO)의 흡착,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

격자 산소의 참여: $\text{CO} + \text{O}^2\text{□□} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{e}^-$ 를 포함하며 결합 부위는 활성화 에너지(> 30%)를 감소시킵니다. 측정은 온도($\pm 1^\circ\text{C}$) 및 기체 유속($\pm 0.1\text{mL/분}$)을 제어하면서 흡착된 종에 대해 고정층 반응기 테스트 변환($\pm 1\%$ 정확도) 및 현장 적외선 분광법(분해능 $\pm 1\text{cm}^{-1}$)을 사용하여 수행되었습니다.

형태는 압축 강도에 큰 영향을 미칩니다. 높은 비표면적($30\text{--}60\text{m}^2/\text{g}$)과 풍부한 표면 부위($>10^{17}\text{cm}^{-3}$)로 인해 나노 구조(예: 나노 튜브, 나노 시트, 입자 크기 $20\text{--}200\text{nm}$)는 광촉매 효율을 30% 증가시키고 전기 촉매 과전위를 20% 감소시키며 열촉매 전환율을 50% 증가시켜 벌크 구조를 훨씬 초과합니다. 미세입자($1\text{--}10\ \mu\text{m}$)는 비표면적($2\text{--}10\ \text{m}^2/\text{g}$)이 낮아 활성이 낮지만 고온(온도 저항 $> 1000^\circ\text{C}$)에서 안정성이 우수하여 열 촉매에 적합합니다. 육각형 결정 형태의 기공 구조는 기체 확산 및 광자 포획(20% 증가)을 향상시켜 촉매 성능을 더욱 향상시킵니다. 형태(예: 나노튜브)를 최적화하면 촉매 활성(> 50%)을 크게 증가시킬 수 있습니다.

반응 조건은 압축 강도의 영향에 핵심입니다. 고온($300\text{--}600^\circ\text{C}$)은 열촉매 효율(전환율 50%)> 증가시키지만 과도한 온도($>800^\circ\text{C}$)는 결정 형태 전이(육각형 \rightarrow 단사정) 및 활성 감소(> 20%)를 유발할 수 있습니다. 광촉매는 광원 강도($>10\text{mW}/\text{cm}^2$)와 pH(6-8)를 제어해야 하는 반면, 전기 촉매는 전해질(0.5-1M) 및 전압(1-3V)을 최적화해야 합니다. 도핑 된 Pt 또는 Pd (0.1-1 wt %)는 CO 산화 전환율 >Pt 도핑 된 WO의 속도 30% 증가와 같은 촉매 효과를 통해 활성을 향상시킵니다. 습도(>50%)는 촉매 효율(> 20%)을 저해할 수 있으며, 이는 소수성 변형으로 개선해야 합니다. 조건을 최적화하면 촉매 성능(효율 > 30%)을 향상시킬 수 있습니다.

텅스텐의 촉매 특성은 많은 분야에서 중요한 응용 분야를 가지고 있습니다. 광촉매 측면에서 육각형 다형체와 나노 WO_3 는 물의 광분해(수소 생산율 $>1\text{mmol}/\text{h}\cdot\text{g}$)와 오염물질 분해(분해율 >90%)에 의한 수소 생산에 사용되어 새로운 에너지 및 환경 정화(시장 규모 > 1 억 달러/년)를 촉진합니다. 전기 촉매 측면에서 nano- WO_3 는 연료 전지 OER 및 HER (과전위 $\approx 500\text{mV}$)에서 우수한 성능을 발휘하며 효율적인 에너지 변환 (효율 > 80 %)을 지원합니다. 열 촉매 측면에서 사방 정계 결정 형태 및 산소 공석 WO_2 는 CO 산화 (전환율 >90 %) 및 NO> 환원 (효율 85 %)과 같은 배기 가스 정화에 사용되어 산업 배출 제어 (시장 성장 > 10 % / 년)에 기여합니다. 촉매 성능은 복합재(예: WO_3/TiO_2) 및 현장 특성화(1ms< 시간 분해능)를 통해 더욱 향상될 수 있습니다.

텅스텐의 촉매 특성에는 광 촉매 (80-90 % 효율), 전기 촉매 (과전위 $\approx 500\ \text{mV}$) 및 열 촉매 (변환 >90 %)가 포함되며, 이는 결정 형태, 형태 및 결합에 의해 조절됩니다. 육각형 결정 형태 및 나노 구조는 높은 비표면적($>30\text{m}^2/\text{g}$)과 결합 상태($>10^{17}\text{cm}^{-3}$)로 인해 우수한 성능을 나타내며, 산소 공극 구조는 가시광선 및 저온의 촉매 능력을 향상시킵니다. 온도($200\text{--}600^\circ\text{C}$), 도핑(Pt, Pd) 및 형태(나노튜브)를 최적화하여 촉매 효율을 50% 이상 높일 수 있습니다. 향후 연구는 에너지 및 환경 보호 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 광범위한 적용을 촉진하기 위해 복합 재료 및 저온 작동 ($<100^\circ\text{C}$)에 초점을 맞추어야 합니다.

5.6 텅스텐의 비 표면적

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

황색 삼산화 텅스텐 (WO_3 , 황색 삼산화 텅스텐)의 비 표면적은 흡착 용량, 광촉매 성능 (수소 생산 $> 1\text{mmol/h}\cdot\text{g}$), 전기 화학 활성 (비 커패시턴스 $> 500\text{F/g}$) 및 가스 감도 (감도 > 100)에 직접적인 영향을 미치는 단위 질량 (단위 : m^2/g)당 표면적으로 정의되는 물리적 특성의 핵심 매개 변수입니다. 비표면적은 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조, 형태, 입자 크기 및 준비 조건과 밀접한 관련이 있으며, 이는 촉매 (변환 $> 90\%$), 센서 (검출 한계 $< 0.1\text{ppm}$) 및 에너지 저장 재료 (> 1000 사이클)의 적용 가능성을 평가하는 중요한 지표입니다. 정확한 측정 방법과 현미경 분석을 통해 특정 표면적의 조절 메커니즘과 그 응용 가치를 깊이 이해할 수 있습니다.

다른 결정 형태를 가진 황색 텅스텐은 비 표면적에서 상당한 차이를 보였다. 컴팩트한 3 차원 네트워크 구조로 인해 단사정 결정 형태(공간 그룹 $P2_1/n$)는 표면이 비교적 평평하고 비표면적이 낮습니다. 단사정 결정 블록의 비표면적은 일반적으로 $2\text{--}5\text{m}^2/\text{g}$ 이며, 마이크론 크기의 입자(입자 크기 $1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$)는 $5\text{--}10\text{m}^2/\text{g}$ 까지 약간 상승합니다. 사방 정계 형태 ($Pnma$) 및 정방 형태 ($P4/nmm$)의 비 표면적은 $5\text{--}10\text{m}^2/\text{g}$ 이며, 이는 격자 대칭이 높을수록 표면이 약간 거칠어지고 유효 표면적이 증가하기 때문에 단사 블록보다 약간 높습니다. 독특한 기공 구조로 인해 육각형 결정 형태($P6/mmm$)는 내부 기공에서 더 많은 표면 표면을 노출하고 비표면적은 $10\text{--}30\text{m}^2/\text{g}$ 로 크게 증가합니다. 산소 공극 구조(예: $W_{18}O_{49}$)는 결정 격자의 바늘 형태 및 균열 결함으로 인해 비표면적을 $20\text{--}50\text{m}^2/\text{g}$ 로 더욱 증가시킵니다. 나노 구조 텅스텐 (예 : 나노 입자, 나노 플라워, 입자 크기 $20\text{--}200\text{ nm}$)은 높은 표면 대 부피 비율과 $30\text{--}60\text{ m}^2/\text{g}$ 의 비 표면적으로 인해 우수한 표면 활성을 나타냅니다.

압축 강도에 대한 지형의 영향은 특히 중요합니다. 큰 입자 크기 ($> 10\text{ }\mu\text{m}$)와 평평한 표면으로 인해 벌크 옐로우 텅스텐 트리 옥사이드는 비 표면적 ($2\text{--}5\text{ m}^2/\text{g}$)이 낮고 높은 기계적 강도 (예 : 하드 코팅, 경도 $> 600\text{ MPa}$)가 필요한 응용 분야에 적합합니다. 마이크론 크기의 입자($1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$)는 크기를 줄여 비표면적($5\text{--}10\text{m}^2/\text{g}$)을 약간 증가시켜 부분 촉매 시나리오에 적합합니다. 나노 구조 (예 : 나노 와이어, 나노 시트, 나노 플라워)는 크기 효과와 높은 표면 대 부피 비율로 인해 비 표면적이 크게 증가합니다 (예 : 나노 플라워 WO_3 는 $50\text{--}60\text{ m}^2/\text{g}$ 에 도달 할 수 있음). 육각형 결정 형태 또는 나노 플라워와 같은 다공성 구조의 내부 기공은 흡착 및 촉매 응용 분야에 탁월한 추가 표면적에 기여합니다(흡착 속도 $> 80\%$). 예를 들어, WO_3 나노 플라워의 광촉매 분해에서 유기물의 제거율은 $> 90\%$ 에 도달 할 수 있습니다.

준비 조건 및 외부 요인은 특정 표면적에 큰 영향을 미칩니다. 열수 ($180\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$, $12\text{--}24\text{ h}$)는 높은 비 표면적 ($30\text{--}60\text{ m}^2/\text{g}$)을 갖는 나노 구조 WO_3 (입자 크기 $< 200\text{ nm}$)를 생산하는 반면, 고온 소성 ($> 800\text{ }^\circ\text{C}$)에 의해 생성 된 벌크 WO_3 는 입자 성장 ($> 10\text{ }\mu\text{m}$)으로 인해 비 표면적 ($< 5\text{ m}^2/\text{g}$)이 낮습니다. 입자 크기는 비표면적에 반비례하며, 크기가 작을수록(예: 10nm) 비표면적($> 50\%$)이 증가합니다. 고온 소결($> 800\text{ }^\circ\text{C}$)은 입자 성장과 기공 폐쇄를 촉진하여 비표면적($> 30\%$)을 감소시키며, 높은 표면적을 유지하기 위해 소결 온도($< 600\text{ }^\circ\text{C}$)를 제어해야 합니다. 또한, 도핑(예: N, Ti) 또는 표면 개질은 표면 거칠기를 더욱 최적화하고 특정 표면적($> 20\%$)을 증가시킬 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

비표면적의 측정은 주로 산업 및 학술 연구의 표준 방법인 높은 정확도($\pm 0.1\text{m}^2/\text{g}$)로 N_2 흡착-탈착 등온선(77K)으로 계산되는 BET(Brunauer-Emmett-Teller) 방법에 의존합니다. 주사 전자 현미경(SEM, 해상도 $< 1\mu\text{m}$) 및 투과 전자 현미경(TEM, 해상도 $< 0.1\text{nm}$)을 이미지 분석과 결합하여 입자 크기와 표면적을 추정하고 지형을 지원할 수 있습니다. Langmuir 방법은 단층 흡착 모델을 기반으로 하며 낮은 표면적 샘플($< 10\text{m}^2/\text{g}$)에 대한 BET 결과를 검증하는 데 사용됩니다. 이러한 방법은 데이터 신뢰성(오류 $< 5\%$)을 보장하기 위해 습기가 없고(습도 $< 10\%$) 깨끗한 환경에서 작동해야 합니다.

비표면적의 메커니즘은 결정 구조의 개방성과 입자의 크기에 의해 결정됩니다. 단사정 결정 형태의 촘촘한 구조는 표면적 성장($< 10\text{m}^2/\text{g}$)을 제한하며 기계적 특성 요구 사항이 높은 시나리오에 적합합니다. 육각형 기공 개구부는 내부 표면($10\text{--}30\text{m}^2/\text{g}$)을 노출시켜 흡착 및 촉매 용량을 크게 향상시킵니다. 나노 구조의 크기 효과(입자 크기 $< 200\text{nm}$)는 표면 원자 비율($> 20\%$)과 입체 밀도를 증가시켜 비표면적($30\text{--}60\text{m}^2/\text{g}$)을 크게 증가시킵니다. 산소가 없는 구조(예: $\text{W}_{18}\text{O}_{47}$)의 균열 및 바늘 모양의 형태는 표면적($20\text{--}50\text{m}^2/\text{g}$)을 더욱 증가시키지만 기계적 안정성을 감소시킬 수 있습니다.

응용 분야 측면에서 높은 비표면적을 가진 육각형 다형체 및 나노 구조 WO_3 ($> 30\text{m}^2/\text{g}$)는 촉매 및 센서에 이상적입니다. 예를 들어, 육각형 형태의 WO_3 는 광촉매 수소 생산에서 높은 효율(수소 생산 $> 1\text{mmol}/\text{h}\cdot\text{g}$)을 나타내며 가스 센서의 NO_2 검출 한계는 $< 0.1\text{ppm}$ (감도 > 100)에 도달할 수 있습니다. 산소 공극 구조(예: $\text{W}_{18}\text{O}_{47}$)는 높은 표면적($20\text{--}50\text{m}^2/\text{g}$)으로 인해 지지 촉매($> 90\%$ 변환)에 적합합니다. 비표면적이 낮은($2\text{--}5\text{m}^2/\text{g}$) 단사정 블록은 표면 활성 요구 사항이 낮기 때문에 하드 코팅(경도 $> 600\text{MPa}$) 또는 매트릭스 재료(압축 강도 $> 800\text{MPa}$)와 같은 구조 재료에 더 적합합니다.

5.7 텅스텐의 느슨한 밀도

황색 삼산화 텅스텐 (WO_3 , 황색 삼산화 텅스텐)의 벌크 밀도는 입자의 패킹 효율과 다공성을 반영하는 g/cm^3 단위로 측정된 자연 패킹 상태의 분말의 밀도를 나타냅니다. 이 매개 변수는 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조, 입자 형태, 크기 및 준비 조건과 밀접한 관련이 있으며, 이는 분말 야금(밀도 $> 95\%$), 촉매 지지체(변환 $> 90\%$), 에너지 저장 재료(특정 커패시턴스 $> 500\text{F}/\text{g}$) 및 기타 분야. 벌크 밀도는 분말의 운송 효율(부피 감소 $> 20\%$), 가공 특성(유동성 $> 80\%$) 및 최종 제품의 특성(예: 경도 $> 600\text{MPa}$)을 결정합니다. 정밀한 측정과 현미경 분석을 통해 텅스텐의 측정 특성을 특정 요구 사항에 맞게 최적화할 수 있습니다.

결정 형태가 다른 텅스텐 소나무의 밀도에는 상당한 차이가 있었습니다. 단사정 결정 형태(공간 그룹 $\text{P}2_1/n$)는 WO_6 팔면체에 의해 형성된 단단한 네트워크 구조로 인해 조밀한 입자 밀도와 높은 벌크 밀도를 가지고 있습니다. 단사정 미세입자($1\text{--}10\mu\text{m}$ 크기)의 부피 밀도는 $1.5\text{--}2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 이고 벌크 분말(입자 $> 10\mu\text{m}$)은 $2.0\text{--}3.0\text{g}/\text{cm}^3$ 에 이릅니다. 사방정계 및 정방정계($\text{P}4/nmm$)의 경우 $2.0\text{--}2.8\text{g}/\text{cm}^3$ 의 벌크 밀도는 고온 준비($> 800^\circ\text{C}$)로 인해 입자 제거율(다공성 $> 5\%$)이 약간 증가할 수 있으므로 단사정 형태보다 약간

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

낮습니다. 육각형 결정 형태(P6/mmm)는 기공 구조로 인해 입자 자체의 밀도를 감소시키고 패키징 시 다공성이 더 높으며 벌크 밀도는 1.2-2.0g/cm³입니다. 산소 공극 구조(예: W₁₈O₄F)는 바늘 형태 및 격자 결합으로 인해 패키징 효율이 더욱 감소하며 벌크 밀도는 1.0-1.8g/cm³에 불과합니다. 나노 구조 텨스텐 (예 : 나노 입자, 나노 플라워, 입자 크기 20-200 nm)은 높은 다공성 및 표면 효과로 인해 0.5-1.5 g / cm³ 범위의 벌크 밀도가 크게 감소하여 경량 응용 분야에 적합합니다.

입자 형태는 느슨한 보압의 밀도에 중요한 영향을 미칩니다. 마이크론 크기의 입자 (1-10 μm)는 일반적으로 구형 또는 다면체 모양이며 단단히 채워져 있으며 높은 벌크 밀도 (1.5-3.0 g / cm³)를 가지므로 분말 야금 (예 : 텨스텐 분말 준비, 밀도 > 95 %)에 적합합니다. 나노 구조(예: 나노 입자, 나노 와이어, 나노 플라워)는 표면 효과와 입자 간 공극(다공성 >30%) 증가로 인해 벌크 밀도(0.5-1.5g/cm³)가 크게 감소합니다. 다공성 구조(예: 육각형 나노플라워)는 내부 기공으로 인한 패키징 효율의 추가 감소로 인해 벌크 밀도(<1.5g/cm³)가 가장 낮지만 높은 비표면적(>50m²/g)으로 인해 촉매 응용 분야(수소 생산 > 1mmol/h·g)에서 우수합니다. 예를 들어, 광촉매에서 WO₃ 나노 플라워의 흡착 속도는 밀도가 낮고 표면적이 높기 때문에 >80%에 도달 할 수 있습니다.

준비 조건은 벌크 밀도에 큰 영향을 미쳤습니다. 소성 방법(예: 파라텨스텐 암모늄의 열 분해, 600-800 °C)은 큰 입자, 규칙적인 형태 및 높은 벌크 밀도 (2.0-3.0 g / cm³)를 가진 마이크론 입자를 생성합니다. 열수 방법 (180-200 °C, 12-24 h)에 의해 생성 된 나노 구조 WO₃ (입자 크기 < 200 nm)는 입자와 기공이 작기 때문에 벌크 밀도 (0.5-1.5 g / cm³)가 낮습니다. 입자 크기는 핵심 요소이며, 크기가 작을수록(예: 10nm) 입자 간 공극이 커지고 벌크 밀도(> 30%)가 낮아집니다. 고온 소결(>800°C)은 입자 밀도를 증가시키지만 입자 응집을 유발하고 벌크 밀도(< 10%)를 약간 감소시킬 수 있습니다. 준비 공정의 최적화(예: 열수 온도<200°C 제어)는 밀도와 표면적의 균형을 20%(> 20%) 조정합니다.

벌크 밀도는 주로 체적 방법으로 측정되며, 황색 삼산화 텨스텐 분말을 알려진 부피의 용기에 자연적으로 포장하고 계량 후 밀도를 계산합니다 ($\rho = m / V$, 정확도 $\pm 0.01 \text{ g / cm}^3$). 진동 방법은 약간의 진동(주파수< 10Hz)을 사용하여 풀림 상태를 시뮬레이션하여 실제 측정에 가까운 밀도 값을 얻습니다. 실제 밀도(7.1-7.16 g/cm³)와 결합하여 다공성(다공성 = 1 - 벌크 밀도/실제 밀도)을 추정할 수 있으며, 이는 재료 설계의 기초를 제공합니다. 측정은 측정 효율에 영향을 미치는 수분(흡착 용량 <0.1 wt%)을 피하기 위해 건조한 환경(습도 < 10%)에서 수행해야 합니다. 주사 전자 현미경(SEM, 해상도<1μm)은 입자 형상 및 패키징 분석을 지원하여 데이터 신뢰성(<5% 오차)을 보장합니다.

벌크 밀도의 메커니즘은 입자 사이의 물리적 축적과 결정 구조의 고유 밀도에 의해 결정됩니다. 단사정 결정 형태(예: 구형 입자)의 조밀함과 규칙적인 형태는 매우 효율적이고 느슨합니다(2.0-3.0 g/cm³). 육각형 결정 형태의 기공 구조와 나노 구조의 다공성(다공성 >30%)은 패키징 효율을 감소시켜 부피 밀도(0.5-2.0g/cm³)를 낮춥니다. 바늘 모양의 형태와 산소 공극 구조(예: W₁₈O₄F)의 불규칙한 표면은 입자 간의 접촉 면적을 더욱 감소시키고 밀도(1.0-1.8g/cm³)를 감소시킵니다. 나노 효과의 핵심은 입자 간 공극(>20%)의 증가와 표면 효과의 향상에 있으며, 이는 벌크 밀도를 크게 감소시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

응용 분야 측면에서 벌크 밀도가 높은 마이크론 크기의 단사정 WO_3 ($1.5-3.0 \text{ g/cm}^3$)는 높은 포장 효율과 증가된 성형 밀도 ($>>95\%$)로 인해 텅스텐 분말 및 초경합금 준비 (경도 90 HRA)와 같은 분말 야금에 적합합니다. 직교 및 정방계 결정 형태의 중간 밀도($2.0-2.8 \text{ g/cm}^3$)는 구조 재료(예: 수명이 > 2000 시간인 내마모성 코팅)에 적합합니다. 벌크 밀도가 낮은 육각형 결정 형태와 나노 구조 WO_3 ($0.5-2.0 \text{ g/cm}^3$)는 광촉매(양자 수율 $>5\%$) 및 가스 센서(감도 >100)와 같은 경량 촉매 지지체에 이상적이며, 이는 높은 비표면적($>50 \text{ m}^2/\text{g}$)으로 인해 표면 활성을 향상시킵니다. 산소 공극 구조의 낮은 밀도($1.0-1.8 \text{ g/cm}^3$)는 지지 촉매($>90\%$ 변환)에 적합합니다.

5.8 황색 삼산화 텅스텐의 광학적 성질

광 흡수, 굴절률 및 색상 변경 특성을 포함한 황색 삼산화 텅스텐 (WO_3 , 황색 삼산화 텅스텐)의 광학 특성은 광 촉매, 광전자 공학 및 스마트 재료 응용 분야의 핵심 특성입니다. 이러한 특성은 황색 삼산화 텅스텐의 결정 구조, 전자 구조 및 형태와 밀접한 관련이 있으며, 이는 물의 광분해 (수소 생산 $> 1 \text{ mmol/h} \cdot \text{g}$), 오염 물질 분해 (효율 $> 90\%$) 및 스마트 유리 (광 투과율 변화 $>70\%$), n 형 반도체로서 텅스텐의 밴드 갭은 $2.2-2.8 \text{ eV}$ 범위이며, 이는 주로 자외선 및 근가시 영역 ($<500 \text{ nm}$)에 집중되어 있는 광 흡수 범위를 결정합니다. 굴절률이 약 $2.2-2.5$ 이며 결정 형태와 파장에 따라 달라져 광학 장치(굴절률 편차 $<5\%$)에 적합합니다. 텅스텐의 색상은 밝은 노란색 (단사정 형태 WO_3)에서 파란색 또는 자주색 ($W_{18}O_{49}$ 와 같은 산소 공극 구조)까지 다양하며 격자 결합 및 전자 상태에 의해 결정됩니다. 다양한 결정 형태를 가진 텅스텐은 응용 성능에 영향을 미치는 독특한 광학 특성을 나타냅니다.

압축 강도에 대한 결정 형태의 영향은 중요합니다. 단사정 결정 형태 (공간 그룹 $P2_1/n$)는 $2.6-2.8 \text{ eV}$ 의 밴드 갭을 가지며 광 흡수는 자외선과 소량의 청색광 ($<450 \text{ nm}$)으로 제한되며 연한 노란색으로 자외선 광촉매 작용에 적합합니다 (열화 속도 $50-70\%$). 사방정계형($Pnma$)과 정방형($P4/nmm$)은 $2.4-2.6 \text{ eV}$ 의 약간 좁은 밴드 갭을 갖고, 흡수가장자리는 약 480 nm 로 이동된 빨간색이며, 색상은 가시광선 반응($> 10\%$)을 향상시키는 황주황색입니다. 육각형 결정 형태($P6/mmm$)는 약 2.7 eV 의 밴드 갭을 가지며 공극 구조는 광 산란 및 포집 효율을 향상시켜 광촉매(수소 생산 효율 $>80\%$)에 기여합니다. 산소 공극 구조(예: $W_{18}O_{49}$)의 밴드 갭은 $2.2-2.5 \text{ eV}$ 로 감소하고, 흡수 범위는 가시 영역($500-600 \text{ nm}$)으로 확장되며, 색상은 청자색으로 길어지게 되어 가시광선 촉매 활성(효율 $70-85\%$)이 크게 향상됩니다.

5.8.1 텅스텐의 광 흡수 및 광촉매 특성

황색 삼산화 텅스텐의 광 흡수 및 광촉매 특성은 광학 특성의 핵심이며, 이는 물의 광분해, 오염 물질 분해 및 환경 정화의 적용 효율을 직접 결정합니다. 단사정 결정 형태는 $2.6-2.8 \text{ eV}$ 의 간접 밴드 갭을 가지며 주로 자외선과 소량의 청색광($<450 \text{ nm}$)을 흡수하며 가시 영역에서 투과율이 높고 밝은 노란색을 나타냅니다. 넓은 밴드 갭으로 인해 전자-홀 분리 효율이 낮고 광촉매 활성이 적당하여 분해 염료($50-70\%$ 효율)와 같은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

UV 광촉매에 적합합니다. 직교 및 정방계 결정 형태는 좁은 밴드 갭 (2.4-2.6 eV), 480 nm 의 확장 된 흡수 범위 및 황색을 띤 주황색을 띠어 광촉매 성능을 향상시킵니다 (효율 > 10 % 증가). 육각형 결정 형태는 약 2.7eV 의 밴드갭을 가지며 기공 구조와 높은 비표면적(10-30m²/g)은 흡착 용량과 광자 활용도를 향상시켜 광분해된 수생 H₂에서 80-90%와 같은 광촉매 효율을 크게 증가시킵니다. 결합 상태의 존재로 인해, 산소 공극 구조(예: W₂₀O₅₈)의 밴드 갭은 2.2-2.5eV 로 감소하고, 흡수 적색 편이는 가시 영역(500-600nm)으로 이동하며, 광촉매 활성은 가시광선 하에서 크게 증가합니다(효율 70-85%). 높은 비표면적(>50m²/g)과 짧은 캐리어 확산 경로로 인해 나노 구조(예: 나노시트 및 나노플라워)의 광촉매 효율이 벌크체보다 우수하고 유기 오염 물질의 분해 효율은 >90%에 달할 수 있습니다.

광 흡수 메커니즘은 O2p 오비탈(원자가 밴드)에서 W 5d 오비탈(전도대)로의 전자의 전이에서 발생합니다. 산소 결핍은 결합 에너지 수준을 도입하고, 전이 에너지를 감소시키며, 흡수 범위(적색편이>50nm)를 확장합니다. 육각형 결정 형태의 공극 구조는 광자 포획을 최적화하고(산란 > 20% 증가), 나노 구조는 크기 효과를 통해 캐리어 확산 경로(<10nm)를 단축하고 전자-정공 분리 효율(> 30%)을 향상시킵니다. 광촉매 성능은 흡수 가장자리를 결정하기 위해 UV-Vis 분광법(파장 정확도 ± 1nm)으로 측정하고, 밴드 갭(오차 < 0.1eV)은 공식 $E_g = 1240/\lambda$ 로 계산했습니다. 광촉매 실험은 광원 강도(>10 mW/cm²) 및 반응 조건(pH 6-8)을 제어하여 오염 물질의 분해 속도(예: 로다민 B, 분해 속도>90%) 또는 H₂/O₂ 수율(>1mmol/h·g)을 모니터링하여 성능을 평가합니다.

응용 분야 측면에서 단사정 WO₃는 안정적인 UV 광촉매 특성으로 인해 수처리(50-70% 분해율) 및 공기 정화(VOC 제거율>60%)에 널리 사용됩니다. 높은 비표면적과 가시광선 반응으로 인해 육각형 결정질 및 산소 공극 구조는 물을 수소로 광분해(효율 >80%) 및 유기 분해(효율 > 90%)와 같은 효율적인 광촉매에 적합합니다. nano-WO₃의 높은 광촉매 효율은 환경 개선(시장 규모 > 미화 1 억 달러/년) 및 새로운 에너지(성장률 > 10%/년)에 대한 적용을 주도하고 있습니다. 미래에는 도핑(예: N, Ti, 반응>30%) 및 배합(예: WO₃/TiO₂, 효율 >20% 증가)을 통해 가시광선 촉매 성능을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

5.8.2 텅스텐의 광변색 특성

텅스텐 품미의 광변색 특성은 스마트 유리 (에너지 절약 > 20 %), 디스플레이 (응답 시간 <1 초) 및 광학 센서 (감도 >100)에 적용하기위한 기초가되는 빛 노출 하에서 가역적으로 색상을 변경하는 능력을 나타냅니다. 단사정 형태 WO₃는 자외선 (<400 nm)을 조사하면 밝은 노란색에서 청록색 (HxWO₃ 또는 WxO₃)으로 변화하는데, 이는 H⁺ 또는 전자 주입으로 인해 W⁶⁺가 W⁵⁺로 부분적으로 감소하기 때문입니다. 직교 및 정방계 결정 형태는 변색 속도가 약간 더 빠르고 높은 대칭성으로 인해 이온 확산 효율(확산 계수 >10⁻¹² cm²/s)을 증가시킵니다. 육각형 결정 형태의 가속 H⁺ 임베딩으로 인해 육각형 결정 형태는 우수한 색상 변경 성능을 가지며 공극 구조의 가속 H⁺ 임베딩으로 인해 색상 변경 시간을 몇 초로 단축할 수 있습니다. 산소 공극 구조(예: W₁₈O₄₉)는 초기 색상이 더 어둡고(청자색-보라색) 광변색 반응이 빠르며 더 깊은 청색을 가지므로 고효율 크롬 장치에 적합합니다. 나노 구조(예: 나노필름, 10-100nm 두께)는 짧은 확산 경로(<10nm)와

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

높은 표면적(>50m²/g)으로 인해 변색 효율(> 광선 투과율 70%)이 크게 향상되었습니다.

광변색의 메커니즘은 다음과 같은 반응을 기반으로 합니다. $WO_3 + xhv \rightarrow W^{6+}O_3 + xH^+ + xe^- \rightarrow HxW^{5+}W^{6+}_{1-x}O_3$. 광자 여기(photon excitation)는 전자-정공 쌍을 생성하고, 정공은 표면 H₂O 와 반응하여 H⁺를 형성하고, H⁺와 전자가 격자에 내장되어 W⁶⁺를 W⁵⁺로 줄여 색상 중심을 형성하여 색상 변화를 일으킵니다. 육각형 결정 형태의 기공 구조(기공 크기 > 1nm)와 산소 결핍의 결합 에너지 준위는 H⁺ 및 전자의 수송(>율 30%)을 가속화하고 색상 변화의 깊이와 속도를 향상시킵니다. 나노 구조체의 짧은 확산 경로는 변색 효율(응답 시간 > 50 %)을 더욱 향상시킵니다. 성능 매개변수에는 색상 변경 시간(단사정 형태의 경우 초에서 분, 육각형 형태 및 나노 구조의 경우 초<초), 투과율 변화(>70%) 및 가역성(감쇠 시 1000 주기>초 동안 1000 주기)<공기 또는 열에 노출될 때 5%)이 포함됩니다.

광변색 성능은 투과율 테스트(UV-Vis 분광계, 정확도 ± 0.1%)를 통해 조명 전후의 투과율 변화를 기록하여 측정하고, CIE 색상 좌표계(오차 <0.01)와 결합하여 색 전이를 정량화했습니다. 분광 분석은 흡수 피크(예: W⁵⁺에서 600–800nm 흡수 피크)의 변화를 모니터링하여 변색 메커니즘을 밝힙니다. 광원 강도(>10mW/cm²) 및 주변 습도(<50%)를 제어하여 데이터 신뢰성(오류 < 5%)을 보강했습니다. SEM(분해능 < 1μm) 및 XPS(에너지 분해능<0.1eV)는 표면 지형 및 화학적 상태 변화 분석을 지원합니다.

응용 분야 측면에서 단사정 WO₃는 안정적인 광변색 특성으로 인해 광 기록 재료(수명 > 1000 회)와 같은 기본 광 변색 장치에 적합합니다. 육각형 결정질 및 나노 구조 WO₃는 빠른 응답과 깊은 색상 변화 효과로 인해 고효율 스마트 윈도우(광 투과율 변화 > 70%, 에너지 절약>20%) 및 디스플레이(응답 시간 <1 초)에 적합합니다. 산소 공극 구조의 빠르게 변화하는 색상은 동적 광학 분야에서 잠재력을 발휘합니다(시장 규모>연간 5 천만 달러). 다형성 형태(육각형), 나노(두께 < 100 nm) 및 복합체(예: WO₃ / 그래핀, 효율 > 20 %)를 최적화함으로써 광 변색 특성을 더욱 향상시킬 수 있으며 스마트 재료 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 광범위한 적용(성장률 > 10 %/년).

5.9 황색 삼산화 텅스텐의 전기적 성질

황색 삼산화 텅스텐 (WO₃)의 전기적 특성은 기능성 재료로서 황색 삼산화 텅스텐 (WO₃)의 핵심 특성이며, 이는 결정 구조, 전자 구조 및 외부 조건과 밀접한 관련이 있습니다. 전형적인 n 형 반도체로서 황색 삼산화 텅스의 전기적 특성에는 밴드 갭, 전도성 및 캐리어 이동성이 포함되며, 이는 전기 변색 장치(광 투과율 변화 > 70 %), 가스 센서(감도 > 100) 및 에너지 저장 재료(특정 커패시턴스 > 500 F / g)에 광범위하게 적용됩니다.

5.9.1 텅스텐 황색의 반도체 성질

텅스텐의 반도체 특성은 독특한 전자 구조로 인해 전도성, 캐리어 이동성 및 밴드 갭 측면에서 우수한 특성을 나타냅니다. 텅스텐 엘로우는 n 형 반도체, 산소 공극 또는 기타

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결합에 자유 전자를 공여체 에너지 수준으로 제공하여 전도도에 큰 영향을 미칩니다. 2.2-2.8eV의 밴드갭 범위를 가진 이 제품은 광전자 및 전기 화학 응용 분야에 적합한 와이드 밴드갭 반도체입니다. Pure WO₃는 실온에서 10⁻⁷-10⁻⁶ S/cm의 낮은 전도성을 가지므로 전도성이 높은 시나리오에서의 적용이 제한됩니다. 그러나 산소 공극 구조에서 크산토스텐의 전도도(예: W₁₈O₄₉)는 10⁻¹-10² S/cm로 크게 증가할 수 있어 전도성 전극 및 센서에서 탁월한 성능을 발휘합니다(> 50% 더 높은 감도).

압축 강도에 대한 결정 형태의 영향은 중요합니다. 단사정 결정 형태(공간 그룹 P2₁/n)는 간접 밴드 갭이 2.6-2.8eV 이고 전도도는 약 10⁻⁷ S/cm 이며 낮은 전자 이동도(0.1-1cm²/V·s)를 갖습니다. 이는 WO₆ 팔면체의 경사 구조가 전자 산란을 증가시켜 캐리어 수송 효율을 제한하고 절연 또는 낮은 전도성 응용 분야 (예 : 절연 코팅, 저항 >10 Ω·cm)에 적합하기 때문입니다. cm). 사방정계형(Pnma)과 정방형(P4/nmm)은 약간 더 좁은 밴드 갭(2.4-2.6 eV), 10⁻⁶-10⁻⁵ S/cm, 1-10 cm²/V·s의 이동성 증가를 갖습니다. 높은 대칭성은 전자 산란을 줄이고 전자 수송 경로를 최적화하여 중간 전도성 시나리오(예: 전도도 >10 배 증가하는 전극 재료)에 적합합니다. 육각형 결정 형태(P6/mmm)는 약 2.7eV의 밴드갭, 10⁻⁶-10⁻⁴ S/cm의 전도도를 가지며 공극 구조는 1 차원 전자 전달을 촉진하여 캐리어 재결합 속도(재결합 속도 <5%)를 감소시키고 센서에 적합합니다(응답 시간 < 10 초). 산소 공극 구조(예: W₁₈O₄₉)는 2.2-2.5eV의 밴드 갭, 최대 10⁻¹-10² S/cm의 전도도, 10-50cm²/V·s의 이동도를 갖습니다. 산소 결핍은 얇은 공여체 에너지를 도입하여 자유 전자 농도(>10¹⁸ cm⁻³)를 크게 증가시키고 전도성을 크게 향상시켜 고성능 전도성 전극에 적합합니다(전도도 > 1000 배 이상).

전기적 특성에 대한 지형의 영향도 똑같이 중요합니다. 나노 구조 WO₃ (예 : 나노 와이어, 나노 시트, 입자 크기 20-200 nm)는 짧은 투과 경로 (<10 nm)와 높은 표면 결합 농도 (>10¹⁷ cm⁻³)로 인해 벌크 재료보다 우수합니다. 예를 들어, 나노 와이어 WO 는 가스 센서에서 높은 감도 (>100)를 나타냅니다. 벌크 WO₃의 전도도는 이론 값 (10⁻⁷-10⁻⁶ S/cm)에 가깝지만 캐리어는 입자 경계 산란 (이동성 <1 cm² / V·s)에 의해 제한되며, 이는 전도도 요구 사항이 낮은 시나리오 (예 : 매트릭스 재료)에 적합합니다. 나노 구조의 표면 효과 및 결합 상태는 전기적 성능(전도도 > 100 배)을 크게 향상시켜 고성능 장치에 사용됩니다.

압축 강도에 대한 외부 조건의 영향은 무시할 수 없습니다. 전도도에 대한 온도의 영향은 Arrhenius 방정식($\sigma = \sigma_0 e^{-E_a/kT}$)을 따르고, 활성화 에너지(E_a)는 약 0.3-0.5eV이며, 전도도는 온도가 증가함에 따라 기하급수적으로 증가합니다. 예를 들어, 단사정 WO 의 전도도는 300°C에서 10⁻⁴ S/cm로 증가할 수 있습니다. 대기를 감소시키면(예: H₂, 5% 농도), 산소 공극을 증가시킴으로써 전도도를 높이고(> 10의 계수), 대기를 산화시키면(O₂, 21% 농도), 결합을 감소시킴으로써 전도도를 감소시키(> 50%) 등 대기 조건도 중요합니다. 도핑(예: Nb⁵⁺, Ti⁴⁺, 도핑 0.1-1 at%)은 n형 전도도를 더욱 향상시킬 수 있으며, 추가 공여체 에너지를 도입하여 자유 전자 농도(>10¹⁹ cm⁻³)를 증가시켜 전도도를 10⁻³-10⁻¹¹ S/cm로 증가시킬 수 있습니다. 이러한 조건은 황색 삼산화 텅스텐의 전기적 특성을 최적화 할 수 있는 유연한 수단을 제공합니다 (성능 30% >).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

반도체 특성을 측정하기 위해 다양한 방법이 사용됩니다. 4 개 프로브 방법은 정전류를 적용하고 전압 강하를 측정하여 결과가 접촉 저항의 영향을 받지 않도록 하여 전도도(정확도 $\pm 0.1\mu\text{S}/\text{cm}$)를 결정하는 데 사용됩니다. 홀 효과 측정은 자기장 강도(예: 0.5T)에서 캐리어 유형(n 형) 및 이동성(정확도 $\pm 0.1\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)을 결정하기 위해 수행됩니다. 밴드 갭(예: $= 1240/\lambda$, 오차 $< 0.1\text{eV}$)은 흡수 에지 해석에 의해 간접적으로 결정되었으며, T_{auc} 매핑에 의해 정확도가 향상되었습니다. 테스트는 데이터 신뢰성(오류 $<5\%$)을 보장하기 위해 통제된 환경(온도 $25\pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $<50\%$)에서 수행해야 합니다. 주사 전자 현미경(SEM, 해상도 $< 1\mu\text{m}$) 및 X 선 광전자 분광법(XPS, 에너지 해상도 $< 0.1\text{eV}$)을 사용하여 지형 및 결합 상태 분석을 지원했습니다.

응용 분야 측면에서 단사정 WO_3 의 낮은 전도성 ($10^{-7}\text{ S}/\text{cm}$)은 유전체 층 (과피 전압 $> 1\text{ MV}/\text{cm}$) 또는 절연 코팅 (저항 $> 10^6\ \Omega$)과 같은 절연 응용 분야에 적합합니다. 직교 및 정방형 형태의 적당한 전도성(10^{-6} - $10^{-5}\text{ S}/\text{cm}$)은 에너지 저장 전극(특정 커패시턴스 $>500\text{ F}/\text{g}$)과 같은 전극 재료에 적합합니다. 육각형 결정 형태는 기공 구조와 높은 전도성(10^{-4} - $10^{-3}\text{ S}/\text{cm}$)으로 인해 가스 센서(NO_2 검출 한계 $< 0.1\text{ppm}$)에 적합합니다. 산소 공극 구조(10^{-1} - $10^2\text{ S}/\text{cm}$)의 높은 전도성으로 인해 전도성 전극(예: $>10\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 이동도를 가진 전계 효과 트랜지스터) 및 고효율 센서(감도 >100)에 탁월합니다. nanoWO의 높은 전도성은 에너지 저장 (> 1000 사이클) 및 감지 (시장 규모 > 1 억 달러 / 년)에서 고성능 응용 분야를 주도합니다.

5.9.2 텅스텐의 전기 변색 특성

텅스텐 옐로우의 전기 변색 특성은 전기장의 작용에 따라 밝은 노란색 (또는 투명)에서 파란색, 진한 파란색 또는 자주색으로 변하며 전기장이 제거 된 후 원래 색상을 복원 할 수 있습니다. 단사정 결정 형태 (공간 그룹 $P2_1/n$) WO_3 는 전기장 (1-3 V)이 적용될 때 밝은 노란색에서 파란색 (MxWO_3 형성, M 은 H^+ , Li^+ 등)으로 변화하며, 응답 시간은 초에서 분이며, 낮은 대칭성으로 인해 느린 이온 확산 (확산 계수 $<10^{-13}\text{ cm}^2/\text{s}$)이 느려집니다. 직교 결정 형태(Pnma)와 정방계 결정 형태(P4/nmm)는 색상 변화가 비슷하지만 이온 수송을 가속화하는 높은 대칭성(확산 계수가 $> 20\%$ 증가) 덕분에 응답 시간이 몇 초로 단축됩니다. 육각형 결정 형태 (P6 / mmm)는 우수한 변색 특성을 나타냈고, 색이 밝은 노란색에서 진한 파란색으로 변색되었으며, 색 변화 깊이가 크고(투과율이 $<20\%$ 로 감소), 응답 시간이 1-5 초, 공극 구조(기공 크기 $> 1\text{nm}$)가 이온 삽입 효율을 촉진했습니다(삽입 속도는 $>80\%$). 산소 공극 구조(예: $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$)는 초기 색상(청자색)으로 인해 더 진한 파란색이고 전기장의 작용에 따라 더 진한 파란색이 되며, 매우 빠른 응답 시간(<1 초)과 결합 상태로 인해 향상된 전도성(전도성 $>10^{-1}\text{ S}/\text{cm}$)을 제공합니다. 나노 구조 (예 : 나노 필름, 나노 시트, 10-100nm 두께)는 짧은 확산 경로 ($<10\text{ nm}$)와 높은 비 표면적 ($>50\text{ m}^2/\text{g}$)으로 인해 높은 색 변화 효율을 가지며 <1 초의 응답 시간과 70-80 %의 광 투과율 변화.

전기 변색의 메커니즘은 $\text{WO}_3 + x\text{M}^+ + x\text{e}^- \leftrightarrow \text{MxWO}_3$ (M 은 H^+ , Li^+ , Na^+)와 같은 가역적 반응을 기반으로 합니다. 구체적인 프로세스에는 다음이 포함됩니다 : 1) WO_3 격자에 M^+ 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전자 주입을 구동하는 적용된 전기장; 2) W^{6+} 는 W^{5+} 로 감소하여 색상 중심을 형성하여 600-800nm 에서 가시 광선의 흡수를 향상시켜 파란색 색상 변화를 일으킵니다. 3) 역 전기장은 M^+ 와 전자가 나와 원래 색으로 돌아가게 합니다. 육각형 결정 형태의 기공 구조와 산소 결핍의 결합 상태는 M^+ 및 전자의 수송을 가속화하고(속도 >30% 증가) 변색의 속도와 깊이가 증가합니다. 황색 삼산화 텅스텐의 n 형 반도체 특성은 전자 수송 채널 (이동성 > $1\text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$)을 제공하는 반면, 산소 공극에 의해 도입 된 얇은 공여체 에너지 수준 (> 10^{18}cm^{-3})은 전도성 (전도도 > 100 배)을 향상시켜 색상 변화 특성을 더욱 최적화합니다. 나노 구조의 짧은 확산 경로와 표면 결합(농도 > 10^{17}cm^{-3})은 이온 삽입 효율(> 50%)을 크게 증가시킵니다.

전기 변색 성능의 주요 매개변수에는 색상 변화 효율(CE), 사이클링 안정성 및 투과율 변동이 포함됩니다. 색상 변경 효율은 전하 밀도 ($CE = \Delta OD / Q$)에 대한 광학 밀도의 변화의 비율로 정의되며, 약 $30\text{-}50\text{ cm}^2 / \text{C}$ 의 단사정 형태와 최대 $80\text{-}100\text{ cm}^2 / \text{C}$ 의 육각형 형태 및 나노 구조로 더 높은 전하 활용도를 나타냅니다. 사이클링 안정성 측면에서 단사정 결정 형태는 > 1000 사이클(감쇠 <5%)을 견딜 수 있고 나노 구조는 높은 구조적 안정성으로 인해 5000 사이클(감쇠 <3%)을 견딜 수 있습니다. 투과율의 변화는 스마트 윈도우의 요구 사항을 충족하기 위해 초기 70-80%(투명)에서 10-20%(파란색)>로 감소합니다. 이러한 매개변수는 결정 형태 및 형태($CE > 20\%$)를 최적화하여 더욱 개선할 수 있습니다.

압축 강도에 대한 외부 조건의 영향은 중요합니다. 전해질의 유형은 색상 변화 특성에 영향을 미치며, H^+ 기반 전해질(예: H_2SO_4 , 0.1 M)은 높은 이온 이동도(> $10^{-3}\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)의 영향을 받습니다. s) 급격한 변색(응답 시간 < 1 초), 장기 안정성이 좋지 않음(500 사이클<); Li^+ 기반 전해질(예: LiClO_4 , 1M)은 색상 변화가 느리지만(응답 시간 1-5 초) 내구성은 높지만(> 5000 사이클) 높습니다. 전압 범위는 1-3V 이며 과전압(>3V)은 변색(시간 > 50%)을 가속화할 수 있지만 격자 손상(안정성 감소>10% 감소)을 유발할 수 있습니다. 온도 상승(예: 60°C)은 이온 확산률(> 30%)을 증가시켜 응답 시간을 단축하지만 고온(> 100°C)은 전해질 분해를 유발할 수 있으므로 작동 온도(< 80°C)를 제어해야 합니다. 이러한 조건을 최적화하면 색상 변경 성능을 크게 향상시킬 수 있습니다(효율성 20% 증가> 효율성).

전기 변색 특성은 다양한 방법으로 측정됩니다. 투과율 시험은 UV-Vis 분광계에 의해 전압 인가 전후의 투과율 변화(파장 정확도 $\pm 1\text{nm}$)를 기록하여 수행하고, 변색 깊이를 정량화(오차 < 0.1%)했습니다. 순환 전압전류법(CV)을 사용하여 이온 삽입 효율을 반영하는 전하 주입/방출 용량(정확도 $\pm 0.1\text{mC}/\text{cm}^2$)을 결정했습니다. 분광 분석은 흡수 피크(예: W^{5+} 의 650nm 피크)의 변화를 모니터링하여 색상 변화 메커니즘을 밝힙니다. 테스트는 통제된 환경(습도 < 50%, 온도 $25\pm 1^\circ\text{C}$)에서 SEM(분해능 < $1\mu\text{m}$) 및 XPS(에너지 분해능< 0.1eV)와 결합하여 데이터 신뢰성(오류 <5%)을 보장하기 위해 지형 및 화학적 상태를 분석했습니다.

응용 측면에서 단사정 WO 는 안정적인 전기 변색 특성으로 인해 광 스위치 (수명 > 1000 사이클)와 같은 기본 전기 변색 장치에 적합합니다. 육각형 결정질 및 나노 구조 WO_3 는 빠른 응답 시간(< 1 초)과 높은 색 변화 효율($80\text{-}100\text{cm}^2/\text{C}$)로 인해 고효율 스마트

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

원도우(에너지 절약 > 20%, 광 투과율 변화 > 70%) 및 디스플레이(응답 시간 < 1 초)에 적합합니다. 산소 공극 구조의 빠르게 변화하는 색상은 동적 광학 분야에서 잠재력을 발휘합니다(시장 규모>연간 5 천만 달러). 다형성 형태 (육각형), 나노 (두께 < 100 nm) 및 복합체 (예 : WO₃ / 그래 핀, 20 % 효율 증가)를 최적화함으로써 전기 변색 특성을 더욱 향상시킬 수 있으며 스마트 재료 분야에서 황색 텅스텐 삼산화물의 광범위한 사용을 향상시킬 수 있습니다 (시장 성장 > 10 % / 년).

5.10 황색 삼산화 텅스텐의 열적 특성

황색 삼산화 텅스텐 (WO₃, 황색 텅스텐 삼산화물)의 열 안정성은 고온에서 결정 구조 및 화학 조성을 유지하는 능력을 의미하며, 이는 결정 형태, 산소 함량, 형태 및 외부 조건과 밀접한 관련이 있는 기능성 물질로서 황색 삼산화 텅스텐의 중요한 성능입니다. 텅스텐의 열 안정성은 고온 세라믹 (온도 저항 > 1000 °C), 촉매 (변환 > 90 %), 전기 변색 장치 (> 1000 사이클) 및 센서 (안정성 > 50 시간) 분야에서의 적합성을 결정합니다. 서로 다른 결정 형태의 열 안정성 범위, 상전이 거동 및 분해 특성은 서로 다르며, 열 분석 및 현장 특성화는 열 거동에 대한 통찰력을 제공하고 고온 응용 분야에 대한 지침을 제공할 수 있습니다.

단사정 텅스텐 (공간 그룹 P2 / n)은 WO₃의 가장 일반적인 구조이며 우수한 열 안정성을 나타냅니다. 실온에서 330°C 까지의 범위에서 단사정 결정 형태는 최대 1473°C의 용점으로 매우 안정적입니다. 330°C 이상에서는 단사정 결정 형태가 점차 사방정계 결정 형태(Pnma)로 변하고 740°C 이상에서는 정방계 결정 형태(P4/nmm)로 더 변화하지만 화학 조성(WO₃)은 변하지 않습니다. 예를 들어, 단사정 WO₃는 500 °C에서 몇 시간 동안 공기 중에서 소성되어 결정 구조와 화학적 성질을 그대로 유지하고(질량 손실 < 0.1%) 고온 세라믹(경도 > 600MPa)에 적합합니다. 사방정계 형태는 330-740°C에서 안정하고 정방체 형태는 740-1473°C에서 안정적이지만 이러한 고온 상은 준안정이며 330°C 이하로 냉각되면 단사정 형태로 되돌아갑니다. 예를 들어, 사방 정계 형태 WO₃는 600 °C의 산화 분위기에서 안정하며 고온 산화 환경 (90 % 전환)에서 촉매 지지 > 적합합니다. 육각형 결정 형태(P6/mmm)는 200-600°C에서 안정적이며 기공 구조는 600°C 이상에서 붕괴되기 쉽고 단사정 결정 형태로 변형되기 쉽습니다. 예를 들어, 육각형 형태의 WO₃는 400 °C의 열수 생성물에서 안정적이지만 800 °C에서 소성 후 단사정으로 완전히 전환되어 고온 응용이 제한됩니다. 산소 공극 구조 (예 : W₂₀O₅₈, W₁₈O₄₉)는 열 안정성이 낮고 300-500 °C에서 안정적이며, 그 이상에서는 환원 분위기에서 WO₃로 산화되거나 WO₂ 또는 금속 W로 분해되기 쉽습니다. 예를 들어, W₂₀O₅₈는 400°C H₂ 대기에서 WO₂로 변환되며, 이를 위해서는 성능을 유지하기 위해 대기를 엄격하게 제어해야 합니다.

압축 강도에 대한 외부 조건의 영향은 중요합니다. 대기는 산화 분위기 (예 : O₂ 1 % 농도)에서 WO₃는 용점 (1473 °C)까지 안정화 될 수 있으며 산소 공극 구조 (예 : W₁₈O₄₉)는 WO₃ (산화 속도 >95 %)로 산화되어 열 안정성이 향상됩니다. 환원 분위기 (예 : H₂, 5 % 농도) 하에서 WO₃의 안정성이 감소하고 산소 손실이 400-600 °C에서 시작되며 금속 W가 1000-1200 °C에서 금속 W (환원율 >90 %)로 완전히 환원되며 고온 환원 환경은 피해야 합니다. 온도 상승 및 하강률은 상변태 거동에 영향을 미치며, 급격한 온도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

상승(>10°C/min)은 운동 히스테리시스로 인해 상전이 또는 분해(>50°C 지연)를 지연시킬 수 있으며 가열 속도(<5°C/min)를 최적화해야 합니다. 압축 강도에 대한 형태학의 영향은 무시할 수 없으며, 나노 구조(예: 나노 입자, 입자 크기 20-200nm)는 높은 표면 에너지(>10%)와 표면 결합(>10¹⁷ cm⁻²) 및 벌크 바디보다 낮은 열 안정성으로 인해 낮은 온도(예: 500°C)에서 입자 성장 또는 상 변형(입자 > 50%)이 발생하기 쉽습니다. 예를 들어, nano-WO₃는 600°C 에서 단사정으로 전환될 수 있는 반면 벌크 WO 는 더 높은 온도(>1000°C)에서 안정화될 수 있습니다.

열 안정성을 측정하기 위해 다양한 보완 방법이 사용됩니다. 열중량 분석(TGA)은 질량 변화(정확도 ±0.01mg)를 모니터링하여 분해 온도를 측정하고 산화 또는 환원 반응(질량 손실<0.1%)을 평가하는 데 적합합니다. 시차 주사 열량계(DSC)는 위상 변화 흡열/발열 피크(±0.1 J/g 의 정확도)를 감지하고 결정 전이 온도(예: 330°C 단사정에서 직교 전이까지)를 정확하게 식별할 수 있습니다. 고온 X 선 회절(XRD, 분해능 ± 0.01°)은 결정 형태 전이를 실시간으로 추적하고 격자 매개변수 변화(오차 < 0.1%)에 대한 데이터를 제공합니다. 이러한 방법은 제어된 대기(O₂ 또는 N₂ 흐름, < 1ppm 불순물) 및 온도(정확도±1°C)에서 SEM(분해능 <1µm)과 결합하여 형상 변화를 분석하여 데이터 신뢰성(오류<5%)을 보장합니다.

열 안정성의 메커니즘은 WO₆ 팔면체의 동각 연결과 결정 격자의 고유 안정성에서 비롯됩니다. W-O 결합의 높은 결합 에너지 (약 600-700 kJ / mol)는 고온에서 구조적 무결성을 제공하여 산화 분위기에서 1473 °C 에 WO 를 견딜 수 있도록 합니다. 산소 포화 WO₃(예: 단사정 결정 형태)는 높은 결합 밀도(>95%)로 인해 우수한 열 안정성을 나타내는 반면, 산소 공허 구조(예: W₁₈O₄₉)는 결합 밀도 감소(<90%)로 인해 분해 또는 산화에 취약합니다. 상전이는 열진동에 의해 구동되며 팔면체 재배열은 결정질 전이(예: 330°C 단사정 - 직교)를 초래하지만 화학 조성은 변경하지 않습니다. 나노 구조의 표면 효과는 격자 안정성을 감소시키고(상전이 온도가 50°C >떨어짐), 배합(예: WO□□/그래핀)을 통해 열 >안정성을 20% 개선해야 합니다.

5.10.2 텅스텐의 열팽창 특성

황색 삼산화 텅스텐의 열팽창 특성은 열팽창 계수 (CTE, 단위 : K⁻¹)로 특징 지어지며, 이는 온도 상승으로 인한 부피 또는 길이의 변화를 반영합니다. 이 성능은 결정 구조, W-O 결합의 결합 특성, 형태 및 외부 조건과 밀접한 관련이 있으며 고온 세라믹 (온도 저항 >> 1000 °C), 전기 변색 장치 (1000 사이클), 센서 (안정성 > 50 시간) 및 정밀 광학 (변형 < 0.1 %). 열팽창 특성의 차이는 결정 형태, 기공 구조 및 결합 상태의 대칭성에 기인하며, 정확한 측정 및 메커니즘 분석을 통해 높은 온도 안정성(변형 감소 > 20%)과 응용 성능을 최적화할 수 있습니다.

서로 다른 결정 형태의 텅스텐의 열팽창 계수는 상당한 차이를 보였다. 단사정 결정 형태 (공간 그룹 P2₁/n)의 선형 CTE 는 20-300 °C 에서 8-12 × 10⁻⁶ K⁻¹이며, WO₆ 팔면체의 기울기로 인한 이방성 팽창은 a 축에서 약 10 × 10⁻⁶ K⁻¹, b 축에서 9 × 10⁻⁶ K⁻¹, c 축에서 12 × 10⁻⁶ K⁻¹입니다. 이 이방성으로 인해 정밀 장치에서 방향성 열 응력(응력 < 50MPa)을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고려해야 합니다. 직교 결정 형태(Pnma)는 330-740°C 에서 CTE 가 $7-10 \times 10^{-6} K^{-1}$ 이고 정방정 결정 형태(P4/nmm)× 740-1473°C 에서 $10^{-6} K^{-1}$ 6-9 이며, 보다 균일한 팽창을 위한 높은 대칭성과 약간 더 큰 c 축 팽창(약 $10 \times 10^{-6} K^{-1}$)을 가지므로 고온 안정 응용 분야(예: 전극 재료, 1000 사이클>s). 육각형 결정 형태(P6/mmm)는 CTE 가 $10-14 \times 10^{-6} K^{-1}$ 로 높아 기공 구조의 밀도가 감소하고 열진동 효과를 증폭하지만 고온(>600°C)에서는 기공이 붕괴되기 쉬워 적용이 제한됩니다. 산소 공극 구조(예: $W_{18}O_{49}$)의 CTE 는 $15 \times 10^{-6} K^{-1}$ 에 달할 수 있으며, 결합은 W-O 결합의 밀도를 감소시키고 격자의 강성을 약화시키며 상당한 팽창을 유발하므로 높은 열 응력(응력 > 100MPa)의 현상을 피해야 합니다.

압축 강도에 대한 결정 형태의 영향은 구조적 특성 때문입니다. 단사정 형태의 낮은 대칭성은 이방성 팽창을 초래하고 W-O 결합의 높은 강성(결합 에너지 600-700kJ/mol)은 팽창 진폭($<12 \times 10^{-6} K^{-1}$)을 제한합니다. 직교 및 정방계 결정 형태의 높은 대칭성은 열진동 에너지를 분산시키고 CTE($6-10 \times 10^{-6} K^{-1}$)가 낮으며 균일하게 팽창하여 정밀 고온 장치(변형 < 0.1%)에 적합합니다. 육각형 기공 구조는 격자 밀도(약 $6.5-7g/cm^3$)를 감소시키고 팽창 계수는 열진동($>10 \times 10^{-6} K^{-1}$)에 의해 증가하지만 고온에서 기공 붕괴는 구조적 고장을 유발할 수 있습니다. 산소 공허 구조 (예 : 자주색 텅스텐 산화물)는 결합, 상당한 열팽창 ($15 \times 10^{-6} K^{-1}$)으로 인해 W-O 결합 밀도 (<90 %)가 감소했으며 고온 응용 분야에서 엄격하게 제어 된 조건 (온도 < 500 °C)이 필요합니다.

압축 강도에 대한 외부 조건의 영향은 무시할 수 없습니다. 온도 범위는 중요하며 상전이 지점(예: 330°C 단사정 → 직교, 740°C 직교→큐브) 근처에서 CTE 는 갑작스러울 수 있으며(>20% 증가 또는 감소) 결정질 전이로 인해 부피 변화(약 0.5-1%)가 발생할 수 있습니다. 형태는 압축 강도에 상당한 영향을 미치며, 나노 구조의 CTE (예 : 나노 입자, 입자 크기 20-200 nm)는 표면 효과와 높은 표면 에너지 (>10 %)로 인해 벌크 바디보다 10-15 % 높습니다 (예 : 나노 WO_3 CTE 는 $13-16 \times 10^{-6} K^{-1}$ 에 도달 할 수 있습니다). 불순물 또는 도핑(예: Na₂, 도핑 0.1-1 at%)은 W-O 결합의 강도(결합 에너지 >5% 감소)를 변화시켜 팽창 거동에 영향을 미치고 불순물 함량(<50ppm)을 제어해야 합니다. 이러한 조건을 최적화하면 열팽창 성능(CTE 감소 > 10%)을 효과적으로 조절할 수 있습니다.

열팽창 계수는 다양한 방법으로 측정됩니다. 고온 X 선 회절(XRD, 분해능 $\pm 0.01^\circ$)은 $CTE(\alpha = (1/L_0)(\Delta L/\Delta T))$ 를 온도 K^{-1} 의 함수로 격자 매개변수를 측정하여 $\pm 0.1 \times 10^{-6}$ 의 정확도로 계산하며, 이는 비등방성 팽창에 적합합니다. 열기계 분석(TMA)은 벌크 및 박막(두께 > 1 μ m)에 대한 시료 길이 변화($\pm 0.1\mu$ m 정확도)를 직접 측정합니다. 팽창계는 블록의 부피 팽창을 기록하며(정확도 $\pm 0.01\%$), 대형 샘플(> 10mm)에 적합합니다. 테스트는 제어된 대기(N₂ 또는 O₂, 불순물<1ppm) 및 온도(정확도 $\pm 1^\circ$ C)와 SEM(분해능 < 1 μ m)을 결합하여 데이터 신뢰성(오류 <5%)을 보장하기 위해 수행되었습니다.

열팽창 메커니즘은 W-O 결합의 열 진동과 격자 구조의 변화에서 비롯됩니다. 온도 상승은 W-O 결합의 길이(약 0.001-0.002 Å/100°C)를 약간 증가시키고 증가된 열 진동으로 인해 격자가 팽창합니다. 고도로 대칭적인 결정 형태(예: 직교, 정방형)는 진동 에너지를 균일하게 분배하여 CTE(< $10 \times 10^{-6} K^{-1}$)를 감소시키는 반면, 공극 구조(육각형) 및 산소 결핍은 진동 효과를 증폭하고 CTE(> $10 \times 10^{-6} K^{-1}$)를 증가시킵니다. 상 전이(예: 단사정 →

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

직교)는 부피가 약간 증가(0.5~1%)하여 팔면체 재배열을 유도하여 일시적인 이상(CTE에서 > 20% 증가)을 초래합니다. 나노구조체의 표면효과는 입계 진동(>10%)을 증가시켜 CTE를 약간 증가시키고, 배합(예: WO₃/SiO₂)을 통해 열팽창 성능을 최적화해야 합니다(CTE > 15% 감소).

5.11 황색 삼산화 텅스텐의 가스 감도

텅스텐 옐로우 (WO₃, 옐로우 텅스텐 트리옥사이드)의 가스 민감도는 특정 가스 환경에서 전기적 또는 광학적 특성의 가역적 변화를 겪을 수 있는 능력을 나타내며 가스 센서 분야의 핵심 재료입니다. 가스 민감도는 결정 구조, 표면 특성, 비표면적 및 전자 상태와 밀접한 관련이 있으며, 이는 환경 모니터링 (NO₂ 검출 한계 <0.1 ppm), 산업 안전 (H₂ 검출 민감도 >100) 및 건강 진단 (NH₃ 검출 한계 <1 ppm)에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용 가능성을 결정합니다. n형 반도체로서 황색 삼산화 텅스텐은 표면 가스 흡착을 통한 산화 가스(예: NO₂, O₃) 및 환원 가스(예: H₂, CO)에 대해 다른 반응 특성을 나타냅니다.

황색 삼산화 텅스텐의 가스 감지 특성은 결정 형태, 형태 및 결합 상태에 따라 다릅니다. 단사정 결정 형태(공간군 P2₁/n)는 표면에 산화 가스를 흡착한 후 전도도가 현저히 감소(>50%)하기 때문에 산화 가스(예: NO₂, O₃)에 대해 높은 민감도를 나타내지만 환원 가스(예: H₂, CO)에 대한 반응은 약합니다(민감도<10). 육각형 결정 형태(P6/mmm)는 공극 구조와 높은 비표면적(10~30m²/g)으로 인해 다양한 가스(예: NO₂, NH₃, H₂S)에 대해 높은 감도(S≈50~200)를 나타내며, 공극은 기체 분자의 확산 및 흡착을 향상시킵니다(흡착률 >80%). 산소 공극 구조(예: W₁₈O₄₉)는 많은 수의 결합 상태와 표면 활성 부위(>10¹⁷ cm⁻³)로 인해 가스 환원(예: H₂, CO)에 대한 반응이 크게 증가하며, 감도는 순수 WO₃의 10-100 배에 달할 수 있어 저농도 가스 검출(<1ppm)에 적합합니다. 나노 구조(예: 나노와이어, 나노시트, 입자 크기 20~200nm)는 매우 높은 비표면적(30~60m²/g)과 짧은 캐리어 수송 경로(<10nm), 짧은 응답 시간(<10 초) 및 높은 감도(S>100)로 인해 고성능 센서에서 탁월합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 가스에 민감한 반응은 표면의 가스 흡착에 의해 유도된 전기적 변화를 기반으로 합니다. 산화 가스(예: NO₂)는 WO₃ 표면에 흡착되어 자유 전자를 가두어 NO₂⁻를 형성하여 n형 반도체의 전도대 전자를 고갈시켜 전도성 (> 50%)을 감소시킵니다. 반응은 NO₂ + e⁻ → NO₂⁻입니다. 환원 가스(예: H₂)는 표면에 흡착된 산소 종(O[•]C 또는 O²⁻)과 반응하여 전자를 격자로 다시 방출하여 전도성(> 100%)을 증가시킵니다. 반응은 H₂ + O⁻ → H₂O + e⁻입니다. 육각형 기공 구조(기공 크기 >1nm)는 더 많은 흡착 부위(>30% 증가)를 제공하고 산소 결핍 상태(>10¹⁸ cm⁻³)는 표면 활성을 향상시키고 가스 감도(감도 > 50%)를 크게 향상시킵니다. 나노 구조의 짧은 확산 경로와 표면 결합은 가스 분자와 전자의 상호 작용을 더욱 가속화합니다(반응 속도가 20% 증가). 단사정 형태의 낮은 비표면적(2~10 m²/g)과 제한된 흡착 부위는 환원 가스에 대한 반응을 제한합니다(S<20).

가스 감지 성능의 주요 매개변수에는 감도, 응답 시간 및 작동 온도가 포함됩니다. 감도(S)는 산화 가스의 경우 R_a/R_g(공기 중 저항/대상 가스 내 저항)으로 정의되고 가스

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

환원의 경우 R_0/R_a 로 정의됩니다. NO_2 에 대한 단사정 결정 형태의 민감도는 5-20 이고 육각형 결정 형태 및 나노 구조는 50-200 에 도달하여 우수한 기체 선택성을 보여줍니다. 응답 시간 측면에서 단사정 결정 형태는 느린 이온 및 전자 확산(확산 계수 $<10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$)으로 인해 10-60 초입니다. 나노 구조와 산소 빈 구조의 응답 시간은 짧은 경로와 높은 표면 활성으로 인해 <10 초입니다(확산 계수가 $>50\%$ 증가). 작동 온도는 일반적으로 $200-400^\circ\text{C}$ 이며 산소 공극 구조(예: $\text{W}_{18}\text{O}_{49}\text{F}$)는 더 낮은 온도($100-200^\circ\text{C}$)에서 효율적으로 작동하고 에너지 소비($<1\text{mW}/\text{cm}^2$)를 줄일 수 있습니다. 이러한 매개변수는 결정 형태와 형태(민감도 30%)를 최적화하여 더욱 개선할 수 있습니다.

압축 강도에 대한 외부 조건의 영향은 중요합니다. 온도가 핵심이며, 고온($200-400^\circ\text{C}$)은 가스 흡착 및 반응 속도(속도 $>50\%$)를 향상시켜 감도를 높이지만, 과도한 온도($>500^\circ\text{C}$)는 표면의 산소 흡착 감소로 인해 선택성($>20\%$)을 감소시킬 수 있습니다. 습도가 압축 강도에 미치는 영향은 무시할 수 없으며, 수증기(습도 $>50\%$)는 흡착 부위, 민감도 감소($>30\%$), 저습도 환경에서의 작동($<30\%$), 표면 개질(예: 소수성 코팅)을 통한 개선과 경쟁합니다. 도핑(예: Au, Pt, 도핑 0.1-1 wt%)은 촉매 효과를 통해 H_2 및 CO(민감도 $>100\%$)에 대한 반응을 유의하게 개선하며, 예를 들어 H_2 의 검출 한계는 Pt 도핑된 WO_3 로 H_2 에 대해 $<0.1\text{ppm}$ 일 수 있습니다. 이러한 조건을 최적화하면 가스 감지 성능을 크게 향상시킬 수 있습니다(응답 시간 $>20\%$).

가스 감도는 주로 전기 및 광학 테스트로 측정됩니다. 전도도 테스트는 4 개의 프로브 방법(정확도 $\pm 0.1\mu\text{S}/\text{cm}$)을 사용하여 흡착 전후 가스의 저항 변화를 기록하고 감도($S = R_0/R_a$ 또는 R_0/R_a , 오차 $<5\%$)를 계산합니다. 동적 응답 테스트는 응답 및 복구 시간(정확도 ± 0.1 초)을 모니터링하고 가스 농도($<1\text{ppm}$ 편차) 및 온도($\pm 1^\circ\text{C}$)를 제어합니다. 광학 특성의 변화(예: NO_2 흡착 후 650nm 에서 흡수 피크 향상)를 분석하기 위한 UV-Vis 분광법(파장 정확도 $\pm 1\text{nm}$)은 광학 가스 센서에 적합합니다. 테스트는 안정적인 대기(N_2 또는 공기, 불순물 $<1\text{ppm}$) 및 습도($<30\%$)에서 수행되었으며, SEM(분해능 $<1\mu\text{m}$) 및 XPS(에너지 분해능 $<0.1\text{eV}$)와 결합하여 표면 지형 및 화학적 상태를 분석하여 데이터 신뢰성(오차 $<5\%$)을 확보했습니다.

텅스텐의 가스 감도는 가스 센서에 널리 사용됩니다. NO_2 ($S \approx 10-20$, 검출 한계 10ppm)에 대한 민감도가 높기 때문에 대기질 센서(NO_2 제거율 $>90\%$)와 같은 환경 모니터링에 단사정 WO_3 가 사용됩니다. 육각형 결정질 나노와이어는 산업 배기가스 모니터링(감도 >100)을 위한 높은 비표면적($>30\text{m}^2/\text{g}$)과 빠른 응답(<10 초)으로 인해 NH_3 검출(검출 한계 $<1\text{ppm}$)에 탁월합니다. H_2 및 CO 에 대한 산소 공극 구조(예: $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$)의 높은 감도($S>100$)로 인해 산업 안전(응답 시간 <5 초)을 위한 가연성 가스 감지(H_2 감지 한계 $<0.1\text{ppm}$)에 적합합니다.

5.12: 황색-텅스텐 산화 환원 반응

텅스텐 옐로우 (WO_3 , 옐로우 텅스텐 트리옥사이드)는 중요한 전이 금속 산화물이며, 산화 환원 반응 특성은 텅스텐의 다가 (+6, +5, +4, 0)와 결정 구조의 다양성에 기인한다. 이러한 반응은 촉매 작용(변환 $>90\%$), 에너지 저장(비정전용량 $>500\text{F}/\text{g}$), 가스 센서(감도 >100)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

및 습식 야금(텨스텐 회수율 > 95%)에서 광범위한 응용 분야를 가지고 있습니다. 산화 환원 반응은 결정 형태, 형태 및 반응 조건에 따라 WO₃를 저가 화합물(예: W₁₈O₄₉, WO₂ 또는 금속 W)로 환원시키거나 저 원자가 텨스텐 산화물을 WO₃로 산화시키는 것을 포함합니다. 다음은 반응 유형, 메커니즘, 결정 형태 및 형태 영향, 조건 효과, 측정 방법 및 적용 사례를 다루는 황색 삼산화 텨스텐의 산화 환원 반응에 대한 단락 검토입니다.

황색 삼산화 텨스텐의 산화 환원 반응은 주로 가스, 액체 또는 전기 화학적 환경에서 발생할 수 있는 산화 반응(WO₃이 감소) 및 환원 반응(저가 텨스텐이 산화됨)을 포함합니다. 기체 상 환원에서 WO₃는 환원 대기(예: H₂, CO)에서 산소를 잃어 원자가 화합물을 형성합니다. 예를 들어, WO₃는 400-600°C(전환율 >90%)에서 H₂ 단위로 WO₂로 변환되고, 1000-1200°C에서 금속 W를 추가로 생성할 수 있습니다. 액상 환원에서 강력한 환원제(예: NaBH₄)는 WO₃를 0.1M NaBH₄ 용액에서 실온에서 교반한 대로 >85%의 수율로 W₁₈O₄₄로 변환합니다. 전기화학적 환원은 전기장이 가해진 전자와 이온(예: H⁺)을 주입하여 M_xWO₃(예: H_xWO₃, 투과율 <20%로 감소)를 형성하는 전기 변색 장치에 일반적으로 사용됩니다. 반대로, 저가 텨스텐(예: W₁₈O₄·F)은 산화 분위기(예: O₂, 300-500°C) 또는 산화제(예: H₂O₂, 50-100°C)에서 95% 이상의 전환율로 WO₃로 산화됩니다.

반응 메커니즘은 텨스텐 산화 상태의 변화와 격자 산소의 이득 및 손실을 기반으로 합니다. 환원 반응에서, 환원제(예를 들어, H₂)가 WO₃의 표면에 흡착되고, 격자 산소와 반응하여 H₂O를 형성하고, 산소 공극(>10¹⁸ cm⁻³)을 남기고, 이는 WC⁺(예를 들어, W₁₈O₄₂) 또는 W⁴⁺(예를 들어, WO₂)로 환원된다. 전기화학적 환원에서는 전자와 Mⁿ⁺(예: H⁺)가 결정 격자에 주입되어 색상 중심(600-800nm 흡수)을 형성하여 색상 변화를 일으킵니다. 산화 반응에서 O₂는 산소 공극을 채우고 W³⁺ 또는 W⁴⁺는 W⁶⁺로 산화되어 WO₃ 구조를 복원합니다. W-O 결합(600-700kJ/mol)의 높은 결합 에너지는 고온 또는 강한 시약에 의해 반응을 유도할 수 있게 하는 반면, 산소 공극은 활성화 에너지(> 30%)를 감소시켜 반응을 가속화합니다. 육각형 결정 형태의 기공 구조(기공 크기 > 1nm)는 기체/이온 확산(속도 증가 >50%)을 촉진하고 결합 상태는 전자 전달을 향상시킵니다(> 50% 증가).

결정 형태와 형태는 반응 속도와 생성물에 큰 영향을 미칩니다. 단사정 결정 형태(P2₁/n)는 조밀한 구조(밀도 ≈ 7.16g/cm³)로 인해 확산을 제한하고 반응 속도가 느립니다(예: WO₂는 500°C H₂에서 생성되고 전환율은 <80%). 육각형 결정 형태(P6₃/mm)의 기공 구조(비표면적 10-30m²/g)는 400°C H₂에서 W₁₈O₄₉(변환 >90%)와 같은 반응을 가속화하며 전기화학적 반응 시간은 1-5 초에 불과합니다. 산소 공극 구조(예: W₁₈O₄₉)는 결합 상태(>10¹⁸ cm⁻³)로 인한 활성화 에너지를 감소시키고 더 빠르게 반응합니다(예: 300°C에서 공기 중에서 WO₃로 산화, >95%의 효율). 나노 구조(입자 크기 20-200 nm)는 높은 비표면적(30-60 m²/g) 및 표면 결합(>10¹⁷ cm⁻³)으로 인해 반응 속도가 두 배 이상 빠릅니다(예: 전기화학적 색상 변화 시간 < 1 초).

반응 조건은 압축 강도의 영향에 핵심입니다. 온도 상승은 반응을 가속화합니다: WO₂는 기상 환원에 의해 400-600°C에서 생성되고 금속 W는 1000-1200°C에서 생성됩니다. 산화는 300-500°C에서 가장 효과적입니다. 액체는 최대 효율(수율 > 90%)을 위해 50-100°C여야 합니다. 환원 분위기(예: H₂)는 WO₃ 환원을 촉진하고, 산화 분위기(예: O₂)는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산화 촉진을 하며, 불활성 분위기 (예: N_2)는 반응을 늦춥니다 (속도 감소 >50%). 고농도의 시약(예: 1M $NaBH_4$ 또는 30% H_2O_2) 또는 1-3V의 전위는 반응 속도(>100%)를 증가시키지만 너무 높은 전위(>3V)는 구조를 손상시킬 수 있습니다(안정성 >10% 감소). 나노 구조 반응 속도가 빠르고(100% > 증가), Pt 또는 Au의 도핑(0.1-1 wt%)은 촉매 효과(>30%)를 통해 효율을 증가시킵니다.

데이터 정확도(오류 <5%)를 보장하기 위해 산화 환원 반응을 특성화하는 데 다양한 방법이 사용됩니다. 화학 분석은 전환율을 계산하기 위해 계량 (정확도 ± 0.01 mg)을 수행하고 텅스텐 산화 상태를 결정하기 위해 ICP-MS (정확도 ± 0.1 ppm)를 통해 수행되었습니다. XPS(에너지 분해능 <0.1eV)를 사용하여 W^{4+}/W^{5+} 비율을 분석하고, UV-Vis 분광법(과장 정확도 ± 1 nm)을 사용하여 색 중심 흡수를 감지했습니다. XRD(분해능 $\pm 0.01^\circ$) 및 SEM(분해능 <1 μ m)을 사용하여 결정 형태 및 형태 변화를 분석했습니다. 전기화학 측정에는 CV(정확도 ± 0.1 mV) 및 EIS(분해능 ± 0.1 Ω), 현장 고온 XRD 및 적외선 분광법(분해능 ± 1 cm^{-1})이 포함되어 반응 과정을 실시간으로 모니터링합니다. 이 테스트에는 온도($\pm 1^\circ C$), 대기(불순물 <1ppm) 및 습도(<30%)의 제어가 필요합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 산화 환원 반응은 많은 분야에서 중요한 응용을 가지고 있습니다. 촉매 작용에서 $W_{18}O_{49}$ 는 배기 가스 정화를 위한 $W^{4+} \leftrightarrow W^{5+}$ 사이클을 통해 CO 산화(전환율 >90%)를 촉매합니다(시장 규모 > \$100,000/년). 전기화학 반응은 스마트 윈도우(투과율 70% 변화) 및 슈퍼 커패시터(특정 커패시턴스 > 500F/g, 5000 사이클 >)에 사용되는 M_xWO_3 를 생성합니다. 이 센서는 NO_2 감소 WO_3 및 <0.1ppm의 검출 한계로 전도성(감도 >100)을 감소시킵니다. 습식 제련에서 WO는 $WO_{2.7}$ 로 산화되고 텅스텐 회수율은 >95%입니다. 광촉매는 산화환원을 통해 활성부위를 생성하며, 수소 생산 효율은 1mmol/h·g>이다.

황색 삼산화 텅스텐의 산화 환원 반응은 화학 활성의 핵심이며, 육각형 결정 형태 및 나노 구조는 공극 채널과 높은 비 표면적 (>>30m² / g)으로 인해 반응을 가속화 (100% 속도 증가)하고 활성화 에너지는 산소 공극 (>30% 감소)에 의해 감소합니다. 온도(300-600°C), 대기(H_2/O_2), 전압(1-3V) 및 도핑(Pt, Au)은 주요 규제 요소입니다. 미래에는 복합재(예: WO_3 /그래핀, 최대 50% 효율 >), 저온 반응(<100°C) 및 현장 특성화(시간 분해능 <1ms)를 더욱 최적화하여 촉매, 에너지 저장 및 센서 분야의 응용 분야를 촉진할 수 있습니다.

5.13 황색 삼산화 텅스텐의 산 - 염기 반응

양쪽 성 산화물로서, 황색 텅스텐 삼산화물은 산성 및 알칼리성 환경에서 다른 화학적 거동을 나타내며, 산 - 염기 반응 특성은 결정 구조, 표면 특성 및 반응 조건과 밀접한 관련이 있습니다. 이 양쪽 성 특성은 텅스텐 추출, 촉매 준비 및 재료 안정성 연구 분야에서 중요한 응용 분야입니다. WO_3 는 산성 환경에서 천천히 반응하며 일반적으로 불용성 텅스텐 산염을 생성하는 반면, 알칼리성 환경에서는 쉽게 용해되어 용해성 텅스텐 산염을 형성합니다. 산-염기 반응 메커니즘, 결정 형태 영향 및 조건부 효과를 분석함으로써 화학적 특성과 산업 응용 분야를 최적화할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐은 산성 환경에서 반응성이 적고 강한 화학적 안정성을 나타냅니다. 약산 (예 : CH_3COOH , $\text{pH} \approx 2.5$)에서 WO 는 W-O 결합 (결합 에너지 $600\text{--}700 \text{ kJ/mol}$)으로 인해 약산에 의한 H^+ 공격에 대한 높은 내성으로 인해 거의 비 반응성 (용해도 $<0.01 \text{ g/L}$)입니다. 강산 (예 : HCl , H_2SO_4 , 6M)에서 WO_3 는 천천히 반응하여 불용성 텅스텐 산 (H_2WO_4)을 형성합니다. 반응은 $\text{WO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{WO}_4$, H_2WO_4 는 낮은 용해도($0.1\text{--}0.5 \text{ g/L}$)를 가졌으며 종종 침전물로 존재했습니다. 예를 들어, WO_2 는 6M HCl 에서 80°C 에서 몇 시간 동안 가열되고 소량만 H_2WO_4 침전물(용해도 $<5\%$)에 용해됩니다. 반응 메커니즘은 H^+ 가 WO_3 표면의 W-O 결합을 공격하고 팔면체 구조를 파괴하여 H_2WO_4 를 형성하는 것을 포함하지만, 단사정 결정 형태의 단단한 격자 (밀도 $\approx 7.16 \text{ g/cm}^3$)는 H^+ 의 추가 침투를 제한하여 느린 반응 속도 (속도 $<0.1 \text{ mg/min}$)를 초래합니다. 이 특성으로 인해 WO_2 는 산성 환경 (내식성 $>80\%$)의 안정성 연구에서 가치가 있습니다.

황색 삼산화 텅스텐은 알칼리성 환경에서 높은 반응성을 가지며 강한 알칼리 (예 : NaOH , KOH)와 반응하여 용해성 텅스텐 산염을 형성하기 쉽고 반응이 빠르고 철저합니다. 반응은 $\text{WO}_3 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ 로 용해성 WO_4^{2-} 이온(용해도 $>100 \text{ g/L}$)을 생성하였다. 예를 들어, $10\% \text{ NaOH}$ 용액 (약 2.5M)에서 몇 시간 동안 끓인 WO_2 는 완전히 용해되어 (용해도 $>95\%$), 투명한 Na_2WO_4 용액이 생성됩니다. 반응 메커니즘은 OH^- 가 W-O 결합을 끊고 WO_4^{2-} 를 형성하기 위해 WO_6 팔면체를 해리하는 것을 포함하며, 반응 속도는 알칼리 농도 및 온도에 따라 크게 증가합니다 (속도 증가 $>50\%$). 고농도 염기($>5\text{M}$) 및 고온($>100^\circ\text{C}$)에서 반응은 몇 분 안에 완료될 수 있습니다(용해 시간 <10 분). 이 특성은 텅스텐 (회수율 $>95\%$) 및 촉매 전구체 준비의 습식 제련 추출에 널리 사용됩니다.

텅스텐의 결정 형태와 형태는 압축 강도에 큰 영향을 미칩니다. 촘촘한 3 차원 네트워크 구조(다공성 $<5\%$)로 인해 단사정 결정 형태($\text{P}2_1/\text{n}$)는 표면에 노출된 W-O 결합이 적고 산-염기 반응 속도가 느립니다(용해도 감소 $>30\%$). 육각형 결정 형태 ($\text{P}6/\text{mmm}$)의 기공 구조 (기공 크기 $>1 \text{ nm}$)는 표면 노출 면적 (비 표면적 $10\text{--}30 \text{ m}^2/\text{g}$)을 증가시키고 알칼리 용해도를 크게 향상 시켰으며 (용해도는 $>50\%$ 증가), 산성 환경에서의 반응 속도는 약간 증가 ($>20\%$)했다. 산소 공극 구조(예: $\text{W}_{18}\text{O}_4\text{F}$)는 결합 상태로 인해 격자 안정성(결합 밀도 $<90\%$)을 약화시키고 산-염기 반응 속도를 더욱 가속화($>40\%$)합니다. 나노 구조 (예 : 나노 입자, 나노 시트, 입자 크기 $20\text{--}200 \text{ nm}$)는 높은 비 표면적 ($30\text{--}60 \text{ m}^2/\text{g}$)과 많은 수의 표면 활성 부위 ($>10^{17} \text{ cm}^{-3}$)로 인해 산-염기 반응 속도 ($>100\%$ 증가)가 현저히 높으며, 예를 들어 nanoWO_3 는 1 M NaOH (용해 시간 <5 분)에서 몇 분 안에 완전히 용해 될 수 있습니다.

반응 조건은 압축 강도의 효과에 결정적입니다. 온도의 증가는 산-염기 반응을 현저하게 촉진시켰고, 80°C 에서의 용해 속도는 산성 환경에서 25°C 에서의 용해 속도보다 $>50\%$ 높았습니다. 알칼리성 환경에서 100°C 에서의 반응 속도는 60°C 에서의 반응 속도보다 2-3 배 높습니다(속도 증가 $>100\%$). 산 또는 염기의 농도는 압축 강도에 상당한 영향을 미치며, 고농도의 산(예: 6M HCl) 또는 염기(예: 5M NaOH)는 H^+ 또는 OH^- 의 화학적 포텐셜을 증가시켜 용해도($>80\%$) 및 반응 속도($>100\%$)를 증가시킵니다. 또한, 교반

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

속도(>200rpm) 및 입자 크기(<200nm)는 물질 전달을 향상시켜 반응(속도 > 30%)을 더욱 가속화했습니다. 이러한 조건을 최적화하면 반응 효율(용해도 > 95%)을 크게 향상시킬 수 있습니다.

산-염기 반응 특성의 측정은 주로 화학적 및 물리적 분석에 의해 수행됩니다. 용해 속도 (mg/min)는 산 / 알칼리 용액에서 WO₃ 샘플의 질량 손실을 0.01 mg의 정확도로 계량하여 계산되었다. 자외선 가시 분광법 (UV-Vis, 파장 정확도 ±1 nm)은 용액 (예 : 250 nm)에서 WO₃의 특성 흡수 피크를 모니터링하고 텅스텐 산염 농도 (오류 <1 %)를 정량화합니다. X 선 회절(XRD, 분해능 ± 0.01°)과 주사전자현미경(SEM, 분해능 < 1μm)을 사용하여 반응 전후의 결정 형태 및 형태 변화를 분석하여 반응 메커니즘을 밝혔습니다. 테스트는 데이터 신뢰성(오류 <5%)을 보장하기 위해 제어된 온도(±1°C) 및 농도(±0.1M)에서 수행되었습니다.

WO₃의 산-염기 반응 메커니즘은 W-O 결합의 화학적 안정성과 H⁺ 또는 OH⁻와의 상호 작용을 기반으로 합니다. 산성 환경에서 H⁺는 표면 W-O 결합을 공격하고 WO₆ 팔면체를 점진적으로 해리하여 불용성 H₂WO₄를 형성하며, 반응은 결정 격자의 조밀함(확산 속도 <10⁻¹⁴ cm²/s)에 의해 제한됩니다. 알칼리성 환경에서 OH⁻는 친핵성 공격에 의해 W-O 결합을 빠르게 끊어 사면체 WO₄²⁻를 형성하고 반응 역학은 OH⁻ 농도 및 온도(활성화 에너지 ≈50-70kJ/mol)에 의해 제어됩니다. 나노 구조와 높은 비표면적은 반응 부위(10¹⁷ cm⁻³)를 증가시켜 반응의 활성화 에너지(>>20%)를 크게 감소시키고 용해 과정을 가속화합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO₃) Product Introduction

1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO₃ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO ₃ content (wt%)	≥99.95
Impurities (wt%, max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm ³)
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO₃ content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website www.tungsten-powder.com. For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

6 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 제조 방법

일반적으로 황색 텅스텐 삼산화물로 알려진 황색 텅스텐 삼산화물 (WO_3)은 밝은 노란색 결정 분말 형태의 무기 화합물로, 우수한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 촉매, 광전자 공학, 감지 및 에너지 저장 분야에서 많은 주목을 받고 있습니다. 텅스텐 무수물로서, WO_3 의 제조 방법은 결정 형태, 입자 크기 및 성능에 직접적인 영향을 미치고 그 적용 효과를 결정합니다. 전통적인 준비 방법은 성숙한 프로세스와 안정적인 작동이 특징이며 산업 및 과학 연구에 널리 사용됩니다. 이 장에서는 황색 삼산화 텅스텐의 두 가지 전통적인 제조 방법, 고온 고체 반응 방법 및 졸-겔 방법에 대해 자세히 논의하고 화학 원리, 공정 흐름, 주요 매개 변수 제어, 장단점 및 응용 시나리오를 자세히 분석하고 전문 데이터와 최신 연구 진행 상황을 결합하여 독자에게 포괄적인 기술 참조를 제공합니다.

6.1 황색 텅스텐 삼산화물의 전통적인 제조 방법

황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법은 화학 반응 및 물리적 변형에 의존하여 텅스텐 기반 원료를 제어된 조건에서 고순도 WO_3 로 변환합니다. 이러한 방법은 실험실 시험에서 산업 대량 생산에 이르기까지 다양한 시나리오에 적합한 안정적인 공정 시스템을 형성하기 위해 수십 년 동안 최적화되었습니다. 기존 방법의 대표자로서 고온 고체상 반응 방법과 졸-겔 방법은 각각 높은 수율과 나노 단위 정밀도로 알려져 있어 다양한 응용 분야의 성능 요구 사항을 충족합니다. 다음은 이러한 각 방법의 의미와 실습을 분석합니다.

6.1.1 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법 - 고온 고체상 반응 방법

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고온 고체상 반응 방법은 황색 삼산화 텅스텐을 제조하기 위한 고전적인 방법이며, 이는 간단한 장비, 직관적인 공정 및 높은 수율의 장점으로 인해 산업 생산의 주류 기술이 되었습니다. 이것의 핵심은 고온 소성을 통해 고체 원료의 화학 반응을 유도하여 고순도 분말 또는 벌크 재료의 생산에 적합한 결정질 WO를 직접 생성하는 것입니다.

고온 고체상 반응법은 일반적으로 텅스텐 산 (H_2WO_4) 또는 파라 텅스텐 산 암모늄 ($(NH_4)_2WO_4$, APT로 약칭)를 출발 물질로 사용하며 산소 또는 공기 대기에서 열처리됩니다. 화학 반응은 주로 다음 공식으로 텅스텐 산을 WO_3 및 수증기로 분해하는 것과 같은 산화 또는 분해 과정을 포함합니다: $H_2WO_4 \rightarrow WO_3 + H_2O$; 반면에 파라 텅스텐 산 암모늄은 400-700°C에서 분해되어 WO_3 , 암모니아 및 물을 형성합니다: $(NH_4)_2WO_4 \rightarrow WO_3 + 2NH_3 + H_2O$. 이러한 반응은 고온에서 빠르게 완료되고 휘발성 성분이 제거되며 텅스텐은 산소와 결합하여 안정적인 삼산화 텅스텐 결정을 형성합니다. WO의 결정 형태는 온도와 밀접한 관련이 있으며, 예를 들어, 단사정 결정 형태는 600°C에서 형성되며, 700°C 이상에서 직교 또는 정방계 결정 형태로 변화할 수 있으며, 결정 형태 전이는 광학 및 전기적 특성에 상당한 영향을 미칩니다.

이 공정은 원료의 준비에서 시작되며, 텅스텐 산 또는 파라 텅스텐 산 암모늄의 순도는 제품 품질에 영향을 미치는 Fe, Ca, Si 및 기타 불순물과 같은 불순물을 피하기 위해 99.9% 이상이어야 합니다. 원료는 1-10 μm로 분쇄되고 균일한 입자를 보장하기 위해 체질되어 반응 효율을 향상시킵니다. 그 후, 원료를 고온 용광로(예: 머플로 또는 회전식 관로)에 적재하고 대상 입자 크기와 결정 형태에 따라 500-800°C에서 2-6 시간 동안 소성합니다. 예를 들어, 550°C는 촉매에 적합한 0.1-1 μm의 미세 입자를 생성합니다. 750°C에서 1-10 μm의 더 큰 입자가 생성되며, 이는 세라믹 또는 타겟에 적합합니다. 소성 후, 제품은 결정 응력으로 인한 균열을 방지하기 위해 실온으로 서서히 냉각됩니다. 냉각 후, WO_3 는 X선 회절 (XRD), 주사 전자 현미경 (SEM) 및 유도 결합 플라즈마 (ICP) 분석에 의해 결정의 형태, 형태 및 순도를 최종적으로 확인할 수 있습니다.

중요한 파라미터의 제어는 프로세스 성공에 매우 중요합니다. 소성 온도는 입자 크기와 결정 형태에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소이며 ±10°C 범위 내에서 정밀하게 제어해야 합니다. 대기는 WO_2 또는 $W_{18}O_{49}$ 와 같은 저가 산화물의 형성을 방지하기 위해 0.2 atm 이상의 산소 분압으로 산소가 풍부해야 합니다. 유지 시간은 일반적으로 2-4 시간이며 길이가 너무 길면 곡물이 과도하게 성장(>10 μm)하고 비표면적이 줄어들 수 있습니다. 너무 짧으면 반응이 불완전하고 원료가 분해되지 않습니다. 원료의 입자 크기 및 균일성도 엄격하게 관리되어야 하며 일관된 반응 역학을 보장하기 위해 입자 크기 편차를 ±20% 이내로 제어해야 합니다. 또한 냉각 속도는 급속 냉각으로 인한 결정 결함을 방지하기 위해 5°C/min 미만이어야 합니다.

고온 고체상 반응 방법의 장점은 중요하고 공정이 간단하며 장비 비용이 저렴하며 연간 생산량이 수천 톤인 대규모 생산에 적합합니다. 이 제품은 고순도(최대 99.99%)와 제어 가능한 결정 형태를 가지고 있어 촉매, 텅스텐 분말 및 전기 변색 물질의 요구를 충족시킬 수 있습니다. 텅스텐 산과 파라 텅스텐 산 암모늄은 텅스텐 광석 제련의 일반적인 중간체이며 공급망이 안정적입니다. 그러나 이 방법은 높은 에너지 소비(WO_3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

톤당 약 2000kWh) 및 높은 운영 비용과 같은 한계도 있습니다. 입자 크기는 정밀하게 제어하기 어렵고 응집되기 쉬워 비표면적(일반적으로 $10\text{m}^2/\text{g}$ <)이 감소합니다. 원료의 품질에 대한 높은 요구 사항과 과도한 불순물은 광학 또는 전기 성능을 크게 저하시킬 수 있습니다. 이 방법은 SCR 탈질 촉매 (비 표면적은 $5\text{-}15\text{m}^2/\text{g}$ 필요) 및 스마트 유리 필름 (단사정 결정 형태)의 생산에 널리 사용되지만 나노 스케일 WO의 제조에는 제한이 있으며 고성능 광촉매 또는 배터리 재료의 요구를 충족시키는 데 어려움이 있습니다.

6.1.2 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법 - 졸 - 겔 법

졸 - 겔 (sol-gel method)은 용액 내 분자 반응에 의해 나노 스케일 황색 텅스텐 트리 옥사이드를 제조하는 습식 화학 기술로, 작은 입자 크기, 높은 균일 성 및 제어 가능한 형태로 알려져 있습니다. 이 방법은 온화한 조건에서 WO_3 를 생성하며, 이는 고성능 광전자 및 에너지 저장 재료의 개발에 특히 적합하며 공정의 복잡성에도 불구하고 실험실 및 고급 응용 분야에서 탁월합니다.

졸 - 겔 (sol-gel) 방법의 원리는 용액 내 텅스텐 전구체의 가수 분해 및 중축합을 기반으로 합니다. 텅스텐 산 나트륨 (Na_2WO) 또는 염화 텅스텐 (WCl_6)은 일반적으로 전구체로 사용되며 물 또는 에탄올 용매에서 반응합니다. 예를 들어, 염화 텅스텐은 가수 분해되어 텅스텐 산 중간체를 형성합니다: $\text{WCl}_6 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{WO}_3 + 6\text{HCl}$, 이후 중축합되어 WO_3 네트워크를 형성합니다: $n\text{H}_2\text{WO}_3 \rightarrow (\text{WO}_3)_n + n\text{H}_2\text{O}$. pH, 온도 및 첨가제를 제어함으로써 반응은 안정된 졸을 형성한 다음 겔화되고 최종적으로 저온에서 건조 및 소성되어 nanoWO를 얻습니다. 그 결과로 생성된 WO_3 형태(예: 구형, 막대 또는 플레이크) 및 입자 크기($10\text{-}100\text{nm}$)는 공정 매개변수에 의해 정밀하게 제어할 수 있으며, 결정 형태는 소성 온도(예: 350°C 에서 비정질 또는 단사정 결정 형태 및 500°C 에서 사방정계 결정 형태)에 따라 달라집니다.

이 과정은 졸 준비로 시작되며, 전구체를 $0.1\text{-}0.5\text{ mol/L}$ 의 농도로 탈 이온수 또는 에탄올에 용해시키고 염산 또는 암모니아를 첨가하여 pH를 2-4로 조정하고 몇 시간 동안 교반하여 투명한 졸을 형성합니다. 그런 다음 졸 중축합은 $40\text{-}80^\circ\text{C}$ 로 가열하거나 폴리에틸렌 글리콜과 같은 겔화제를 첨가하여 일반적으로 6-48시간의 겔화 시간을 가하여 3 차원 겔 네트워크를 형성하도록 유도됩니다. 그런 다음 겔을 $20\text{-}50^\circ\text{C}$ 에서 12-48 시간 동안 숙성하여 골격 구조를 강화하고 건조 시 무너지지 않도록 합니다. 건조 단계에서는 대기압 건조($80\text{-}120^\circ\text{C}$, 12-24 시간) 또는 초임계 건조($>7.4\text{MPa}$ 의 CO_2)를 사용할 수 있으며, 후자는 나노기공 구조를 더 잘 보존할 수 있습니다. 건조 겔은 $300\text{-}500^\circ\text{C}$ 에서 1-3 시간 동안 소성되어 잔류 유기물과 수분을 제거하고 결정질 WO를 형성합니다. 분쇄 및 스크리닝 후 최종 제품의 입자 크기($10\text{-}100\text{nm}$), 비표면적($20\text{-}100\text{m}^2/\text{g}$) 및 결정 형태를 투과 전자 현미경(TEM), BET 비표면적 분석 및 XRD로 특성화했습니다.

주요 매개 변수의 제어는 WO의 성능을 직접 결정합니다. pH 값은 2-4로 유지되어야 하며, 너무 높으면 텅스텐 산염 침전이 발생하고 너무 낮으면 중축합이 억제되어 겔 품질에 영향을 미칩니다. 에탄올은 표면 장력이 낮아 (22 mN/m 대 물의 경우 72 mN/m) $10\text{-}50\text{ nm}$ 입자를 형성하는 반면, 수용액은 $50\text{-}100\text{ nm}$ 입자를 형성하는 경향이 있습니다. 소성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

온도는 300-400 °C 에서 생성되는 높은 비 표면적 (50-100 m² / g)과 500 °C (>100 nm) 이상의 입자 성장으로 인해 비 표면적이 20 m² / g 미만으로 감소하는 결정 형태 및 입자 크기를 결정하는 요소입니다. 노화는 젤 구조를 안정화하는 데 최소 24 시간이 걸리지만 너무 길면(> 72 시간) 비용이 증가합니다. 겔화제(예: 폴리에틸렌 글리콜, 분자량 2000-6000)는 다공성(30-60%)과 입자 분산을 최적화하기 위해 0.5-2wt%로 제어해야 합니다.

젤-겔 방법의 장점은 광촉매 (분해 효율 >90 %) 및 가스 센서 (NO₂ 검출 한계 <1 ppm)의 고성능 요구 사항을 충족하는 제어 가능한 입자 균일 성 및 형태로 높은 비 표면적 (20-100 m² / g)과 작은 입자 크기 (10-100 nm)를 가진 WO₃ 나노 입자를 제조 할 수 있다는 것입니다. 반응 조건은 온화하고 소성 온도는 600°C 미만이며 에너지 소비는 고온 고체상 방법의 30-50%에 불과합니다. 템플릿 (예 : CTAB) 또는 컨디셔닝 용매를 도입함으로써 막대 형태 (중형비 5 : 1) 또는 시트 (두께 < 20 nm)로 WO₃의 준비를 사용자 정의 할 수 있습니다. 그러나 이 방법의 단점은 수많은 공정 단계(보통 5-7 단계) 및 긴 주기 시간(2-5 일)과 같이 빠른 대량 생산에 적합하지 않다는 점을 무시해서는 안 됩니다. 전구체 순도 및 pH 제어에 대한 요구 사항은 매우 높고(pH 편차 <0.2) 작동이 복잡합니다. 용제 및 겔화제의 높은 비용 (WO₃ 소모품 kg 당 약 \$ 50-\$ 100)은 산업 응용 분야를 제한합니다. 이 방법은 유기 화합물(예: 메틸 오렌지, 양자 수율>0.1), 리튬 배터리 양극(비용량 693mAh/g) 및 전기 변색 장치(응답 시간 <5 초)의 광촉매 분해에서 잘 수행되지만 비용 및 효율성의 추가 최적화가 필요합니다.

6.1.3 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법 - 열수 법

열수는 고온 및 고압의 수용액 환경에서 황색 삼산화 텅스텐을 제조하기 위한 습식 화학 방법이며, 높은 결정성 및 나노 입자로 WO₃ 를 생성하는 능력으로 알려져 있습니다. 이 방법은 온화한 조건에서 결정 성장을 달성하며 고성능 광전자 재료의 제조에 널리 사용됩니다.

열수 방법의 핵심 원리는 밀봉 된 오토 클레이브의 수용액에서 텅스텐 전구체를 용해하고 재결정화하여 WO₃ 나노 결정을 생성하는 것입니다. 텅스텐 산 나트륨 (Na₂WO₄) 은 일반적으로 130-250 °C 및 0.3-4 MPa 에서 반응하는 전구체로 2H₂O) 또는 염화 텅스텐 (WCl₆)으로 사용됩니다. 예를 들어, 텅스텐 산 나트륨은 산과 반응하여 텅스텐 산 중간체를 형성합니다 : Na₂WO₄ + 2HCl → H₂WO₄ + 2NaCl 은 이후에 분해되어 열수 환경에서 WO₃ : H₂WO₄ → WO₃ + H₂O 로 재결정화됩니다. 높은 온도와 압력은 핵형성 및 결정 성장을 촉진하여 일반적으로 20-200nm 크기의 단사정 또는 직교 WO₃ 형태와 반응 조건에 따라 나노 입자, 막대 또는 플레이크가 될 수 있는 형태를 생성합니다.

이 과정은 전구체 용액의 준비로 시작하여 텅스텐 산 나트륨을 탈 이온수 (농도 0.05-0.2 mol / L)에 용해시키고 염산을 첨가하여 pH 를 1-3 으로 조정하고 균일하게 교반 한 다음 충전 정도가 60-80 %로 제어되는 PTFE 라이닝 오토 클레이브로 이동합니다. 오토클레이브를 밀봉하여 오븐에 넣고 150-200°C 에서 6-24 시간 동안 반응시켜 WO₃ 침전물을 생성합니다. 반응이 끝나면 실온으로 냉각시키고 제품을 원심 분리하고 탈이온수와 에탄올로 여러 번 세척하여 잔류 이온과 유기물을 제거합니다. 세척 후,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

펠릿을 80-100 °C 에서 12 시간 동안 건조시켜 WO₃ 분말을 얻었다. 선택적으로, 결정성을 증가시키기 위해 300-400°C 에서 1-2 시간 동안 소성합니다. 최종 제품은 투과 전자 현미경(TEM), X 선 회절(XRD) 및 BET 특정 표면적 분석을 통해 입자 크기, 결정 형태 및 비표면적(일반적으로 20-80m²/g)을 확인하는 것이 특징이었습니다.

주요 매개변수의 제어는 WO₃ 성능에 매우 중요합니다. 반응 온도는 결정 형태 및 입자 크기에 영향을 미치며, 150 °C 에서 20-50 nm 의 단사정 형태 WO₃가 형성되고, 200 °C 이상에서 100-200 nm 의 사방 정계 결정 형태가 형성 될 수 있습니다. pH 값은 1-3 으로 제어해야 하며, 너무 높으면 텅스텐 산염 침전이 발생하고 너무 낮으면 결정 성장이 억제됩니다. 반응 시간은 입자 크기에 영향을 주어 6 시간 내에 더 작은 입자(<50nm)가 생성되고 24 시간 내에 더 큰 입자(>100nm)가 생성됩니다. 전구체 농도는 적당해야 하며, 너무 높으면(>0.3 mol/L) 쉽게 응집되고, 너무 낮으면(<0.02 mol/L) 수율이 부족합니다(<80%). 계면활성제(예: CTAB, 0.1-0.5 wt%)를 추가하면 막대 WO₃ 유도(중형비 3:1-10:1)와 같은 형태가 수정됩니다. 오토클레이브의 충전 정도와 압력(0.5-3MPa)은 장비의 과압 또는 불완전한 반응을 방지하기 위해 균형을 맞춰야 합니다.

열수 법의 장점은 고온 소성 (<500 °C)없이 고 결정성 나노 WO 를 직접 생성 할 수 있으며 입자 성장 및 단단한 응집을 피할 수 있으며 비 표면적은 고온 고체상 법 (<10 m² / g)보다 훨씬 높습니다. 이 제품은 입자 크기가 작고 분포가 균일하며(편차 <15%) 및 제어 가능한 형태를 가지고 있어 광촉매(로다민 B 의 경우 85% 분해 효율> 및 가스 감지 센서(H₂S <0.5ppm 검출 한계)에 적합합니다. 온화한 반응 조건, 낮은 에너지 소비 (WO₃ 킬로그램 당 약 200-300 kWh), 환경 친화적이고 폐액의 쉬운 처리. 그러나 단점은 고전압 저항 장비의 필요성(약 \$5,000-10,000/개)의 필요성, 긴 생산 주기(1-2 일) 및 신속한 대량 생산에 적합하지 않다는 것입니다. 배치 수율은 오토클레이브 부피(일반적으로 1L <)에 의해 제한되며, 산업 규모 확장으로 인해 장비 및 비용 문제가 발생합니다. 이 방법은 nano-WO₃ 광촉매 및 배터리 음극 재료(cycle 용량 >600mAh/g)의 제조에 탁월한 성능을 발휘하지만 확장 가능성을 높이기 위해 장비 설계를 최적화해야 합니다.

6.1.4 황색 삼산화 텅스텐의 전통적인 제조 방법 - 암모늄 텅스텐 산염 법

암모늄 텅스텐 산염 법은 텅스텐 정광 또는 텅스텐 산염을 다단계 반응을 통해 황색 텅스텐 삼산화물로 변환하는 암모늄 텅스텐 산염 ((NH₄)₂WO₄)의 분해를 기반으로 하는 화학 제조 방법입니다. 이 방법은 텅스텐 제련 산업에서 널리 사용되며 고순도와 공정 안정성을 모두 가지고 있습니다.

암모늄 텅스텐 산염 법의 원리는 텅스텐 농축액의 화학적 전환과 암모늄 텅스텐 산염의 열 분해를 포함합니다. 이 공정은 일반적으로 텅스텐 농축액 (예 : scheelite CaWO₄)으로 시작하여 수산화 나트륨 (NaOH)에 의해 알칼리화되어 텅스텐 산 나트륨 : CaWO₄ + 2NaOH → Na₂WO₄ + Ca(OH)₂를 생성합니다. 텅스텐 산 나트륨 용액은 염산으로 pH 7-8 로 중화 된 다음 염화 암모늄 (NH₄Cl)과 반응하여 텅스텐 산 암모늄을 형성합니다 : Na₂WO₄ + 2NH₄Cl → (NH₄)₂WO₄ + 2NaCl. 암모늄 텅스텐 산염 용액은 염산에 의해 산성화되어 텅스텐 산 침전물을 생성합니다 : (NH₄)₂WO₄ + 2HCl → H₂WO₄ + 2NH₄Cl. 마지막으로, 텅스텐 산은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

500-700 °C 에서 소성에 의해 $WO_3 : H_2WO_4 \rightarrow W_5O_{14} + H_2O$ 로 분해됩니다. 전체 공정은 단단계 화학 반응을 통해 텅스텐의 정제 및 변형을 실현하며, 생성물은 단사 정계 또는 사방 정계 형태 WO 입니다.

이 공정에는 원료 전처리 및 단단계 반응이 포함됩니다. 먼저, 텅스텐 농축액을 200 mesh 로 불 밀링하고, 4-6 mol / L NaOH 용액을 첨가하고, 80-100 °C 에서 2-4 시간 동안 알칼리화하고, Na_2WO_4 용액을 여과 하였다. 용액을 pH 7.5 까지 6 mol / L HCl 로 중화하고, 1.5-2 배 화학 량론 NH_4Cl 을 첨가하고, 50-70 °C 에서 1-2 시간 동안 교반하여 $(NH_4)_2WO_4$ 를 결정화했다. 암모늄 텅스텐 산염을 8-10 mol / L HCl 로 용해시키고 산분해하여 60-80 °C 에서 H_2WO_4 침전물을 생성하고, Cl⁻이 없을 때까지 탈 이온수로 여과하고 세척했다. 텅스텐 산을 500-600 °C 에서 머플 용광로에서 2-3 시간 동안 볶아 WO_3 분말을 생성합니다. 생성물을 1-5µm 로 냉각 및 분쇄하고, 결정 형태 및 순도(>99.9%)를 XRD 및 ICP-MS 로 검출하고 적격성 평가 후 패키징했습니다. 폐액이 중화되고 암모니아와 염화나트륨이 회수됩니다.

주요 매개변수는 제품 품질을 보장하기 위해 엄격하게 제어되어야 합니다. 알칼리 가수분해 중 NaOH 의 농도가 너무 낮으면(<3 mol/L) $CaWO_4$ 가 불완전하게 용해되고 너무 높으면(>8 mol/L) 비용이 증가합니다. 산분해의 pH 는 7.5±0.5 로 정확해야 하며 편차는 텅스텐 산 암모늄 수율 (<90%)을 감소시킵니다. 산분해 온도는 60-80°C 로 제어되며, 너무 높으면 불용성 불순물이 형성되고 너무 낮으면 반응이 느려집니다. 로스팅 온도는 500°C 에서 단사정 결정 형태(비표면적 10-20m²/g)를 형성하고 600°C 이상에서 사방정계 결정 형태(비표면적 < 10m²/g)를 형성하는 WO_3 결정 형태에 영향을 미칩니다. 로스팅 시간은 2-3 시간이며 너무 길면 곡물 응집(>10µm)이 발생할 수 있습니다. 염화 암모늄은 텅스텐 산 나트륨의 완전한 전환을 보장하기 위해 20-30 % 이상을 사용해야 합니다.

암모늄 텅스텐 산염 방법의 장점은 공정이 성숙하고 제품 순도가 높으며 (>99.95 %) 수율이 95 % 이상에 도달 할 수 있다는 것인데, 이는 복잡한 텅스텐 광석에서 WO 를 추출하는 데 적합합니다. 원료 적응성이 강하고 scheelite, wolframite 및 혼합 광석을 처리할 수 있으며 공급망이 안정적입니다. 장비는 간단하고(주로 반응기 및 로스터) 투자 비용이 낮습니다(용량 톤당 약 100,000 달러). 그러나 단점은 많은 프로세스 단계(5-7 단계), 복잡한 작업 및 긴 (3-5 일)을 포함합니다. 사용되는 산 및 알칼리의 양이 많고 (WO_3 1 톤당 약 1.5 톤의 HCl 및 0.8 톤의 NaOH) 폐액을 처리해야하므로 환경 보호 비용 (약 200 달러 / 톤)이 증가합니다. 로스팅 에너지 소비(약 1500kWh/톤)와 큰 입자 크기(1-10µm)로 인해 나노 단위 응용 분야에는 적합하지 않습니다. 이 방법은 텅스텐 분말 및 초경합금 원료 생산에 널리 사용되지만 고성능 나노 물질 분야의 다른 기술과 함께 최적화해야 합니다.

6.1.5 황색 텅스텐 트리옥사이드의 전통적인 제조 방법 - 텅스텐 산염의 염산 분해 방법

텅스텐 산염의 염산 분해 방법은 텅스텐 산염 용액을 산성화하여 황색 텅스텐 삼산화물을 직접 제조하기 위한 습식 화학 방법으로, 단순성, 효율성 및 저렴한 비용으로 텅스텐 화학 산업에서 자리를 차지합니다. 이 방법은 텅스텐 산 나트륨 용액에서 WO_3 를 추출하는 데

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

특히 적합합니다.

이 방법의 원리는 텅스텐 산을 생산하기 위해 산성 조건에서 텅스텐 산 나트륨을 분해하는 것을 기반으로 하며, 이는 이후에 WO 로 묶아집니다. 이 공정은 텅스텐 산 나트륨 (Na₂WO₄·2H₂O)을 첨가하여 염산을 산성화하여 텅스텐 산 침전물을 생성한다 : Na₂WO₄ + 2HCl → H₂WO₄ + 2NaCl. 텅스텐 산은 500-600 °C 에서 묶고 탈수하여 WO₃ : H₂WO₄ → WO₃ + H₂O 를 생성합니다. 반응은 간단하고 부산물은 취급하기 쉬운 염화나트륨 용액입니다. 나트륨 불순물 (<0.01 %)을 줄이기 위해 텅스텐 산 나트륨 용액은 종종 WO 의 순도를 보장하기 위해 이온 교환 또는 용매 추출로 전처리됩니다. 생성 된 WO₂ 는 1-5 μm 의 입자 크기를 갖는 단사정입니다.

이 과정은 일반적으로 텅스텐 농축액을 알칼리화하거나 폐 텅스텐 재료를 0.5-2 mol / L 의 농도로 회수하여 얻는 텅스텐 나트륨 용액의 제조로 시작됩니다. 용액을 50-80 °C 에서 6-10 mol / L HCl 을 첨가하고 교반하여 황색 H₂WO₄ 침전물을 생성함으로써 pH 1-2 로 천천히 산성화시켰다. 산성화는 빠른 강수와 고르지 않은 입자를 피하기 위해 30-60 분으로 제어해야 합니다. 펄트를 원심분리 또는 여과하고 탈이온수로 5-6 회 세척하여 Cl⁻ 및 Na⁺가 없도록 합니다(검출 한계< 10ppm). 세척 후 H₂WO₄를 100°C 에서 6-12 시간 동안 건조시켜 건조 분말을 얻습니다. 건조 분말을 500-600°C 에서 2-3 시간 동안 로스팅하여 WO₃를 생성하고 냉각하고 1-5μm 로 분쇄합니다. 이 제품은 XRD, SEM 및 ICP-MS 에 의해 결정 형태, 형태 및 불순물 함량(Na<50ppm)으로 검출되었습니다. 폐액이 중화되고 NaCl 이 회수 또는 배출됩니다.

주요 매개변수의 제어는 WO₃ 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 산성화 pH 는 1-2 로 유지되어야 하며, 너무 높으면(>3) 텅스텐 산이 불완전하게 용해되고 너무 낮으면(<0.5) 불안정한 부산물(예: 메타텅스텐산염)이 형성됩니다. 산성화 온도는 50-80°C 로 제어되며, 너무 낮으면 강수량이 느려지고 너무 높으면 나트륨 불순물이 발생합니다. 반응이 완료되도록 하려면 6 mol/L 이상의 HCl 농도가 필요하며 20-30%를 초과하면 수율(>90%)이 증가할 수 있습니다. 로스팅 온도는 결정 형태와 입자 크기에 영향을 미치며, 단사정 형태 WO₃ (비 표면적 10-15 m² / g)는 500 °C 에서 형성되고 곡물은 600 °C 이상에서 (>5 μm) 자랍니다. 세척 횟수와 수질(전도도 < 10μS/cm)은 불순물을 줄이기 위해 엄격하게 제어되어야 합니다. 너무 장시간(> 24 시간) 건조하면 H₂WO₄가 부분적으로 분해되어 후속 로스팅에 영향을 줄 수 있습니다.

이 방법의 장점은 공정의 단순성, 적은 단계(3-4 단계), 온화한 반응 조건(<600°C) 및 낮은 에너지 소비(약 1000kWh/톤)입니다. 원료 비용이 낮고 텅스텐 스크랩 (톤당 약 3,000 달러)에서 텅스텐 산 나트륨을 회수 할 수 있으며 수율이 높습니다 (90-95 %). 장비 요구 사항은 낮고(주로 교반 주전자 및 로스터) 중소 규모 생산(연간 100-1000 톤)에 적합합니다. 그러나 단점은 입자 크기가 크고(1-5μm) 비표면적(<15m²/g)이 낮아 나노 단위 응용 분야에 적합하지 않다는 것입니다. 산성화 과정은 많은 양의 폐기물 (WO₃ 톤당 약 10m³)을 생성하며, 이는 중화되어야 합니다 (비용 약 \$ 100 / ton). 나트륨 불순물은 제어하기 어렵고 기존 산성화 방법의 나트륨 함량은 종종 100-200ppm 에 도달하여 추가 정제가 필요합니다. 이 방법은 촉매 지지체 및 텅스텐 분말 원료의 생산에 적합하지만 광전자

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료 분야의 경쟁력은 약합니다.

6.1.6 파라 텨스텐 산 암모늄의 열분해, 황색 삼산화 텨스텐의 전통적인 제조 방법

암모늄 파라 텨스텐 산염 열 분해 방법은 APT 라고하는 파라 텨스텐 산 암모늄 ($(\text{NH}_4)_2\text{WO}_4$)의 고온 분해에 의한 황색 텨스텐 삼산화물을 직접 제조하는 전통적인 방법입니다. 이 방법은 텨스텐 제련 및 분말 준비에 널리 사용되며 산업 생산에 적합한 높은 수율 및 높은 제품 순도로 알려져 있습니다.

암모늄 파라 텨스텐 산염 열 분해 방법의 원리는 고온에서 APT 의 분해 반응을 기반으로합니다. 공기 또는 산소 대기에서 APT 는 열분해되어 암모니아와 수증기를 방출하여 궁극적으로 WO 를 생성합니다. 반응식은 $(\text{NH}_4)_2\text{WO}_4 \rightarrow \text{WO}_3 + 2\text{NH}_3\uparrow + \text{H}_2\text{O}\uparrow$ 입니다. 반응은 일반적으로 400-700 °C 에서 발생하며 단단계 분해를 포함합니다 : 첫째, APT 는 200-300 °C 에서 암모니아와 물의 일부를 잃어 중간 단계 (예 : $(\text{NH}_4)_x\text{WO}_3-y$)를 형성합니다. 그런 다음 400-500 °C 에서 비정질 WO 로 완전히 분해됩니다. 마지막으로, 500-700 °C 에서 단사 정계 또는 사방 정계 형태 WO_3 로의 결정화. 결정 형태 및 입자 크기는 온도, 분위기 및 유지 시간에 의해 제어되며, 예를 들어 단사정 결정 형태 (입자 크기 1-5 μm)는 600 °C 에서 형성되고 사방 정계 결정 형태 (입자 크기 > 5 μm)는 700 °C 이상에서 형성 될 수 있습니다.

이 과정은 원료 준비로 시작됩니다. 고순도 APT (순도 > 99.9 %)를 선택하고 10-50 μm 의 입자 크기로 분쇄하고 분해 효율을 향상시키기 위해 균일 성을 보장하기 위해 체로 거릅니다. 분쇄된 APT 는 세라믹 도가니 또는 스테인리스강 트레이에 적재되어 머플로 또는 회전식 관로에 넣고 공기 대기에서 5-10°C/min 에서 400-600°C 로 가열되고 2-4 시간 동안 따뜻하게 유지됩니다. 분해 과정에서 데일 가스 흡수 장치(물은 산성 용액 포함)를 통해 암모니아와 수증기를 회수하여 환경 오염을 방지합니다. 반응이 끝나면 WO_3 생성물은 급속 냉각으로 인한 결정 결함을 피하기 위해 실온으로 자연적으로 냉각됩니다. 냉각 후, WO_3 는 1-10 μm 로 더 분쇄 될 수 있으며, 결정 형태, 형태 및 불순물 함량 (Fe, Ca<50 ppm)은 X 선 회절, 주사 전자 현미경 및 유도 결합 플라즈마 (ICP-MS)로 검출 할 수 있습니다. 적격 제품은 밀봉 및 포장되어 있으며 배기 가스는 처리 후 배출됩니다.

중요한 매개변수의 정밀한 제어는 제품 품질에 매우 중요합니다. 분해 온도가 핵심이며 400-500 °C 는 촉매에 적합한 미세 입자 (0.5-2 μm , 비 표면적 10-20 m^2/g)를 생성합니다. 큰 입자 (5-10 μm , 비 표면적 <10 m^2/g)는 600-700 °C 에서 생성되며 이는 텨스텐 분말 원료에 적합합니다. 산소의 분압은 저가 산화물(예: WO_2 또는 $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$)의 형성을 방지하기 위해 >0.2 기압으로 유지되어야 합니다. 유지 시간은 2-4 시간으로 제어되며 너무 길면(>6 시간) 곡물 응집이 발생하고 특정 표면적이 감소합니다. 너무 짧으면(< 1 시간) 잔류 미분해 APT (수율 <90%)가 발생할 수 있습니다. APT 의 입자 크기 균일 성은 $\pm 20\%$ 로 제어되어야 하며, 그렇지 않으면 분해 속도가 고르지 않아 결정 형태의 일관성에 영향을 미칩니다. NH_3 배출 농도가 환경 보호 기준을 충족하는 $95\text{mg}/\text{m}^3$ < 하려면 배기 가스 처리 효율이 >95%가 되어야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

암모늄 과라 텅스텐 산업 열 분해 방법의 장점은 간단한 공정, 적은 단계 (2-3 단계) 및 낮은 장비 요구 사항 (주로 로스터, 약 50,000 달러 / 톤 용량의 투자)입니다. 이 제품은 고순도(> 99.95%), 최대 98%의 수율 및 제어 가능한 결정 형태를 가지고 있어 촉매 지지체(10-20m²/g 의 비표면적 요구 사항) 및 텅스텐 제품(순도 > 99.9%)의 요구 사항을 충족합니다. 텅스텐 산업 체인의 중간 제품으로서, APT는 낮은 원료 비용 (톤 당 약 4,000 달러)과 안정적인 공급망을 가지고 있습니다. 그러나 단점은 높은 로스팅 에너지 소비(톤 WO₃당 약 1200-1500kWh)와 큰 입자 크기(>1μm)로 인해 나노 규모(비표면적 < 20m²/g)에 적합하지 않다는 것입니다. 암모니아 배출은 엄격하게 처리되어야 하므로 환경 보호 비용(약 100 달러/톤)이 증가합니다. 입자의 균일성은 원료의 분쇄에 따라 달라지며 이는 제어하기 어렵습니다. 이 방법은 SCR 탈질 촉매 및 텅스텐 분말 원료의 생산에 널리 사용되지만 광전자 재료 분야에서 입자 크기와 형태를 더욱 최적화해야 합니다.

6.2 황색 텅스텐 삼산화물의 새로운 제조 방법

나노 기술과 녹색 화학의 발전으로 황색 삼산화 텅스텐에 대한 새로운 제조 방법이 등장하여 더 높은 성능, 더 낮은 에너지 소비 및 환경 친화성을 달성했습니다. 신형 기술인 전기화학 증착은 정밀한 제어와 박막 준비 능력으로 인해 광전자 및 센서 분야에서 큰 잠재력을 보여주었습니다.

6.2.1 황색 삼산화 텅스텐에 대한 새로운 제조 방법 - 전기 화학 증착

전기 화학적 증착은 텅스텐 전구체를 전도성 기판에 증착하여 전기장에 의해 WO₃ 박막 또는 나노 구조를 형성하는 방법입니다. 이 방법은 간단한 조작, 제어 가능한 형태 및 저온 준비로 인해 고성능 광전자 재료의 준비에 중요한 기술이 되었습니다.

전기 화학적 증착의 원리는 전극 표면의 텅스텐 산업 이온의 환원 또는 산화를 기반으로 합니다. 텅스텐 산 나트륨 (Na W₁₂ O₄₂) 또는 퍼 옥시 텅스텐 산 용액은 일반적으로 전해질로 사용되며 WO₄²⁻ 이온은 음극 또는 양극 표면에서 반응하여 직류 또는 펄스 전기장의 작용으로 WO₃를 형성합니다. 예를 들어, 음극 증착에서 WO₄²⁻는 H⁺에 결합하고 WO₄²⁻ + 4H⁺ + 2e⁻ → WO₃ + 2H₂O를 감소시킵니다. 반응은 실온에서 60 °C의 산성 용액 (pH 1-3)에서 수행하여 50 nm에서 수 마이크론 두께의 비정질 또는 결정질 WO₃ 필름을 생성하고 다공성, 나노 와이어 또는 입상 구조를 포함하는 형태를 생성한다. 증착 후, WO₃는 200-400 °C에서 어닐링하여 결정도를 증가시키고 단사 정계 또는 사방 정계 결정 형태를 형성 할 수 있습니다.

이 공정은 전해질 준비로 시작됩니다. 탈이온수에 Na₂WO₄·2H₂O(농도 0.01-0.1 mol/L)를 넣고 HCl 또는 H₂SO₄를 첨가하여 pH를 1.5-2.5로 조정하고, 안정제(예: H₂O₂, 0.1-0.5 vol%)를 첨가하여 용액이 분해되는 것을 방지했습니다. 전도성 기판(예: ITO 유리, FTO 또는 스테인리스강)을 작업 전극으로 사용하고 표면을 에탄올과 아세톤(10-15 분)으로 초음파로 세척하여 유기물을 제거합니다. 상대 전극(예: Pt 시트) 및 기준 전극(예: Ag/AgCl)을 전해 전지에 배치하여 3 전극 시스템을 형성합니다. 증착은 전위차 (-0.5 --1.0 V 대 Ag / AgCl) 또는 갈바 노 스테틱 (1-10 mA/cm²) 모드에서 30 초에서 30 분 동안

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수행되어 필름 두께 (50-2000 nm)를 제어합니다. 증착 후, WO₃ 필름을 탈 이온수로 행구고 80 °C 에서 1-2 시간 동안 건조하고, 선택적으로 300-400 °C 공기에서 1-2 시간 동안 어닐링하여 결정성을 향상시켰다. 최종 필름은 SEM, XRD 및 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis)으로 형태, 결정 형태 및 광학 특성(예: 밴드갭 2.5–2.8 eV)을 특징으로 합니다.

주요 매개 변수의 조절은 WO₃ 필름의 성능을 결정합니다. 전해질 pH 는 1.5–2.5 로 유지되어야 하며, 너무 높으면(>3) WO₄²⁻가 증착되지 않고 너무 낮으면(<1) 저원자 산화물(예: WO₂)을 생성해야 합니다. 증착 전위 또는 전류 밀도는 -0.7V 가 다공성 구조(공극 크기 50-200nm)를 형성하고 -1.0V 가 나노와이어(직경 20-50nm)를 형성하는 지형에 영향을 미칩니다. 증착 시간은 필름 두께를 제어하여 1 분 내에 100-200nm 필름, 20 분 내에 1-2µm 의 필름을 생성합니다. 전해질 농도는 증착 속도에 영향을 미치며 0.05 mol/L 가 적절하며 너무 높으면(>0.2 mol/L) 필름 균열로 이어집니다. 어닐링 온도는 기판의 고장(예: ITO, 450°C < 내열성)을 방지하고 단사정 결정 형태(0.38–0.39nm 평면 간격)의 형성을 보장하기 위해 400°C 미만이어야 합니다. 필름의 접착력(박리 강도 > 5MPa)을 향상시키기 위해 기판의 표면 거칠기(Ra<10nm)를 제어해야 합니다.

전기화학 증착의 장점은 낮은 준비(< 100°C)와 매우 낮은 에너지 소비(필름 제곱미터당 약 0.1kWh)로 유연한 기판 및 대규모 코팅 생산에 적합합니다. 필름의 형태는 제어 가능하며 다공성 WO₂ (비 표면적 50-100m² / g)는 광촉매 (메틸 오렌지의 분해 효율 >90 %) 및 전기 변색 (착색 효율 >50 cm² / C)에서 잘 수행됩니다. 공정이 정확하고 필름 두께 편차가 <5%로 마이크로 나노 장치(예: 센서, 응답 시간이 1 초 <)에 적합합니다. 그러나 단점으로는 느린 증착 속도(약 10–50nm/분)와 후막 준비(>5µm)에 적합하지 않다는 것입니다. 전해질은 정기적으로 교체해야 하며 폐기물 처리 비용이 높습니다(약 US\$ 50/m³). 장비에는 부식 방지 전극이 필요하므로 (Pt 비용은 약 1000 US 달러 / 세트) 초기 투자가 증가합니다. 이 방법은 스마트 유리(70%>광 투과율 변화), 광촉매 코팅 및 소형 센서 분야에서 큰 가능성을 가지고 있지만 비용 절감을 위해 증착 효율을 최적화해야 합니다.

6.2.2 황색 삼산화 텅스텐에 대한 새로운 제조 방법 - 증기 증착 방법

기상 증착은 기체 전구체가 기판에 반응하거나 증착되어 WO₃ 박막 또는 나노 구조를 형성하는 고급 기술입니다. 높은 순도, 제어 가능한 형태 및 공정 유연성으로 알려진 이 방법은 특히 고성능 박막 장치의 광전자 및 촉매 재료 준비에 널리 사용됩니다.

증기 증착의 원리는 WO 를 형성하기 위해 특정 조건 하에서 기체 텅스텐 전구체의 분해 또는 반응을 기반으로 합니다. 공정 차이에 따라 화학 기상 증착(CVD)과 물리 기상 증착(PVD)으로 나눌 수 있습니다. CVD 에서 텅스텐 헥사 클로라이드 (WCl₆) 또는 텅스텐 카르 보닐 (W (CO))은 일반적으로 300-600 ° C 에서 산소 또는 수증기와 반응하는 전구체로 사용됩니다 (예 : WCl₆ + 3H₂O → WO₃ + 6HCl. PVD (예 : 마그네트론 스퍼터링)는 텅스텐 타겟을 고 에너지 입자로 충격하고 다음 반응으로 산소 분위기에서 WO□□를 증착시킵니다 : W + 3 / 2O₂ → WO₃. 증착 공정은 진공 상태 또는 저압 (10⁻³-10 Pa)에서 발생하여 두께가 10nm 에서 수 미크론 범위의 WO₃ 필름을 생성하며 형태는 고밀도 필름,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다공성 구조 또는 나노 입자에 이르기까지 다양합니다. 박막 형태 (비정질, 단사 또는 직교)는 증착 온도 및 후속 어닐링에 의해 결정되며, 예를 들어 400 °C 어닐링은 단사 형태 WO₃ (밴드 갭 2.6-2.8 eV)를 산출합니다.

프로세스 흐름에서는 CVD 를 예로 들 수 있습니다. 전구체인 WCl₆는 에탄올에 용해되거나 승화(150-200°C)에 의해 기체 상태로 전환되고, 캐리어 가스(예: 50-200sccm 의 유속에서 Ar 또는 N₂)와 혼합되어 반응 챔버로 도입됩니다. 기관(예: 실리콘 웨이퍼, FTO 유리)은 사전 세척(에탄올/아세톤과 초음파로 10 분 동안)하고 300-500°C 로 가열됩니다. 산소 또는 수증기를 반응 가스 (유속 10-50 sccm)로 사용하고 1-10 Pa 의 공동 내 압력에서 5-60 분의 증착 시간 동안 반응하여 막 두께 (50-1000 nm)를 제어한다. 증착 후, 필름을 공기 중에서 냉각하고 선택적으로 300-400 °C 에서 1-2 시간 동안 어닐링하여 결정도를 높입니다. PVD 공정은 유사하지만 텅스텐 타겟(>99.99% 순도)이 RF 또는 DC 스퍼터링(전력 50-200W)에서 산소/Ar 혼합 분위기(O₂ 비율 10-30%)에 증착됩니다. 이 제품은 주사 전자 현미경(SEM), X 선 회절(XRD) 및 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis)을 특징으로 하여 형태(예: 조리개 50-200nm), 결정 형태 및 광학 특성(투과율 > 80%)을 확인했습니다.

주요 매개 변수의 제어는 WO₃ 필름의 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 증착 온도는 300°C 에서 형성된 비정질 또는 다공성 WO₃(비표면적 30-50m²/g)와 500°C 에서 조밀한 단사정 결정 형태(비표면적 < 10m²/g)로 형태 및 형태를 결정합니다. 전구체 유속은 0.1-1g/분으로 제어해야 하며, 너무 높으면 입자 응집이 발생하고 너무 낮으면 증착 속도가 느려집니다(<5nm/분). 캐비티의 압력은 필름 두께의 균일성에 영향을 미치며 5Pa 가 적절하고 편차는 <10%입니다. 산소 비율은 정확해야 하고(10-20%), 저가의 WO_{2-x}를 생성하기에는 너무 낮아야 하며, 증착 효율을 감소시키기에는 너무 높아야 합니다(수율 <80%). 접착력(박리 강도 > 10MPa)을 향상시키기 위해 기관의 표면 거칠기(Ra<5nm)를 제어해야 합니다. 어닐링 온도는 기관(예: FTO, 500°C<의 온도 저항)을 보호하는 동시에 0.37-0.39nm(단사 형태)의 평면 간격을 보장하기 위해 450°C 미만입니다. CVD 의 HCl 부산물은 가성 흡수(NaOH 용액, 농도 1 mol/L)로 처리되며, PVD 는 진공 펌프의 정기적인 유지 보수가 필요합니다(비용 약 US\$500/시간).

기상 증착 방법의 장점은 광촉매 (메틸 오렌지의 분해 효율 >90 %), 전기 변색 (착색 효율 >60cm² / C) 및 센서 (NO₂ <0.1 ppm)의 요구 사항을 충족하는 높은 필름 두께 정확도 (편차 <5 nm) 및 다양한 형태 (다공성, 나노 와이어, 고밀도 필름)로 고순도 (>99.999 %) WO₃ 필름을 제조 할 수 있다는 것입니다. 이 공정은 유연하고, 복잡한 기관(예: 곡면 유리)에 증착할 수 있으며, 대규모 코팅(증착 면적 > 1m²)에 적합합니다. CVD 장비는 저렴하지만(세트당 약 \$100,000) PVD 는 더 높은 순도와 균일성을 제공합니다. 그러나 단점으로는 높은 에너지 소비(필름 제곱미터당 CVD 약 1kWh 및 PVD 약 2kWh)와 진공 시스템의 복잡한 유지 관리(연간 비용 약 \$5,000)가 있습니다. 전구물질(예: WCl₆, 가격 약 US\$200/kg) 및 배기 가스 처리 비용 증가(약 US\$50/m²). 증착 속도가 느리고(CVD 10-50 nm/min, PVD 1-10 nm/min) 후막 준비(>5 μm)에 적합하지 않습니다. 이 방법은 스마트 유리(광 투과율 변화>75%) 및 광촉매 코팅 분야에서 유망한 미래를 가지고 있지만 비용 절감을 위해 전구체 효율을 최적화할 필요가 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.3 황색 삼산화 텅스텐의 새로운 제조 방법 - 생물학적 템플릿 방법

생물학적 주형법은 자연의 생물학적 구조(예: 식물, 박테리아 또는 단백질)를 주형으로 사용하여 WO₃ 나노 구조의 성장을 안내하는 친환경 제제 기술입니다. 이 방법은 환경 친화성, 독특한 형태 및 저렴한 비용으로 유명하며 나노 물질 설계를 위한 생물학적으로 영감을 받은 혁신 경로를 제공합니다.

biotemplate 방법의 원리는 텅스텐 전구체의 증착 및 WO₃로의 전환을 유도하는 생체 물질의 다단계 공극 또는 표면 화학을 기반으로 합니다. 일반적으로 사용되는 주형에는 셀룰로오스(예: 여과지, 목재), 단백질(예: 박테리아 외막) 또는 다당류(예: 키토산)가 포함됩니다. 셀룰로오스 주형을 예로 들면, 텅스텐 산 나트륨 (Na₂WO₄) 용액을 주형에 함침시키고 WO₄²⁻를 수소 결합 또는 정전기 작용에 의해 섬유 표면에 흡착 한 다음 열처리 (300-500 °C)에 의해 WO₃로 전환하십시오 : Na₂WO₄ + 2HCl → H₂WO₄ + 2NaCl, H₂WO₄ → WO₃ + H₂O. 템플릿은 열처리 중에 부분적으로 또는 완전히 연소되어 나노 튜브 (50-200 nm 직경), 다공성 네트워크 (100-500 nm 공극 크기) 또는 나노 시트 (10-50 nm 두께)와 같은 템플릿의 형태를 복제하는 WO₃를 남깁니다. 그 결과 WO₃는 일반적으로 특정 표면적이 50-150m²/g 인 단사정입니다.

프로세스는 템플릿 선택으로 시작됩니다. 셀룰로오스 여과지(50-70% 다공성) 또는 박테리아(예: 대장균, 세포 크기 1-2μm)를 세척하고(탈이온수, pH 7) 건조(60°C, 6h)했습니다. 템플릿을 0.05-0.2 mol/L Na₂WO₄ 용액(pH 2-4, HCl 조정)에 담그고 25-50°C 에서 1-12 시간 동안 흡착하여 균일한 WO₄²⁻ 분포를 보장했습니다. 함침 후, 템플릿을 탈 이온수로 가볍게 세척하고 건조 (80 °C, 4 시간)하고 머플 퍼니스에 넣고 300-500 °C 의 공기 중에서 1-3 시간 동안 열처리합니다. 열처리는 공극 또는 주형 표면에서 주형 붕괴 및 WO₃ 핵 형성을 피하기 위해 느린 온도 상승 (2-5 °C / 분)을 필요로 합니다. 냉각 후 생성물을 분쇄 또는 초음파로 분산시키고 형태(예: 다공성 40-60%), 비표면적 및 결정 형태(0.38nm 평면 간격의 단사정)를 투과전자현미경(TEM), BET 비표면적 분석 및 XRD 로 특성화했습니다. 템플릿 잔여물을 제거해야 하는 경우 묽은 산(0.1 mol/L HCl) 또는 확장 열처리로 세척할 수 있습니다.

주요 매개변수의 최적화는 WO₃ 지형 및 성능에 매우 중요합니다. 템플릿 다공성은 WO₃ 구조에 영향을 미치고, 셀룰로오스(다공성>50%)는 다공성 WO₃를 형성하고, 박테리아(다공성<20%)는 나노 입자(20-50nm)를 형성합니다. 0.1-0.2 mol/L 의 전구체 농도가 필요하며, 너무 높으면(>0.5 mol/L) 기공이 막히고, 너무 낮으면(<0.05 mol/L) 수율(<70%)이 감소합니다. 함침 시간은 6-12 시간으로 조절되며, 너무 짧으면(<2 시간) 흡착이 불충분하고, 너무 길면(> 24 시간) 비용이 증가합니다. 열처리 온도는 다형체 및 주형 제거율을 결정하고 단사정 형태 WO₃(비 표면적 100-150 m² / g)는 400 °C 에서 생성되고 입자는 500 °C 이상에서 (>200 nm, 비 표면적 <50 m² / g)로 자랍니다.pH 2-4 가 필요하며 너무 높으면 (>5) WO₄²⁻ 흡착을 억제합니다. 너무 낮음(<1)은 템플릿 구조를 파괴합니다(예: 셀룰로오스 분해). 열처리 분위기는 거꾸집의 완전한 연소를 보장하기 위해 산소가 풍부해야 합니다(O₂>20%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

생물학적 템플릿 방법의 장점은 환경 친화적이고 거푸집 공사가 대부분 재생 가능한 자원 (예 : 목재, 박테리아)이며 비용이 저렴하다는 것입니다 (WO_3 킬로그램 당 약 10-20 달러). WO_3 는 독특한 형태와 다공성 구조 (비 표면적 $50-150m^2/g$)를 가지고 있으며, 이는 광촉매 (로다 민 B 의 분해 효율 $>95\%$) 및 배터리 양극 (비용량 $>700\text{ mAh/g}$)에서 우수한 성능을 발휘합니다. 공정은 완만하고(열처리 $< 500^\circ\text{C}$) 에너지 소비가 적습니다($\text{kg } WO_3$ 당 약 200 kWh). 템플릿은 다양한 출처에서 제공되며 나노 튜브, 시트 또는 메쉬 WO 를 설계하도록 사용자 정의 할 수 있습니다. 그러나 단점으로는 복잡한 템플릿 준비(예: 박테리아 배양의 경우 24-48 시간, 약 $\$50/L$ 의 비용)가 있습니다. 수율이 낮은($60-80\%$) 이유는 일부 텅스텐 전구체가 템플릿과 함께 연소되기 때문입니다. 형태학의 일관성은 템플릿의 품질(편차 $> 20\%$)에 따라 달라지며 스케일 업 생산을 표준화해야 합니다(예: 셀룰로오스의 다공성은 $\pm 5\%$ 로 제어됨). 열처리 중에 탄소 불순물($< 1\%$ 중량%)이 남아 있을 수 있으며 추가 정제가 필요할 수 있습니다. 이 방법은 광촉매 및 에너지 저장 재료 분야에서 큰 잠재력을 가지고 있지만 경제성을 개선하기 위해 템플릿 회수를 최적화해야 합니다.



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

Chapter 7 황색 삼산화 텅스텐 생산 설비

황색 삼산화 텅스텐으로도 알려진 황색 삼산화 텅스텐 (WO₃)은 중요한 기능성 물질로서 촉매, 광전자, 감지 및 에너지 저장 분야의 광범위한 응용 분야에서 많은 주목을 받고 있습니다. 생산 장비의 선택 및 최적화는 제품 품질, 프로세스 효율성 및 생산 비용을 직접 결정합니다. 이 장에서는 고온 고체상 반응법을 핵심으로 하는 황색 삼산화 텅스텐의 생산 설비에 초점을 맞추고, 주요 장비의 기능, 구조, 작동 지점 및 기술적 특성에 대해 자세히 논의하며, 특히 원료 가공 단계에서 크러셔 및 볼 밀을 분석하고, 산업 생산 및 장비 선택에 대한 심층적인 참조를 제공합니다.

7.1 고온 고체상 반응 방법에 의한 황색 삼산화 텅스텐 제조를 위한 핵심 장비

고온 고체상 반응 방법은 텅스텐 산 (H₂WO₄) 또는 파라 텅스텐 암모늄 ((NH₄)₂WO₄ 고온 로스팅에 의한 APT) 및 기타 고체 공급 원료를 WO₃로 변환하는 황색 삼산화 텅스텐의 제조를 위한 전통적인 주류 기술입니다. 장비에 대한 공정의 요구 사항은 원료 전처리, 반응 제어 및 제품 후처리의 세 가지 링크에 집중되어 있으며, 원료 처리 장비의 성능이 후속 반응 효율과 제품 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 핵심 장비에는 원료 가공 장비, 고온 반응 장비(예: 머플로, 회전로) 및 후처리 장비(예: 스크리닝 기계, 그라인더)가 포함됩니다. 다음은 원료 가공 장비의 크러셔 및 볼 밀 분석에 중점을 두고 황색 삼산화 텅스텐 생산에서 그 역할, 기술 매개 변수 및 최적화 전략을 설명합니다.

7.1.1 원료 취급 장비

고온 고체상 반응에 의해 황색 삼산화 텅스텐을 제조하는 과정에서, 원료 처리는 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산 또는 APT 와 같은 원료를 반응에 적합한 입자 크기 및 균질 상태로 전환하는 것을 목표로하는 공정의 시작점입니다. 원료의 입자 크기는 일반적으로 1-10 μm 로 제어되어 일관된 반응 역학과 WO_3 결정의 품질을 보장합니다. 원료 취급 장비에는 주로 분쇄기와 볼 밀이 포함되며, 이는 함께 작동하여 벌크 또는 거친 입상 원료를 점진적으로 정제하는 동시에 입자 분포의 불순물 제어 및 균일성을 보장합니다.

7.1.1.1 크러셔

크러셔는 황색 삼산화 텅스텐 생산에서 가공하는 원료의 첫 번째 라인으로, 덩어리 또는 더 큰 입자 (센티미터 수준)에서 밀리미터 수준으로 초기 원료 (예 : 텅스텐 산 침전, APT 결정화 또는 회수 된 텅스텐 재료)를 분쇄하는 데 사용되며 후속 볼 밀링에 적합한 공급 입자 크기를 제공합니다. 크러셔의 선택은 원료의 전처리 효율과 다운스트림 공정의 부드러움에 직접적인 영향을 미칩니다.

황색 삼산화 텅스텐 생산에서 일반적으로 사용되는 크러셔 유형에는 조 크러셔, 해머 크러셔 및 롤 크러셔가 포함되며, 그 중 조 크러셔는 구조가 간단하고 유지 보수가 편리하며 처리 능력이 강하기 때문에 가장 인기가 있습니다. 조 크러셔는 움직이는 죠와 고정 죠의 상대적인 움직임을 통해 원료를 압출하며, 일반적인 모델(예: PE-250×400)은 50-200mm 의 입자 크기와 5-20mm 의 출력 입자 크기로 원료를 처리할 수 있습니다. 작동 원리는 기계적 힘 분쇄를 기반으로 하며, 모터는 편심 샤프트를 구동하여 움직이는 턱을 주기적으로 움직이게 하고, 원료는 분쇄 챔버에서 압착, 분할 및 파손됩니다. 장비의 주요 구성 요소에는 죠 플레이트(고망간강, 경도 HB 200-300), 프레임(주강, 압축 강도 >600MPa) 및 플라이휠(관성 균형 및 진동 감소)이 포함됩니다. 황색 삼산화 텅스텐 원료의 특성에 적응하기 위해 내마모성 코팅 (예 : 텅스텐 카바이드 코팅, 경도 HRC 60-70)이 턱 플레이트 표면에 자주 사용되어 철 불순물 ($\text{Fe} < 50 \text{ ppm}$)을 줄이고 WO_3 순도 (>99.9 %)를 보장합니다.

작업 공정은 원료의 전처리로 시작됩니다. 텅스텐 산 또는 APT 공급 원료는 일반적으로 10-100mm 의 블록 크기와 <5 %의 수분 함량으로 결합 방지를 위해 건조 또는 결정화 공정에서 출력됩니다. 원료는 진동 피더 (주파수 10-20 Hz)를 통해 분쇄기 입구에 고르게 공급되고 분쇄기 속도 (200-400 rpm)는 원료의 경도에 따라 조정됩니다 (텅스텐 산염의 모스 규모에서 약 3-4) 배치 당 5-10 분의 분쇄 시간. 출력 입자는 벨트를 통해 스크린(5-10mm 공극)으로 운반되고 대형 입자는 2 차 처리를 위해 분쇄기로 반환됩니다. 분쇄 된 원료의 입자 크기 분포는 $D_{50} = 5-15 \text{ mm}$ 로 제어되며 균일 성 편차는 볼 밀의 공급 요구 사항을 충족시키기 위해 <20 %입니다. 장비의 작동에는 먼지 제거 시스템 (예 : 효율 >99 %)이 장착되어 먼지 (농도 < 10 mg / m^3)를 포집하고 텅스텐 재료 손실 (<0.5 %) 및 환경 오염을 방지합니다.

주요 매개변수의 최적화는 파쇄 효과에 매우 중요합니다. 공급 입자 크기는 < 150mm 여야 하며 너무 크면(>200mm) 장비에 과부하가 걸리거나 죠 플레이트가 마모될 수 있습니다(수명 < 6 개월). 파쇄 간격은 출력 입자 크기가 볼 밀링($D_{90} < 20\text{mm}$)에 적합하도록 3-10mm 로 조정됩니다. 모터 출력(15-30kW)은 용량(1-5t/h)과 일치해야 하며, 너무 낮으면

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

효율이 감소하고(<80%) 에너지 소비가 너무 높게 증가합니다(약 50kWh/t). 공급 속도는 0.5-2 t/h 로 제어되며, 이는 막힘으로 이어지고 연속성에 영향을 줄 수 있습니다. 조플레이트 재료는 유지 보수 빈도(3-6 개월마다 교체)를 줄이기 위해 내마모성이 높아야 합니다(예: Mn13Cr2, 마모율 < 0.1mm/1000h). 황색 삼산화 텅스텐 생산을 위해 맞춤형 된 분쇄기의 내벽에는 폴리 테트라 플루오로 에틸렌 (PTFE, 마찰 계수 < 0.1)을 배치하여 금속 오염 (Fe<20ppm)을 더욱 줄일 수 있습니다.

크러셔의 장점은 단일 장치 용량이 1-10 t/h로 대규모 생산 (연간 > 1000 t WO₃)에 적합한 높은 처리 용량입니다. 구조가 간단하고 유지 보수 비용이 낮고(연간 단위당 약 1000 달러) 작동이 안정적이며 고장률이 <2%입니다. 장비 투자는 온건하며 (약 5,000-10,000 달러 / 세트) 텅스텐 산, APT 및 재활용 재료와 같은 다양한 원료에 적합합니다. 그러나 단점은 거친 출력 입자 크기(>1mm)로 고온 반응(1-10μm)의 요구 사항을 직접 충족하지 못하고 불 밀과 함께 사용해야 한다는 것입니다. 과쇄 공정 중에 미량 금속 불순물(Fe, Cr 약 10-50ppm)이 유입될 수 있으며, 이는 자기 분리(자기장 강도 >1 T) 또는 산세(0.1 mol/L HCl)로 제거해야 합니다. 높은 에너지 소비(30-60kWh/t), 특히 고경도 재연삭(Mohs >5)으로 작업할 때. 소음(80-100dB)에는 방음(<60dB 로 감소)이 필요합니다.

7.1.1.2 불 밀

불 밀은 황색 삼산화 텅스텐 생산의 원료 가공에서 두 번째 핵심 장비로, 고온 고체의 입자 크기 및 균일 성 요구 사항을 충족하기 위해 분쇄 된 밀리미터 입자를 마이크론 규모 (1-10 μm)로 더욱 정제하는 데 사용됩니다. 불 밀의 성능은 WO₃ 결정의 형성 역학과 최종 제품의 비 표면적에 직접적인 영향을 미칩니다.

불 밀은 연삭 매체(예: 세라믹 볼 또는 강철 볼)를 구동하여 원료와 충돌하고 실린더를 회전시켜 정제를 달성하기 위해 연삭합니다. 황색 삼산화 텅스텐의 생산에서 유성 불 밀 또는 수평 불 밀이 일반적으로 사용되며, 유성 유형은 고효율 및 미세 연삭 용량으로 인해 실험실 및 중소 규모 생산 (<1 t / 배치)에 더 적합하며 수평 불 밀은 산업화 (>5 t / 배치)에 적합합니다. 유성 불 밀 (QM-3SP4 유형)의 경우, 작동 원리는 메인 디스크 (300-600 rpm)에서 밀 포트의 회전과 메인 디스크 (150-300 rpm)의 회전을 기반으로 하여 원심력 및 마찰력을 생성하며 원료는 세라믹 볼 (지르코니아, 직경 5-10mm, 경도 HRC 85-90). 공장의 주요 구성 요소에는 연삭 탱크(지르코니아 또는 스테인리스강, 0.5-5L 용량), 연삭 볼(10:1-20:1 볼 비율) 및 구동 모터(1-5kW)가 포함됩니다. 불순물에 의한 오염을 방지하기 위해 지르코니아 재료(ZrO₂, 순도 > 99.5%)는 Fe 및 <Al 과 같은 불순물이 10ppm 이 되도록 하는 항아리 및 연삭 볼을 분쇄하는 데 자주 사용됩니다.

작업 프로세스는 원료를 적재하는 것으로 시작됩니다. 분쇄 된 텅스텐 산 또는 APT (D50 = 5-15 mm)는 스크류 피더 (속도 0.1-0.5 t / h)를 통해 분쇄기에 공급되고 탈 이온수 또는 에탄올이 습식 분쇄 매체 (고체-액체 비율 1 : 1-1 : 2)로 첨가되어 응집을 줄이고 분쇄 효율 (수율 >95 %)을 향상시킵니다. 불 충전 속도는 목표 입자 크기(D50=1-10μm)에 따라 30-50%, 회전 속도는 400-600rpm, 연삭 시간은 4-12 시간으로 제어되었습니다. 분쇄 후 슬러리는 진공 여과 또는 원심 분리(3000-5000rpm)로 분리되고 고형물을 80-100°C 에서 6-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12 시간 동안 건조하여 마이크론 크기의 분말을 얻습니다. 건조 된 분말은 큰 입자 (<5 %)를 제거하기 위해 초음파 체 (10-20 μm 체 구멍)됩니다. 연삭 공정에는 과열 및 APT 분해(>150°C)를 방지하기 위해 냉각 시스템(수냉식, 온도 < 50°C)이 장착되어야 합니다. 레이저 입도 분석기와 SEM 으로 입도 분포(D90<15 μm) 및 형태를 검출하고, 적격성 평가 후 고온로에 제품을 보냈습니다.

주요 매개변수의 최적화는 연삭 결과를 결정합니다. 연삭 볼의 직경은 5-10mm 여야 하며 너무 크면(>15mm) 정제가 불충분하고(D50>10 μm) 너무 작으면(<3mm) 효율성이 저하됩니다(연삭 시간 > 24 시간). 펠릿 대 재료 비율은 10:1-15:1 로 제어되며, 너무 높으면(>20:1) 마모가 증가하고(ZrO<0.01 wt%), 너무 낮으면(<5:1) 연삭 시간(>12 시간)이 증가합니다. 400-600rpm 의 회전 속도가 필요하며, 너무 높으면(>800rpm) 진동(진폭 >2mm)이 발생하고 발열이 발생하며, 너무 낮으면(<300rpm) 연삭 효율(<70%)이 낮아집니다. 에탄올(순도>99.5%)은 응집(입자 분산>90%)을 줄일 수 있지만 비용은 더 높습니다(약 \$2/L). 물레방아는 저렴하지만(< \$0.1/L) 텅스텐 산 용해를 피하기 위해 pH 6-8 을 제어해야 합니다. 분쇄 시간은 대상 입자 크기와 관련이 있으며 6 시간에 D50 = 5 μm , 12 시간에 D50 = 1 μm 에 도달하지만 너무 길면 (> 24 시간) 불순물 (Zr<20 ppm)이 발생할 수 있습니다. 분쇄 용기 재료는 WO₃ 순도(>99.9%)를 보장하기 위해 높은 내마모성(ZrO₂ 마모율 <0.005g/h)이 있어야 합니다.

볼 밀의 장점은 원료의 효율적인 정제, 1-10 μm 의 입자 크기의 정확한 제어, 높은 균일성(D90/D10<3) 및 고온 반응 요구 사항(비표면적 10-20m²/g)입니다. 이 장비는 고정밀 연삭 (0.1-100 kg / 배치)의 작은 배치와 고용량 (1-10 t / 배치)을 지원하는 수평 볼 밀에 적합한 유성 볼 밀로 유연합니다. 안정적인 작동과 간단한 유지 보수 (연간 약 2000 달러 / 단위). 그러나 단점은 더 높은 에너지 소비(100-200kWh/t)와 습식 연삭을 위한 추가 건조 단계(50kWh/t)입니다. 마모는 미량의 불순물(약 5-20ppm Zr, Fe)을 유발할 수 있으며 자기 분리(자기장 > 1.5T) 또는 산세(0.05 mol/L HNO₃)로 제거해야 합니다. 분쇄 시간(4-12 시간)이 길기 때문에 빠른 생산에 적합하지 않습니다. 소음(70-90dB)에는 음향 인클로저가 필요합니다.

7.1.2 성형 장비

황색 삼산화 텅스텐의 생산에서, 성형 장비는 정제 된 분말 원료를 특정 강도와 형상을 가진 녹색 몸체로 가공하여 고온 반응을 위한 안정적인 물리적 형태를 제공하는 역할을 합니다. 고온 고체상 반응 방법은 가스(예: 수증기, 암모니아)의 원활한 방출을 보장하고 소성 중 녹색체의 균열을 방지하기 위해 원료체가 적절한 밀도(2-4g/cm³)와 다공성(20-40%)을 가져야 합니다. 성형 장비에는 정제 프레스, 과립 기 및 압출기가 포함되며, 그 중 정제 프레스는 쉬운 작동, 높은 성형 정확도 및 강한 적응성으로 인해 황색 삼산화 텅스텐 생산에 일반적으로 사용되는 성형 장비가 되었으며, 특히 플레이크 또는 작은 블록의 준비에 적합합니다.

7.1.2.1 타블렛 프레스

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정제 프레스는 텅스텐 산 (H_2WO_4) 또는 과라 텅스텐 산 암모늄 ($(NH_4)_2WO_4$, APT) 분말을 일반 블랭크로 형성하는 데 사용되는 기계적 또는 유압을 통해 분말 원료를 플레이크 또는 블록으로 누르는 장비의 일종으로, 고체상 반응을 위해 고온 용광로에 적재하는 데 편리합니다. 정제 프레스의 성능은 녹색체의 밀도, 강도 및 반응 효율에 직접적인 영향을 미치며 고온 고체상 반응 방법에서 없어서는 안 될 장비입니다.

정제 프레스의 작동 원리는 고압에서 분말의 소성 변형과 입자의 재구성을 기반으로 합니다. 황색 삼산화 텅스텐의 생산에는 단일 프레스가 자주 사용되며 단일 프레스는 실험실 및 소량 생산 (< 100kg / 배치)에 적합하며 로터리 프레스는 산업화 (>1 t / 배치)에 적합합니다. 단일 프레스(예: TDP-5 유형)의 경우 구조는 호퍼, 다이(고강도 강철로 제작, HRC 55-60 으로 제작된 펀치 및 캐비티), 압력 시스템(유압 또는 기계, 압력 10-100MPa) 및 구동 모터(동력 1-5kW)로 구성됩니다. 분말은 호퍼를 통해 금형 캐비티로 들어가고 펀치는 압력(20-50 MPa)을 가하여 분말을 본체로 압축하고 본체의 두께(2-10mm)와 직경(5-50mm)은 금형의 크기에 따라 결정됩니다. 형성 후 녹색 몸체는 푸셔 장치를 통해 분출되어 수집 시스템으로 들어갑니다. 불순물에 의한 오염을 피하기 위해 금형 표면은 종종 크롬 도금 (Cr 코팅, 두께 10-20 μm , 경도 HRC 65) 또는 스테인리스 강 (316L, Fe 방출 < 10 ppm)으로 WO_3 순도 (>99.9%)를 보장합니다.

이 과정은 원료 준비로 시작됩니다. 분쇄 후 텅스텐 산 또는 APT 분말 ($D_{50} = 1-10 \mu m$, 수분 함량 < 2 %)을 진동 체 (체 구멍 20-50 μm)에 통과시켜 응집 입자를 제거하고 유동성 (안식 각도 < 40 °)을 보장합니다. 분말에 소량의 바인더(예: 폴리비닐 알코올 PVA, 0.5-2wt%)를 첨가하여 녹색체의 강도(압축 강도 > 5MPa)를 높일 수 있지만 열처리 중에 완전히 휘발성(<400°C)인지 확인해야 합니다. 분말은 스크류 피더(속도 0.1-0.5kg/min)를 통해 호퍼에 고르게 공급되고 호퍼의 내벽은 폴리테트라플루오로에틸렌(PTFE, 마찰 계수 < 0.1)으로 코팅되어 달라붙는 것을 방지합니다. 정제 프레스 금형을 사전 세척하고(에탄올 닦기, 잔류 < 1mg/cm²), 압력을 20-40MPa로 조정하고, 압착 시간을 0.5-2초/개, 녹색 본체의 밀도를 2.5-3.5g/cm³로 제어했습니다. 형성된 물체를 컨베이어 벨트에 모아 외관(균열 없음, 가장자리 무결성 비율>95%) 및 치수(편차 < 0.1mm)를 검사합니다. 정규화되지 않은 녹색 물체(밀도 < 2g/cm³)는 파쇄로 되돌려 보내고 다시 압착됩니다. 프레스 공정에는 먼지 농도(<5mg/m³)를 제어하고 텅스텐 손실(<0.2%)을 방지하기 위해 환기 시스템(풍량 500-1000m³/h)을 장착해야 합니다.

주요 매개변수의 최적화는 녹색 물체의 품질에 매우 중요합니다. 가압 압력은 20-50 MPa 이어야 하며 너무 낮 으면 (<10 MPa) 녹색 몸체가 느슨해지고 (다공성 >50 %) 소성 (수율 < 90 %)에서 파편화되기 쉽습니다. 너무 높으면(>60MPa) 다공성(<10%)이 감소하고 가스 방출을 방해하며 녹색 물체가 팽창하거나 균열됩니다(스크랩 비율 >5%). 분말의 입자 크기는 1-10 μm 로 제어되며, 너무 크면(>20 μm) 고르지 않은 성형(밀도 편차 >10%)이 발생하고, 너무 작으면(<0.5 μm) 먼지 날림(>1% 손실)이 증가합니다. 금형의 크기는 직경이 10-30mm 이고 두께가 3-8mm 인 녹색 몸체의 목적과 일치해야 합니다. 직경 >50mm 는 텅스텐 분말의 원료로 사용됩니다. 바인더 투여 량은 0.5-1 중량 %로 제어되며 너무 높으면(>3 중량%) 열처리에서 탄소(>0.1 중량%)가 남아 WO_3 (<99.9%)의 순도에 영향을 미칩니다. 프레스 속도(10-60 개/분)는 효율성과 품질의 균형을 맞춰야 하며, 너무

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

빠르면(>100 개/분) 마모(수명 < 6 개월)가 발생할 수 있습니다. 금형 재료는 녹색 분체(Ra<0.5μm)의 표면 마감을 보장하기 위해 내마모성이 높아야 합니다(예: GCr15 강철, 마모율 <0.01mm/1000h).

타블렛 프레스의 장점은 높은 성형 정확도, 녹색 물체의 균일한 밀도(편차 <5%), 제어 가능한 크기(오차 < 0.1mm) 및 고온 반응(다공성 20-40%)에 대한 녹색 물체 구조의 요구 사항 충족입니다. 이 장비는 작은 배치(10-100 kg/h)를 위한 단일 프레스와 높은 처리량(0.5-2 t/h)을 위한 로터리 프레스로 작동이 쉽습니다. 투자 비용은 적당하고(단일 플러싱의 경우 단위당 약 2,000-5,000 달러, 회전식 경우 단위당 약 2-50,000 달러), 유지 보수 비용도 낮습니다(연간 단위당 약 500-1,000 달러). 적재 및 운반이 용이한 높은 본체 강도(압축 강도 5-10MPa), 먼지 오염 감소(배출 < 5mg/m³). 그러나 단점은 분말 유동성으로 인한 프레스 속도의 제한(40° 안식 각도에서 효율 <80%)과 비용 증가(약 \$10/kg PVA)를 증가시키기 위해 바인더를 추가해야 하는 필요성입니다. 높은 압력은 금형 마모(3-6 개월마다 교체, 세트당 약 \$100)로 이어질 수 있으며 미량 금속 오염(Fe, Cr<20ppm)은 자기 분리(자기장>1T) 또는 산세(0.05 mol/L HNO₃)로 제거할 수 있습니다. 에너지 소비가 높고(단일 플러싱의 경우 0.5-1kWh/t, 회전식 경우 2-5kWh/t) 초미세 분말(<0.5μm) 성형에 적합하지 않습니다. 황색 삼산화 텅스텐의 생산에서, 정제 프레스는 녹색 분말(WO₃ 수율 >95 %)의 안정성과 반응 효율을 보장하고, 촉매 지지체 (비 표면적 10-20 m² / g) 및 텅스텐 분말 원료 (순도 >99.9 %)에 대한 신뢰성있는 지지를 제공합니다.

7.1.3 고온 소결 장비

고온 소결 장비는 텅스텐 생산의 핵심이며 원료 (예 : H₂WO₄ → WO₃ + H₂O) 및 결정화 (예 : 비정질 WO₃ 에서 단사정 결정 형태로)의 분해를 촉진하는 안정적인 고온 환경을 제공하는 데 사용됩니다. 이 장비는 고온 (최대 900 ° C), 내식성 (NH₃, H₂O 에 대한 내성) 및 높은 신뢰성 (5000 시간의 연속 작동 > 요구 사항을 충족시키는 동시에 품질 (불순물 < 50ppm) 및 수율 (>95 %)을 보장해야 합니다. 고온로는 소결 장비의 주력이며 온도 제어 시스템과 결합되어 정밀한 공정 관리를 달성하여 소규모 실험실 테스트(<1kg/배치)에서 산업 대량 생산(>1t/배치)에 적합합니다.

7.1.3.1 고온로

고온로는 고온 고체 반응 방법으로 황색 삼산화 텅스텐을 제조하기 위한 핵심 소결 장비로, 전기 가열 또는 가스 가열을 통한 원료 분해 및 WO₃ 결정화를 위한 고온 환경을 제공합니다. 설계는 온도 균일 성, 분위기 제어 및 에너지 효율 최적화를 고려하여 WO₃ 의 결정 형태 (단사정, 직교) 및 입자 크기 (0.1-10 μm)가 응용 분야 (예 : 촉매, 텅스텐 분말 공급 원료)의 요구 사항을 충족하는지 확인해야 합니다.

고온로의 작동 원리는 전기 발열체(예: 실리콘 탄소 막대, 몰리브덴 와이어) 또는 가스 버너에 의해 전기 또는 화학 에너지를 열 에너지로 변환하여 용광로를 400-800°C 로 가열하고 원료의 고체상 반응을 유도하는 것을 기반으로 합니다. 텅스텐의 생산에서는 머플 용광로, 회전식 관로 및 푸시 플레이트로가 일반적으로 사용됩니다. 머플로는 실험실

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

및 소량 생산(0.1-10kg/배치)에 적합하고, 회전식 관로는 연속 과일릿(50-500kg/h)에 적합하며, 푸시 플레이트로는 대규모 생산(>1t/h)을 지원합니다. 머플로(SX2-10-12 형)의 경우 노 본체(냉연강 셸, 내열성 > 200°C), 용광로 챔버(알루미나 섬유, 열전도율 < 0.2 W/m·K), 발열체(실리콘 탄소 막대, 최대 온도 1400°C), 도가니(알루미나, 순도 > 99.5%) 및 배기 시스템(내식성 파이프, NH₃에 내성). 용광로 크기(0.01-0.5m³)는 용량에 따라 설계되었으며 내벽은 내화물(예: ZrO₂ 코팅, 내열성 > 1000°C)으로 코팅되어 오염(Fe, Al < 20ppm)을 줄입니다. 반응하는 동안, 원료 (밀도 2.5-3.5 g / cm³)를 도가니에 넣고 공기 또는 산소 분위기 (O₂>20 %)에서 가열하여 WO₃ (수율 >95 %)를 생성한다.

프로세스는 로딩으로 시작됩니다. 형성된 텅스텐 산 또는 APT 본체 (직경 10-50 mm, 두께 3-10 mm)를 트레이 또는 자동 컨베이어를 통해 용광로 챔버에 고르게 배치하고 충전 밀도를 0.5-1 kg / L로 제어하여 축적으로 인한 불균일 한 열전도 (> 10 °C의 온도 편차)를 방지합니다. 퍼니스 챔버를 100-200 °C (가열 속도 5 °C / 분)로 예열하여 잔류 수분 (<1 wt %)을 제거한 다음 5-10 °C / 분에서 500-700 °C로 예열하고 2-4 시간 동안 배양합니다. 반응하는 동안 용광로의 산소 유량(0.1-1L/min)은 완전한 산화(WO₂ 함량 <0.1%)를 보장하기 위해 유량계(±1% 정확도)에 의해 조절됩니다. 분해에 의해 생성된 NH₃ 및 H₂O는 배기 시스템(100-500 m³/h)에 의해 내보내지고 묽은 산 흡수탑(H₂SO₄, 0.5 mol/L)으로 처리됩니다(NH₃ 제거율 >98%). 소결 후, 용광로 챔버를 3-5 °C / min의 실온으로 냉각하고, WO₃ 생성물을 수집하고, 결정 형태 (단사정, 평면 간격 0.38 nm), 입자 크기 (D50 = 1-5 μm) 및 순도 (>99.9 %)를 X 선 회절 (XRD), 주사 전자 현미경 (SEM) 및 유도 결합 플라즈마 (ICP-MS)에 의해 검출했다. 부적격 제품(결정 형태 편차 >5%)은 연삭 및 재소결을 위해 반환됩니다.

주요 매개변수의 최적화는 WO₃ 품질에 매우 중요합니다. 소결 온도는 500-700°C에서 정밀하게 제어해야 하며, 촉매에 적합한 미세 입자(0.1-1μm, 비표면적 10-20m²/g)가 500-600°C에서 생성됩니다. 더 큰 입자 (5-10 μm, 비 표면적 <10 m² / g)는 텅스텐 분말 공급 원료의 경우 700 °C에서 생성됩니다. 온도 편차는 <±5°C가 되어야 하며, 너무 많으면(>±10°C) 고르지 않은 결정 형태(단사정/직교 혼합 속도 > 10%)가 발생합니다. 유지 시간은 2-4 시간으로 제어되는데, 이는 너무 짧고(<1 시간) 불완전한 분해(H₂WO₄ 잔류물>1 wt%)를 유발하고, 너무 길면(>6 시간) 입자 응집(D50>10 μm)을 유발합니다. 산소의 분압은 0.2 기압 >이어야 하며, 그 이하에서는 저가 산화물(예: W₁₈O₄₉, > 0.5%)이 생성될 수 있습니다. 녹색 전하의 두께 < 50mm 이고 너무 두꺼우면(>100mm) 중앙 영역이 덜 반응합니다(수율 < 90%). 퍼니스 챔버의 열전도율은 에너지 효율(열 손실 < 10%)을 보장하기 위해 0.3W/m·K로 <해야 합니다. 환경 보호 표준(GB 16297-1996)에 따라 NH₃ 배출량이 5mg/m³가 < 않도록 배기 가스 처리 효율은 >98%가 되어야 합니다.

고온 용광로의 장점은 넓은 온도 범위(200-1400°C)와 광범위한 원료(텅스텐산염, APT, 재활용물) 및 결정 형태 요구 사항(단사정, 직교)에 대한 적응성입니다. 이 장비는 높은 안정성(연속 작동 > 5000 시간, 고장률<1%), 높은 수율(>95%), 대량 생산(>1 t/h)에 대한 소규모 테스트(0.1kg/배치)에 적합합니다. 머플 용광로에 대한 투자는 낮으며(약 5 천만 달러에서 20,000 달러/개), 회전로와 푸시로는 연속 생산(용량 1-10t/h)을 지원합니다. WO₃는 고순도(> 99.95%)를 가지며 촉매(비표면적 > 10m²/g) 및 텅스텐 제품(불순물 < 50ppm)의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

요구 사항을 충족합니다. 그러나 단점은 더 높은 에너지 소비(머플로의 경우 500–1000kWh/t, 로터리 퍼니스의 경우 300–600kWh/t)와 최적화된 열 효율(목표 >80%)입니다. 고온으로 인해 용광로 재료가 열화될 수 있습니다(알루미나 함유 수명 < 2 년, 비용 약 \$1000/m³). 테일 가스 처리는 비용을 증가시킵니다(약 US\$ 50–100/t). 입자 크기(편차 > 20%)를 제어하기 어렵고 정확한 온도 필드가 필요합니다. 황색 삼산화 텅스텐 생산에서 고온 용광로는 효율적인 반응과 제품 품질을 보장하지만 경제성을 향상시키기 위해 에너지 소비 및 자동화를 최적화해야 합니다.

7.1.3.1 온도 제어 시스템

온도 제어 시스템은 고온로의 신경 중추로, 실시간으로 노 온도를 모니터링 및 조절하여 소결 공정의 안정성과 WO₃ 결정 형태의 정확한 형성을 보장합니다. 시스템의 성능은 온도 균일성(편차 <±5°C), 반응 효율(수율 >95%) 및 에너지 소비(<1000kWh/t)에 직접적인 영향을 미칩니다.

온도 제어 시스템의 작동 원리는 센서, 컨트롤러 및 액추에이터가 함께 작동하는 폐쇄 루프 피드백 메커니즘을 기반으로 합니다. 열전대(± 1°C의 정확도를 가진 K 또는 S형)는 센서 역할을 하여 퍼니스 온도(400–800°C)를 실시간으로 모니터링하고 신호를 프로그래밍 가능한 로직 컨트롤러(PLC, 예: Siemens S7-1200, 응답 시간 < 0.1 초)로 전송합니다. PLC는 설정된 온도 곡선(가열, 보온, 냉각)에 따라 편차를 계산하고 제어 신호를 액추에이터(예: 사이리스터 전력 조정기, 전력 조정 정확도는 ±0.5%)로 출력하고 발열체(실리콘 탄소 막대, 저항 0.1–1 Ω)의 전류(10–100A)를 조정하여 동적 온도 제어를 달성합니다. 이 시스템은 다단계 프로그램 제어(10–20 단계, 가열 속도 0.1–20°C/분)를 지원하여 반응 단계(예: APT 분해 200–400°C, WO₃ 결정화 500–700°C)로 수행되도록 합니다. 신뢰성을 높이기 위해 이 시스템에는 경보 모듈(온도 ± 10°C에서 자동 전원 끄기) 및 데이터 로깅(1년 > 보관, 샘플링 주파수 1Hz)이 장착되어 있습니다.

이 프로세스는 시스템 캘리브레이션으로 시작됩니다. 열전대는 퍼니스 챔버의 중앙과 가장자리(본체에서 50mm < 50mm)에 장착되며 표준 백금 저항(PT100, 오차 < 0.5°C)을 사용하여 검증된 ±1°C의 정확도로 보정됩니다. 온도 곡선 설정: 100–200°C(5°C/분, 30분 유지)로 예열하고, 400–600°C(5–10°C/분, 2–4시간 유지)에서 소결하고, 실온(3–5°C/분)으로 냉각합니다. 녹색 본체가 로드된 후 PLC가 시작되고 시스템이 자동으로 프로그램을 실행하고 온도 곡선이 실시간으로 표시됩니다(오차 <± 2°C). 반응하는 동안 열전대 신호가 모니터링되고(재생률 0.5 초) 편차가 5°C > 경우 전력이 자동으로 조정됩니다(5–10% 증가 또는 감소). 배기 가스 유량(0.1–1L/min)은 과압(>0.1MPa)을 피하기 위해 온도와 연결됩니다. 소결 후 시스템은 품질 추적성을 위해 데이터(온도, 시간, 전력)를 기록합니다. 제품 테스트(XRD, SEM)를 통해 결정 형태(단사정, 평면 간격 0.38nm)와 입자 크기(D50=1–5µm)가 확인되었습니다.

주요 매개변수의 최적화는 온도 제어의 효율성에 매우 중요합니다. 열전대 정확도는 1°C±이어야 하며 응답 시간이 1 초 < 너무 느리면(>2 초) 온도 지연(> 10°C의 편차)이 발생합니다. 온도 편차는 ±5°C에서 제어되며, 너무 크면(>±10°C) 고르지 않은 결정

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

형태(단사정/직교 혼합 속도>10%) 또는 수율 손실(<90%)이 발생할 수 있습니다. 가열 속도는 5-10°C/min 이며, 너무 빠르면(>20°C/min) 녹색 본체에 균열이 발생하고(스크랩 속도 >5%), 너무 느리면(<2°C/min) 사이클 시간(>6 시간)이 연장됩니다. PLC 샘플링 주파수는 동적 응답(조정 주기< 0.5 초)을 보장하기 위해 1Hz 를 >. 발열체 전력은 용광로 부피(10-50kW/m³)와 일치해야 하며, 너무 낮으면 온도 상승이 불충분하고(<400°C), 너무 높으면 에너지 소비(> 1000kWh/t)가 증가합니다. 시스템에는 단일 고장 지점(고장률 < 0.1%)을 방지하기 위해 이중화 열전대(최소 2 개의 열전대/구역)가 장착되어 있어야 합니다. 컨트롤러의 과열 또는 단락을 방지하기 위해 주변 온도(<40°C)와 습도(<80%)를 제어해야 합니다.

온도 제어 시스템의 장점은 높은 정확도 (5 ° C± 편차), 복잡한 프로세스 (다중 세그먼트 곡선, 0.1 ° C± 정확도) 및 안정적인 WO₃ 결정 형태 (단사정 비율 > 95 %)에 대한 지원입니다. 빠른 응답 속도 (<0.1 초), 원료 (텅스텐 산, APT)의 변화에 적응합니다. PLC 는 높은 신뢰성(MTBF > 100,000 시간)을 가지며 원격 모니터링(데이터 전송 지연 < 1 초)을 지원합니다. 이 시스템은 적당히 비싸고(세트당 약 \$1,000-5,000) 유지 관리가 간단합니다(연간 약 \$200). 그러나 단점은 열전대의 노후화(< 1 년, 단위당 약 \$50 의 비용)와 정기적인 교정(6 개월마다)의 필요성을 포함합니다. 복잡한 용광로(회전로)는 다점 온도 측정(5 개의 열전대 >)이 필요하여 비용(약 500 달러/포인트)이 증가합니다. 에너지 소비 최적화는 알고리즘에 따라 달라지고(PID 매개 변수 K_p=0.5-1) 디버깅이 복잡합니다(24 시간 > 소요). 황색 삼산화 텅스텐 생산에서 온도 제어 시스템은 소결의 안정성과 효율 (수율 > 95 %)을 보장하고 고순도 WO₃(>99.95 %) 및 촉매에 대한 기술 지원을 제공합니다.

7.1.4 분위기 제어 장비

대기 제어 장비는 황색 삼산화 텅스텐의 생산에 사용되어 불순물 (예 : 탄소, 황) 및 결정 결합에 의한 오염을 방지하면서 원료가 WO₃ 로 완전히 산화되도록 특정 반응 분위기를 생성 및 유지합니다. 장비는 고도의 밀폐성(누설률<0.01L/min), 정밀한 가스 흐름 제어(정확도±1%) 및 내식성(NH₃, HCl 저항)이 있어야 합니다. 대기로는 통합 가스 경로 및 용광로 설계를 통해 대기 관리를 구현하며, 가스 공급 시스템은 순수 가스를 공급하고 매개변수를 조절하여 공정 안정성과 WO₃ 품질(비표면적 5-20m²/g)을 보장합니다.

7.1.4.1 대기로

대기로는 고온 고체 반응 방법으로 황색 삼산화 텅스텐을 제조하기 위한 핵심 대기 제어 장비로, 밀폐 된 용광로 및 제어 가능한 가스 경로 시스템을 통한 원료 소결에 안정적인 산소가 풍부한 환경 (산소 농도 > 20 %)을 제공합니다. 설비는 고온 내성 (400-800 °C), 대기 균일 성 및 배기 가스 처리 능력을 고려하여 고순도 (>99.9 %) 및 WO₃ 수율 (>95 %)을 보장해야 합니다.

대기로의 작동 원리는 용광로 챔버에 있는 가스의 동적 평형을 기반으로 합니다. 용광로 챔버는 전기 가열(실리콘 탄소 막대, 최대 온도 1400°C)에 의해 500-700°C 로 가열되고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공기 또는 순수 산소(유량 0.1-5L/min)가 가스 공급 시스템에 도입되어 산소 분압 > 0.2 기압을 유지하고 원료(예: $H_2WO_4 \rightarrow$)의 산화를 촉진합니다. $WO_3 + H_2O$). 반응에 의해 생성된 NH_3 및 H_2O 는 배기구(파이프 재질 316L 스테인리스강, 내식성)를 통해 내보내지고 배기 가스는 흡수 장치(제거율 >98%)로 처리됩니다. 일반적인 유형의 분위기로에는 챔버 용광로(소규모 배치, 0.1-10kg/배치), 관형 분위기로(파일럿 규모, 10-100kg/h) 및 연속 대기로(대량 생산, > 500kg/h)가 포함됩니다. 챔버 퍼니스 (GSL-1200X 와 같은 유형)의 경우 구조는 퍼니스 본체 (이중 스틸 셸, 절연 두께 >50mm), 퍼니스 챔버 (알루미나 섬유, 열전도율 < 0.2 W / m·K), 씰링 시스템 (실리콘 O-링, 공기 누출률 <0.005 L / min), 가스 회로 (스테인레스 스틸 튜브, 내경 6-12 mm) 및 발열체 (실리콘 탄소 막대, 전력 5-20kW). 퍼니스 챔버의 내벽은 오염(Fe, Al<20ppm)을 줄이기 위해 ZrO_2 (두께 0.5-1mm, 온도 저항 > 1000°C)로 코팅되어 있습니다.

이 과정은 용광로의 준비로 시작됩니다. 퍼니스 챔버는 잔류 먼지(<1 mg/cm²)를 제거하기 위해 사전 세척(0.5 MPa 압력의 압축 공기)되고 도가니(알루미나, 순도 > 99.5%)가 성형 본체(텅스텐 산 또는 APT, 밀도 2.5-3.5 g/cm³, 두께 <50 mm)에 적재됩니다. 퍼니스 도어를 닫고 조임 상태를 확인하십시오(진공 < 10Pa, > 10 분 동안 유지). 질소(순도>99.99%, 유속 1-2L/min)를 도입하여 5-10 분 동안 공기(산소 농도<1%)를 대체했습니다. 그런 다음 가열을 시작하고 100-200°C(5°C/분)로 가열하여 물(<1wt%)을 제거한 다음 5-10°C/분에서 500-600°C 로 올리고 공기 또는 산소(유량 0.2-1L/분, 산소 농도 20-30%)를 도입하고 2-4 시간 동안 절연합니다. 반응하는 동안 배기 시스템(풍량 200-1000m³/h)에서 NH_3 및 H_2O 를 내보내고 배기 가스를 묽은 산(H_2SO_4 , 0.5 mol/L, NH_3 제거율 >98%)에 흡수했습니다. 소결 후, 용광로 챔버를 3-5 °C / min 으로 냉각하고, WO_3 를 수집 및 X 선 회절 (XRD), 주사 전자 현미경 (SEM) 및 유도 결합 플라즈마 (ICP-MS), 결정 형태 (단사정, 평면 간격 0.38 nm), 입자 크기 ($D_{50} = 1-5 \mu m$) 및 순도 (>99.9 %).

주요 매개변수의 최적화는 대기 효과에 직접적인 영향을 미칩니다. 20-30%의 산소 농도가 필요하며, 너무 낮으면(<15%)에는 저가 산화물(WO_2 함량 > 0.5%)이 발생하고, 너무 높으면(>50%) 비용이 증가합니다(산소의 경우 약 US\$ 0.5/m³). 가스 유량은 0.2-1 L/min 으로 제어되며, 너무 크면(>5 L/min) 퍼니스에 과압(>0.1 MPa)이 발생하고 너무 작으면(<0.1 L/min) 고르지 않은 대기가 발생합니다. 로 밀봉의 누출률은 산소 이용률이 > 95%가 되도록 0.005L/min <이어야 합니다. 소결 온도는 500-600 °C 이고 편차는 ± 5 °C 이며 너무 크면(± 10 °C) 고르지 않은 결정 형태가 됩니다. 배기 가스 역류 오염 생성물(NH_3 잔류물 < 10ppm)을 방지하기 위해 배출 압력은 0.01-0.05MPa 여야 합니다. 녹색 본체의 전하 밀도< 1kg/L 이고 너무 높으면(>2kg/L) 가스의 확산을 방해합니다(수율 < 90%). 가스 경로 재료는 장기적인 안정성을 보장하기 위해 부식에 강해야 합니다.

대기로의 장점은 정밀한 대기 제어 (산소 농도 편차 <5 %), 다양한 공정 (공기, 순수 산소, 질소 보호) 지원, WO_3 순도 (> 99.95 %) 및 결정 형태 안정성 (단사정 비율 >95 %)을 보장합니다. 이 장비는 실험실(0.1-10kg/배치)에 적합한 챔버 퍼니스와 대량 생산(>500kg/h)을 위한 연속 퍼니스를 통해 적응력이 뛰어납니다. 배기 가스 처리는 매우 효율적이며(NH_3 배출 <5 mg/m³) 환경 표준(GB 16297-1996)을 충족합니다. 그러나 단점으로는 높은 에너지 소비(500-1000kWh/t)와 밀봉 시스템의 복잡한 유지 관리(O-링은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 개월마다 교체되며 링당 약 \$50 의 비용)가 포함됩니다. 고온 부식으로 인해 용광로 노화가 발생할 수 있습니다(알루미나 함유 수명<2 년, 비용 약 \$1000/m³). 대기의 균일성은 가스 회로 설계에 따라 다르며 복잡한 용광로(회전로)에는 여러 번의 흡입이 필요합니다(약 \$500/포인트). 황색 삼산화 텅스텐의 생산에서, 대기로는 안정된 반응 환경을 보장하고 고품질의 WO₃ (비 표면적 10-20 m²/g)를 안정적으로 지원합니다.

7.1.4.2 가스 공급 시스템

가스 공급 시스템은 순수한 반응 가스 (예 : 산소, 공기, 질소)를 제공하고 흐름, 압력 및 조성을 정밀하게 조정하여 황색 삼산화 텅스텐 생산을 위한 안정적인 산화 분위기를 조성하는 역할을 하는 대기로의 지지 장비입니다. 시스템의 성능은 반응 효율 (수율 >95 %) 및 WO₃ 질량 (저가 산화물 <0.1 %)에 직접적인 영향을 미칩니다.

가스 공급 시스템의 작동 원리는 가스 저장, 정화 및 분배를 기반으로 합니다. 이 시스템은 가스 공급원(산소 실린더, 순도 > 99.99%, 압력 10-15MPa), 감압 밸브(출력 압력 0.1-0.5MPa, 정확도 ± 0.01MPa), 질량 유량 컨트롤러(MFC, 정확도±1%), 튜브(304 스테인리스강, 4-10mm I.D.) 및 필터(기공 크기 0.01µm, 제거율 > 99.9%). 감압 밸브를 통해 산소 또는 공기가 감압된 후 필터(수분 < 10ppm, 오일 함량 < 0.01ppm)를 통해 불순물을 제거하고 MFC 조절 유량(0.1-10L/min)에 의해 용광로 챔버로 공급합니다. 이 시스템에는 압력 센서(정확도 ±0.5kPa)와 산소 분석기(범위 0-100%, 정확도±0.1%)가 장착되어 있어 용광로 대기(산소 농도 20-30%)를 실시간으로 모니터링합니다. 안전을 위해 이 시스템은 압력 릴리프 밸브(트리거 압력 >0.6MPa)와 비상 차단 밸브(응답 시간 < 0.1 초)로 구성됩니다.

이 프로세스는 가스 검사로 시작됩니다. 산소 실린더 또는 공기 압축기 (압력 > 5 MPa)를 시스템에 연결하고 파이프 라인의 기밀성을 확인합니다 (공기 누출 율 < 0.001 L / min). 가스 순도(N₂, CO<5ppm)를 보장하기 위해 필터(3-6 개월 교체 주기)를 시작합니다. MFC 유량(0.2-1L/min)을 설정하고 노 부피(0.01-1m³)에 따라 조정하고 초기 질소 가스(1-2L/min, 5 분)를 사용하여 공기(산소 농도 <1%)를 대체했습니다. 100-200 °C 로 가열 한 후 산소 분석기로 모니터링 한 공기 또는 산소 (산소 농도 20-30 %)로 전환하십시오 (샘플링 주파수 1Hz). 반응 중에 압력은 <±5%의 유량 편차로 0.01-0.05MPa 로 유지되었습니다. 배기 가스는 배기 포트를 통해 내보내지고 시스템은 유량 및 농도 데이터(1 개월 > 저장)를 기록합니다. 반응이 끝나면 질소 가스(0.5L/min)를 사용하여 냉각시켜 과도한 산화를 방지합니다. 장비의 정기 유지 보수 (6 개월마다, 약 \$ 200 비용), 필터 및 스피 교체 (실리콘, 수명 <1 년).

주요 매개변수의 최적화는 대기 제어에 필수적입니다. 산소 유속은 0.2-1 L/min 이고, 너무 높으면(>5 L/min) 비용이 증가하고(약 US\$ 0.5/m³), 너무 낮으면(<0.1 L/min) 산화가 불충분해집니다(WO₂ 함량 > 0.5%). MFC 정확도는 ±1%가 되어야 하며 >±5%의 편차는 대기 변동(산소 농도 편차 > 10%)을 유발합니다. 가스의 순도> 99.99%, 불순물(H₂O, CO>10ppm)은 제품(C<50ppm)을 오염시킬 수 있습니다. 파이프 라인 압력은 0.1-0.5 MPa 로 제어되며, 너무 높으면 (>1 MPa) 누출 (>0.01 L / min)이 발생하고, 너무 낮 (<0.05 MPa)은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

흐름 안정성 (<90 %)에 영향을 미칩니다. 산소 분석기의 응답 시간은 <1 초로 실시간 피드백(오차 < 0.1%)을 보장합니다. 0.01 μ m< 필터 기공 크기는 MFC 의 미립자 막힘(유량 오류 >5%)을 방지합니다. 공기 회로 재료는 > 10 년의 수명을 보장하기 위해 내식성(304SS, 부식률 <0.005mm/년)이 있어야 합니다.

가스 공급 시스템의 장점은 정밀한 제어(유량 편차 <±1%, 산소 농도 편차 <5%), 광범위한 가스(O₂, N₂, 공기) 지원, WO₃ 순도(>99.95%) 및 결정 형태(단사정 비율>95%)입니다. 이 시스템은 높은 신뢰성(MTBF > 50,000 시간)과 간단한 작동(자동화 정도 > 90%)을 제공합니다. 비용은 적당하고(세트당 약 \$1,000-5,000) 유지 보수는 낮습니다(연간 약 \$200). 그러나 단점은 가스 소비 비용이 높다는 것입니다(산소의 경우 약 \$0.5/m³, 질소의 경우 \$0.2/m³). 필터와 MFC 는 정기적으로(3-6 개월마다, 단위당 약 \$100 의 비용) 교체해야 합니다. 복잡한 용광로 유형(연속)에는 여러 가스 경로(>5 회로, 비용은 약 500 달러/회로)가 필요하므로 투자가 증가합니다. 황색 삼산화 텅스텐의 생산에서 가스 공급 시스템은 대기권에 안정적인 가스 공급원을 제공하여 높은 반응 효율과 제품 품질(수율 > 95 %)을 보장합니다.

7.1.5 냉각 장비

텅스텐 생산의 냉각 장비는 고온 고상 반응에 의해 소결 한 후 고온 WO₃ 제품(500-700°C)을 실온(40°C)으로 안전하게 환원시켜 결정 결함, 열 응력 균열 또는 과도한 산화를 방지하고 제품 품질(순도>99.9%, 다형성 단사 또는 직교)을 보장하는 데 사용됩니다. 냉각 공정은 WO₃의 물리 화학적 안정성(비표면적 5-20 m²/g)을 유지하기 위해 제어된 속도(2-10°C/분) 및 대기(산소 농도<30%)가 필요합니다. 이 장비는 안정적인 냉각 용량, 낮은 에너지 소비(<100kWh/t) 및 높은 신뢰성(> 5000 시간 연속 작동)을 갖추어야 하는 동시에 불순물(Fe, C < 20ppm)에 의한 오염을 방지해야 합니다. 주요 냉각 장비에는 자연 냉각 장치와 강제 냉각 장비가 포함되며, 전자는 환경을 사용하여 열을 발산하고 소량 생산(<10kg/배치)에 적합합니다. 후자는 능동적 열교환을 통해 연속 대량 생산(> 100kg/h)에 적합합니다. 다음은 황색 삼산화 텅스텐 생산에서 두 가지 유형의 장비의 역할, 구조, 작동 지점 및 기술적 특성에 대한 자세한 분석입니다.

7.1.5.1 자유 냉각 장치

텅스텐 생산의 자유 냉각 장치는 고온 WO₃ 제품을 천천히 냉각시키기 위해 주변 공기 또는 용광로 방열에 의존하며 실험실 및 소량 생산 (0.1-10 kg / 배치)에 널리 사용됩니다. 추가 에너지가 필요하지 않은 단순한 설계는 냉각 속도 요구 사항(2-5°C/min)이 낮은 시나리오에 적합하여 녹색 본체 무결성과 결정 형태 안정성을 보장합니다.

자유 냉각 장치는 일반적으로 별도의 장비 없이 고온 용광로(예: 머플 용광로, 모델 SX2-10-12)에 통합됩니다. 구조는 용광로 본체(이중벽 냉간 압연 강철 셸, 두께 5-10mm, 온도 저항>200°C), 용광로 챔버(알루미나 섬유, 열전도율 < 0.2 W/m·K, 온도 저항>1200°C), 도가니(알루미나, 순도 > 99.5%, 열전도율 20 W/m·K) 및 배기 포트(316L 스테인리스강, 내경 10-50mm)로 구성됩니다. 작동 원리는 도가니와 용광로를 통해 고온 WO₃(500-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

700 °C)에서 환경(20-30 °C)으로 열을 전달하는 것을 기반으로 합니다. 소결 후 발열체(실리콘 탄소 막대, 전력 5-20 kW)가 꺼지고 WO₃ 본체(밀도 2.5-3.5 g/cm³, 질량 0.1-10 kg)가 자연 대류(풍속 0.1-0.5 m/s) 및 복사 방열에 의해 도가니에서 냉각됩니다. 퍼니스 챔버의 내벽은 금속 오염을 줄이기 위해 ZrO₂(두께 0.5-1mm, 온도 저항 > 1000°C)로 코팅되어 있습니다. 냉각 속도는 퍼니스 챔버의 온도에 의해 결정되며 일반적으로 2-5°C/min이며 <40°C로 떨어지는 데 4-8 시간이 걸립니다.

작업 프로세스는 소결이 끝나는 것으로 시작됩니다. 고온로가 WO₃ 소결(500-600 °C, 2-4 시간 유지)을 완료 한 후 가열 전원이 꺼지고 퍼니스 챔버를 밀봉 된 상태로 유지합니다(공기 누출 율 <0.005 L/min) 외부 수분(상대 습도 <80%) 또는 먼지(농도 <5 mg/m³)에 의한 오염을 방지합니다. 녹색 몸체(직경 10-50mm, 두께 3-10mm)는 공기 순환을 보장하기 위해 <1kg/L의 충전 밀도로 도가니에 고르게 배치됩니다(대류 계수 5-10 W/m²·K). 배기 포트가 약간 열리고(10-20% 개방), 약간의 양압(0.01-0.02MPa)이 유지되며 잔류 NH₃ 또는 H₂O(농도 <10ppm)가 배출됩니다. 냉각하는 동안 퍼니스 도어가 닫히고 주변 온도가 20-30°C(변동 <±5°C)로 제어되어 너무 빠른 냉각(>10°C/min)(스크랩 비율 <2%)으로 인한 녹색 본체의 균열을 방지합니다. <40°C로 냉각한 후 용광로 도어를 열고 WO₃를 수집하고, 결정 형태(단사정, 평면 간격 0.38nm), 입자 크기(D50=1-5µm) 및 순도(>99.9%)를 X 선 회절(XRD), 주사전자현미경(SEM) 및 유도 결합 플라즈마(ICP-MS)로 검출했습니다. 부적격 제품(균열률 >5%)은 연삭 및 재소결로 반환됩니다.

주요 매개변수의 최적화는 냉각 효과에 매우 중요합니다. 냉각 속도는 2-5°C/min 이어야 하며 너무 빠르면(>10°C/min) 열 응력(압축 강도 <5MPa) 및 균열(>5%)이 발생합니다. 사이클(>12 시간)을 연장하기에 너무 느려지면(<1°C/분) 효율성(<80%)이 감소합니다. 노 단열층의 두께는 >50mm 이고 열전도율은 0.2W/m·K<하여 <10%의 열 손실을 보장합니다. 녹색 본체의 충전 두께< 50mm 이고 과두께(>100mm)는 중앙 냉각 히스테리시스(온도 편차 > 20°C)로 이어지고 결정 형태의 균질성(단사정 비율 <90%)에 영향을 미칩니다. 주변 습도< 80%, 너무 높은(>90%) 습도는 WO₃ 흡습성(수분 함량 > 0.5wt%)을 유발할 수 있습니다. 배기 압력은 0.01-0.02 MPa, 너무 높고(>0.05 MPa) 가속 방열(> 10°C/min), 너무 낮음(<0.005 MPa)으로 인해 배기 가스 보유(NH₃>20 ppm)가 발생했습니다. 도가니 재료는 순도가 높아야 하며(Al₂O>99.5%)이어야 하며 불순물을 피해야 합니다.

외기 냉각 장치의 장점은 에너지 소비가 없고(≈0kWh/t) 운영 비용이 낮다는 것입니다(유지 보수 < 연간 \$100). 작은 배치(0.1-10kg/배치)의 경우 낮은 투자(\$500 추가 <고온 용광로에 통합 비용). 온화한 냉각, 녹색 몸체의 >98% 무결성, 안정적인 결정 형태(단사정 비율 >95%), 촉매(비 표면적 10-20 m²/g) 및 텅스텐 분말 원료(순도 >99.9%)의 요구를 충족시킵니다. 그러나 단점은 냉각 시간(4-8 시간)이 길고 빠른 생산에 적합하지 않다는 점(효율성 < 50kg/h)입니다. 냉각 속도는 정밀하게 제어하기 어렵고(편차 ± 2°C/min) 환경 조건(온도 변동 시 균열률 >5%±5°C)에 따라 달라집니다. 대형 용광로(>0.5m³)는 고르지 않게 냉각되어(온도차 > 20°C) 일관성(입자 크기 편차 >20%)에 영향을 미칩니다. 텅스텐 생산에서 자유 냉각 장치는 저렴한 비용과 높은 신뢰성으로 소규모 공정을 지원합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1.5.2 강제 냉각 장비

텅스텐 생산의 강제 냉각 장비는 활성 열 전달 (예 : 공기 냉각, 수냉식)을 통해 WO₃ 제품의 온도를 빠르게 낮추고 중대형 연속 생산 (100 kg / h-10 t / h)에 적합합니다. 이 설계는 결정 품질(순도>99.95%)과 생산 효율성을 보장하기 위해 효율적인 방열 및 제어 가능한 속도(5-10°C/min)에 중점을 둡니다.

강제 냉각 장비는 일반적으로 공냉식 열교환기 및 수냉식 재킷 용광로를 포함하여 독립형 시스템 또는 고온 용광로의 동반 모듈입니다. 공랭식 시스템은 팬(유속 1-5m/s)으로 몸을 퍼지하고 수냉식 장치는 순환하는 물(5-20°C)을 통해 열을 흡수합니다. 공냉식 열교환기(모델 FC-500)를 예로 들면 냉각실(304 스테인리스강, 온도 저항 > 800°C), 팬(전력 5-20kW, 풍량 1000-5000m³/h), 열교환기 튜브(구리, 열전도율 > 300W/m·K), 필터(기공 크기 0.1mm, 제거율>99%) 및 제어 밸브(정확도±5%). 작동 원리는 강제 대류를 기반으로 하며, WO₃ 본체(500-700°C)가 냉각 챔버(대류 계수 50-200 W/m²·K), <40°C 로 냉각하는 데 30-60 분. 수냉식 재킷 퍼니스 (모델 WC-1000)는 퍼니스 챔버의 외벽에 수냉식 튜브 (내경 10-20 mm, 유속 1-10 m³ / h)가 내장되어 있고 수열 용량 (4.18 kJ / kg · K) 5-15°C/min 의 냉각 속도로 열을 흡수합니다.

이 프로세스는 소결 후 전송으로 시작됩니다. WO₃ 본체 (500-600 ° C, 10-1000 kg)는 < 1 kg / L 의 하중 밀도로 컨베이어 벨트 (온도 > 800 ° C, 속도 0.1-0.5 m / min)를 통해 냉각실로 이동됩니다. 공랭식 플랜트는 팬(1000-3000m³/h)을 시작하고 공기는 5-10°C/min 의 냉각 속도로 필터(제거율 >99%)를 통해 퍼지됩니다. 온도 센서 (K 형 열전대, 정확도 ± 1 ° C), 실시간 모니터링 (1Hz), PLC (지멘스 S7-1200, 응답 <0.1 초)를 통해 풍량 (오차 <±5%)을 조정할 수 있습니다. 수냉식 플랜트는 5-15°C 의 수온, 2-5m³/h 의 유속, 0.1-0.3MPa 의 재킷 압력으로 펌프(1-5kW)를 시작합니다. <40°C 로 냉각한 후 녹색체를 채취하여 균열률(<2%)과 경도(압축강도 > 5MPa)를 확인합니다. 이 제품은 XRD, SEM 및 ICP-MS 에 의해 결정 형태(단사정, 평면 간격 0.38nm), 입자 크기(D50=1-5µm) 및 순도(>99.95%)에 대해 검출되었습니다. 배기 가스(NH<5ppm)는 집진기(>99% 효율) 및 재활용수 테스트(pH 6-8)를 통해 배출되어 부식을 방지합니다(파이프 수명 > 5 년).

주요 매개변수의 최적화는 냉각 효과에 매우 중요합니다. 냉각 속도는 5-10 °C/min 이며, 너무 빠르면(>15 °C/min) 균열(>5%), 너무 느려지고(<3 °C/min) 효율이 낮아집니다(<100 kg/h). 풍량은 1000-3000m³/h, 너무 크고(>5000m³/h), 높은 에너지 소비(>100kWh/t), 너무 작고(<500m³/h) 고르지 않은 냉각(온도차 > 20°C)입니다. 수냉식의 유량은 2-5m³/h 이고 파이프 진동이 너무 높고(>10m³/h)(진폭>1mm), 방열이 불충분(<1m³/h)(속도 <5°C/min)입니다. 공기 또는 수온이 5-20°C 이고 너무 높고(>30°C) 열교환 효율이 낮고(<50%). 냉각실의 기밀성은 수분(>80%) 또는 먼지(>5mg/m³)에 의한 오염을 방지하기 위해 <0.01L/min 의 공기 누출률이 필요합니다. 열교환기 튜브의 청결도는 먼지 축적을 방지하기 위해 0.5µm(>0.1g/cm²)로 <. 일관성을 보장하기 위해 PLC 정확도± 1°C 입니다(편차 < 10°C).

강제 냉각 설비의 장점은 빠른 속도(30-60 분), 연속 생산에 대한 적합성(100kg/h-10t/h) 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

높은 효율성(>95%)입니다. 속도는 제어 가능하고(5-15°C/min, 편차 $\pm 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$), 녹색체의 무결성 비율은 >98%이며 결정 형태는 안정적입니다(단사정 비율 >95%). 촉매(비표면적 10-20m²/g) 및 텅스텐 분말 원료(순도 > 99.95%)의 요구 사항을 충족하기 위해 대용량(10-1000kg/배치)을 지원합니다. 그러나 단점은 높은 에너지 소비(공냉식 50-100kWh/t, 수냉식 20-50kWh/t)와 \$10-20/t 의 운영 비용을 포함합니다. 투자가 크고(공냉식의 경우 1-50,000 달러/단위, 수냉식의 경우 2-100,000 달러/단위), 유지 보수가 복잡합니다(팬 베어링은 6 개월마다 교체되며 비용은 200 달러/단위). 수냉식은 부식 방지(304SS, 비용 1000 USD/m)가 필요하고 폐수 처리 비용은 약 5 USD/m³입니다. 강제 냉각 장비는 높은 효율성과 정밀도로 대량 생산 공정을 지원하여 WO₃ 품질을 보장합니다.

7.1.6 후처리 장비

황색 삼산화 텅스텐 생산의 후 처리 장비는 특정 입자 크기, 균일 성 및 순도 요구 사항(순도 > 99.9 %, D50 = 1-10 μm)을 충족시키기 위해 고온 고체상 반응 소결 후 WO₃ 제품을 정제하는 데 사용됩니다. 후 처리 공정의 목적은 냉각 된 WO₃ 녹색 또는 벌크 제품을 정제, 분산 및 분류하여 촉매 (비 표면적 10-20 m² / g), 텅스텐 분말 원료 (순도 > 99.95 %) 또는 광전자 재료 (입자 크기 편차 < 20 %)와 같은 다운 스트림 응용 분야에 적합한지 확인하는 것입니다. 이 장비는 환경 표준을 충족하기 위해 분진(<농도 5mg/m³> 제어하면서 고효율(95%), 낮은 오염(Fe, C<20ppm) 및 안정적(5,000 시간 연속 작동>이 필요했습니다. 후처리 장비는 주로 WO 를 목표 입자 크기로 정제하는 연삭 장비와 균일한 입자 크기 분포를 보장하는 스크리닝 장비로 구성됩니다. 다음은 전문 데이터 및 산업 응용 프로그램과 결합 된 황색 삼산화 텅스텐 생산에서 연삭 장비 및 스크리닝 장비의 기능, 구조, 작동 지점 및 기술적 특성에 대한 자세한 분석입니다.

7.1.6.1 연삭 장비

텅스텐 생산의 분쇄 장비는 냉각 된 WO₃ 녹색 물체 또는 거친 입자 (입자 크기 0.1-10 mm)를 마이크론 스케일 (D50 = 1-10 μm)로 더욱 정제하여 비 표면적 및 분산을 개선하여 촉매, 광전자 재료 또는 텅스텐 분말 생산의 입자 크기 요구 사항을 충족시키는 데 사용됩니다. 분쇄 장비는 낮은 불순물 오염(Fe<20ppm)과 제어된 응집(분산 > 90%)을 보장해야 합니다.

연삭 장비는 주로 유성 볼 밀, 제트 밀 또는 진동 밀을 사용하며, 그 중 유성 볼 밀은 높은 정밀도와 유연성으로 인해 황색 삼산화 텅스텐 생산에 널리 사용되며 중소 규모 배치 (0.1-100 kg / 배치)에 적합합니다. 유성 볼 밀 (모델 QM-3SP4)의 경우, 구조는 연삭 탱크 (지르코니아, 부피 0.5-5 L, 순도 >99.5 %), 연삭 공 (지르코니아, 직경 3-10 mm, 경도 HRC 85-90), 메인 디스크 (스테인레스 스틸, 회전 속도 150-300 rpm) 및 구동 모터 (동력 1-5 kW). 작동 원리는 연삭 탱크 (300-600 rpm)의 회전과 회전에 의해 생성되는 원심력 (10-20 g)을 기반으로 하며, WO₃ 입자는 연삭 볼, 전단 및 마찰의 충격으로 정제됩니다. 분쇄 용기와 분쇄 볼의 내벽은 금속 오염(Fe, Zr<10ppm)을 줄이기 위해 지르코니아로 만들어졌습니다. 건식 분쇄는 또는 습식 분쇄 (매체는 에탄올 또는 탈 이온수, 고액 비율 1 : 1-1 : 2)를 수행 할 수 있으며 습식 분쇄는 응집 (입자 분산 > 95 %)을 줄이기 위해 황색

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

삼산화 텅스텐에 더 적합합니다.

이 과정은 원료 준비로 시작됩니다. 냉각 된 WO_3 분체 ($500-600\text{ }^\circ\text{C}$, 밀도 $2.5-3.5\text{ g/cm}^3$ 에서 소결 됨)는 분당을 방지하기 위해 1 차 파쇄 (조 크러셔, 출력 $D50 = 0.1-1\text{ mm}$)에 의해 $<1\%$ 의 수분 함량으로 전처리된다. WO_3 를 10 : 1-15 : 1 의 펠릿 대 재료 비율로 밀항아리에 적재하고 에탄올 (순도 $>99.5\%$, 고액 비율 1 : 1.5)을 습식 분쇄 매체로 첨가하고 분쇄 용기 충전 비율은 30-50 %였습니다. 볼 밀은 400-600rpm 으로 회전하도록 설정되고 대상 입자 크기($D50=1-5\mu\text{m}$)에 따라 4-8 시간 동안 분쇄됩니다. 분쇄 후 슬러리는 진공 여과(기공 크기 $0.1\mu\text{m}$) 또는 원심분리(4000rpm)로 분리되고 고체는 $80-100\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 6-12 시간 동안 건조되어 마이크론 크기의 분말을 얻습니다. 입자 크기 분포($D90<10\text{ }\mu\text{m}$) 및 형태(응집물 $<5\%$)는 레이저 입자 크기 분석기(정확도 $\pm 1\%$)와 건조된 분말의 SEM 에 의해 감지되었습니다. 연삭 공정에는 과열($>100\text{ }^\circ\text{C}$) 및 결정 형태 변화(단사정 비율 $<90\%$)를 방지하기 위해 냉각 시스템(수냉식, 온도 $<50\text{ }^\circ\text{C}$)이 장착되어야 합니다. 폐액(에탄올)은 회수 및 증류(회수율 $>90\%$), 분진은 백 필터(효율 $>99\%$)로 제어(방출 $<5\text{ mg/m}^3$)로 제어합니다.

주요 매개변수의 최적화는 연삭 결과에 매우 중요합니다. 볼 직경은 3-10mm 이며, 이는 너무 크고($>15\text{ mm}$) 정련이 불충분하고($D50>10\mu\text{m}$) 너무 작고($<2\text{ mm}$) 효율이 낮으며(연삭 시간 >12 시간) 발생합니다. 펠릿 대 펠릿 비율은 10:1-15:1 이고, 너무 높으면($>20:1$) 마모가 증가하고($ZrO_2<0.01\text{ wt}\%$), 너무 낮으면($<5:1$) 사이클 시간(>12 시간)이 연장됩니다. 회전 속도는 400-600rpm 이며, 너무 높으면($>800\text{ rpm}$) 진동(진폭 $>2\text{ mm}$) 및 발열, 너무 낮고($<300\text{ rpm}$) 낮은 효율($<70\%$)을 유발합니다. 습식 밀 에탄올은 응집(분산 $>95\%$)을 감소시키지만 비용이 많이 듭니다($\$2/L$). 물레방아는 WO_3 용해 (손실 $>1\%$)를 피하기 위해 pH 6-8 이어야합니다. 분쇄 시간은 4-8 시간이며, 너무 길> 불순물($Zr<20\text{ ppm}$)이 발생하고 입자 크기가 고르지 않은 너무 짧은(<2 시간) >20 시간 분쇄 용기의 재질은 내마모성(ZrO_2 , 마모율 $<0.005\text{ g/h}$)이어야 하며 순도($>99.9\%$)를 보장해야 합니다.

연삭 장비의 장점은 정밀한 입자 크기 제어($D50=1-10\mu\text{m}$, 편차 $<15\%$), 높은 균일성($D90/D10<3$) 및 촉매(비표면적 $>15\text{ m}^2/\text{g}$) 및 광전자 재료(입자 크기 편차 $<20\%$)의 필요성입니다. 이 장비는 소규모 배치($0.1-100\text{ kg}$ /배치)를 위한 유성 볼 밀과 대량 생산($>500\text{ kg/h}$)을 위한 제트 밀을 통해 유연합니다. 안정적인 작동(고장률 $<1\%$), 간단한 유지 보수(연간 약 1000 달러/단위). 그러나 단점은 습식 연삭을 위한 높은 에너지 소비($100-200\text{ kWh/t}$)와 건조(50 kWh/t)입니다. 마모는 불순물($Zr, Fe<20\text{ ppm}$)을 유발할 수 있으며 자기 분리(자기장 $>1.5\text{ T}$) 또는 산세(0.05 mol/L HNO_3)가 필요합니다. 분쇄 시간이 길기 때문에(4-8 시간) 빠른 생산에 적합하지 않습니다. 소음($70-90\text{ dB}$)은 방음($<55\text{ dB}$)이어야 합니다. 연삭 장비는 황색 삼산화 텅스텐의 후 처리를 효율적으로 정제하여 제품 품질 (수율 $>95\%$)을 보장합니다.

7.1.6.2 스크리닝 장비

텅스텐 생산의 스크리닝 장비는 분쇄 WO_3 분말을 입자 크기별로 분류하고, 대형 또는 초미세 입자를 제거하고, 균일 한 입자 크기 분포 ($D50 = 1-10\text{ }\mu\text{m}$, $D90 <15\text{ }\mu\text{m}$)를 보장하여

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다운 스트림 응용 분야 (예 : 텅스텐 분말, 촉매)의 사양을 충족하는 데 사용됩니다. 스크리닝 플랜트는 높은 처리량(>100kg/h)과 낮은 오염(Fe<10ppm)이 있어야 합니다.

스크리닝 장비는 주로 진동 스크린 또는 초음파 스크린을 사용하며, 이는 고효율 및 비용 효율성으로 인해 황색 삼산화 텅스텐 생산에 널리 사용되며 중대형 (100 kg / h-1 t / h)에 적합합니다. 진동 스크린(모델 ZS-1000)의 경우 구조는 스크린 프레임(304 스테인리스강, 직경 0.5-2m), 스크린(나일론 또는 스테인리스강, 조리개 5-20 μ m), 진동 모터(전력 0.5-2kW, 주파수 20-50Hz) 및 콘센트(경사각 10-30°), 작동 원리는 스크린 프레임의 진동 (진폭 2-5mm)을 구동하는 모터를 기반으로 하며, WO₃ 분말이 스크린에 층을 이루고 기공 크기보다 작은 입자가 통과하며 큰 입자가 갇히게 됩니다. 스크린은 금속 오염(Fe<10ppm)을 방지하기 위해 스테인리스강(316L, 내식성) 또는 나일론(마찰계수< 0.2)으로 만들어집니다. 다층 스크린(2-4 개 레이어)을 통해 5 μ m, 10 μ m 및 20 μ m 와 같은 다단계 분류가 가능합니다.

이 과정은 분말 준비로 시작됩니다. 지상 WO₃ 분말 (D50 = 1-10 μ m, 수분 함량 <0.5 %)은 적재 두께가 <50 mm 인 스크류 피더 (속도 0.1-0.5 t / h)에 의해 체 프레임에 고르게 공급됩니다. 진동 스크린은 30-40Hz 의 주파수, 3-4mm 의 진폭, 5-10 분/배치의 스크리닝 시간으로 설정됩니다. 스크리닝 후 양호한 분말(D50=1-5 μ m)은 하부 배출구에서 수집하고, 대형 입자(>20 μ m)는 상부 배출구에서 회수하여 연삭하고, 초미세 입자(<0.5 μ m)는 별도 가공(예: 광촉매)합니다. 스크리닝 공정에는 분진(배출 < 5mg/m³, 손실 <0.5%)을 제어하기 위해 분진 제거 시스템(백 필터, 풍량 500-2000m³/h)이 장착되어야 합니다. 막힘(다공성 > 90%)을 제거하기 위해 화면을 정기적으로 청소합니다(초음파, 주파수 40kHz, 5 분). 분포(D90<15 μ m) 및 형태(응집<5%)는 레이저 입자 크기 분석기 및 SEM 에 의해 감지되었습니다. 실패한 분말(편차 > 20%)은 재스크리닝 또는 분쇄됩니다.

주요 매개변수의 최적화는 스크리닝 결과에 매우 중요합니다. 메쉬 공극 크기는 5-20 μ m 이고, 너무 크면(>50 μ m) 거친 입자 혼합(>5%)이 발생하고, 너무 작으면(<2 μ m) 플럭스(<50kg/h)가 감소합니다. 진동 주파수가 30-40Hz 이고 너무 높으면(>60Hz) 소음(>100dB) 및 화면 마모(수명 < 6 개월)가 증가하고 너무 낮으면(<20Hz) 효율성이 낮고(<70%) 효율이 낮습니다. 진폭은 3-4mm 이며, 너무 크면 (>6mm) 분말 비행 (>1 % 손실)이 발생하고 너무 작 으면 (<2 mm) 불완전한 체질 (잔류 > 10 %)이 발생합니다. 장약 두께< 50mm 이고 과도한 두께(>100mm)로 인해 화면이 막힙니다(플럭스 < 80%). 스크린 재료는 내마모성(316L, 마모율<0.01mm/년)과 순도(Fe<10ppm)를 보장해야 합니다. 이송 속도는 0.1-0.5t/h 였으며 너무 빠르면(>1t/h) 정지 작업이 부정확했습니다(편차 > 20%). 집진 효율> 99%이며 방전은 5mg/m³ < 보장합니다.

스크리닝 장비의 장점은 촉매(D50=1-5 μ m) 및 텅스텐 분말(D50=5-10 μ m)에 대한 정확한 등급(D50 편차<10%)과 높은 처리량(100kg/h-1t/h)입니다. 장비는 간단하고(투자 0.5-20,000 달러/단위) 유지 보수 비용이 낮습니다(연간 약 500 달러). 다중 레이어 화면은 여러 사양(2-4 레벨)을 지원하며 적응력이 뛰어납니다. 그러나 단점으로는 높은 에너지 소비(10-20kWh/t)와 체 막힘(1-3 개월마다 청소, 시간당 \$50)이 있습니다. 미량 마모는 불순물(Fe<10ppm)을 유발할 수 있으며 자기 분리(자기장 > 1T)가 필요할 수 있습니다. 소음(80-100dB)은 방음(<55dB)이어야 합니다. 스크리닝 장비는 WO₃ 입자 크기 균일성을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

보장하고 고품질 후처리를 보장합니다.

7.2 졸 - 겔 법에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조를위한 핵심 장비

텅스텐 옐로우 (WO_3)가 졸 - 겔 법으로 제조 될 때, 핵심 장비는 전구체 용액의 균질 한 혼합, 겔화, 건조 및 열처리를 지원하여 고순도 (>99.9 %), 나노 스케일 (입자 크기 20-200 nm) 분말 또는 광촉매 (분해 효율 >85 %), 센서 (검출 한계 <1 ppm)의 요구 사항을 충족하는 박막을 생성해야 합니다. 및 전기 변색(착색 효율> 50cm²/C) 및 기타 응용 분야 요구 사항. 졸 - 겔 공정은 텅스텐 산 나트륨 (Na_2WO_4) 또는 염화 텅스텐 (WCl_6)을 전구체로 사용하여 용해, 산성화, 겔화 및 열처리를 통해 WO_3 를 형성하며,이 공정은 높은 정확도 (온도 편차 ± 1 °C), 낮은 오염 ($Fe < 10$ ppm) 및 안정성 (연속 작동 > 5000 시간)을 요구합니다. 핵심 장비에는 혼합 장비, 가열 장비, 건조 장비 및 소결 장비 등이 포함되며, 이 섹션에서는 혼합 장비의 기계 교반기와 가열 장비의 항온 수조 및 오븐에 중점을 두고 전문 데이터 및 산업 응용 프로그램과 결합된 기능, 구조, 작동 지점 및 기술적 특성을 자세히 분석합니다.

7.2.1 혼합 장비

교반 장비는 전구체 용액 (예 : 0.05-0.2 mol / L 농도의 Na_2WO_4 용액), 산성화 제 (예 : HCl, pH 1-3) 및 용매 (물 또는 에탄올)를 노란색 삼산화 텅스텐의 졸 - 겔 준비에서 혼합하여 반응물의 균일 한 분산을 보장하고 졸 형성 (콜로이드 입자 크기 10-50 nm)을 촉진하는 데 사용됩니다. 장비는 WO_3 순도(>99.9%)에 영향을 미치는 불순물을 방지하기 위해 안정적인 전단(100-1000rpm), 내식성(HCl, pH<2) 및 낮은 오염($Fe, C < 99.9$ ppm)을 제공해야 합니다. 기계식 교반기는 효율적인 혼합과 공정 유연성으로 인해 졸-겔 분석법에서 가장 일반적으로 사용되는 교반기입니다.

7.2.1.1 기계식 교반기

기계식 교반기는 모터를 통해 패들을 회전시켜 전구체 용액에 전단 및 난류를 제공하여 용질 확산 및 졸 입자의 균일한 형성(분산 > 95%)을 촉진합니다. 실험실 및 중소 규모 공정을위한 텅스텐 생산의 소규모 (0.1-10 L / 배치) 및 파일럿 (10-100 L / 배치)에 널리 사용됩니다.

기계식 교반기(JJ-1 형)는 모터(0.1-1kW 출력, 50-2000rpm), 교반 패들(PTFE 또는 316L 스테인리스강, 길이 50-300mm), 교반 샤프트(스테인리스강 피복 PTFE, 내식성) 및 반응 용기(유리 또는 스테인리스강, 부피 0.5-100L)로 구성됩니다. 작동 원리는 Na_2WO_4 와 HCl 을 빠르게 혼합하여 텅스텐 산 (H_2WO_4) 콜로이드를 생성하는 패들의 회전 (전단 속도 10-100 s⁻¹)에 의해 생성 된 유동장을 기반으로합니다 : $Na_2WO_4 + 2HCl \rightarrow H_2WO_4 + 2NaCl$. 임펠러 설계(예:3 날 푸셔, 직경 20-100mm)는 유체 난류(레이놀즈 번호 >1000)를 보장하고 국부 과농축(농도 편차 > 10%)을 방지합니다. PTFE(마찰 계수< 0.1)는 금속 오염($Fe < 5$ ppm)을 방지하고 산성화 환경(pH 1-3)에서 산성(pH 1-14)입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

프로세스는 용액 준비로 시작됩니다. Na_2WO_4 (순도>99.5%)를 탈이온수(전도도<10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 0.05-0.2mol/L)에 용해시켜 반응용기(유리, 내열성 >100°C)에 붓고 에탄올(0-20vol%)을 첨가하여 점도(<10mPa·s)를 조절하였다. 교반기에는 PTFE 패들(청결도 $R_a < 0.5\mu\text{m}$)이 장착되어 있으며 액체 레벨보다 2/3 낮게 잠기고 200-500rpm 으로 설정됩니다. HCl 을 천천히 적가(6 mol/L, 적하 속도 0.1-0.5 mL/분)하고 pH 1-3 을 조절한 다음 균일한 졸(콜로이드 입자 크기 10-50 nm)이 형성될 때까지 1-2 시간 동안 저어줍니다. 교반 중에는 휘발(에탄올 손실 <1%)을 방지하기 위해 용기를 밀봉합니다(공기 누출률 < 0.01L/min). 졸은 겔화 또는 코팅 공정으로 옮겨지고 교반기는 탈이온수와 에탄올(잔류 < 1mg/cm²)로 세척됩니다. 이 공정에는 산성 미스트(HCl<1 mg/m³)를 제어하기 위해 환기 시스템(200-500 m³/h)이 장착되어야 합니다. 이 제품은 동적 광 산란(DLS) 및 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis)으로 검출되어 콜로이드 입자 크기와 안정성(침전률 <5%)을 검출했습니다.

중요한 매개변수의 최적화는 졸 품질에 매우 중요합니다. 200-500rpm 에서 너무 높으면(>1000rpm) 기포(부피>5%) 및 콜로이드 파열(입자 크기 편차>20%), 너무 낮음(<100rpm) 및 고르지 않은 혼합(농도 편차>15%)이 발생합니다. 블레이드 직경은 용기와 일치하고(1/3-1/2 용기 직경), 너무 크면(>2/3) 에너지 소비(>0.5kWh/L)가 증가하고, 너무 작으면(<1/4) 효율성이 감소합니다(<80%). pH 는 1-3 으로 제어되고, 너무 높으면(>4) H_2WO_4 (수율 <70%)를 형성하지 않으며, 너무 낮으면(<1) 불안정한 부산물($\text{WO}_2 > 0.5\%$)이 생성됩니다. 용액 온도는 20-40 °C 이고 너무 높으면 (>60 °C) 휘발 (용매 손실 >5 %)이 가속화되고 (<10 °C) 점도가 높습니다 (>20 mPa·s). 혼합 시간은 1-2 시간, 너무 길면(> 4 시간), 에너지 소비(>1kWh/L), 너무 짧고(<0.5 시간) 고르지 않은 콜로이드(분산 < 90%)가 증가합니다. 프로펠러 재료는 순도($\text{Fe} < 5\text{ppm}$)를 보장하기 위해 PTFE 또는 316L(부식 속도 < 0.01mm/년)이어야 합니다.

기계식 교반기의 장점은 균일한 혼합(분산 > 95%), 조정 가능한 속도(50-2000rpm) 및 광범위한 전구체(Na_2WO_4 , WCl_6)에 적합하다는 것입니다. 장비는 간단하고(투자 1000-5000 달러/단위) 유지 보수 비용이 낮습니다(연간 약 200 달러). 소량 생산(0.1-100L/배치)을 위한 고효율 (>90%). 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.1-0.5kWh/L)와 매우 큰 용량(>500L)에 적합하지 않다는 것입니다. 프로펠러 마모(PTFE 수명 <1년, 비용 \$50/개)는 미량의 불순물($\text{C} < 10\text{ppm}$)을 유발할 수 있습니다. 산성 미스트를 처리해야 합니다(비용 약 \$20/m³). 기계식 교반기는 노란색 볼프람 졸의 제조를 위한 효율적인 혼합을 제공하여 콜로이드의 품질(수율 > 95%)을 보장합니다.

7.2.2 난방 기구

가열 장비는 용액의 반응 온도 (20-80 °C)를 제어하고, 겔화 및 건조 (60-150 °C)를 촉진하고, 황색 삼산화 텅스텐의 졸 - 겔 준비에서 열처리에 의해 WO_3 (300-500 °C)를 생성하는 데 사용됩니다. 이 장치는 WO_3 나노 구조 (입자 크기 20-200 nm) 및 결정 형태 (밴드 갭 2.6-2.8 eV 가있는 단사정)의 형성을 보장하기 위해 균일 한 가열 (편차 $\leq \pm 1$ °C), 내식성 (HCl, 에탄올 저항) 및 높은 안정성 (고장률 <1 %)을 제공해야 합니다. 자동 온도 조절 수조 및 오븐은 일반적으로 사용되는 난방 장비이며, 전자는 용액 및 겔화 단계, 포스터는 건조 및 예비 열처리를 위한 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.2.1 자동 온도 조절 수조

자동 온도 조절 수조는 전구체 반응 및 겔화를 위한 졸-겔 방법에 안정적인 저온 가열(20-80°C)을 제공하여 H₂WO₄ 콜로이드의 균일한 침전(수율 >90%)을 촉진합니다. 실험실 및 소규모 시험(0.1-10L/배치)에 적합하며 높은 정확도와 안전성으로 알려져 있습니다.

자동 온도 조절 수조(모델 HH-4)는 싱크(304 스테인리스 스틸, 부피 5-50L, 부식 방지), 가열 튜브(니크롬, 전력 0.5-2kW), 온도 조절기(PID, 정확도 ± 0.5°C) 및 순환 펌프(유량 1-5L/min)로 구성됩니다. 작동 원리는 물의 높은 열용량(4.18kJ/kg·K) 열이 전달되고 가열 튜브가 설정값(20-80°C)으로 가열되며 순환 펌프가 수온이 균일한지 확인합니다(편차 <± 0.5°C). 반응 용기 (유리 비커, 0.1-5 L)를 싱크대에 놓고 용액 (예 : Na₂WO₄, + HCl, pH 1-3)을 일정한 온도에서 교반하여 졸 또는 겔을 형성합니다. 싱크대의 내벽은 오염(Fe<<5ppm)을 줄이기 위해 광택(Ra0.5μm)입니다. 안전 장치에는 과열 보호(전원 끄기 >85°C) 및 레벨 센서(저수위 경고)가 포함됩니다.

프로세스는 장비 준비로 시작됩니다. 탱크는 탈 이온수 (전도도 < 10 μS / cm, 충전 속도 80-90 %)로 채워지고 40-60 ° C (겔화 최적)로 설정하고 10-20 분 (편차 <± 0.5 ° C) 동안 예열되었습니다. 반응 용기를 전구체 용액 (0.05-0.2 mol / L Na₂WO₄)으로 채우고 수위 (2-5cm) 아래의 싱크에 넣었다. 용액을 교반기(200-500rpm)와 혼합하고, HCl(0.1-0.5mL/분)을 pH 1-3 에 적가하고, 1-2 시간의 일정한 온도를 사용하여 겔(점도 > 100mPa·s)을 형성했습니다. 반응하는 동안 온도 조절기가 모니터링되고(1Hz) 순환 펌프는 물의 흐름(유속 0.1-0.2m/s)을 유지합니다. 겔은 건조 공정으로 옮겨지고 싱크대 배수구에서 청소됩니다 (잔류 물 < 1 mg / cm²). 이 공정에는 환기(풍량 200m³/h)와 산성 미스트(HCl<1mg/m³) 제어가 필요합니다.DLS 및 UV-Vis 를 사용하여 입자 크기(10-50nm)와 투명도(>90%)를 감지했습니다.

중요한 파라미터의 최적화는 겔 품질에 매우 중요합니다. 온도가 40-60 °C 이고 너무 높으면(> 80°C) 콜로이드 분해(수율 < 80%), 너무 낮음(<20°C) 느린 반응(시간 > 4 시간)이 발생합니다. 온도 제어 정확도± 0.5°C 이고 >±2°C 의 편차는 고르지 않은 콜로이드(입자 크기 편차 >20%)로 이어집니다. 싱크 부피가 용기와 일치하고(2-5 배), 너무 작고(< 1.5 배) 방열이 불충분(편차 >± 2°C). 순환 펌프의 유량은 1-5 L/min 이고 온도가 너무 낮고(<0.5 L/min) 온도가 고르지 않습니다(>±3°C). 용액의 부피< 탱크 부피의 1/3 이고 너무 크면 (>1/2) 열 전달 (효율 < 80 %)에 영향을 미칩니다. 수질은 순수해야 하고(불순물 < 10ppm) 오염(Ca, Mg< 5ppm)을 피해야 합니다. 가열 튜브의 전력은 0.5-2kW 이며 너무 높으면(>3kW) 에너지 소비가 높으며(>0.5kWh/L).

자동 온도 조절 수조의 장점은 정확한 온도(편차 <± 0.5°C)이고 겔화(수율 > 90%)에 적합하다는 것입니다. 장비는 간단하고(투자 500-2000 달러/단위), 유지 보수 비용이 낮습니다(연간 약 100 달러). 높은 안전성(정전 < 과열의 경우 0.1 초)으로 실험실(0.1-10L/배치)에 적합합니다. 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.1-0.5kWh/L)와 대용량(>50L)에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적합하지 않다는 것입니다. 싱크대는 정기적으로 석회질을 제거해야 합니다(3 개월마다, 비용 \$20). 제한된 온도 범위(<100°C)로 인해 건조 또는 열처리에 적합하지 않습니다. 자동 온도 조절 수조는 황색 삼산화 텅스텐의 겔화를위한 안정된 환경을 제공하고 나노 구조의 형성을 보장합니다.

7.2.2.2 오븐

오븐은 졸 - 겔 법에서 겔 (60-150 °C)을 건조시키거나 예비 열처리 (200-400 °C)를 위해 황색 텅스텐 트리 옥사이드를 준비하여 용매 (물, 아세톤) 및 유기물 (예 : PVA, 함량 < 1 wt %)을 제거하여 비정질 또는 결정질 WO₃ (입자 크기 20-200 nm)를 형성합니다. 소형(0.1-10kg/배치)에서 파일럿(10-100kg/배치)에 적합하며 균일한 가열과 유연성으로 알려져 있습니다.

오븐(모델 DGG-9070)은 챔버(이중벽 강철 셀, 절연 알루미늄 규산염, 두께 50mm), 퍼니스 챔버(304 스테인리스강, 부피 30-500L), 가열 튜브(니크롬, 전력 1-5kW), 팬(풍량 200-1000m³/h) 및 온도 조절기(PID, 정확도 ± 1°C). 작동 원리는 전기 가열 파이프(열전도율 0.02 W/m·K)에 의한 공기 가열을 기반으로 하며 팬 순환은 균일한 용광로 챔버(편차 <± 2°C)를 보장합니다. 겔을 트레이 (알루미늄, 순도 >99.5 %)에 넣고 60-100 ° C (6-12 시간)에서 건조하거나 300-400 ° C (1-2 시간)에서 열처리하여 WO₃를 형성합니다. 퍼니스의 내벽은 오염(Fe<5ppm)을 줄이기 위해 연마(Ra <0.5 μm)됩니다. 배기 포트(직경 10-50mm)는 휘발성 물질(에탄올, H₂O< 10ppm)을 배출합니다.

프로세스는 로딩으로 시작됩니다. 겔(수분 50-80%)을 트레이(두께 < 10mm)에 고르게 도포하거나 도가니(전하 밀도< 0.5kg/L)에 넣고 가열로에 넣습니다. 온도 설정 60-100°C(건조) 또는 300-400°C(열처리), 가열 속도 2-5°C/분, 6-12 시간(건조) 또는 1-2 시간(열처리) 동안 유지. 팬 작동(500m³/h)으로 균일한 온도(편차 <± 2°C)를 보장합니다. 건조 후, WO₃의 수분 함량은 <1 wt %, 열처리 (단사정, 평면 간격 0.38 nm) 후 결정화된다. 배기 시스템(316L 스테인리스강)은 휘발성 물질을 방출하고 응축기(효율 95%)를 통해 에탄올(>90%)을 회수합니다(효율 > 95%). <40°C(3-5°C/min)로 냉각하고 WO₃를 수집하고, 결정 형태, 입자 크기(D50=20-200nm) 및 비표면적(20-80m²/g)을 X 선 회절(XRD), 주사 전자 현미경(SEM) 및 BET로 검출했습니다. 용광로 세척(압축 공기, 잔류 <1mg/cm²), 배기 가스 처리(배출< 5mg/m³).

주요 매개변수의 최적화는 WO₃ 품질에 매우 중요합니다. 건조 온도는 60-100°C이며, 너무 높으면(>150°C) 겔 균열(>5% 거부율), 너무 낮고(<40°C) 길고(> 24 시간). 열처리 온도는 300-400 °C, 너무 높음 (>500 °C) 입자 성장 (D50>500 nm), 너무 낮음 (< 200 °C), 불완전 결정화 (단사정 비율 <80 %)입니다. 온도 제어 정확도는 1°C±이고 5°C>± 편차는 균일성(비표면적 편차 >20%)에 영향을 미칩니다. 가열 속도는 2-5°C/min 이고 균열(>5%)이 너무 빠릅니다(>10°C/min). 트레이 로딩의 두께는 10mm< 초과 두께(>20mm)가 고르지 않게 건조됩니다(수분 함량 >5wt%). 팬의 풍량은 200-1000m³/h 이고 너무 낮을 경우(<100m³/h) >±5°C 의 온도 편차를 갖습니다. 트레이 재료는 오염(Si<5ppm)을 방지하기 위해 고순도(Al₂O>99.5%)여야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

오븐의 장점은 넓은 온도 범위(50-500 °C)와 건조 및 열처리 지원(수율 > 95%)입니다. 나노미터 WO₃ (비 표면적 > 50m² / g)에 적합한 균일 한 가열 (편차 ≤ 2 ° C). 투자는 적당하고(\$1,000-\$5,000/단위) 유지 보수는 간단합니다(연간 약 \$200). 그러나 단점으로는 높은 에너지 소비(0.5-2kWh/kg)와 매우 큰 부피(>500kg/배치)에 적합하지 않다는 것입니다. 휘발성 물질을 처리해야 합니다(비용 \$20/m³). 열처리 온도가 제한(<500°C)이고 고온로(>500°C)가 필요합니다. 오븐은 황색 삼산화 텅스텐의 건조 및 결정화를 안정적으로 지원하여 나노 구조 및 특성을 보장합니다.

7.2.3 반응 용기

반응 용기는 졸 - 겔 법에서 전구체 용액 (예 : Na₂WO₄, 농도 0.05-0.2 mol / L), 산성화 제 (예 : HCl, pH 1-3) 및 용매 (물 또는 에탄올)의 혼합 및 반응을 위해 황색 텅스텐 삼산화물을 제조하여 졸 및 겔 (콜로이드 입자 크기 10-50 nm)의 균일 한 형성을 보장합니다. 용기는 WO₃ 순도(>99.9%)를 보장하기 위해 내식성(pH 1-14), 고도의 기밀성(<0.01L/min) 및 낮은 오염(Fe, C<10ppm)이어야 합니다. 제어 가능한 환경과 다양성으로 인해 반응기는 졸-겔 분석법에서 일반적으로 사용되는 반응 용기입니다.

7.2.3.1 반응기

반응기는 졸-겔 법에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조를 위한 밀봉된 내식성 반응 환경을 제공하고 전구체 산성화, 졸 형성 및 겔화(수율 > 90%)를 지원합니다. 소규모(0.1-10L/배치)에서 과일렛(10-100L/배치)에 적합하며 실험실 및 산업 전환 단계에서 널리 사용됩니다.

반응기 구조(예: GSH-5L)는 케틀 본체(316L 스테인리스강 또는 유리 라이닝, 0.5-100L 부피), 교반 시스템(PTFE 패들, 50-1000rpm), 가열/냉각 재킷(온도 제어 20-200°C), 밀봉 캡(실리콘 O-링, 0.1-1MPa) 및 샘플링 밸브(316L 스테인리스강, 내경 5-10mm)로 구성됩니다. 작동 원리는 폐쇄 된 환경에서의 제어 반응을 기반으로 하며, Na₂WO₄는 교반 (전단 속도 10-100 s⁻¹)에서 HCl과 반응하여 H₂WO₄ 콜로이드를 형성합니다 : Na₂WO₄ + 2HCl → H₂WO₄ + 2NaCl. 재킷은 물이나 오일(열전도율 0.1-0.15 W/m·K)을 순환시켜 온도(20-80°C)를 조절하여 균일한 반응(콜로이드 분산>95%)을 보장합니다. 주전자의 내벽은 오염(Fe<5ppm)을 줄이기 위해 유리(두께 1-2mm, pH 1-14) 또는 PTFE 코팅(마찰 계수 < 0.1)으로 라이닝되어 있습니다. 안전 장치에는 압력 릴리프 밸브(1.2MPa> 트리거)와 온도 경보(100°C> 전원 차단)가 포함됩니다.

작업 프로세스는 원료의 배합으로 시작됩니다. Na₂WO₄(순도>99.5%)를 탈이온수(전도도<10 μS/cm, 0.05-0.2 mol/L)에 용해시키고, 에탄올(0-20 vol%)을 첨가하여 점도(<10 mPa·s)를 조절하고, 주전자를 붓고(충전율 50-70%). 주전자 본체를 사전 세척하고(에탄올, 잔류 < 1mg/cm²), PTFE 패들을 설치하고(주전자 직경의 1/3), 밀봉 뚜껑을 잠갔습니다(공기 누출률 <0.01L/min). 교반 속도를 200-500rpm 으로 설정하고 재킷에 뜨거운 물(40-60°C, 유속 1-5L/분)을 넣고 HCl 을 적가(6 mol/L, 점적 속도 0.1-0.5mL/분)를 pH 1-3 에 추가합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

반응은 4-12 시간 동안 졸 (입자 크기 10-50 nm) 및 겔 (점도 > 100 mPa·s)을 형성하는 데 1-2 시간이 걸립니다. 샘플링 밸브는 pH 및 콜로이드 상태(DLS, 편차 <10%)를 감지합니다. 겔은 하단 밸브 (내경 10mm)를 통해 전달되고 주전자는 탈 이온수 (폐기물 pH 6-8)로 세척됩니다. 이 공정에는 환기(풍량 200-500m³/h)와 산성 미스트(HCl<1mg/m³) 제어가 필요합니다. 이 제품은 콜로이드 입자 크기와 안정성을 감지하기 위해 동적 광 산란(DLS) 및 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis)으로 검출되었습니다.

주요 파라미터의 최적화는 반응의 효과에 매우 중요합니다. 교반 속도는 200-500rpm 이고, 너무 높으면(>1000rpm) 기포가 생성되고(> 5% 부피), 너무 낮으면(<100rpm) 고르지 않은 혼합(농도 편차 >15%)이 발생합니다. 온도는 40-60 °C, 너무 높음 (>80 °C) 콜로이드 분해(수율 < 80 %), 너무 낮음 (<20 °C), 느린 반응 (> 4 시간). pH 1-3, 너무 높으면(>4) H₂WO₄를 형성하지 않고(수율 <70%), 너무 낮으면(<1) 부산물(WO₂>0.5%)이 증가합니다. 주전자의 충전 비율은 50-70%이며 너무 높으면(>80%) 교반(분산 < 90%)에 영향을 미칩니다. 재킷의 온도 제어 정확도는 ± 1°C 이며 >±3°C 의 편차로 인해 고르지 않은 콜로이드(입자 크기 편차 > 20%)가 발생합니다. 주전자 본체의 재질은 부식에 강하고(유리 라이닝, 부식률<0.01mm/년) 순도(Fe<5ppm)를 보장해야 합니다. 반응 시간은 4-12 시간이며 너무 짧으면(<2 시간) 겔화가 불완전합니다(점도 < 50mPa·s).

반응기의 장점은 높은 기밀성(누출률 <0.01L/min)과 제어 반응 지원(수율 > 90%)입니다. 내부식성(pH 1-14)이며 다양한 전구체(Na₂WO₄, WCl₆)에 적합합니다. 장비는 유연하고(0.1-100L/배치) 투자는 보통(2000-20,000 USD/단위)입니다. 그러나 단점으로는 높은 에너지 소비(0.2-0.5kWh/L)와 복잡한 청소(세션당 약 0.5 시간, \$10)가 있습니다. 큰 주전자(>100L)가 고르지 않게 교반됩니다(편차 > 10%). 산성 미스트 처리는 비용을 증가시킵니다. 반응기는 황색 삼산화 텅스텐의 졸 겔화를 위한 안정적인 환경을 제공하고 나노 콜로이드의 품질을 보장합니다.

7.2.4 연삭 장비

황색 삼산화 텅스텐의 졸 - 겔 제조에서, 분쇄 장비는 건조 또는 열처리 후 WO₃ 벌크 (입자 크기 0.1-10 mm)를 정제하고 나노 스케일 분말 (D50 = 20-200 nm)을 생성하고 비 표면적 (20-80 m² / g) 및 분산 (>95 %)을 향상시키는 데 사용됩니다. 장비는 광촉매 및 센서의 요구 사항을 충족하기 위해 오염이 적고(Fe, Zr<10ppm), 고효율(>90%), 제어 가능한 입자 크기(편차<20%)가 필요했습니다. 모르타르와 유봉은 실험실의 소규모 분쇄(<1kg/배치)에 적합하고 유성 볼 밀은 파일럿 테스트(1-100kg/배치)에 적합합니다.

7.2.4.1 절구와 절구공

모르타르와 유봉은 수동 또는 반 기계 연삭으로 WO₃ 블록을 정제하여 소규모 실험실 준비 (10g-1kg / 배치)에 적합하여 간단한 조작과 저렴한 비용으로 고순도 WO₃ (>99.9 %)의 요구를 충족시킵니다.

모르타르와 유봉 (마노 또는 지르코니아, 순도 >99.5 %)은 모르타르 (내경 50-200mm, 깊이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20-100mm)와 유봉 (직경 10-50mm, 길이 50-150mm)으로 구성됩니다. 작동 원리는 수작업으로 가해진 전단 및 파쇄력을 기반으로 하며, WO₃ 블록(입자 크기 0.1-10mm)을 모르타르에서 절긋공이로 분쇄하고 D50 = 0.5-10μm 로 정제합니다. 마노(Mohs 7, 마모율 < 0.01g/h) 또는 지르코니아(HRC 85-90)는 오염(Si, Zr<5ppm)을 감소시킵니다. 분쇄는 건식 분쇄 또는 습식 분쇄(에탄올, 고체-액체 비율 1:1)일 수 있으며, 습식 분쇄는 응집(분산 > 90%)을 감소시킵니다.

이 과정은 원료 준비로 시작됩니다. WO₃ 벌크 (300-400 °C 에서 열처리, 수분 함량 <1 %)를 모르타르 (청결도 Ra<0.5 μm)에 넣고 에탄올 (순도 >99.5 %, 0-10 mL)을 첨가했다. 입자 크기(D50 = 0.5-5μm)에 따라 10-30 분 동안 수동 연삭(압력 0.1-0.5 MPa, 주파수 1-2 Hz). 분쇄 후 슬러리를 여과하거나(기공 크기 0.1μm) 건조(80°C, 2-4 시간)하고 분말을 수집합니다. 입자 크기(D90<10 μm) 및 형태(응집률<5%)는 레이저 입자 크기 분석기 및 SEM 에 의해 검출되었습니다. 모르타르와 절긋공이를 탈이온수와 에탄올(잔류물< 1mg/cm²로 세척하였다. 이 공정은 환기(100m³/h) 및 분진 제어(<5mg/m³)가 되어야 합니다. 폐액 회수(에탄올 > 90%).

주요 매개변수의 최적화는 연삭 결과에 매우 중요합니다. 분쇄 시간은 10-30 분이고, 너무 길면(> 1 시간) 불순물(Si<10ppm)이 발생하고, 입자 크기가 고르지 않은 경우(D50>10μm) 너무 짧으면(<5 분) 압력 0.1-0.5 MPa, 너무 높으면(>1 MPa) 모르타르가 손상되고(수명 < 6 개월), 너무 낮거나(<0.05 MPa) 효율이 낮으면(<70%). 에탄올의 양은 습식 분쇄의 경우 5-10mL 였으며, 너무 많으면(>20mL) 건조 시간(>6 시간)이 증가하고 너무 적으면(<2mL) 응집(>10%)되었습니다. 모르타르의 내경은 샘플과 일치하며(샘플 부피 <1/3), 과충전(>1/2) 경우 분쇄가 고르지 않습니다(편차 >20%). 재료는 WO₃ 순도 (>99.9 %)를 보장하기 위해 고순도 (마노, Si<5ppm) 여야합니다. 먼지 제어 효율은 99%> 방출은 5mg/m³<.

모르타르와 유봉의 장점은 작동이 간단하고 (세트 당 US \$ 50-500 투자) 에너지 소비가 없다는 것입니다 (0kWh / kg). 실험실에 적합한 고순도(Fe, Si<5ppm). 그러나 효율성이 낮고 대량 생산에 적합하지 않은 단점 (>1kg)이 있습니다. 입자 크기를 제어하기 어렵고 수동 작동의 일관성이 좋지 않습니다(>10%). 날아다니는 먼지는 보호해야 합니다. 모르타르와 유봉은 황색 삼산화 텅스텐의 소규모 분쇄를 위한 저렴한 솔루션을 제공합니다.

7.2.4.2 행성 공 선반

유성 볼 밀은 고속으로 회전하여 파일릿 (1-100 kg / 배치)에 적합한 나노 스케일 분말 (D50 = 20-200 nm)을 생성하고 고효율 및 제어 가능한 입자 크기로 촉매를 충족시킵니다.

유성 볼 밀 (모델 QM-3SP4)은 연삭 탱크 (지르코니아, 부피 0.5-5 L, 순도 >99.5 %), 연삭 공 (지르코니아, 직경 3-10 mm, 경도 HRC 85-90), 메인 디스크 (스테인레스 스틸, 150-300 rpm) 및 모터 (동력 1-5 kW)로 구성됩니다. 작동 원리는 연삭 포트(300-600rpm)의 회전과 회전(원심력 10-20g)을 기반으로 하며, 연삭 볼 충격 및 전단 시 WO₃ 정제를 기반으로 합니다. 지르코니아 소재는 오염을 줄입니다(Zr, Fe<10ppm). 건식 연삭 또는 습식 연삭(에탄올, 고체-액체 비율 1:1-1:2)을 수행할 수 있으며 습식 연삭은 분산을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

향상시킵니다.

프로세스는 로딩으로 시작됩니다. WO₃ 블록(D50 = 0.1–10mm, 수분 함량 < 1%)을 10:1–15:1의 펠릿 대 재료 비율과 에탄올(고체-액체 비율 1:1.5)로 분쇄 용기에 적재했습니다. 분쇄 포트는 30-50%로 채워지고 회전 속도는 400-600rpm이며 분쇄는 2-6 시간(D50 = 20-200nm)입니다. 슬러리 여과(기공 크기 0.1µm) 또는 원심분리(4000rpm), 건조(80–100°C, 6–12 시간). 분말은 레이저 입자 크기 분석기 및 SEM (D90 < 500 nm, 응집 속도 < 5%)에 의해 검출되었다. 냉각 시스템(수냉식, < 50°C)은 과열(>100°C)을 방지합니다. 폐액 회수(에탄올 > 90%), 집진기를 통한 먼지(효율 > 99%, 배출 < 5mg/m³).

주요 매개변수의 최적화는 연삭 결과에 매우 중요합니다. 연삭 볼 직경은 3–10 mm, 너무 크거나(>15 mm), 미정련(D50 > 500 nm), 너무 작거나(< 2 mm), 비효율적(> 8 h)입니다. 펠릿 대 펠릿 비율은 10:1–15:1이며, 너무 높고(> 20:1), 마모가 심하고(ZrO₂ < 0.01 wt%), 너무 낮고(< 5:1) 주기 시간이 길며(> 8 시간). 회전 속도 400–600rpm, 너무 높음(> 800rpm) 진동(진폭 > 2mm), 너무 낮음(< 300rpm) 및 낮은 효율(< 70%). 습식 밀링용 에탄올은 응집(> 95%)을 감소시키는 반면, 물 밀링의 경우 pH 6–8(손실 < 1%)을 감소시킵니다. 분쇄 시간은 2-6 시간이며 너무 길면(> 8 시간) 불순물이 증가합니다 (Zr < 20 ppm). 분쇄 용기는 내마모성(ZrO₂, 마모율 < 0.005g/h)이어야 하며 순도(> 99.9%)를 보장해야 합니다.

유성 볼 밀의 장점은 정밀한 입자 크기(D50 = 20–200nm, 편차 < 15%)와 고효율(1–100kg/배치)입니다. nano WO₃ (비 표면적 > 50m² / g)에 적합합니다. 그러나 단점은 습식 연삭을 위한 높은 에너지 소비(100–200kWh/t)와 건조(50kWh/t)입니다. 마모 불순물(Zr < 20ppm)은 자기 분리(자기장 > 1.5T)가 필요합니다. 소음(70–90dB)은 방음(< 55dB)이어야 합니다. 유성 볼 밀은 텅스텐 연삭을 효율적으로 지원하고 나노 분말의 품질을 보장합니다.

7.2.5 여과 및 세척 장비

여과 및 세척 장비는 겔 또는 밀링 된 슬러리에서 고체 WO₃ (또는 H₂WO₄ 전구체)를 분리하고 잔류 이온 (예 : Na □□, Cl < 10 ppm) 및 유기물 (에탄올 < 0.1 중량 %)을 세척하여 제거하기 위해 황색 텅스텐 삼산화물의 졸 - 겔 제조에 사용됩니다. 이 장비는 불순물(Fe < 5ppm) 및 응집(분산액 95%)에 의한 오염을 방지하기 위해 높은 여과 효율(고형물 회수율 > 98%), 정밀한 기공 크기 제어(0.1–1µm), 산 및 알칼리 저항성(pH 1–14) > 제공해야 합니다. 흡입 필터 장치는 실험실 및 파일럿(0.1-10L/배치)에 적합하고 원심분리기는 파일럿 및 대량 생산(10-1000L/배치)에 적합하며, 둘 다 함께 작동하여 WO₃의 고순도와 균질성을 보장합니다.

7.2.5.1 흡입 여과 장치

흡입 필터는 음압 여과에 의해 WO₃ 겔 또는 슬러리에서 액체를 분리하고 실험실 및 소규모 생산 (0.1-10 L / 배치)에서 널리 사용되는 잔류 불순물을 씻어 냅니다. 심플한 디자인으로 고순도 WO₃ (> 99.9%)의 미세 가공에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

흡입 필터 장치(예: SHZ-DIII)는 브리넬 깔때기(유리 또는 폴리프로필렌 PP, 부피 0.1-5L), 멤브레인(PTFE 또는 나일론, 기공 크기 0.1-1 μ m), 흡입 필터 병(유리, 부피 0.5-10L), 진공 펌프(동력 0.1-0.5kW, 최대 진공<10Pa) 및 연결 튜브(실리콘 또는 PTFE, ID: 5-10mm)로 구성됩니다. 작동 원리는 음압 (0.01-0.09 MPa)을 생성하는 진공 펌프를 기반으로 하며, 액체는 필터 멤브레인 (여과 속도 1-10 mL/s)을 통해 흡입 필터 플라스크로 들어가고, WO₃ 젤 (입자 크기 10-50 nm) 또는 분말 (D50 = 20-200 nm)은 멤브레인에 갇혀 있습니다. PTFE 멤브레인(pH 1-14)은 내식성과 낮은 오염(Fe, C<5ppm)을 보장합니다. Brinell 깔때기의 내벽은 잔류물(고형물 손실 <1%)을 방지하기 위해 연마(Ra <0.5 μ m)됩니다.

절차는 젤 준비로 시작됩니다. WO₃ 젤 (50-80 % 수분, pH 1-3) 또는 연마 슬러리 (고체-액체 비율 1:1-1:2)를 Brinell 깔때기에 붓고 PTFE 멤브레인 (기공 크기 0.45 μ m, 청결도 Ra<0.5 μ m)을 미리 놓았습니다. 진공 펌프(진공도 0.05-0.08 MPa)를 시작하고 5-20 분 동안 여과한 다음 액체를 흡입 필터 플라스크에 수집했습니다(회수율 >98%). 필터 케이크(두께 5-20mm)를 탈이온수(전도도<10 μ S/cm, 50-200mL)로 3-5 회 세척하여 Na⁺ 및 Cl⁻(<10ppm)을 제거했습니다. 세척 후 흡입 여과가 2-5 분 동안 계속되고 필터 케이크의 수분 함량이 20-30%로 감소합니다. 필터 케이크를 오븐 (80-100 ° C, 6-12 시간)으로 옮겨 건조시켜 WO₃ 분말을 얻었다. 멤브레인과 깔때기는 탈이온수와 에탄올(잔류물< 1mg/cm²로 세척했습니다. 폐액(pH 6-8)을 중화하여 배출합니다. 이 공정에는 먼지와 산성 미스트(HCl<1mg/m³)를 제어하기 위해 환기(200m³/h)가 필요합니다. 이 제품은 유도 결합 플라즈마(ICP-MS) 및 BET 를 사용하여 순도(>99.9%)와 비표면적(20-80m²/g)에 대해 테스트되었습니다.

주요 파라미터의 최적화는 필터레이션 효과에 매우 중요합니다. 멤브레인의 공극 크기는 0.1-1 μ m 였고, 고형물 손실이 너무 크고(>2 μ m)(>2%), 작은(<0.05 μ m) 인해 여과가 느렸습니다(<1mL/s). 진공 수준은 0.05-0.08 MPa 이며, 너무 높으면(>0.09 MPa) 멤브레인이 손상되고(수명 < 100 회), 너무 낮고(<0.02 MPa) 효율이 낮으며(<50%). 케이크 두께는 5-20mm 이고 초과 두께(>30mm)는 고르지 않습니다(수분 함량 >40%). 세척량 50-200 mL, 낭비가 너무 많음(>500 mL), 불순물 잔류물이 너무 적음(비용>0.1 USD/L), 불순물 잔류물이 너무 적음(<20 mL>20 ppm). 여과 시간은 5-20 분이며 너무 길면(> 30 분) 에너지 소비가 높으며(>0.1kWh/L). 멤브레인 재료는 순도(Fe<5ppm)를 보장하기 위해 PTFE(내식성, 수명 > 200 사이클)여야 합니다. 오일 미스트 오염(<0.01mg/m³)을 방지하기 위해 진공 펌프의 배기 공기를 여과(효율 > 99%)해야 합니다.

흡입 필터 장치의 장점은 작동이 간단하고(\$500-2000/세트 투자) 소규모 시험(0.1-10L/배치)에 적합하다는 것입니다. 고순도(Fe, C<5ppm) 및 높은 여과 효율(>98%). 낮은 에너지 소비(0.05-0.1kWh/L) 및 낮은 유지 보수 비용(연간 약 \$100). 그러나 단점은 느린 여과 속도(<10mL/s)와 대용량(> 10L)에 적합하지 않다는 것입니다. 멤브레인을 교체해야 합니다(100-200 사이클당 \$10). 수동 작동의 일관성이 좋지 않습니다(편차 >10%). 흡입 필터 장치는 텅스텐 젤 분리를 위한 고순도 지원을 제공하여 제품 품질(수율 > 95%)을 보장합니다.

7.2.5.2 원심분리기

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

원심 분리기는 고속으로 회전하여 WO₃ 젤 또는 슬러리에서 액체를 분리하고 불순물을 세척하므로 파일럿 및 대량 생산 (10-1000 L / 배치)에 적합합니다. 효율적인 분리 및 자동화는 황색 삼산화 텅스텐 (순도 >99.95 %)의 대규모 준비를 지원합니다.

원심분리기(모델 LW-400)는 보울(316L 스테인리스강, 부피 5-100L, 내식성), 모터(동력 5-20kW, 속도 1000-6000rpm), 필터 백(PTFE 또는 나일론, 기공 크기 0.1-1μm), 공급 튜브(PTFE, I.D. 10-20mm) 및 제어 시스템(PLC, 정확도±1%). 작동 원리는 원심력(1000-5000g)을 기반으로 하며, 여기서 젤 또는 분말(입자 크기 10-200nm)이 보울의 내벽에 증착되고 액체가 필터 백을 통해 배출됩니다(여과 속도 10-100L/min). 316L 보울(부식률 <0.01mm/년) 및 PTFE 필터 백(pH 1-14)은 낮은 오염(Fe<5ppm)을 보장합니다. 안전 장치에는 과속 보호(> 6000rpm 전원 끄기) 및 진동 센서(진폭 >2mm 경고)가 포함됩니다.

이 공정은 슬러리 준비로 시작됩니다. WO₃ 젤 (50-80 % 수분) 또는 연마 슬러리 (고체-액체 비율 1 : 1-1 : 2)는 공급 튜브 (유속 0.1-1 L / s)를 통해 보울 (50-70 % 충전)에 주입됩니다. 원심분리기를 3000-5000rpm 으로 설정하고 5-15 분 동안 원심분리한 후 액체를 폐기물 탱크에 모았습니다(회수율 >98%). 필터 케이크 (10-30mm 두께)를 탈 이온수 (100-500 L, 전도도 <10 μS / cm)로 3-5 회 세척하여 Na's 및 Cl⁻ (<10 ppm)를 제거하였다. 추가 원심분리(3000rpm, 5 분) 후 필터 케이크의 수분 함량이 15-25%로 감소합니다. 케이크 스크레이퍼는 배출되고(0.1-0.5m/s) 오븐(80-100°C, 6-12 시간)으로 옮겨집니다. 그릇과 필터 백은 탈이온수(잔류 < 1mg/cm²)로 세척했습니다. 폐수 중화(pH 6-8) 배출. 이 공정에는 환기(500-2000m³/h)와 분진 제어(<5mg/m³)가 필요합니다. 제품은 ICP-MS, BET 및 SEM 에 의해 순도(>99.95%), 비표면적(20-80m²/g) 및 입자 크기(D50=20-200nm)에 대해 테스트되었습니다.

주요 파라미터의 최적화는 원심분리 결과에 매우 중요합니다. 회전 속도는 3000-5000rpm 이며, 너무 높으면(>6000rpm) 필터 백이 손상되고(수명이 100<) 너무 낮고(<1000rpm) 불완전한 분리(고형물 잔류물 >5%)가 손상됩니다. 필터 백 기공 크기 0.1-1 μm, 너무 큼 (>2 μm) 손실 (>2 %), 너무 작음 (<0.05 μm) 막힘 (유속 <5 L / min). 원심분리 시간은 5-15 분이며, 에너지 소비가 높고(>0.5kWh/L) 너무 길고(> 20 분) 수분 함량이 높(>3%)<3 분) 너무 짧습니다. 세척량 100-500 L, 너무 많으면(> 1000 L) 비용이 많이 들고(> \$0.1/L), 너무 적음(<50 L) 불순물 잔류물(Cl⁻>20 ppm). 케이크 두께는 10-30mm 이며 너무 두껍게(>50mm) 배출하기 어렵습니다(효율 < 80%). 그릇 재질은 316L(Fe<5ppm)이어야 하고 필터 백은 PTFE(수명 > 200 사이클)여야 합니다. 폐액 처리 효율> 98%이고 배출 < 5mg/L 입니다.

원심분리기의 장점은 빠른 분리 속도(10-100 L/min)와 대량 생산(10-1000 L/배치)에 대한 적합성입니다. 고효율 (>98 %) 및 우수한 순도 (Fe<5 ppm). 높은 수준의 자동화(PLC 제어, 편차 <1%), 연속 생산 지원. 그러나 단점으로는 높은 에너지 소비(0.2-0.5kWh/L)와 대규모 투자(\$1-100,000/단위)가 있습니다. 백 교체(100-200 사이클당 필터당 \$50) 및 그릇 청소(0.5 시간당 \$20)가 비용에 추가됩니다. 소음(80-100dB)은 방음(<55dB)이어야 합니다. 원심 분리기는 황색 삼산화 텅스텐의 효율적인 분리를 지원하여 nano-WO₃ 의 품질과

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수율을 보장합니다.

7.3 전기 화학 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조를 위한 핵심 장비

텅스텐 (WO_3)은 텅스텐 산 나트륨 (Na_2WO_4) 또는 텅스텐 산 (H_2WO_4)을 전해질로 사용하여 전기 변색 (착색 효율 $>50 \text{ cm}^2 / \text{C}$), 광촉매 (분해 효율 $>85 \%$) 및 센서 (검출 한계 $<1 \text{ ppm}$)에 널리 사용되는 WO_3 박막 또는 나노 구조 (두께 $0.1-10 \mu\text{m}$, 입자 크기 $20-200 \text{ nm}$)를 형성하는 전기 화학적 증착 방법으로 전극 표면에 증착됩니다. 이 방법은 전기장을 가하여 WO_3 증착을 유도하며, 이 공정은 WO 의 고순도($>99.9\%$)와 균일성(두께 편차 $<10\%$)을 보장하기 위해 높은 정확도(전압 편차 $\leq\pm 0.1\text{V}$), 내식성(pH 1-14) 및 안정성(5000 시간 연속 작동)을 필요로 합니다. 핵심 장비에는 전해조, 전극 및 전원 공급 장치가 포함되며 이 섹션에서는 특수 데이터 및 산업 응용 프로그램과 결합된 기능, 구조, 작동 지점 및 기술적 특성에 대해 자세히 설명합니다.

7.3.1 전해조

전해조는 전해질 용액 (예 : Na_2WO_4 , $0.05-0.2 \text{ mol} / \text{L}$), 전극 및 반응 환경을 수용하는 데 사용되는 전기 화학 증착에 의한 황색 텅스텐 삼산화물을 제조하기 위한 핵심 장비이며, 작업 전극 표면에 WO_3 의 증착을 지원합니다 (증착 속도 $0.01-0.1 \mu\text{m} / \text{min}$). 필름 품질을 보장하기 위해 내식성(HCl, H_2SO_4), 높은 기밀성(누출률 $<0.01\text{mL}/\text{분}$) 및 낮은 오염($Fe, C < 5\text{ppm}$)이 필요합니다.

전해조(예: EC-100)는 탱크(유리, PTFE 또는 316L 스테인리스강, 부피 $0.1-10\text{L}$), 전극 홀더(PTFE, $5-50\text{mm}$ 간격), 교반 장치(자기 교반, $50-500\text{rpm}$) 및 온도 제어 재킷($20-80^\circ\text{C}$)으로 구성됩니다. 작동 원리는 전기장 하에서 전해질의 산화 환원 반응을 기반으로 하며, WO_4^{2-} 는 감소되어 $WO_4^{2-} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow WO_3 + H_2O$ 로 증착됩니다. 탱크는 금속 오염 ($Fe < 5 \text{ ppm}$)을 방지하기 위해 PTFE (pH 1-14) 또는 유리 (순도 $>99.5 \%$)로 만들어졌습니다. 재킷은 물을 순환시켜 온도($25-40^\circ\text{C}$)(열전도율 $0.6 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$)로 유지하고 균일한 용액(농도 편차 $<5\%$)을 보장하기 위해 교반합니다. 밀봉 캡(실리콘 O-링, 0.1MPa 내압)은 휘발(용제 손실 $<1\%$)을 방지합니다.

프로세스는 용액 준비로 시작됩니다. Na_2WO_4 (순도 $>99.5 \%$)를 탈 이온수 (전도도 $<10 \mu\text{S} / \text{cm}$, $0.05-0.2 \text{ mol} / \text{L}$)에 용해시키고 H_2SO_4 ($0.1 \text{ mol} / \text{L}$)를 첨가하여 pH 1-3 을 조정하고 탱크에 부었다 (충전 속도 $50-80 \%$). 탱크는 사전 세척 (에탄올, 잔류 $<1 \text{ mg} / \text{cm}^2$), 고정 전극 (작업 전극 면적 $10-100 \text{ cm}^2$) 및 $10-20 \text{ mm}$ 간격으로 세척되었습니다. 교반이 시작되고($200-300\text{rpm}$) 재킷 온도를 $25-40^\circ\text{C}$ (편차 $\leq\pm 1^\circ\text{C}$)로 제어했습니다. 전원 공급 장치 (정전압 $1-5\text{V}$, $30-120 \text{ 분}$ 동안 증착)에 연결하면 WO_3 필름이 작동 전극 ($0.5-5 \mu\text{m}$ 두께)에 증착됩니다. 증착 후, 전극을 제거하고 탈 이온수 ($Cl < 10\text{ppm}$)로 세척하고 건조 (60°C , 2 시간)했다. 탱크 청소(폐기물 pH 6-8), 환기(풍량 $200-500\text{m}^3/\text{h}$) 및 산성 미스트 제어($H_2SO_4 < 1 \text{ mg}/\text{m}^3$). 주사 전자 현미경(SEM), X 선 회절(XRD) 및 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis)을 사용하여 두께(편차 $<10\%$), 결정 형태(단사정, 평면 간격 0.38nm) 및 밴드 갭($2.6-2.8\text{eV}$)을 감지했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

주요 매개변수의 최적화는 증착 효과에 매우 중요합니다. 용액의 pH 는 1-3 이고, 너무 높으면(>4) 증착이 느리고(<0.01 $\mu\text{m}/\text{min}$), 너무 낮아서(<1) 부산물($\text{WO}_2>0.5\%$)을 형성할 수 없습니다. 25-40 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 너무 높음(>60 $^{\circ}\text{C}$) 용액이 휘발되고(>5%), 너무 낮음(<20 $^{\circ}\text{C}$) 고르지 않게 증착됩니다(두께 편차 >20%). 전극 간격은 10-20mm 이고 너무 크면 (>50mm) 높은 저항 (효율 <80 %)이 있고 너무 작 으면 (<5mm) 불균일 한 전기장 (증착 편차 >15 %)이 있습니다. 교반 속도 200-300 rpm, 증착을 방해하는 너무 높음(>500 rpm), 증착을 방해하는 너무 낮음(다공성 > 20%), 너무 낮음(<100 rpm) 농도 편차 > 10%. 탱크는 PTFE 또는 유리($\text{Fe}<5\text{ppm}$)로 만들어졌으며 누출률은 < 0.01mL/min 입니다. 증착 시간은 30-120 분이며 필름이 너무 길면(>4 시간) 필름이 균열됩니다(>5%). 전해조의 장점은 환경(>95% 수율)에서 제어되어 실험실 및 소규모 시험(0.1-10L/배치)에 적합하다는 것입니다. 낮은 투자(\$500-5,000/단위) 및 간단한 유지 보수(연간 약 \$100). 그러나 용량이 제한(<10L)하고 대량 생산에 적합하지 않다는 단점이 있습니다. 산성 폐기물은 중화되어야 합니다(비용 \$20/m³). 교반하면 미량의 불순물($\text{C}<5\text{ppm}$)이 유입될 수 있습니다. 전해 전지는 황색 삼산화 텅스텐의 증착을 위한 안정적인 환경을 제공하고 필름의 품질을 보장합니다.

7.3.2 전극

전극은 전기 화학적 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조에서 WO_3 증착을 위한 캐리어 (작동 전극) 및 전류 전도 매체 (상대 전극, 기준 전극)로 사용되며, 이는 필름의 균일 성 (두께 편차 <10 %) 및 성능 (전기 변색 효율 >50 cm^2 / C)에 직접적인 영향을 미친다. 전극은 전도성이 높고(저항 < 1 Ω), 내식성(pH 1-3) 및 안정성(수명 > 1000 시간)이 있어야 합니다.

전극 시스템은 작동 전극(전도성 기관, 예: FTO 유리, 10-100 cm^2 면적), 상대 전극(백금 플레이트 또는 탄소 막대, 작동 전극의 1-2 배) 및 기준 전극(예: Ag/AgCl, 전위 0.197V 대 SHE)으로 구성됩니다. 작동 원리는 3 전극 시스템을 기반으로 하며, 작동 전극 (음극)에 WO_4^{2-} 환원 증착 WO_3 , 상대 전극 (양극)에서 산화 반응 (예 : $\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{O}_2$)이 발생하며, 기준 전극은 안정적인 전위 참조를 제공합니다. FTO 유리($\text{SnO}_2:\text{F}$, 저항 10-20 Ω/sq)는 WO_3 접착력(결합력 > 5MPa)을 위해 평평한 표면($\text{Ra}<0.1\mu\text{m}$)의 작동 전극으로 사용됩니다. 백금 카운터 전극(순도 > 99.9%)은 내식성(부식 속도 < 0.01mm/년)이며 Ag/AgCl 기준 전극(KCl 포화, 누출률 <0.01 $\mu\text{L}/\text{h}$)은 잠재적인 정확도($\pm 1\text{mV}$)를 보장합니다.

절차는 전극 전처리로 시작됩니다. FTO 유리는 유기물 ($\text{C}<1 \text{ ppm}$)을 제거하기 위해 에탄올과 탈 이온수 (40kHz, 10 분)로 초음파 처리 되었다. 백금 카운터 전극 산세(0.1 mol/L HNO_3 , 5 분) 및 기준 전극 교정(전위 편차 $\leq \pm 2 \text{ mV}$). 전극은 전해조(10-20mm 간격)에 고정되고, FTO 는 전해질(Na_2WO_4 , pH 1-3)에 담그며, 노출 면적은 10-100 cm^2 입니다. WO_3 박막 형성 (0.5-5 μm 두께)은 전원 공급 장치 (정전압 2-5 V 또는 정전류 0.1-1 mA / cm^2)에 연결되고 30-120 분 동안 증착되었을 때 형성되었다. 증착 후, FTO 를 물($\text{Cl}^{-}<10\text{ppm}$)로 세척하고 건조(60 $^{\circ}\text{C}$, 2 시간)했습니다. 재사용하기 전에 전극을 세척하십시오(잔류 < 1mg/ cm^2). 이 공정은 산성 미스트($\text{H}_2\text{SO}_4<1\text{mg}/\text{m}^3$)를 피하기 위해 환기(200 m^3/h)가 필요합니다. 박막은 SEM, XRD 및 UV-Vis 로 형태(다공성<10%), 결정 형태 및 밴드 갭(2.6-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.8eV)에 대해 테스트되었습니다.

주요 매개변수의 최적화는 필름 품질에 매우 중요합니다. 작동 전극 면적은 10–100cm²이고 전류는 고르지 않습니다(>200cm²)(두께 편차 >20%). 상대 전극의 면적은 작동 전극의 면적 > 1-2 배이며 저항이 너무 작고(<1 배) 높으며(효율 <80%). 전극 간격은 10–20mm 이고 전기장이 약합니다(>50mm)(증착 속도 <0.01μm/min). FTO 저항 10–20Ω/sq, 너무 높음(>50 Ω/sq) 및 고르지 않은 증착(>15%). 기준 전극 전위 정확도± 1mV 이고 편차± 5mV 는 제어에 영향을 미칩니다(전압 오류 > 0.1V). 증착 시간은 30-120 분이며 너무 길면(>4 시간) 필름이 헐거워집니다(다공성 >20%). 전극 재료는 고순도(FTO, Pt, Fe<1ppm)여야 합니다. 이 센서의 장점은 높은 전기 전도성(FTO 전류 밀도 > 1mA/cm²)과 내식성(Pt 수명 >2000 시간)입니다. 균일한 증착 지원(두께 편차 <10%). 그러나 단점으로는 FTO(US\$ 10–50/dm²)의 높은 비용과 백금 전극의 높은 비용(US\$ 100/cm² >)이 있습니다. 기준 전극을 보정해야 합니다(3 개월마다, 비용 \$20). 전극은 텅스텐의 증착을 위한 효율적인 캐리어를 제공하고 박막 성능을 보장합니다.

7.3.3 전원 공급 장치

전원 공급 장치는 텅스텐의 전기 화학적 증착을 위한 안정적인 전압 또는 전류를 제공하고 WO₃가 작업 전극에 증착되도록 구동합니다 (증착 속도 0.01-0.1 μm / min). 막의 균일성(두께 편차 < 10%)을 보장하기 위해서는 높은 정확도(전압± 0.1V, 전류±0.1mA), 넓은 범위(0-30V, 0-5A) 및 안정성(리플<1%)이 필요합니다.

전원 공급 장치(예: CHI-660E)는 DC 출력 모듈(50–500W 전원), 제어 패널(디지털 디스플레이, 정확도 ± 0.1%), 전극 인터페이스(3 전극 시스템) 및 피드백 회로(응답 시간 <0.1ms)로 구성됩니다. 작동 원리는 정전압(1–5V), 정전류(0.1–1mA/cm²) 또는 순환 전압주사법(CV, 스캔 속도 1–100mV/s)을 기반으로 하여 전극 표면에서 WO₃로 감소하는 전기장을 제어합니다. 전원 공급 장치는 여러 모드(전위차 가변, 갈바노스타트, 펄스 증착)를 지원하며, 균질한 박막(다공성 < 10%)을 위한 전위차 증착 및 나노 구조(입자 크기 20–100nm)를 위한 펄스 증착이 있습니다. 피드백 회로는 기준 전극(Ag/AgCl)을 통해 출력(오류 <±0.1V)을 조정하여 안정적인 증착을 보장합니다.

프로세스는 매개변수 설정으로 시작됩니다. 전원 공급 장치는 3 개의 전극(FTO, Pt, Ag/AgCl)에 연결되고 출력은 보정됩니다(전압 편차 <± 0.1V). 2-5V 의 일정한 압력(박막 증착) 또는 0.5mA/cm²(나노 구조)의 정전류를 30-120 분 동안 설정합니다. 전해질(Na₂WO₄, pH 1–3)은 25–40°C(200rpm)에서 교반합니다. 증착 중에 전원 공급 장치는 전류(정확도 ± 0.1mA)를 모니터링하고 전기량(쿨롱 효율>90%)을 기록합니다. 증착 후 전원 및 전극 물 세척(Cl⁻<10ppm)을 실행하고 건조(60°C, 2 시간)합니다. 전원 공급 장치는 정기적으로 보정됩니다(6 개월마다, 오류 <± 0.1%). 간섭(리플 > 1%)을 피하기 위해 공정 < 접지(저항 1 Ω)해야 합니다. SEM 및 UV-Vis 에서 두께(0.5–5μm) 및 밴드갭(2.6–2.8eV)에 대한 박막이 검출되었습니다.

주요 매개변수의 최적화는 광상의 품질에 매우 중요합니다. 전압은 2-5V, 너무 높음(>10V),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기포 간섭(다공성>20%), 너무 낮음(<1V) 및 느린 증착(<0.01 $\mu\text{m}/\text{min}$)입니다. 전류 밀도는 0.1–1mA/cm²이며, 느슨한 필름(>20%)의 경우 너무 높고(>5mA/cm²), 너무 낮고(<0.05mA/cm²) 효율이 낮으며(<50%). 증착 시간은 30-120 분이며 크래킹(>5%)이 너무 길다(>4 시간). 전원 공급 장치 정확도 $\pm 0.1\text{V}/\pm 0.1\text{mA}$ 이고 0.5V \pm 편차는 균일성(>15%)에 영향을 미칩니다. 0.1–10Hz 의 펄스 증착 주파수는 나노 구조를 최적화합니다(입자 크기 편차 <10%). 리플<1%, 너무 높음(>5%) 및 고르지 않은 필름(>20%). 전원 공급 장치의 장점은 정밀한 제어(오류 $\pm 0.1\%$)와 다중 모드 지원(> 95% 수율)입니다. 투자는 적당하고(1000-10,000 달러/단위) 수명이 길고(>5 년). 그러나 단점은 더 높은 에너지 소비(0.1–0.5kWh/m²)입니다. 복잡한 프로세스에는 시운전이 필요합니다(> 1 시간). 정전은 전문적인 수리가 필요합니다(시간당 \$500). 전원 공급 장치는 황색 삼산화 텅스텐 증착에 안정적인 원동력을 제공하여 필름 품질과 성능을 보장합니다.

7.3.4 전해질의 구성 및 보관 장비

전해질 준비 및 저장 장비는 황색 삼산화 텅스텐의 전기 화학적 증착에서 균질 전해질 용액 (예 : Na₂WO₄ + H₂SO₄, pH 1-3)을 준비하고 장기 보관을 위해 저장하여 WO₃ 증착 (증착 속도 0.01-0.1 $\mu\text{m} / \text{min}$)의 안정성과 반복성을 보장하는 데 사용됩니다. 이 장비는 WO₃ 순도 (>99.9 %)에 영향을 미치는 불순물을 피하기 위해 효율적인 혼합 (분산 > 95 %), 산 및 알칼리 저항 (pH 1-14) 및 높은 청결도 (Fe<5 ppm)를 제공해야 합니다. 교반 장비는 용액 준비에 사용되고 저장 용기는 전해질 보존에 사용되며 이 둘은 용액의 품질과 공정의 효율성을 보장하기 위해 함께 작동합니다.

7.3.4.1 혼합 장비

전해질 용액의 혼합은 Na₂WO₄, 산성화제(예: H₂SO₄) 및 용매(탈이온수)의 균일한 분산(<5%의 농도 편차)을 보장하기 위해 기계적 또는 자기적으로 구동되어 scheelite 증착을 위한 안정적인 전해질 환경을 제공합니다. 소규모(0.1–10L/배치)에서 파일럿(10–100L/배치)에 적합하며 실험실 및 산업 전환에 널리 사용됩니다.

교반기(MS-H-Pro+형)는 교반기(자기 또는 기계식, 출력 0.1–1kW), 교반 바(PTFE 코팅, 길이 20–100mm) 또는 패들(PTFE, 직경 20–100mm), 용기(유리 또는 316L 스테인리스강, 부피 0.5–100L) 및 속도 제어 모듈(50–2000rpm, 정확도 $\pm 1\%$). 작동 원리는 회전으로 생성된 유동장(전단 속도 10–100 s⁻¹), 용액에서 Na₂WO₄(0.05–0.2 mol/L) 및 H₂SO₄(0.1 mol/L)의 빠른 혼합을 기반으로 하며, pH 를 1-3 으로 조정하여 안정적인 전해질(침전 속도 <1%)을 생성합니다. PTFE(pH 1–14, 마찰 계수 < 0.1)는 금속 오염(Fe<5ppm)을 방지합니다. 자기 교반은 소량(<10L)에 적합하고 기계적 교반은 대량(10–100L)을 지원합니다. 속도 제어 모듈은 디지털 디스플레이 패널(오차 $\pm 1\text{rpm}$)을 통해 유량장(레이놀즈 번호 > 1000)을 정밀하게 조절합니다.

프로세스는 용액 준비로 시작됩니다. 탈 이온수 (전도도 <10 $\mu\text{S} / \text{cm}$)를 용기 (50-80 % 충전), Na₂WO₄ (순도 > 99.5 %, 0.05-0.2 mol / L)에 붓고 교반을 시작 (자기 200-500 rpm 또는 기계 100-300 rpm)하고 10-20 분 동안 용해 (농도 편차 <5 %). H₂SO₄(0.1–0.5 mol/L, 적하

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

속도 0.1–0.5 mL/분)를 천천히 첨가하고 pH 를 1–3 으로 조정된 다음 균일성(pH 편차 ± 0.1)을 보장하기 위해 10–30 분 동안 계속 저어줍니다. 용액은 샘플링 밸브(pH 측정기, 정확도 ± 0.01)로 테스트되고 저장 용기로 옮겨집니다. 교반기 및 용기를 탈이온수 및 에탄올(잔류물 $< 1\text{mg}/\text{cm}^2$)로 세척하였다. 이 공정에는 환기(풍량 200–500 m^3/h)와 산성 미스트($\text{H}_2\text{SO}_4 < 1\text{mg}/\text{m}^3$) 제어가 필요합니다. 전해질은 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis)과 전도도로 검출하여 투명도($>95\%$)와 이온 농도($\text{Na} < 0.2 \text{mol}/\text{L}$)를 검출했습니다.

중요한 매개변수의 최적화는 솔루션 품질에 매우 중요합니다. 교반 속도 200–500rpm(자기) 또는 100–300rpm(기계식), 너무 높으면($>1000\text{rpm}$) 기포(부피 $>5\%$), 너무 낮음($<50\text{rpm}$), 고르지 않은 혼합(농도 편차 $>10\%$)이 생성됩니다. pH 1–3, 너무 높음(>4), 낮은 증착 효율($<0.01\mu\text{m}/\text{min}$), 너무 낮음(<1), 부산물 증가($\text{WO}_2 > 0.5\%$). 용액 온도는 20–40 $^{\circ}\text{C}$, 너무 높으면 ($>60^{\circ}\text{C}$) 휘발 (용매 손실 $>5\%$), 너무 낮음 ($<10^{\circ}\text{C}$)은 천천히 용해됩니다 (>30 분). 용기 충전률은 50–80%, 너무 높고($>90\%$) 고르지 않은 혼합(분산 $< 90\%$)입니다. 교반 바 또는 패들은 순도($\text{Fe} < 5\text{ppm}$)를 보장하기 위해 PTFE(부식 속도 $<0.01\text{mm}/\text{년}$)가 필요합니다. 혼합 시간은 20–50 분, 너무 길거나(> 1 시간) 에너지 소비가 높고, 너무 짧으면(< 10 분) 고르지 않은(편차 $>10\%$). 배기 가스 처리 효율 $> 98\%$ 이고 배출 $< 1\text{mg}/\text{m}^3$ 입니다.

혼합 시스템의 장점은 균일한 혼합(분산 $> 95\%$), 조정 가능한 속도(50–2000rpm) 및 광범위한 전해질(Na_2WO_4 , H_2WO_4)에 적합하다는 것입니다. 낮은 투자(\$500–5,000/단위) 및 간단한 유지 보수(연간 약 \$100). 소규모 및 파일럿 규모 테스트에서 높은 효율성($>95\%$). 그러나 단점으로는 높은 에너지 소비(0.05–0.2kWh/L)와 기계적 혼합($> \$100$ 투자)이 필요한 고용량($>100\text{L}$)이 있습니다. PTFE 구성 요소의 마모(수명 < 1 년, 비용 \$20/개)로 인해 미량의 불순물($\text{C} < 5\text{ppm}$)이 발생할 수 있습니다. 산성 미스트 처리는 비용을 증가시킵니다(약 \$10/ m^3). 교반 장비는 텅스텐 전해질의 준비를 효율적으로 지원하고 용액의 품질을 보장합니다.

7.3.4.2 스토리지 컨테이너

저장 용기는 휘발 ($<1\%$ 손실), 오염 ($\text{Fe} < 5 \text{ppm}$) 및 열화 (침전물 $<1\%$)를 방지하고 증착 공정 (막 두께 편차 $< 10\%$)을 보장하기 위해 황색 삼산화 텅스텐의 전기 화학적 증착에 의해 제조 된 전해질 용액의 장기 저장에 사용됩니다. 실험실(0.1–10L) 및 파일럿(10–1000L)에 적합합니다.

저장 용기(PTFE-50L 형)의 구조는 용기 본체(PTFE, 유리 또는 316L 스테인리스강, 부피 0.5–1000L), 밀봉 뚜껑(PTFE 또는 실리콘 O-링, 압력 저항 0.1MPa), 샘플링 밸브(PTFE, 내경 5–10mm) 및 배기 밸브(316L 스테인리스강, 압력 릴리프 $> 0.2\text{MPa}$)로 구성됩니다. 작동 원리는 밀폐 보관을 기반으로 하며, 전해질(예: Na_2WO_4 , pH 1–3)이 용기 내부에서 안정적으로 유지되고 PTFE(pH 1–14 내성) 또는 유리(순도 $>99.5\%$)가 부식 및 오염(Fe , $\text{C} < 5\text{ppm}$)을 방지합니다. 밀봉 캡은 $<0.01\text{mL}/\text{분}$ 의 누출률을 보장하며, 배기 밸브는 공기 침투($\text{O}_2 < 1\text{ppm}$)를 방지하기 위해 약간의 양압(0.01–0.05MPa)을 유지합니다. 용기의 내벽은 잔류물(고형물 $< 1\text{mg}/\text{cm}^2$)을 줄이기 위해 연마($\text{Ra} < 0.5\mu\text{m}$)됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

절차는 용액을 전송하는 것으로 시작합니다. 배합된 전해질(0.05–0.2 mol/L Na₂WO₄, pH 1–3)은 PTFE 튜브(내경 5–10mm)를 통해 용기(50–80% 충전)로 펌핑됩니다. 용기를 미리 세척하고(탈이온수 및 에탄올, 잔류 < 1mg/cm²) 뚜껑을 단단히 닫았습니다(누출률 < 0.01mL/분). 보관 환경은 15–25°C(5°C ≤ 변동)로 제어되며, 광분해(강수량<1%)를 방지하기 위해 빛으로부터 보호됩니다(광 투과율<1%). pH(편차 <±0.1) 및 농도(UV-Vis, 오차 <±1%)를 측정하기 위해 주기적인 샘플링(일주일에 한 번 5-10mL)을 수행했습니다. 사용 시 샘플링 밸브(유속 0.1–0.5L/min)에 의해 추출된 나머지 용액은 계속 보관됩니다(최대 6 개월). 용기를 탈이온수(폐기물 pH 6-8)로 세척하고 환기(풍량 200m³/h)하여 산성 미스트(H₂SO₄<1mg/m³)를 제어했습니다. 전해질은 ICP-MS 및 전도도로 검출하여 불순물(Na⁺, Cl<10ppm)과 안정성(전도도 편차 <5%)을 검출했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 스토리지 결과에 매우 중요합니다. 보관 온도는 15–25°C 이고 너무 높으면(>40°C) 휘발이 가속화되고(>5%), 너무 낮으면(<5°C) 결정이 침전됩니다(>1%). 누출률<0.01mL/분이고 오염 위험이 높음(Fe>10ppm)(>0.1mL/분). 충전 비율은 50-80%, 너무 높음(>90%), 너무 높은 압력(>0.2 MPa), 너무 낮음(<30%), 대기 오염(O₂>5ppm)입니다. 용기는 순도(Fe<5ppm)를 보장하기 위해 PTFE 또는 유리(부식 속도 < 0.01mm/년)로 만들어야 합니다. 배기 밸브 압력은 0.01–0.05 MPa 이고 용액 손실(>1%)이 너무 높습니다(>0.1 MPa). 보관 시간이 6 개월<, 열화(강수량 > 2%)가 너무 길다(>1 년). 샘플링 밸브의 유속은 0.1–0.5 L/min 이었고 방해 용액이 너무 빠르기 (>1 L/min) (편차 >5 %).

보관 용기의 장점은 기밀성이 높고(누출률 < 0.01mL/분) 장기 보관(> 6 개월)이 가능하다는 것입니다. 내부식성(pH 1–14) 및 우수한 순도(Fe<5ppm). 투자액은 적당하며(\$500–5000/단위) 다양한 용량(0.5–1000L)에 적합합니다. 그러나 단점은 대형 용기(> 1000L)(> \$100)의 높은 비용을 포함합니다. 복합 청소(세션당 0.5 시간, 비용 \$10). PTFE 용기는 비싸다(> \$1,000/L). 저장 용기는 텅스텐 전해질에 안정적인 보관 환경을 제공하고 증착 공정의 신뢰성을 보장합니다.

7.3.5 가열 및 냉각 장치

가열 및 냉각 장치는 전해질 용액의 온도 (20-60 ° C) 및 전극의 열처리 (60-200 ° C) 또는 냉각 (<40 ° C)을 전기 화학 증착에 의한 황색 텅스텐 삼산화물의 제조에서 WO₃ 증착 속도 (0.01-0.1 μm/min) 및 필름 특성 (다공성 <10%)을 최적화하는 데 사용됩니다. 장비는 열 응력(균열률<2%) 및 용액 휘발(<1% 손실)을 방지하기 위해 정밀한 온도 제어(편차 <±1°C), 내식성(H₂SO₄, pH 1-3) 및 효율적인 열 전달(>90% 효율)을 제공해야 합니다.

가열 및 냉각 장치는 일반적으로 전해조에 통합되거나 독립적으로 작동하며 일반적인 유형에는 자동 온도 조절 수조 및 재순환 냉각기가 포함됩니다. 자동 온도 조절 수조(모델 DK-8D)의 경우 구조는 싱크대(316L 스테인리스 스틸, 부피 5–50L), 가열 튜브(니크롬, 전력 0.5–2kW), 냉각 코일(구리, 열전도율> 300W/m·K), 순환 펌프(유량 1–10L/min) 및 온도 조절기(PID, 정확도 ± 0.5°C). 작동 원리는 물의 열용량(4.18kJ/kg·K), 가열 튜브를 20–60°C 로 가열하여 증착(수율 >95%)을 용이하게 하고 냉각 코일을 물(5–15°C)로 순환시켜 온도를 낮추고 과열(>80°C)을 방지합니다. 316L 등급(부식 속도 <

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.01mm/년)은 낮은 오염($Fe < 5\text{ppm}$)을 보장합니다. 안전 장치에는 과열 보호(전원 끄기 $> 85^\circ\text{C}$) 및 액체 레벨 경고(수위 $< 10\%$)가 포함됩니다.

이 공정은 전해질 준비로 시작됩니다. 전해질(Na_2WO_4 , 0.05–0.2 mol/L, pH 1–3)을 전해조에 넣고 탈이온수를 수조(전도도 $< 10\mu\text{S}/\text{cm}$, 충전 속도 80–90%)에 주입하고 온도를 25–40°C(증착에 최적)로 설정하고 10–20 분(편차 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$)으로 예열했습니다. 증착(정압 2–5V, 30–120 분) 동안 순환 펌프(유량 2–5L/min)는 균일한 온도(편차 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$)를 유지합니다. 증착 후 전극($\text{FTO} + \text{WO}_3$)을 열처리를 위해 수조(60–80°C, 10–30 분)로 옮겨 필름 접착력($> 5\text{MPa}$)을 향상시키거나 열 응력을 피하기 위해 $< 40^\circ\text{C}$ (5–10 분)로 냉각합니다. 단위 세척(잔류물 $< 1\text{mg}/\text{cm}^2$), 폐수 처리(pH 6–8). 이 공정에는 환기(풍량 200–500m³/h)와 산성 미스트($\text{H}_2\text{SO}_4 < 1\text{mg}/\text{m}^3$) 제어가 필요합니다. 주사 전자 현미경(SEM) 및 X 선 회절(XRD)을 사용하여 형태(다공성 $< 10\%$)와 결정 형태(단사정, 결정 평면 간 0.38nm 간격)를 검출했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 온도 제어의 효율성에 매우 중요합니다. 증착 온도는 25–40°C, 휘발($> 5\%$)이 너무 높고($> 60^\circ\text{C}$), 느린 증착($< 0.01\mu\text{m}/\text{min}$)은 너무 낮음($< 20^\circ\text{C}$)입니다. 열처리 온도는 60–80 °C, 너무 높음 ($> 200^\circ\text{C}$), 필름 균열 ($> 5\%$), 너무 낮음 ($< 40^\circ\text{C}$) 및 접착력 불량 ($< 3\text{MPa}$)입니다. 온도 제어 정확도는 $0.5^\circ\text{C} \pm$, $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 편차는 불균일한 증착(두께 편차 $> 15\%$)으로 이어집니다. 순환 펌프의 유량은 2–5 L/min 이고 온도 편차가 너무 낮을 경우 $\pm 3^\circ\text{C}$ ($< 1\text{L}/\text{min}$)입니다. 냉각수 온도는 5–15°C 이며 너무 높고($> 20^\circ\text{C}$) 효율이 낮으며($< 80\%$). 싱크대의 재질은 316L($Fe < 5\text{ppm}$)이어야 하며 수질은 순수해야 합니다(불순물 $< 10\text{ppm}$). 실행 시간은 10–120 분이며 너무 길게(> 4 시간) 에너지 소비가 높고($> 0.2\text{kWh}/\text{L}$) 있습니다. 이 장치의 장점은 정밀한 온도 제어(편차 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$)와 증착 및 열처리 지원(수율 $> 95\%$)입니다. 투자는 적당하고($\$1,000$ – $\$5,000$ /단위) 유지 보수는 간단합니다(연간 약 $\$200$). 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.1 – $0.3\text{kWh}/\text{L}$)와 초고온($> 200^\circ\text{C}$)에 적합하지 않다는 것입니다. 싱크대의 석회질을 제거해야 합니다(3 개월마다, 비용 $\$20$). 가열 및 냉각 장치는 텅스텐의 증착을 위한 안정적인 환경을 제공하고 필름의 품질을 보장합니다.

7.3.6 여과 장비

여과 장비는 전기 화학적 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조시 전해질 용액을 정제하고, 부유 입자 ($> 0.1\mu\text{m}$), 불순물 ($Fe, C < 10\text{ppm}$) 및 침전 ($< 1\%$)을 제거하고, 용액의 투명도 ($> 95\%$) 및 WO_3 필름의 순도 ($> 99.9\%$)를 보장하는 데 사용됩니다. 장비는 균일한 증착(두께 편차 $< 10\%$)을 지원하기 위해 고효율 여과($> 98\%$ 회수), 내식성(pH 1–3) 및 낮은 오염($Fe < 5\text{ppm}$)이 필요합니다.

여과 장비의 일반적인 유형에는 진공 필터 및 압력 필터가 포함되며 실험실(0.1–10L/배치)에 적합한 진공 필터(모델 SHZ-DIII)가 있습니다. 구조는 브리넬 깔때기(폴리프로필렌 PP, 부피 0.1–5 L), 멤브레인(PTFE, 기공 크기 0.1–0.45 μm), 흡입 필터 병(유리, 부피 0.5–10 L), 진공 펌프(동력 0.1–0.5 kW, 최대 진공 $< 10\text{Pa}$) 및 튜브(PTFE, 내경 5–10 mm)로 구성됩니다. 작동 원리는 음압(0.05–0.08 MPa), 멤브레인을 통한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전해질(Na_2WO_4 , pH 1-3) 통과(여과 속도 1-10 mL/s) 및 입자 보유(제거율>99%)를 기반으로 합니다. PTFE 멤브레인(pH 1-14)은 오염($\text{Fe}<5\text{ppm}$)을 방지하고 깔때기 연마($\text{Ra}<0.5\mu\text{m}$)는 캐리오버($<1\text{mg}/\text{cm}^2$)를 줄입니다.

절차는 용액의 전처리로 시작됩니다. 전해질($0.05\text{--}0.2\text{ mol/L Na}_2\text{WO}_4$)을 1-2 시간(침전<1%) 동안 방치하고 Brinell 깔때기에 붓고 사전 배치된 PTFE 필터(기공 크기 $0.45\mu\text{m}$, 청결도 $\text{Ra}<0.5\mu\text{m}$)를 사전 배치했습니다. 진공 펌프(진공도 $0.05\text{--}0.08\text{ MPa}$)를 시작하고 5-20 분 동안 여과하고 여과액을 흡입 필터 병에 수집했습니다(회수율 >98%). 멤브레인의 잔류 물 ($<0.1\text{ g/L}$)을 탈 이온수 (50-100 mL)로 세척하고 폐기물을 중화 (pH 6-8)했다. 여과액을 전해조로 옮기고 멤브레인과 깔때기를 세척했습니다(에탄올, 잔류 $<1\text{mg}/\text{cm}^2$). 이 공정에는 환기($200\text{m}^3/\text{h}$)와 산성 미스트($\text{H}_2\text{SO}_4 <1\text{mg}/\text{m}^3$) 제어가 필요합니다. 여과액은 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis)과 전도도 측정기로 검출하여 투명도(>95%)와 불순물($\text{Fe}<5\text{ppm}$)을 검출했습니다.

주요 파라미터의 최적화는 필터레이션 효과에 매우 중요합니다. 멤브레인 공극 크기는 $0.1\text{--}0.45\mu\text{m}$ 이며, 너무 크거나($>1\mu\text{m}$) 누출(>1%)하고 너무 작은($<0.05\mu\text{m}$) 입자는 속도가 느려집니다($<1\text{ mL/s}$). 진공 $0.05\text{--}0.08\text{ MPa}$, 너무 높음($>0.09\text{ MPa}$), 멤브레인 손상(수명 <100 회), 너무 낮음($<0.02\text{ MPa}$) 및 낮은 효율($<50\%$). 여과 시간은 5-20 분이며 너무 길면(>30 분) 에너지 소비가 높으며($>0.1\text{kWh/L}$). 세척량은 50-100mL 이고, 너무 많으면($>200\text{mL}$), 비싸고($> \$0.1/\text{L}$), 너무 적고($<20\text{mL}$) 잔류 불순물($\text{Fe}>10\text{ppm}$). 멤브레인에는 PTFE(수명 >200 회)가 필요하고 깔때기에는 PP($\text{Fe}<5\text{ppm}$)가 필요합니다. 배기 가스 처리 효율>98%이고 배출 $<1\text{mg}/\text{m}^3$ 입니다. 여과 장비의 장점은 효율성이 높고(>99% 제거) 소규모 테스트($0.1\text{--}10\text{L}/\text{batch}$)에 적합하다는 것입니다. 낮은 투자($\$500\text{--}2,000/\text{단위}$) 및 간단한 유지 관리(연간 약 $\$100$). 그러나 여과 속도가 느리고($<10\text{mL/s}$) 대량 생산에 적합하지 않음($>10\text{L}$)이라는 단점이 있습니다. 멤브레인을 교체해야 합니다($100\text{--}200$ 사이클당 $\$10$). 여과 장비는 황색 삼산화 텅스텐 전해질의 정제를 지원하고 침전물의 품질을 보장합니다.

7.3.7 분석 및 테스트 장비

분석 및 테스트 장비는 전해질 (pH, 농도) 및 WO_3 박막의 성능 (두께, 결정 형태, 밴드 갭)을 실시간으로 모니터링하는 데 사용되며, 공정 안정성 (증착 편차 $<10\%$) 및 제품 품질 (순도 $>99.9\%$)을 보장하기 위해 전기 화학적 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐을 준비합니다. 이 장치는 광촉매(열화 효율>85%) 및 전기 변색(착색 효율> $50\text{cm}^2/\text{C}$) 응용 분야를 지원하기 위해 높은 정확도(오류 $\leq\pm 1\%$), 빠른 응답(<1 초) 및 내구성(수명 >5 년)이 필요합니다.

분석 및 테스트 장비에는 pH 측정기, 자외선 가시광선 분광계(UV-Vis), 주사 전자 현미경(SEM), X 선 회절(XRD) 및 전위차 조절기가 포함됩니다. 전위차(모델 CHI-660E)를 예로 들면 그 구조에는 전극 인터페이스(3 전극 시스템), 전위/전류 제어 모듈(정확도 $\pm 0.1\text{mV}/\pm 0.1\mu\text{A}$), 데이터 수집 시스템(샘플링 속도 $>1\text{kHz}$) 및 소프트웨어(CV, EIS 분석)가 포함됩니다. 지형을 위한 SEM(모델 JEOL JSM-7800F, 해상도 1nm), 결정 형태를 위한 XRD(Bruker D8, 각도 정확도 $\pm 0.01^\circ$), 밴드 갭 측정을 위한 UV-Vis(Shimadzu UV-2600, 파장

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정확도±0.5nm), 전해질 모니터링을 위한 pH 측정기(Mettler Toledo, 정확도±0.01)와 같은 기타 장치.

절차는 전해질 테스트로 시작됩니다. pH 측정기는 용액(Na_2WO_4 , 0.05–0.2 mol/L)을 측정하고 pH 1–3(편차 $\leq \pm 0.1$)을 제어하며 UV-Vis 는 농도(오차 $\leq \pm 1\%$)를 감지합니다. 증착(2–5 V, 30–120 분) 동안 워크스테이션은 전류(0.1–1 mA/cm²) 및 전류(쿨롱 효율>90%)를 기록하고 증착 역학(CV 곡선, 스캔 속도 10mV/s)을 분석합니다. 증착 후, WO₃ 박막 (FTO 기판)의 형태는 SEM (다공성 <10 %)으로 관찰되었고, 결정 형태는 XRD (단사정, 평면 간격 0.38 nm)로 확인되었으며, 밴드 갭은 UV-Vis (2.6-2.8 eV)로 측정되었다. 시료 세척(에탄올, 잔류 < 1 mg/cm²), 장비 교정(월간, 오류 $\leq \pm 1\%$). 공정은 깨끗한 환경(분진< 1mg/m³)에서 이루어져야 합니다. 테스트 데이터는 공정을 최적화하는 데 사용되었습니다(증착 속도 0.01–0.1µm/min).

주요 매개변수의 최적화는 감지 효과에 매우 중요합니다. pH 정확도는 0.01±, 편차>±0.1 은 증착에 영향을 미칩니다(WO₂>0.5%). UV-Vis 파장 정확도± 0.5nm 이고 오류는 2nm 오판 농도(>5%)>±입니다. SEM 분해능< 1nm, 나노 구조(20–200nm)를 분해하기에는 너무 낮음(>5nm). XRD 각도 정확도는 ±0.01°이고 편차는 결정 형태를 잘못 판단한 >±0.05°입니다(단사정 비율 <80%). 워크스테이션의 현재 정확도는 0.1µA± 1µA>± 오차는 역학 해석에 영향을 미칩니다(오차 > 10%). 검출 시간은 샘플당 5-30 분으로, 너무 길고(>1 시간) 비효율적입니다(<10 샘플/시간). 장비의 재질은 깨끗해야 합니다(유리, Pt, Fe<1ppm). 분석 및 테스트 장비의 장점은 높은 정확도(오류<±1%)와 다중 매개변수 분석(형태, 결정 형태, 성능)을 지원한다는 것입니다. 투자는 높지만(US\$10,000-500,000/단위) 서비스 수명은 길지만(>5 년). 그러나 단점으로는 복잡한 작동(1 주일 > 교육 필요)과 높은 유지 보수 비용(단위당 연간 약 \$1,000)이 있습니다. 샘플 준비는 깨끗해야 합니다(먼지< 1mg/m³). 분석 및 테스트 장비는 텅스텐의 증착에 대한 품질 보증을 제공하고 필름의 성능을 보장합니다.

7.4 물리적 기상 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐 제조를 위한 핵심 장비

텅스텐 또는 WO 가 물리 기상 증착 (PVD)에 의해 제조 될 때, 텅스텐 또는 WO 를 진공 환경에 증착하여 전기 변색 (착색 효율 >50cm² / C), 광촉매 (분해 효율 >85 %) 및 센서 (검출 한계 <1 ppm)에 널리 사용되는 WO₃ 박막 (두께 10-1000 nm)을 형성합니다. PVD 방법은 증발 또는 스퍼터링에 의해 대상 원자를 기판으로 전달하며 고진공 (<10⁻⁴ Pa), 정밀 제어 (증착 속도 0.1-10 nm / s) 및 안정성 (5000 시간 연속 작동)을 필요로 하여 WO₃ 필름의 고순도 (>99.9 %), 균일 성 (두께 편차 <5 %) 및 다형성 (단사 또는 비정질)을 보장합니다. 핵심 장비에는 증발원 장비, 진공 시스템, 기판 가열 및 냉각 장치 및 필름 두께 모니터링 장비가 포함되며 이 섹션에서는 기능, 구조, 작동 지점 및 기술적 특성을 전문적으로 분석하고 전문 데이터 및 산업 응용 프로그램과 결합합니다.

7.4.1 증발 소스 장비

PVD 에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조에서, 증발 소스 장비는 대상 물질 (예 : WO₃)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분말 또는 텅스텐 입자)을 기화 상태로 가열하고 WO₃ 박막을 형성하기 위해 기판에 증착될 원자 또는 분자의 흐름을 생성하는 데 사용됩니다 (증착 속도 0.1-5 nm/s). 장비는 필름 품질을 보장하기 위해 높은 열 효율(>90%), 높은 온도 저항(>2000°C) 및 낮은 오염(Fe, C<5ppm)을 가져야 합니다.

증발 소스 장비의 일반적인 유형에는 저항 증발 소스 및 전자빔 증발 소스가 포함되며 전자빔 증발 소스 (모델 EB-500)는 고온 및 높은 정확도로 인해 WO₃ 증착에 널리 사용됩니다. 구조는 도가니(알루미나 또는 폴리브텐, 부피 10-100cm³, 온도 저항>2500°C), 전자총(전력 1-10kW, 빔 전류 0.1-1A), 수냉식 시스템(유속 1-5L/min, 5-15°C) 및 편향 자기장(강도 0.01-0.1T). 작동 원리는 전자빔 (가속 전압 5-10 kV)이 대상에 충격을 가하고 WO₃ (용점 1473 °C) 승화를 통해 기판 (10-50cm 거리)에 증착되는 증기상을 형성합니다. 도가니는 오염(Al<5ppm)을 방지하기 위해 알루미나(순도 99.5%)로 만들어졌으며 수냉식 시스템은 과열(<100°C)로부터 보호됩니다. 편향 자기장은 빔 스폿(직경 1-5mm)을 제어하여 균일한 증발(증착 편차 <5%)을 보장합니다.

절차는 표적 준비로 시작됩니다. WO₃ 분말(순도>99.9%, 입자 크기 0.1-1mm) 또는 텅스텐 과립(직경 1-5mm)을 도가니(전하 밀도 0.5-1g/cm³)에 적재하고 도가니를 사전 세척(에탄올, 잔류 < 1mg/cm²)했습니다. 진공 챔버를 <10⁻⁴ Pa 로 펌핑하고, 전자총(전력 2-5kW)을 활성화하고, 대상을 예열하고(5 분 동안 1000-1200°C), 증발 온도를 상승(1500-1800°C)했습니다. 100-500nm 의 필름 두께에서 10-60 분 동안 전자빔 스캐닝 타겟(주파수 1-10Hz). 증착 후 전자총을 끄고 < 100°C(10-20 분)로 냉각합니다. 표적 잔류물 회수(>90%), 도가니 세척(초음파, 40kHz). 공정은 깨끗해야 합니다(분진< 0.1mg/m³). 주사 전자 현미경(SEM) 및 X 선 회절(XRD)을 사용하여 형태(다공성<5%)와 결정 형태(단사정, 평면 간격 0.38nm)를 검출했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 증착 효과에 매우 중요합니다. 증발 온도는 1500-1800 °C 이고 너무 높으면 (>2000 °C) 분해 (WO>1 %)되고 너무 낮음 (<1400 °C)은 천천히 증발합니다 (<0.1 nm / s). 전자빔 전력은 2-5kW, 너무 높음(>10kW), 대상 스플래시(오염 > 10ppm), 너무 낮음(<1kW) 및 낮은 효율(<50%)입니다. 도가니 전하는 0.5-1g/cm³이고 증발량이 고르지 않고(편차>10%) 너무 높습니다(>2g/cm³). 번들 스폿의 직경은 1-5mm 이고 너무 크고(>10mm) 증착이 고르지 않습니다(>10%). 진공 < 10⁻⁴ Pa, 너무 높음(>10⁻³ Pa) 산화(O₂>1ppm). 수냉식 유량 1-5 L/min, 너무 낮고(<0.5 L/min) 너무 뜨겁습니다(>150°C). 증발 소스의 장점은 높은 증착 속도 (0.1-5 nm / s)와 고순도 WO₃ (>99.9 %)에 대한 적합성입니다. 투자는 보통(1-50,000 달러/단위)이고 서비스 수명은 길며(> 2000 시간). 그러나 단점은 높은 에너지 소비(1-5kWh/m²)입니다. 목표 활용률이 낮고(<50%) 잦은 보충이 필요합니다(\$50/kg 의 비용). 텀 물질은 차폐되어야 합니다(효율 < 90%). 증발 소스는 황색 삼산화 텅스텐 필름에 고효율 증기상 소스를 제공합니다.

7.4.2 진공 시스템

진공 시스템은 PVD 에 의한 황색 삼산화 텅스텐을 준비하기 위한 저압 환경(<10⁻⁴ Pa)을 제공하고, 가스 충돌을 줄이며(평균 자유 경로 >1m)) 대상 원자가 기판으로 선행

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전달되도록 합니다(증착 효율 > 95%). 이 시스템은 높은 펌핑 속도(>100L/s)와 낮은 누출률(<10⁻⁸ Pa·)을 필요로 합니다. m³/s) 및 안정성(연속 작동>5000 시간).

진공 시스템(모델 VP-1000)은 진공 챔버(304 스테인리스강, 부피 0.1-10m³), 기계식 펌프(펌핑 속도 10-50m³/h, 최대 진공 1Pa), 분자 펌프(펌핑 속도 500-2000L/s, 최대 진공<10⁻⁶ Pa), 밸브(316L 스테인리스강, 밀봉률>99.9%) 및 진공 게이지(열전대 + 이온화, 정확도±1%)로 구성됩니다. 작동 원리는 다단계 진공 청소를 기반으로 하며, 기계식 펌프는 1-10 Pa 까지 굽게 펌핑하고 분자 펌프는 <10⁻⁴ Pa 까지 미세 펌핑하며, 여기서 WO₃ 원자는 저압 (충돌률 <1 %)에서 증착됩니다. 흡착(H₂O<1ppm)을 줄이기 위한 진공 챔버 벽 연마(Ra <0.5 μm). 콜드 트랩(액체 질소, -196°C)은 잔류 가스(O₂<0.1ppm)를 포집합니다. 안전 장치에는 과전압 보호(>10⁻² Pa 전원 차단) 및 누출률 감지(He 누출 감지, <10⁻⁸ Pa·)가 포함됩니다. m³/s)。

이 공정은 진공 준비로 시작됩니다. 진공 챔버 세척(에탄올, 잔류 < 1 mg/cm²), 장착 대상 및 기관(FTO 유리, 10-100 cm²). 밸브를 닫고 기계식 펌프를 시작하고(5-10 분, 1Pa), 분자 펌프(10-20 분, <10⁻⁴ Pa)를 전환합니다. 증착 중 진공 게이지 모니터링(주파수 1Hz)이 <10⁻⁴ Pa(변동<±10%)로 유지됩니다. 증착 (10-60 분) 후 고순도 질소 (99.999 %, 0.1-1 Pa / min)를 천천히 도입하여 정상 압력을 회복합니다. 펌프 세트 유지 관리(50 시간당 오일 교체 비용 \$1000) 공정은 깨끗해야 합니다(먼지< 0.1mg/m³). 균일성(두께 편차 <5%)은 필름의 SEM 에 의해 감지됩니다.

주요 파라미터의 최적화는 진공 효과에 매우 중요합니다. 진공 < 10⁻⁴ Pa, 너무 높음(>10⁻³ Pa) 산화(WO₂>1%). 펌핑 속도 500-2000 L/s, 너무 낮음(<100 L/s) 및 느린 펌핑(>30 분). 누출률 < 10⁻⁸ Pa·m³/s, 너무 높음(>10⁻⁷ Pa·m³/s) 오염(O₂>1ppm). 콜드 트랩 온도는 < -150°C 이고 너무 높으면(>-100°C) 포집 효율이 낮음(<80%)입니다. 진공 챔버는 304SS(Fe<5ppm)로 만들어졌으며 내벽 흡착률은 < 1ppm 입니다. 실행 시간은 20-90 분이고 너무 길게(>4 시간) 에너지 소비가 높고(>1kWh/m³) 있습니다. 진공 시스템의 장점은 고진공(<10⁻⁴ Pa)과 고품질 WO₃(순도 > 99.9%)를 지원한다는 것입니다. 펌핑 속도가 빠르고(<30 분) 파일럿 테스트(0.1-10m³)에 적합합니다. 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.5-2kWh/m³)입니다. 투자액이 크고(\$5-\$200,000/세트) 유지 보수가 복잡합니다(연간 약 \$1,000). 분자 펌프는 정기적으로 서비스를 받아야 합니다(2 년마다, 비용 \$2,000). 진공 시스템은 텅스텐의 증착을 위한 깨끗한 환경을 제공합니다.

7.4.3 기관 가열 및 냉각 장치

기관 가열 및 냉각 장치는 PVD 에 의한 황색 텅스텐 삼산화물의 제조시 기관 온도 (25-400 °C)를 조절하여 WO₃ 필름의 결정 형태 (단사정 또는 비정질) 및 접착력 (>5 MPa)을 최적화하고 열 응력 (균열률 <2 %)을 피하기 위해 증착 후 급속 냉각 (<40 °C)한다. 장비는 정밀하게 온도 제어(편차 <±1°C), 효율적인 열 전달(>90%) 및 진공 저항(<10⁻⁴ Pa)이 필요합니다.

장치(모델 HT-200)는 가열 테이블(흑연 또는 세라믹, 전력 0.5-5kW), 냉각 코일(구리,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열전도율 > 300W/m·K), 열전대(K 형, 정확도 ± 0.5°C), 온도 조절기(PID, 정확도 ± 1°C) 및 수냉 시스템(유속 1-5L/min, 5-15°C). 작동 원리는 저항 가열(25-400°C)을 기반으로 하여 원자 확산(입자 크기 20-100nm) 및 수냉식 코일의 급속 냉각(냉각 속도 5-20°C/min)을 촉진합니다. 흑연 테이블(열전도율 100W/m·K), 고온 저항(>1000°C), 오염(C<5ppm)을 방지하기 위한 세라믹 코팅(알루미나, 순도 > 99.5%), 안정성을 보장하기 위해 진공 밀봉(누출률 < 10⁻⁸ Pa·m³/s).

이 공정은 기질 준비로 시작됩니다. FTO 유리(10-100cm²)를 세척(초음파, 40kHz, 10 분)하고 가열 테이블에 고정합니다. 진공 챔버는 <10⁻⁴ Pa 로 펌핑되고, 가열 테이블은 100-300 °C(5-10 °C/분)로 가열되며, 증착(10-60 분) 동안 온도는 일정하게(편차 <± 1°C) 유지됩니다. WO₃ 증착 (두께 100-500 nm) 후, 수냉 (유속 2-5 L / min)을 시작하고 <40 °C (10-20 분)로 냉각시켰다. 열전대는 실시간(1Hz)으로 모니터링되고 온도 조절기는 전력(오류<±1%)을 조정합니다. 단위 세척(에탄올, 잔류 < 1mg/cm²). 공정은 깨끗해야 합니다(분진<0.1mg/m³). 결정 형태(단사정 비율 > 80%) 및 형태(다공성<5%)는 박막의 XRD 및 SEM 에 의해 검출되었습니다.

주요 매개변수의 최적화는 필름 품질에 매우 중요합니다. 가열 온도 100-300°C, 너무 높음(>400°C), 기관 손상(FTO 저항>50 Ω/sq), 너무 낮음(<50°C), 높은 비정질 비율(>50%). 냉각 속도는 5-20°C/min, 균열(>5%)은 너무 빠르고(>30°C/min), 낮은 효율(<80%)은 너무 느립니다(<2°C/min). 온도 제어 정확도는 ± 1°C 이고 편차는 >± 5°C 이며 증착이 고르지 않습니다(>10%). 수냉식의 유속은 2-5L/min 이며 너무 낮으면(>30L/min) 냉각이 느려집니다(1L/min). 가열 테이블은 흑연 또는 세라믹(C<5ppm)으로 만들어져야 합니다. 실행 시간은 20-90 분이며 너무 길게(> 0.5 시간) 에너지 소비가 높고(>0.5kWh/m²) 4 시간입니다. 이 장치의 장점은 정밀한 온도 제어(편차 <± 1°C)와 다형체 최적화(단사정 > 80%) 지원입니다. 투자는 보통(2000-10,000 달러/단위)이고 서비스 수명은 길며(> 5000 시간). 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.2-0.5kWh/m²)입니다. 고온 작동에는 예방 조치가 필요합니다(비용 \$100/시간). 수냉에는 순수한 물(불순물< 10ppm)이 필요합니다. 이 장치는 텅스텐 필름에 대한 온도 지원을 제공합니다.

7.4.4 박막 두께 모니터링 장비

필름 두께 모니터링 장치는 PVD 방법으로 황색 삼산화 텅스텐을 제조 할 때 WO₃ 필름 두께 (10-1000 nm)를 실시간으로 측정하여 증착 정확도 (편차 <5 %) 및 성능 일관성 (전기 변색 효율 >50 cm² / C)을 보장합니다. 이 장치는 고해상도(<0.1nm), 빠른 응답(<1 초) 및 진공 저항(<10⁻⁴ Pa)이어야 합니다.

모니터링 장비의 일반적인 유형(모델 QCM-200)은 수정 진동자(주파수 5-10MHz, 정확도±0.1Hz), 발진기(전력 0.1-0.5W), 컨트롤러(디지털 디스플레이, 정확도 ± 0.1nm) 및 실드(316L 스테인리스강, 열전도율 < 15W/m·K)로 구성된 수정 마이크로 저울(QCM)입니다. 작동 원리는 질량에 따른 결정 주파수의 변화 (Sauerbrey 방정식, 1Hz ≈ 1 ng / cm²), WO₃ 증착은 질량을 증가시키고 주파수는 감소하며 컨트롤러는 두께 (밀도 7.16 g / cm³)를 변환합니다. 석영 결정(직경 10-20mm)은 내열성(<200°C)과 과열(<100°C)에 대해 차폐되어

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있습니다. QCM 정확도 $\pm 0.1\text{nm}$ 로 실시간 모니터링(증착 속도 0.1–5nm/s)에 적합합니다.

프로세스는 장치 설치로 시작됩니다. QCM 을 진공 챔버(기판에서 5-10cm)에 고정하고 결정을 사전 세척(에탄올, 잔류 $< 1\text{mg}/\text{cm}^2$)했습니다. $< 10^{-4}\text{ Pa}$ 로 진공 펌핑되고 결정 주파수가 보정되었습니다(오류 $< \pm 0.1\text{Hz}$). 증착(10-60 분) 동안 QCM 은 두께를 실시간으로 기록하고(주파수 1Hz) 증착 속도(0.1-5nm/s)를 제어합니다. 목표 두께(100–500nm)에 도달하면 증착이 중지됩니다. 크리스털 교체(100–200 사이클당 \$50/개) 증착 정확도(편차 $< 5\%$)를 검증하기 위한 컨트롤러 데이터 내보내기. 공정은 깨끗해야 합니다(분진 $< 0.1\text{mg}/\text{m}^3$). 박막은 SEM 및 타원편광법으로 테스트하여 두께(편차 $< 5\%$)와 굴절률(2.0–2.2)을 감지했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 효과를 모니터링하는 데 필수적입니다. 결정 주파수는 5–10MHz 이고 너무 낮으면($< 5\text{MHz}$) 감도가 좋지 않습니다($> 1\text{nm}$). 증착 속도는 0.1–5 nm/s 이고 너무 빠르면($> 10\text{ nm/s}$) 오류가 큼니다(10 %). 결정은 기판에서 5-10cm 떨어져 있고 너무 멀리 떨어져 있으면($> 20\text{cm}$) 신호가 약합니다($< 80\%$). 쉘드의 온도는 100°C < 있으며 너무 높으면($> 150^\circ\text{C}$) 결정이 디튕됩니다(오류 $> 5\%$). 진공도는 10^{-4} Pa < 고 간섭 주파수($> 1\text{Hz}$)가 너무 높습니다($> 10^{-3}\text{ Pa}$). 모니터링 시간은 10-60 분이고 결정 포화도(두께 $> 2000\text{nm}$)가 너무 깊습니다(> 4 시간). 이 장비의 장점은 높은 정확도($\pm 0.1\text{nm}$)와 실시간 모니터링(편차 $< 5\%$)입니다. 투자는 적당하고(5000-20,000 달러/단위) 작동이 간단합니다. 그러나 단점은 잦은 결정 교체가 필요하다는 것입니다(개당 \$50). 고온 증착($> 200^\circ\text{C}$)은 정확도($> 5\%$)에 영향을 미칩니다. QCM 은 텅스텐 필름에 대한 정밀한 두께 제어를 제공합니다.

7.5 화학 기상 증착에 의한 황색 삼산화 텅스텐 제조를 위한 핵심 장비

텅스텐 엘로우 (WO_3)는 WF_6 또는 $\text{W}(\text{CO})_9$ 와 같은 텅스텐 전구체를 가스 공급원으로 사용하여 화학 기상 증착 (CVD)에 의해 제조되며, 화학 반응에 의해 기판 표면에 증착되어 전기 변색 (착색 효율 $> 50\text{ cm}^2 / \text{C}$)에 널리 사용되는 WO_3 박막 또는 나노 구조 (두께 10-1000 nm, 입자 크기 20-200 nm)를 형성하고, 광촉매(분해 효율 $> 85\%$) 및 센서(검출 한계 $< 1\text{ppm}$). CVD 방법은 기체 상 전구체를 기판 표면과 반응시켜 WO_3 를 생성하며, 이 공정에는 고진공($< 100\text{Pa}$), 정밀한 온도 제어($300\text{--}800^\circ\text{C}$) 및 가스 흐름 제어($< \pm 1\%$ 정확도)가 필요하며 필름의 고순도($> 99.9\%$), 균일성(두께 편차 $< 5\%$) 및 결정 형태(단사정 또는 비정질)를 보장합니다. 핵심 장비에는 반응 챔버, 가스 공급 시스템, 가열 시스템, 진공 시스템 및 배기 가스 처리 장치가 포함되며, 이 섹션에서는 반응 챔버 및 가스 공급 시스템에 중점을 두고 전문 데이터 및 산업 응용 프로그램과 결합된 기능, 구조, 작동 지점 및 기술적 특성을 자세히 분석합니다.

7.5.1 반응 챔버

반응 챔버는 CVD 에 의한 황색 삼산화 텅스텐을 제조하기 위한 핵심 장비로, 기판 표면에 전구체 가스 (예 : WF_6) 및 반응성 가스 (예 : O_2)의 화학 반응을 위한 제어 환경을 제공하여 WO_3 박막을 증착합니다(증착 속도 0.1-10 nm/s). 필름 >품질(순도 $> 99.9\%$)과 공정

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

안정성을 보장하기 위해 고온(1000°C), 내식성(HF, H₂) 및 높은 기밀성(누출률 < 10⁻⁸ Pa·m³/s)에 대한 내성이 있어야 합니다.

반응 챔버 (모델 CVD-300)는 챔버 (석영 또는 316L 스테인리스 스틸, 부피 0.1-10L), 기관 홀더 (흑연 또는 세라믹, 면적 10-500cm²), 가열 시스템 (적외선 또는 저항, 전력 1-10kW), 가스 분배기 (316L 스테인레스 스틸, 보어 크기 0.1-1mm) 및 배기 포트 (PTFE 또는 316L, 내경 10-50mm). 작동 원리는 WF₆+O₂가 기관(FTO 유리, 300-600°C)에서 반응하는 기상 반응을 기반으로 합니다: WF₆ + 3/2O₂ → WO₃ + 3F₂ WO₃ 필름을 생성합니다. 석영 챔버(순도 > 99.9%)는 고온(>1200°C) 및 부식(HF<1ppm)에 강하고 가스 분배기는 균일한 가스 흐름(유동장 편차 <5%)을 보장합니다. 베이스 스텐트는 오염(C<99.5ppm)을 방지하기 위해 알루미늄(순도>59.5%)로 코팅되어 있습니다. 씰링 시스템(O-ring, Viton)은 진공(<100 Pa)과 <10⁻⁸ Pa·m³/s의 누출률을 유지합니다.

이 과정은 챔버 준비로 시작됩니다. 캐비티 세척(탈이온수 및 에탄올, 잔류 < 1mg/cm²), 기초(FTO, 10-100cm²) 초음파 세척(40kHz, 10 분), 스텐트에 고정. 챔버는 <10 Pa로 배출되고 300-600 °C (가열 속도 5-10 °C / min)로 가열됩니다. 전구체(WF₆, 유속 10-50sccm) 및 O₂(유속 50-200sccm)가 도입되고 반응 압력은 1-100Pa, 증착은 10-60 분, 필름 두께는 100-500nm입니다. 증착 후 공기 공급원을 끄고 <100°C(5-10°C/min)로 냉각하며 고순도 N₂(99.999%)를 통해 대기압을 복원합니다. 캐비티 청소(N₂ 퍼지 + 플라즈마 청소, 잔류 <0.1 mg/cm²). 공정은 깨끗해야 합니다(분진 < 0.1mg/m³). 주사 전자 현미경(SEM), X 선 회절(XRD) 및 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis)을 사용하여 지형(다공성<5%), 결정 형태(단사정, 평면 간격 0.38nm) 및 밴드 갭(2.6-2.8eV)을 검출했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 증착 효과에 매우 중요합니다. 반응 온도는 300-600 °C이며, 부산물 (WO₂>1 %)이 증가하면 너무 높고(>800 °C), 너무 낮고(<200 °C) 느린 증착(<0.1 nm/s)이 있습니다. 압력 1-100 Pa, 너무 높음(>500 Pa), 기체 상 반응(입자>1 μm), 너무 낮음(<0.1 Pa) 및 낮은 증착 효율(<50%). 기류 비율 WF₆:O₂=1:5-1:10 은 너무 높고(>1:2), F₂ 부식(캐비티 수명 < 1000 시간), 너무 낮고(<1:20) 불완전한 반응(WO₃ 수율<80%)입니다. 캐비티는 석영(Si<5ppm)으로 만들어져야 하며 밀봉 누출률은 <10⁻⁸ Pa·m³/s입니다. 증착 시간은 10-60 분이며 너무 길면(>>5 시간) 필름이 균열됩니다(2%). 반응 챔버의 장점은 환경을 제어 할 수 있고(수율 > 95%) 고순도 WO₃(>99.9%)에 적합하다는 것입니다. 투자는 실험실 및 조종사(0.1-10L)를 지원하기 위해 적당한(\$1-100,000/단위) 규모입니다. 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.5-2kWh/m²)입니다. 복합 청소(세션당 0.5 시간, 비용 \$50). 부산물(HF)을 처리해야 합니다(비용 \$20/m³). 반응 챔버는 황색 삼산화 텅스텐의 증착을위한 안정적인 반응 환경을 제공합니다.

7.5.2 가스 공급 시스템

가스 공급 시스템은 전구체 가스(예: WF₆), 반응 가스(예: O₂) 및 운반 가스(예: N₂ 또는 Ar)의 정확한 전달을 위해 황색 삼산화 텅스텐의 CVD 준비에 사용되며, 반응성 가스(유동 편차<±1%) 및 화학량론적 비율(WF₆:O₂=1:5-1:10)의 균일한 분포를 보장합니다. 시스템은 오염(Fe, C<5ppm) 및 공정 변동(증착 편차>5%)을 방지하기 위해 매우 정확해야

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

하고(유량 제어 $\pm 0.1\text{sccm}$), 내식성(WF₆, HF 저항) 및 안전성(누출률 $< 10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ $10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)이 되어야 합니다.

가스 공급 시스템(모델 GS-500)은 가스 실린더(316L 스테인리스강, 부피 10-50L, 압력 $> 10\text{MPa}$), 질량 유량 컨트롤러(MFC, 1-500sccm, 정확도 $\pm 0.5\%$), 배관(PTFE 또는 316L, ID, 2-10mm), 밸브(316L, 밀봉 $> 99.9\%$) 및 압력 조절기(정확도 $\pm 0.1\text{MPa}$). 작동 원리는 기체 흐름을 정밀하게 조절하는 MFC 를 기반으로 하며, WF₆(끓는점 17°C, 순도 $> 99.9\%$)가 실린더에서 출력되고 O₂(순도 $> 99.999\%$) 및 N₂(운반 가스, 순도 $> 99.999\%$)와 혼합되어 반응 챔버(압력 1-100 Pa)로 배관됩니다. PTFE 튜브(HF 저항성, 부식 속도 $< 0.01\text{mm}/\text{년}$)는 낮은 오염(Fe $< 5\text{ppm}$)을 보장합니다. 안전 장치에는 누출 감지(He 누출 감지, $< 10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) 및 비상 차단 밸브(응답 < 0.1 초)가 포함됩니다.

이 공정은 가스 준비로 시작됩니다. 실린더(WF₆, O₂, N₂)는 압력(1-10 MPa)을 확인하고 MFC(사전 보정, 오차 $< \pm 0.5\%$)에 연결합니다. 파이프 및 밸브 청소(N₂ 퍼징, 잔류 $< 0.1 \text{ mg}/\text{cm}^2$), $< 10 \text{ Pa}$ 까지 시스템 대피, 누출 감지($< 10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$). WF₆ 유량 10-50sccm, O₂ 유량 50-200sccm, N₂ 유량 100-500sccm, 총 압력 1-100Pa 를 설정합니다. 챔버가 300-600 °C 로 가열 된 후 밸브가 열리고 가스 혼합물이 챔버로 들어가 10-60 분 (두께 100-500 nm) 동안 증착됩니다. 증착 후 WF₆를 닫고 N₂(500sccm, 5 분)로 파이프를 퍼지합니다. 실린더는 흡 후드(500m³/h)에 보관되고 배기 가스(HF, F₂)는 가성 용액(효율 $> 99\%$)에 흡수됩니다. MFC 보정(6 개월마다, 비용 \$100). 박막은 SEM 및 XRD 로 균일성(편차 $< 5\%$) 및 결정 형태(단사정 비율 $> 80\%$)에 대해 테스트했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 가스 공급의 효율성에 매우 중요합니다. WF₆ 유속 10-50sccm, 너무 높음($> 100\text{sccm}$), 부반응(F₂ $> 10\text{ppm}$), 너무 낮음($< 5\text{sccm}$), 느린 증착($< 0.1\text{nm}/\text{s}$). O₂ 유속 50-200 sccm, 너무 높음 ($> 500 \text{ sccm}$), 과도한 산화 (다공성 $> 10 \%$), 너무 낮음 ($< 20 \text{ sccm}$), WO₃ 불완전 (수율 $< 80 \%$). N₂ 유속 100-500 sccm, 너무 높음($> 1000 \text{ sccm}$) 희석 반응(효율 $< 70\%$). MFC 정확도 $\pm 0.5\%$ 이고 $\pm 2\%$ 의 오류로 인해 불균일한 증착($> 10\%$)이 발생합니다. 파이프 재료는 PTFE(Fe $< 5\text{ppm}$), 압력 1-100Pa, 너무 높으면($> 500\text{Pa}$) 입자 형성($> 1\mu\text{m}$)이어야 합니다. 배기 가스 처리 효율 $> 99\%$ 이고 배출 $< 1\text{mg}/\text{m}^3$ 입니다. 가스 공급 시스템의 장점은 정확한 유량(편차 $< \pm 1\%$)과 안정적인 증착(수율 $> 95\%$)입니다. 투자는 중간 정도(5 천만 - 50,000 달러/세트)이며 다양한 전구체(WF₆, W(CO)₆)에 적합합니다. 그러나 단점은 WF₆의 높은 독성(보호 필요, 방문당 \$200 비용)을 포함합니다. 파이프는 부식에 취약합니다 (HF, 수명 < 2 년). 배기 가스 처리 비용이 높습니다(\$20/m³). 가스 공급 시스템은 크산톤 증착을 위한 정밀한 압축 공기 제어를 제공합니다.

7.5.3 난방 시스템

가열 시스템은 CVD 에 의한 황색 삼산화 텅스텐의 제조시 반응 챔버 및 기관에 고온 환경 (300-800 °C)을 제공하고 기관 표면에서 전구체 (예 : WF₆) 및 반응성 가스 (예 : O₂)의 화학 반응을 촉진하여 WO₃ 박막 (증착 속도 0.1-10 nm / s)을 형성하는 데 사용됩니다. 시스템은 필름의 결정 형태(단사정 비율 $> \pm 80\%$)와 접착력($> 5\text{MPa}$)을 보장하기 위해 정밀한 온도 제어(1°C 편차 1000°C) 및 $>$ 효율적인 열 전달(효율 $> 90\%$)을 가져야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

일반적인 유형의 난방 시스템(모델 HT-CVD-600)에는 저항 가열과 적외선 가열이 포함되며 안정성과 균일성으로 인해 널리 사용됩니다. 구조는 발열체(1-10kW 출력의 실리콘 탄소 막대 또는 니크롬 합금), 가열로 본체(석영 또는 알루미늄 세라믹, 1200°C > 내열성), 열전대(K 형, 정확도 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), 온도 조절기(PID, 정확도 $\pm 1^{\circ}\text{C}$) 및 단열층(규산알루미늄, 두께 50-100mm, 열전도율 $<0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). 작동 원리는 전열 변환을 기반으로 하며, 여기서 발열체는 300-600°C 로 가열되고 열은 복사 및 대류에 의해 기판(FTO 유리)으로 전달되어 반응을 유도합니다: $\text{WF}_6 + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + 3\text{F}_2$. 석영로 본체(순도 > 99.9%)는 내식성(HF 내성)이며 단열층은 열 손실(<10%)을 줄입니다. 열전대는 기판 홀더(기판에서 < 5mm)에 내장되어 있으며 온도는 실시간으로 모니터링됩니다(주파수 1Hz).

이 공정은 기질 준비로 시작됩니다. FTO 유리(10-100cm²) 초음파(40kHz, 10 분) 및 공동 내 스텐트(흑연, 순도 > 99.5%)에 고정. 챔버를 <10 Pa 로 비우고, 밸브를 닫고, 가열 시스템을 활성화하고, 온도를 300-600 °C(가열 속도 5-10 °C/min)로 설정하고, 온도를 10-20 분(편차 $\pm 1^{\circ}\text{C}$) 동안 예열합니다. WF₆ (10-50 sccm) 및 O₂ (50-200 sccm)를 도입하고 100-500 nm 의 필름 두께로 10-60 분 동안 증착시켰다. 증착 후 열을 끄고 <100°C(5-10°C/min N₂ 500sccm)로 냉각합니다. 용광로 세척(N₂ 퍼지, 잔류 <0.1 mg/cm²), 열전대 교정(월간, 오차 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). 공정은 깨끗해야 합니다(분진 < 0.1mg/m³). 박막은 X 선 회절(XRD) 및 주사전자현미경(SEM)으로 검출하여 결정 형태(단사정, 평면 간격 0.38nm) 및 형태(다공률<5%)를 검출했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 광상의 품질에 매우 중요합니다. 온도 300-600 °C, 너무 높음(>800 °C), 부산물(WO₂>1%), 너무 낮음(<200 °C), 느린 증착(<0.1 nm/s). 온도 제어 정확도는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이며 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 편차로 인해 고르지 않은 결정 형태(단사정 비율 <70%)가 발생합니다. 가열 속도는 5-10°C/min, 너무 빠르고(>20°C/min) 기저 응력(균열 >5%), 비효율이 낮고(<80%)(<2°C/min). 난방 전력 1-10kW, 고(>15kW)보다 높은 에너지 소비(>2kWh/m²). 용광로 본체는 석영(Si<5ppm)으로 만들어졌으며 절연층 손실은 <10%입니다. 증착 시간은 10-60 분이 너무 길면(>2 시간) 필름이 헐거워집니다(다공성 >10%). 난방 시스템의 장점은 정밀한 온도 제어 (1 °C \pm 편차)와 고품질 WO (순도 > 99.9 %) 지원입니다. 투자는 적당하고(5,000-20,000 달러/단위) 서비스 수명은 길고(> 5,000 시간). 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.5-2kWh/m²)입니다. 고온 작동에는 예방 조치가 필요합니다(비용 \$100/시간). 단열재를 유지해야 합니다(연간 \$200 의 비용). 가열 시스템은 텅스텐 증착을 위한 안정적인 고온 환경을 제공합니다.

7.5.4 진공 시스템

진공 시스템은 텅스텐의 CVD 준비 시 저압 환경(1-100 Pa)을 제공하고, 기체 상 충돌을 줄이며(평균 자유 경로 > 10cm), 전구체 가스를 기판으로 효율적으로 전달(증착 효율 >95%)합니다. 이 시스템은 높은 펌핑 속도(>100L/s)와 낮은 누출률(<10⁻⁸ Pa·)을 필요로 합니다. m³/s) 및 안정성(5000 시간 연속 작동)을 통해 산화(O₂<1ppm) 및 오염(Fe<5ppm)을 방지합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

진공 시스템(모델 VS-CVD-500)은 진공 챔버(316L 스테인리스강, 부피 0.1–10L), 기계식 펌프(펌핑 속도 10–50m³/h, 최대 진공 1Pa), 분자 펌프(펌핑 속도 500–2000L/s, 최대 진공<10⁻⁶ Pa), 밸브(316L, 밀봉률 > 99.9%), 진공 게이지(열전대 + 이온화, 정확도±1%) 및 콜드 트랩(액체 질소, -196°C). 작동 원리는 다단계 진공 청소를 기반으로 하며, 기계식 펌프는 1-10Pa 까지 굵게 펌핑하고 분자 펌프는 <10Pa 까지 미세 펌핑하여 반응 압력(1-100Pa)을 유지합니다. 316L 진공 챔버(연마된 Ra<0.5μm)는 흡착(H₂O<1ppm)을 줄이고 콜드 트랩은 휘발성 부산물(HF<1ppm)을 포집합니다. 안전 장치에는 과전압 보호(> 500Pa 전원 끄기) 및 누출률 감지(He 누출 감지, < 10⁻⁸ Pa·m³/s)가 포함됩니다.

이 과정은 챔버 준비로 시작됩니다. 진공 챔버 세척(에탄올, 잔류 < 1 mg/cm²), 마운팅 기판(FTO, 10–100 cm²). 밸브를 닫고 기계식 펌프를 시작하고(5–10 분, 1Pa), 분자 펌프를 전환합니다(10–20 분, < 10Pa). 게이지 모니터링(1Hz) 및 증착(WF₆+O₂, 10–60 분) 중 1–100Pa(변동±5%) 유지. 증착 후 고순도 N₂(99.999%, 0.1–1 Pa/min)를 통과하고 정상 압력을 회복했습니다. 펌프 세트 유지 관리(50 시간당 \$1000 오일 교체 비용) 콜드 트랩 비우기(배치당 \$20 액체 질소 비용). 공정은 깨끗해야 합니다(분진< 0.1mg/m³). 균일성(두께 편차 <5%)은 필름의 SEM에 의해 감지됩니다.

주요 파라미터의 최적화는 진공 효과에 매우 중요합니다. 압력은 1–100 Pa, 입자 생성(>1 μm)에 너무 높고(>500 Pa), 느린 증착(<0.1 nm/s)에 너무 낮음(<0.1 Pa)이었습니다. 펌핑 속도 500–2000 L/s, 너무 낮음(<100 L/s) 및 느린 펌핑(>30 분). 누출률 < 10⁻⁸ Pa·m³/s, 너무 높음(>10⁻⁷ Pa·m³/s) 오염(O₂>1ppm). 콜드 트랩 온도는 <-150°C 이고 너무 높으면(>-100°C) 포집 효율이 낮음(<80%)입니다. 진공 챔버 재질은 316L(Fe<5ppm)이어야 합니다. 실행 시간은 20-90 분이며 장시간(>4 시간) 동안 에너지 소비가 높고(>1kWh/L) 있습니다. 진공 시스템의 장점은 고진공(<10Pa)과 고품질 WO₃(순도 > 99.9%)를 지원한다는 것입니다. 펌핑 속도가 빠르고(<30 분) 중간 테스트(0.1–10L)에 적합합니다. 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.5–2kWh/L)를 포함합니다. 투자액이 크고(\$5–\$200,000/세트) 분자 펌프는 유지 관리가 복잡합니다(2 년당 \$2,000). 진공 시스템은 텅스텐 증착을 위한 깨끗하고 저압 환경을 제공합니다.

7.5.5 배기 가스 처리 시스템

테일 가스 처리 시스템은 CVD 방법으로 황색 삼산화 텅스텐을 제조 할 때 반응 부산물(예 : HF, F₂) 및 미반응 전구체 (WF₆)를 포착하고 중화하는 데 사용되어 배출이 환경 표준(HF<1 mg / m³, F<0.1 ppm)을 충족하는지 확인합니다. 시스템은 장비(부식 속도<0.01mm/년)와 환경을 보호하기 위해 높은 흡수성(>99%), 내식성(HF, H₂ 내성) 및 안전성(누출률< 10⁻⁹ Pa·m³/s)이 있어야 합니다.

배기 가스 처리 시스템(모델 EGS-200)은 흡수탑(316L 스테인리스강 또는 PTFE, 부피 10–100L), 젯물 탱크(NaOH 용액, 농도 0.1–1 mol/L), 스프레이 펌프(유량 1–10 L/min, 동력 0.5–2 kW), 활성탄 필터(기공 크기 0.1–1 μm, 흡착 속도 > 95%) 및 배기 덕트(PTFE, 내경 10–50mm). 작동 원리는 HF 와 F₂가 분무(NaOH, pH 10-12)하여 NaF 와 H₂O 를 생성하는 화학적

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중화를 기반으로 합니다: $\text{HF} + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaF} + \text{H}_2\text{O}$, $\text{F}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow 2\text{NaF} + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2$. 활성탄 필터는 잔류 유기물($\text{W}(\text{CO})_6 < 1\text{ppm}$)을 포집합니다. PTFE 튜빙(HF 내성)은 낮은 오염($\text{Fe} < 5\text{ppm}$)을 보장합니다. 안전 장치에는 pH 모니터링(정확도 ± 0.1) 및 누출 경보($\text{HF} > 1\text{ppm}$ 트리거링)가 포함됩니다.

작업 프로세스는 시스템 시작과 함께 시작됩니다. 가성 플에 NaOH(0.5 mol/L, 80-90% 충전)를 주입하고 흡수 컬럼(탈이온수, 잔류 $< 1 \text{ mg/cm}^2$)을 세척했습니다. 챔버가 증착되고($\text{WF}_6 + \text{O}_2$, 10-60 분), 배기 가스(HF, F, 10-100L/min)가 흡수탑으로 들어가고 스프레이 펌프가 작동됩니다(유량 2-5L/min). 중화 후 폐액(pH 6-8)을 포집하고($\text{NaF} < 100\text{ppm}$) 활성탄을 통해 가스를 여과합니다(배출 $< 1\text{mg/m}^3$). 젯물 보충(배치당 \$10), 활성탄 교체(시간당 \$100, \$50 비용). 파이프 라인 검사(주간, 누출율 $< 10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$). 공정은 환기가 필요합니다(500-2000 m^3/h). 필름의 품질은 SEM(다공률 $< 5\%$)으로 검증하고, 폐액은 ICP-MS($\text{F} < 100\text{ppm}$)로 검출하였다.

주요 매개변수의 최적화는 치료 효과에 매우 중요합니다. NaOH 농도 0.1-1 mol/L, 너무 높음($> 2 \text{ mol/L}$), 파이프 부식($> 0.1 \text{ mm/년}$), 너무 낮음($< 0.05 \text{ mol/L}$) 및 낮은 중화 효율($< 90\%$). 스프레이 유속이 2-5 L/분, 너무 높거나($> 10 \text{ L/분}$), 낭비적(비용 $> 0.1 \text{ USD/L}$), 너무 낮음($< 1 \text{ L/분}$), 불완전 흡수($\text{HF} > 1 \text{ ppm}$). 흡수탑의 부피는 10-100L 이고 너무 작으면($< 50\text{L}$) 용량이 낮음(50L/min)입니다. 활성탄의 기공 크기는 0.1-1 μm 이며, 너무 크면 ($> 80 \mu\text{m}$) 흡착 속도가 낮습니다 ($< 2 \mu\text{m}$). 배기 가스 유량 10-100 L/min, 과부하($> 200 \text{ L/min}$) (토출 $> 1 \text{ mg/m}^3$). 파이프 재료는 PTFE($\text{Fe} < 5\text{ppm}$)여야 합니다. 처리 시스템의 장점은 높은 효율($> 99\%$)과 환경 표준($\text{HF} < 1 \text{ mg/m}^3$)을 준수한다는 것입니다. 투자는 보통(1-50,000 달러/단위)이고 서비스 수명은 길고(> 5 년). 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.1-0.5kWh/ m^3)입니다. 젯물과 활성탄은 정기적으로 교체해야 합니다(배치당 \$50). HF 치료는 보호되어야 합니다(비용 100 USD/시간). 배기 가스 처리 시스템은 황색 삼산화 텅스텐의 증착에 대한 환경 보호를 제공합니다.

7.6 생물학적 템플릿 방법에 의한 황색 삼산화 텅스텐 제조를 위한 핵심 장비

Yellowsten (WO_3)은 천연 또는 합성 생체 재료 (예 : 셀룰로오스, 단백질 또는 박테리아 막)를 생물 템플릿 방법으로 템플릿으로 사용하며, 함침, 증착 및 열처리를 통해 텅스텐 전구체(예 : Na_2WO_4 또는 WCl_6)와 결합하여 특정 형태 (입자 크기 20-200 nm, 공극 크기 5-100 nm)를 가진 WO_3 나노 구조를 형성합니다. 이 방법은 광촉매(분해 효율 $> 85\%$), 전기변색(착색 효율 $> 50\text{cm}^2/\text{C}$) 및 센서(검출 한계 $< 1\text{ppm}$)에 널리 사용되며 환경 친화성(화학량 $< 50\text{g/L}$)과 형태 제어성(다공성 $> 50\%$)으로 주목받고 있습니다. 이 공정은 온화한 반응 조건(온도 $< 100^\circ\text{C}$, pH 4-10), 내식성(약산 및 알칼리에 대한 내성) 및 높은 균일성(농도 편차 $< 5\%$)을 필요로 하여 WO_3 의 고순도($> 99.9\%$) 및 구조적 정확도(지형 편차 $< 10\%$)를 보장합니다. 핵심 장비에는 반응 용기, 가열 장비 및 교반 장비가 포함되며 이 섹션에서는 전문 데이터 및 실험실 응용 프로그램과 결합하여 기능, 구조, 작동 지점 및 기술적 특성을 자세히 분석합니다.

7.6.1 반응 용기

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

반응 용기는 생물학적 템플릿 (예 : 셀룰로오스 여과지, 공극 크기 0.1-10 μm), 전구체 용액 (예 : Na₂WO₄, 0.01-0.1 mol / L) 및 반응 매체 (물 또는 에탄올)를 운반하는 데 사용되며, 생물학적 템플릿 방법에 의한 황색 텅스텐 삼산화물의 제조에서 템플릿 함침 및 WO₃ 증착 (수율 >90 %)을 지원합니다. 용기는 WO₃ 순도에 영향을 미치는 불순물을 방지하기 위해 부식 방지(pH 4-10), 고도의 기밀성(누출률 <0.01mL/분) 및 낮은 오염(Fe, C<5ppm)이어야 합니다.

반응 용기(모델 RC-500)는 일반적으로 유리 비커 또는 폴리테트라플루오로에틸렌(PTFE) 탱크이며 용기 본체(유리 또는 PTFE, 부피 0.1-10L), 밀봉 덮개(실리콘 O-링, 압력 저항 0.1MPa), 홀더(316L 스테인리스강 또는 PTFE, 베어링 플레이트 10-100cm²) 및 샘플링 포트(PTFE, 내경 5-10mm)로 구성됩니다. 작동 원리는 생물학적 템플릿이 Na₂WO₄ 용액(pH 4-7)에 텅스텐 산염 (WO₄²⁻)을 흡착 한 다음 산성화 (HCl, pH 4-6) 또는 열처리 (200-500 ° C)에 의해 WO 를 생성하는 용액 함침을 기반으로합니다 : Na₂WO₄ + 2HCl → H₂WO₄ + 2NaCl, H₂WO₄ → WO₃ + H₂O. 유리 용기(순도 > 99.5%) 또는 PTFE(pH 1-14 내성)는 낮은 오염(Fe<5ppm)을 보장합니다. 스텐트는 템플릿을 제자리에 고정하고 균일한 침수(액체 레벨 편차 <1mm)를 유지합니다. 밀봉된 캡은 휘발(에탄올 손실 <1%)을 방지합니다.

프로세스는 템플릿 준비로 시작됩니다. 셀룰로오스 여과지(0.1-1mm 두께) 또는 박테리아 멤브레인(1-10μm 두께)을 세척(탈이온수, 잔류 < 1mg/cm²)하고 스텐트에 고정합니다. Na₂WO₄(순도>99.5%)를 탈이온수(전도도< 10μS/cm, 0.01-0.1mol/L)에 용해시켜 용기(50-80% 충전)에 붓습니다. 주형을 1-24 시간 동안 침용 (50-200 rpm 에서 교반), HCl(0.1 mol/L, 적하 속도 0.1-0.5 mL / 분)을 pH 4-6 에 천천히 첨가하고, 반응 1-4 시간 후에 H₂WO₄ 증착을 형성했다. 주형을 제거하고 물(Na⁺, Cl<10ppm)로 세척하고 열처리(200-500°C)로 옹겜했습니다. 용기 세척(에탄올, 잔류 < 1mg/cm²). 이 공정에는 환기(풍량 200-500m³/h)와 산성 미스트(HCl<1mg/m³) 제거가 필요합니다. 주사 전자 현미경(SEM) 및 X 선 회절(XRD)을 사용하여 형태(다공성>50%)와 결정 형태(단사정, 평면 간격 0.38nm)를 검출했습니다.

주요 파라미터의 최적화는 반응의 효과에 매우 중요합니다. 용액 pH 4-6 은 증착이 적고(수율 < 70%) 너무 높고(<3) 템플릿 분해(다공성<30%)에 비해 너무 낮습니다(3). 침용 시간은 1-24 시간이고, 템플릿은 너무 길고(>>48 시간) 포화(10% 낭비), 너무 짧은(<1 시간) 고르지 않은 증착(편차 >20%)입니다. 용기 충전률은 50-80%이며 너무 높으면(>90%) 반응이 고르지 않습니다(농도 편차 > 10%). 온도 20-60°C, 너무 높음(>80°C) 및 템플릿 손상(>10%). 용기는 유리 또는 PTFE(Fe<5ppm)로 만들어져야 하며 누출률은 < 0.01mL/분이어야 합니다. 반응기의 장점은 작동 용이성(단위당 \$100-1000 투자)과 소규모 시험(0.1-10L/배치)에 대한 적합성입니다. 고순도(Fe<5ppm)로 다양한 템플릿(셀룰로오스, 단백질)을 지원합니다. 그러나 용량이 제한(<10L)하고 대량 생산에 적합하지 않다는 단점이 있습니다. 수동 작동의 일관성이 좋지 않습니다(편차 > 10%). 청소 시간(매번 0.5 시간). 반응 용기는 황색 삼산화 텅스텐 생물 템플릿 방법에 대한 온화한 반응 환경을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.6.2 난방 기구

가열 장비는 전구체 증착 (수율 > 90 %) 및 WO₃ 결정화 (단사정 비율 80 %)를 촉진하기 위해 생물학적 템플릿 방법으로 황색 텅스텐 삼산화물을 제조 할 때 반응 온도 (20-60 °C), 템플릿 건조 (60-100 °C) 및 열처리 (200-500 °C)를 제어하는 데 사용됩니다. 장비는 템플릿 손상(<1%) 및 필름 균열(<2%)을 방지하기 위해 정밀한 온도 제어(편차 <±1°C), 내식성(수증기 저항) 및 균일한 가열(편차 <±2°C)이 필요합니다.

가열 장비(모델 MFL-1200)에는 자동 온도 조절 수조(용액 반응)와 머플로(열처리)가 포함됩니다. 머플로의 구조는 퍼니스 본체(304 스테인리스강, 부피 10-100 L), 발열체(실리콘 탄소 막대, 전력 1-5 kW), 퍼니스 챔버(알루미나 세라믹, 온도 저항 > 1200 °C), 온도 조절기(PID, 정확도 ± 1 °C) 및 단열재(알루미늄 규산염, 두께 50mm)로 구성됩니다. 작동 원리는 저항 가열을 기반으로 하며, 퍼니스를 200-500°C 로 가열하고 H₂WO₄를 WO₃: H₂WO₄ → WO₃ + H₂O 로 분해하고 주형(셀룰로오스)을 연소하여 다공성 구조(기공 크기 5-100nm)를 형성합니다. 오염을 피하기 위한 알루미늄으로(순도 > 99.5%)(Al<5ppm). 단열은 열 손실(<10%)을 줄입니다. 안전 장치에는 과열 보호(> 600°C 전원 끄기) 및 통풍구(직경 10-50mm)가 포함됩니다.

이 과정은 용액의 가열로 시작됩니다. 수조는 20-60°C(편차<±0.5°C)로 설정하고 Na₂WO₄ 용액(0.01-0.1 mol/L)을 함침시키고 주형 반응을 1-24 시간 동안 유지했습니다. 템플릿을 제거한 후 수조(60-80°C, 2-4 시간)에 넣어 건조(수분 함량<5%)합니다. 건조 템플릿을 200-500 °C (가열 속도 2-5 °C / 분)의 머플로에 넣고 1-4 시간 동안 열처리 한 다음 템플릿을 연소시키고 WO₃ (비 표면적 > 50m² / g)를 형성합니다. <100°C(N₂ 100scm 에서 3-5°C/분)로 냉각합니다. 용광로 세척(압축 공기, 잔류 < 0.1 mg/cm²). 공정은 환기가 필요합니다(200-500m³/h). 다공성(>50%), 다형체(단사정) 및 비표면적(20-80m²/g)을 SEM, XRD 및 BET 로 측정했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 WO₃ 품질에 매우 중요합니다. 열처리 온도는 200-500 °C, 너무 높고(>600 °C), 곡물이 자라고(>500 nm), 너무 낮음(<150 °C), 결정화가 불완전합니다(비정질 > 50%). 가열 속도는 2-5°C/min 이고 템플릿이 너무 빨리 균열(>5%)(>10°C/min)됩니다. 온도 제어 정확도는 1°C±, 편차는 >±5°C, 형태가 고르지 않습니다(기공 직경 편차 >20%). 용광로 부피 10-100 L, 너무 작고(<5 L) 배치가 적음(<10 cm²). 건조 온도는 60-80 °C 이며 너무 높으면(>100 °C) 템플릿이 수축(>10%)합니다. 퍼니스 챔버는 알루미늄(Al<5ppm)로 만들어져야 합니다. 가열 시스템의 장점은 넓은 온도 범위(20-500°C)와 결정화 지원(수율 >95%)입니다. 투자는 적당하고(\$1,000-\$5,000/단위) 유지 보수는 간단합니다(연간 약 \$200). 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.5-2kWh/kg)를 포함합니다. 고온으로부터 보호(비용: 시간당 \$50). 소형 용광로는 대량 생산에 적합하지 않습니다(> 100cm²). 난방 장비는 텅스텐 지형 제어에 대한 핵심 지원을 제공합니다.

7.6.3 혼합 장비

교반 장비는 생물학적 템플릿 방법에 의한 황색 텅스텐 트리 옥사이드의 제조시 전구체

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

용액 (Na_2WO_4 , 0.01-0.1 mol/L), 산성화 제 (HCl , pH 4-6) 및 템플릿 현탁액 (예 : 셀룰로오스 슬러리)을 혼합하는 데 사용되며, 반응물 (농도 편차 <5 %) 및 템플릿 함침 일관성 (증착 편차 < 10 %). 장비는 생물학적 템플릿(손상 < 5%)을 보호하기 위해 온화한 전단력(50-500rpm), 내식성(pH 4-10) 및 낮은 오염(Fe , C <5ppm)이어야 합니다.

혼합 장비(모델 MS-200)는 일반적으로 자기 교반기이며 구동 모터(동력 0.05-0.5kW), 자기 교반 바(PTFE 코팅, 길이 20-50mm), 용기(유리, 부피 0.1-10L) 및 속도 제어 모듈(50-1000rpm, 정확도 $\pm 1\%$). 작동 원리는 교반 막대를 회전시켜 유동장(전단 속도 1-10 s^{-1})을 생성하고 Na_2WO_4 와 HCl 을 혼합하여 템플릿 표면에 흡착되는 H_2WO_4 를 형성하는 자기장을 기반으로 합니다. 오염(Fe <5ppm)을 방지하기 위한 PTFE 교반 막대(pH 1-14, 마찰 계수 < 0.1). 유리 용기(순도>99.5%)는 부드러운 반응(pH 4-10)을 지원합니다. 속도 제어 모듈은 균일한 유량장(레이놀즈 번호 > 100)을 보장합니다.

프로세스는 용액 준비로 시작됩니다. Na_2WO_4 (순도>99.5%)를 탈이온수(전도도< 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 0.01-0.1mol/L)에 용해시켜 유리 용기(50-80% 충전)에 붓습니다. 템플릿(예: 셀룰로오스, 0.1-1g/L)을 추가하고 교반을 시작하고(100-300rpm) 10-20 분 동안 분산합니다(분산 > 95%). HCl (0.1 mol/L, 주입 속도 0.1-0.5 mL/분)을 pH 4-6 에 적가하고 1-4 시간 동안 교반하여 H_2WO_4 (증착 속도 >90%)를 흡착시켰습니다. 용액을 방치하거나 여과하고 템플릿을 물(Cl^- <10ppm)로 세척했습니다. 교반 막대와 용기 세척(에탄올, 잔류 < 1mg/cm²). 이 공정에는 환기(풍량 200m³/h)와 산성 미스트(HCl <1mg/m³) 제어가 필요합니다. 동적 광 산란(DLS) 및 UV-Vis 를 사용하여 용액 균질성(편차<5%)과 증착 효율(>90%)을 검출했습니다.

중요 파라미터의 최적화는 반응 품질에 매우 중요합니다. 교반 속도 100-300rpm, 너무 높음(>500rpm), 템플릿 손상(>10%), 너무 낮음(<50rpm), 고르지 않은 혼합(편차 >10%). pH 4-6, 너무 높음(>8), 적층 감소(<70%), 너무 낮음(<3), 템플릿 저하(>10%). 용액 온도는 20-40 °C 이고 템플릿이 너무 높으면(>60 °C) 변성(>5%)됩니다. 교반 막대 길이는 20-50mm 이며 너무 짧으면(<10mm) 유동장이 약합니다(분산 < 90%). 컨테이너 충전률은 50-80%, 초과 충전(>90%), 오버플로(손실>1%)입니다. 재질은 PTFE (Fe <5 ppm)입니다. 교반 시간의 장점은 균일한 혼합(분산 > 95%), 부드러운 취급(템플릿 손상 <5%)입니다. 낮은 투자(\$200-1000/단위), 소규모 테스트(0.1-10L)에 적합합니다. 그러나 단점은 더 높은 에너지 소비(0.05-0.1kWh/L)를 포함합니다. 대용량(>10L)에는 기계적 혼합(투자 > \$2,000)이 필요합니다. 수동 청소는 시간이 많이 걸립니다. 교반 장비는 황색 삼산화 텅스텐 주형 반응을위한 균일 한 환경을 제공합니다.

7.6.4 온도 제어 장비

온도 제어 장비는 생물학적 템플릿 방법으로 황색 텅스텐 삼산화물의 제조시 반응 용액의 온도 (20-60 °C), 템플릿 건조 (60-100 °C) 및 열처리 (200-500 °C)를 정밀하게 제어하여 전구체 증착 (수율 >90 %), 템플릿 건조 (수분 함량 <5 %) 및 WO_3 결정화 (단사정 비율 >80 %). 장비는 템플릿 손상(<5%) 및 필름 균열(<2%)을 방지하기 위해 고정밀 온도 제어(편차 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$), 내식성(수증기, 약산에 대한 내성) 및 균일한 가열(편차 $\leq \pm 2^\circ\text{C}$)을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제공해야 합니다.

온도 제어 장비에는 자동 온도 조절 수조(반응 및 건조, 모델 HH-4)와 머플로(열처리, 모델 MFL-1200)가 포함됩니다. 자동 온도 조절 수조 구조는 싱크대(304 스테인리스 스틸, 부피 5-50L), 가열 튜브(니크롬, 전력 0.5-2kW), 순환 펌프(유량 1-5L/분), 온도 조절기(PID, 정확도 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) 및 안전 장치(과열 보호, 전원 끄기 $> 85^{\circ}\text{C}$)로 구성됩니다. 머플로의 구조는 퍼니스 챔버(알루미나 세라믹, 부피 10-100 L, 온도 저항 $> 1200^{\circ}\text{C}$), 발열체(실리콘 탄소 막대, 전력 1-5 kW), 열전대(유형 K, 정확도 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), 온도 조절기(PID, 정확도 $\pm 1^{\circ}\text{C}$) 및 단열재(알루미늄 규산염, 두께 50mm). 작동 원리는 전열 변환과 물을 통한 수조의 높은 열용량($4.18\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$) 20-100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 유지되는 머플로는 복사에 의해 200-500 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열되어 $\text{H}_2\text{WO}_4 : \text{H}_2\text{WO}_4 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 의 분해를 유도합니다. 304 스테인리스강(부식 속도 $< 0.01\text{mm}/\text{년}$) 및 알루미나는 낮은 오염($\text{Fe}, \text{Al} < 5\text{ppm}$)을 보장합니다.

절차는 용액 반응으로 시작됩니다. 탈 이온수 (전도도 $< 10 \mu\text{S} / \text{cm}$, 충전률 80-90 %)를 수조에 주입하고 20-60 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고 10-20 분 동안 예열 (편차 $< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)을 실시했습니다. 반응 용기 (Na_2WO_4 , 0.01-0.1 mol / L 및 주형 포함)를 수조에 넣고 1-24 시간 동안 침지시켰다 (100-300 rpm 에서 교반). 템플릿을 제거하고 수조(60-80 $^{\circ}\text{C}$, 2-4 시간)에 넣어 건조(수분 함량 $<5\%$)했습니다. 건조 된 템플릿을 200-500 $^{\circ}\text{C}$ (2-5 $^{\circ}\text{C} / \text{분}$)의 머플로로 옮기고 1-4 시간 동안 열처리하여 템플릿 (셀룰로오스)을 연소시켜 다공성 WO_3 (공극 크기 5-100 nm)를 형성합니다. $< 100^{\circ}\text{C}$ (N_2 100sccm 에서 3-5 $^{\circ}\text{C}/\text{분}$)로 냉각합니다. 장비 청소(수조 배수, 머플로 압축 공기, 잔류 $< 0.1\text{mg}/\text{cm}^2$). 공정은 환기가 필요합니다(200-500 m^3/h). 다공성($>50\%$), 다형체(단사정) 및 비표면적(20-80 m^2/g)을 SEM, XRD 및 BET 로 측정했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 WO_3 품질에 매우 중요합니다. 반응 온도는 20-60 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 템플릿 변성($>5\%$)의 경우 너무 높고($>80^{\circ}\text{C}$), 느린 증착(>24 시간)의 경우 너무 낮은($<10^{\circ}\text{C}$)입니다. 건조 온도는 60-80 $^{\circ}\text{C}$ 이며 너무 높으면($>100^{\circ}\text{C}$) 템플릿이 수축($>10\%$)합니다. 열처리 온도는 200-500 $^{\circ}\text{C}$, 너무 높음 ($>600^{\circ}\text{C}$), 큰 입자 성장 ($>500 \text{nm}$), 너무 낮음 ($<150^{\circ}\text{C}$) 및 높은 비정질 비율 ($>50\%$)입니다. 온도 제어 정확도는 0.5°C (수조) $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (머플로) \pm 편차는 $> \pm 2^{\circ}\text{C}$ 이며 형태가 고르지 않습니다(기공 직경 편차 $>20\%$). 가열 속도는 2-5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이고 균열($>5\%$)이 너무 빠릅니다($>10^{\circ}\text{C}/\text{min}$). 싱크 및 용광로 재료 304SS 또는 알루미나($\text{Fe} < 5\text{ppm}$)가 필요합니다. 온도 제어 장비의 장점은 정밀한 온도 제어($1^{\circ}\text{C} < \pm$ 편차)와 다단계 공정($> 95\%$ 수율) 지원입니다. 투자는 적당하고($\$500-5,000/\text{단위}$) 유지 보수는 간단합니다(연간 약 $\$100-\200). 그러나 단점은 높은 에너지 소비(0.1-2 kWh/kg)를 포함합니다. 머플로는 매우 큰 샘플($>500\text{cm}^2$)에는 적합하지 않습니다. 수조는 정기적으로 석회질을 제거해야 합니다. 온도 제어 장치는 텅스텐 지형 및 결정 형태의 최적화를 위한 핵심 지원을 제공합니다.

7.6.5 여과 장비

여과 장비는 생물학적 템플릿 방법으로 황색 삼산화 텅스텐을 제조 할 때 템플릿에서 H_2WO_4 침전물 또는 WO_3 전구체와 반응 용액을 분리하고, 잔류 용액 (NaCl , HCl 10 ppm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

및 결합되지 않은 전구체 ($\text{Na} < \text{WO} \square \square 1 \%$)를 제거하고, 템플릿 순도 (불순물 $< 5 \text{ ppm}$) 및 WO_3 품질 (순도 $> 99.9 \%$)을 보장하는 데 사용됩니다. 장비는 다공성 구조 형성(다공성 $> 50\%$)을 지원하기 위해 고효율(회수율 $> 98\%$), 내식성($\text{pH} 4-10$) 및 낮은 오염($\text{Fe} < 5 \text{ ppm}$)을 제공해야 합니다.

여과 장비(모델 SHZ-DIII)는 일반적으로 브리넬 깔때기(폴리프로필렌 PP 또는 유리, 부피 $0.1-5 \text{ L}$), 멤브레인(PTFE 또는 셀룰로오스, 기공 크기 $0.1-1 \mu\text{m}$), 흡입 필터 병(유리, 부피 $0.5-10 \text{ L}$), 진공 펌프(동력 $0.1-0.5 \text{ kW}$, 극한 진공 $< 10 \text{ Pa}$) 및 연결 튜브(PTFE, $5-10 \text{ mm I.D.}$)로 구성된 진공 필터입니다. 작동 원리는 음압($0.05-0.08 \text{ MPa}$)을 기반으로 하며, 용액은 필터 멤브레인(여과 속도 $1-10 \text{ mL/s}$), 템플릿(셀룰로오스 멤브레인) 및 그 침전물(H_2WO_4)을 통해 갇히고 액체는 흡입 필터 플라스크에 수집됩니다. PTFE 멤브레인($\text{pH} 1-14$)은 오염($\text{Fe} < 5 \text{ ppm}$)을 방지하고 유리 깔때기(순도 $> 99.5\%$)는 청결($\text{C} < 5 \text{ ppm}$)을 보장합니다.

이 프로세스는 템플릿이 반응한 후에 시작됩니다. 템플릿(셀룰로오스, $0.1-1 \text{ g}$) 및 H_2WO_4 ($\text{pH} 4-6$)를 포함하는 현탁액을 Brinell 깔때기에 붓고 PTFE 멤브레인(공극 크기 $0.45 \mu\text{m}$, 청결도 $\text{Ra} < 0.5 \mu\text{m}$)으로 사전 코팅했습니다. 진공 펌프(진공도 $0.05-0.08 \text{ MPa}$)를 시작하고 5-20 분 동안 여과한 후 여과액을 수집했습니다(회수율 $> 98\%$). 주형 케이크($1-5 \text{ mm}$ 두께)를 탈이온수($50-200 \text{ mL}$, 전도도 $< 10 \mu\text{S/cm}$)로 3-5 회 세척하여 Na^+ 및 Cl^- ($< 10 \text{ ppm}$)을 제거했습니다. 2-5 분의 흡입 및 여과 후 케이크의 수분 함량은 20-30%로 감소합니다. 템플릿을 건조($60-80^\circ\text{C}$)로 옮기고 멤브레인과 깔때기(에탄올, 잔류 $< 1 \text{ mg/cm}^2$)로 세척했습니다. 폐기물 중화($\text{pH} 6-8$). 이 공정에는 환기(풍량 $200 \text{ m}^3/\text{h}$)와 먼지 제어($< 1 \text{ mg/m}^3$)가 필요합니다. 순도($> 99.9\%$)와 형태(다공성 $> 50\%$)는 유도 결합 플라즈마(ICP-MS)에 의해 검출되었습니다.

주요 파라미터의 최적화는 필터레이션 효과에 매우 중요합니다. 멤브레인의 공극 크기는 $0.1-1 \mu\text{m}$ 였고, 템플릿이 너무 크거나($> 2 \mu\text{m}$) 손실되었으며($> 2\%$), 필터가 너무 작거나($< 0.05 \mu\text{m}$) 느리거나($< 1 \text{ mL/s}$) 진공 $0.05-0.08 \text{ MPa}$, 너무 높음($> 0.09 \text{ MPa}$), 멤브레인 손상(수명 < 100 회), 너무 낮음($< 0.02 \text{ MPa}$) 및 낮은 효율($< 50\%$). 케이크 두께는 $1-5 \text{ mm}$ 이고 초과 두께($> 10 \text{ mm}$)는 수분 함량($> 40\%$)이 높습니다. 세척량 $50-200 \text{ mL}$, 너무 많으면($> 500 \text{ mL}$) 비싸고($> \$0.1/\text{L}$) 너무 적으면($< 20 \text{ mL}$) 불순물 잔류물($\text{Cl} > 20 \text{ ppm}$). 멤브레인에는 PTFE(수명 > 200 회)가 필요하고 깔때기에는 PP 또는 유리($\text{Fe} < 5 \text{ ppm}$)가 필요합니다. 여과 장비의 장점은 분리 효율이 높다는 것(회수율 $> 98\%$)으로 소규모 시험($0.1-10 \text{ L}$ /배치)에 적합합니다. 낮은 투자 비용과 간단한 유지 보수. 그러나 단점은 여과 속도($< 10 \text{ mL/s}$)가 느려서 대량 생산($> 10 \text{ L}$)에 적합하지 않다는 것입니다. 멤브레인을 교체해야 합니다. 여과 장비는 텅스텐 템플릿의 분리를 위한 고순도 지원을 제공합니다.

7.6.6 건조 장비

건조 장비는 샘플 템플릿 방법으로 황색 삼산화 텅스텐을 제조 할 때 템플릿과 그 침전물 ($\text{H}_2\text{WO} \square \square$)에서 물 (수분 함량 $< 5 \%$)과 용매 (에탄올 $< 0.1 \%$)를 제거하고, 후속 열처리 ($200-500^\circ\text{C}$)를 위해 건조 샘플을 준비하고, 템플릿 구조 (다공성 $> 50 \%$)를 보호하고, WO_3 지형 (기공 크기 $5-100 \text{ nm}$)을 보장하는 데 사용됩니다. 장비는 템플릿 수축($< 10\%$) 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

침전물 균열(<2%)을 방지하기 위해 부드럽게 건조(60–100°C), 균일하게 가열(편차<±2°C) 및 낮은 오염(Fe<5ppm)이 필요합니다.

건조 플랜트 (모델 DGG-9070)는 일반적으로 챔버 (304 스테인리스 스틸, 볼륨 10-100 L), 가열 튜브 (니크롬, 전력 0.5-2 kW), 진공 펌프 (펌핑 속도 1-10 L / s, 최대 진공 <100 Pa), 트레이 (알루미나, 순도 > 99.5 %), 온도 조절기 (PID, 정확도 ± 1 ° C) 및 팬 (풍량 100-500 m³ / h). 작동 원리는 가열 튜브를 60–100 ° C 로 가열하고 진공은 끓는점(물 < 50°C)을 낮추고 물의 증발(0.1–1g/min)을 가속화하는 저온 진공 건조를 기반으로 합니다. 알루미나 트레이는 오염(Al<5ppm)을 방지하고 팬은 균일한 온도(편차 <± 2°C)를 보장합니다. 안전 장치에는 과열 보호(> 120°C 전원 차단) 및 진공 압력 릴리프 밸브(>0.1MPa)가 포함됩니다.

프로세스는 템플릿 준비로 시작됩니다. 여과된 템플릿(H₂WO₄, 수분 함량 20–30%)을 사전 세척된 알루미나 트레이(두께 <5mm)에 넣습니다(에탄올, 잔류 < 0.1 mg/cm²). 건조 온도를 <100 Pa 로 비우고 60-80 ° C (가열 속도 2-5 ° C / 분)로 설정하고 4-12 시간 (수분 함량< 5 %) 동안 건조했습니다. 팬이 작동하고(200–300m³/h) 균일성(편차 <± 2°C)을 유지합니다. 건조 후 템플릿을 <40°C(N₂ 100sccm)로 냉각하고 머플로(200–500°C)로 옮깁니다. 챔버 청소(압축 공기, 잔류 < 0.1mg/cm²). 이 공정에는 환기(풍량 200m³/h)와 먼지 제어(<1mg/m³)가 필요합니다. 형태(다공성>50%) 및 비표면적(20–80m²/g)은 SEM 및 BET 에 의해 감지되었습니다.

주요 매개변수의 최적화는 건조 결과에 매우 중요합니다. 건조 온도는 60–80°C, 템플릿 수축(>10%)에 비해 너무 높고(>100°C), 장시간(> 24 시간) 너무 낮음(< 40°C)입니다. 진공 수준은 100Pa, 너무 높음(>500Pa), 수분 잔류물(>10%)<. 팔레트의 두께는 < 5mm 이고 두께가 너무 두껍고(>10mm) 건조가 고르지 않습니다(수분 함량 > 10%). 온도 제어 정확도는 ± 1°C 이고 편차는 >±5°C 지형 손상(기공 직경 편차 >20%)입니다. 팬의 풍량은 200–300m³/h 이고 너무 낮을 경우(<100m³/h) 온도 편차는 >±5°C 입니다. 팔레트 재료는 알루미나(Al<5ppm)여야 합니다. 건조 장비의 장점은 부드러운 건조(템플릿 손상<5%)와 높은 다공성 WO₃(>50%)를 지원한다는 것입니다. 적당한 투자와 간단한 유지 보수. 그러나 단점은 더 높은 에너지 소비(0.1–0.5kWh/kg)를 포함합니다. 건조 시간(4-12 시간)이 길어 대규모 배치(>1kg/배치)에는 적합하지 않습니다. 건조 장비는 텅스텐 거푸집 공사의 전처리를 안정적으로 지원합니다.

7.7 특성화 장비

황색 삼산화 텅스텐 (WO₃)의 특성화 장비는 결정 형태, 형태, 미세 구조 및 광학 특성을 포함한 물리적 및 화학적 특성을 분석하여 재료가 광촉매 (분해 효율 >85 %), 전기 변색 (착색 효율 >50cm² / C) 및 센서 (검출 한계 <1ppm)와 같은 응용 분야의 요구 사항을 충족하는지 확인하는 데 사용됩니다. 특성화 장비는 WO₃의 순도(>99.9%), 입자 크기(20–200nm), 다공성(>50%) 및 밴드 갭(2.6–2.8eV)을 검증하기 위해 높은 정확도(<±1% 오류), 고분해능(<1nm) 및 안정성(5000 시간 연속 작동)이 필요합니다.

7.7.1 X 선 회절분석기

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

X 선 회절 (XRD)은 WO의 결정 구조, 상 조성 및 입자 크기 (20-200 nm)를 분석하여 결정 형태 (예 : 단사정, 평면 간격 0.38 nm) 및 비율 (>80 %)을 확인하여 재료의 성능 안정성 (광촉매 효율 >85 %)을 평가하는 데 사용됩니다. 이 장치는 높은 각도 해상도($\pm 0.01^\circ$)와 강한 신호(카운트 속도 $> 10^4$ cps)를 필요로 합니다.

XRD(모델 Bruker D8 Advance) 구조는 X 선관(Cu $K\alpha$, 파장 1.5406Å, 출력 1-4kW), 시료 스테이지(회전 속도 0-60rpm), 검출기(LynxEye, 각도 해상도 $\pm 0.01^\circ$), 모노크로메이터(흑연, $K\beta$ 제거) 및 데이터 처리 시스템(DIFFRAC. EVA 소프트웨어). 작동 원리는 브래그 회절($2d \sin\theta = n\lambda$)을 기반으로 하고, WO의 결정 평면은 X 선을 반사하고, 검출기는 회절 피크(예 : $2\theta = 23.1^\circ$, (002) 평면)를 기록하고, 결정 형태 및 입자 크기를 분석합니다 (Scherrer 공식, $D = K\lambda / \beta \cos\theta$). 스테이지 회전은 방향 효과(편차 <5%)를 줄입니다. 모노크로메이터는 신호 대 잡음비(> 100:1)를 향상시킵니다.

이 과정은 시료 전처리로 시작됩니다. WO_3 분말(0.1-1g) 또는 필름(1-10cm²), 분쇄(입자 크기<10 μ m) 또는 평면($R_a < 0.5\mu$ m), 시료 스테이지(실리콘 기반, 순도>99.9%). 기기를 보정하고(표준 Si, 2θ 편차 $\leq \pm 0.01^\circ$) 스캔 범위를 10-80 $^\circ$ (단계 크기 0.02 $^\circ$, 속도 0.1-1 $^\circ$ /분)로 설정합니다. 1-2 시간 동안 스캔하고 회절 패턴을 기록합니다. 이 소프트웨어는 피크 위치(오류 $\leq \pm 0.01^\circ$), 강도($> 10^3$ cps) 및 절반 높이($\beta < 0.2^\circ$)의 너비를 분석하여 결정 형태(단사정 비율>80%)와 입자 크기(20-200nm)를 결정합니다. 시료 세척(에탄올, 잔류 < 0.1 mg/cm²), 기기 유지보수(월 교정, 비용 \$50). 공정은 깨끗해야 합니다(분진 < 0.1mg/m³). WO_3 (>99.9%)의 순도를 확인하기 위해 JCPDS 카드(83-0950)와 데이터를 비교하였다.

중요한 매개변수의 최적화는 분석 품질에 매우 중요합니다. 스캔 단계 크기는 0.02 $^\circ$ 로 너무 크고($> 0.1^\circ$) 해상도가 낮습니다(피크 중첩 > 10%). 스캔 속도는 0.1-1 $^\circ$ /min 이고 신호 대 잡음비(<50:1)가 낮고($> 2^\circ$ /min) 너무 빠르다(2 $^\circ$ /min). 샘플 두께는 0.1-1mm 이고 너무 얇고(<0.05mm) 신호가 약합니다($< 10^3$ cps). X 선 출력 1-4kW, 너무 높음(> 5 kW) 샘플 손상(>1%). 스테이지는 0-60rpm 회전했고 방향 오류($> 10\%$)가 너무 낮았습니다(< 10 rpm). 흑연($K\beta < 1\%$)은 모노크로메이터에 필요합니다. XRD의 장점은 비파괴 검사 및 정확한 결정 형태 분석(오차 $\leq \pm 0.01^\circ$)이라는 것입니다. 투자액은 높지만(\$10-\$500,000/단위) 수명이 길다(> 10 년). 그러나 단점은 긴 분석 시간(1-2 시간/샘플)을 포함합니다. 표본은 균일해야 합니다(편차 10% > 정확도에 영향을 미침). XRD 는 WO_3 결정 구조의 신뢰할 수 있는 특성화를 제공합니다.

7.7.2 주사 전자 현미경

주사 전자 현미경 (SEM)을 사용하여 WO의 표면 형태, 입자 크기 (20-200 nm) 및 다공성 (>50 %)을 관찰하여 광촉매 (비 표면적 >50 m² / g) 및 센서 성능에 대한 미세 구조의 영향을 평가했습니다. 이 장치는 고해상도(<1nm)와 큰 피사계 심도(>1 μ m)를 필요로 합니다.

SEM(모델 JEOL JSM-7800F) 구조는 전자총(전계 방출, 가속 전압 0.5-30kV), 렌즈

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

시스템(전자기 렌즈, 해상도 0.8nm), 샘플 챔버(진공 $<10^{-4}$ Pa), 검출기(2 차 전자 SE, 후방 산란 BSE) 및 이미지 처리 시스템(해상도 1024×1024)으로 구성됩니다. 작동 원리는 샘플을 스캔하는 전자빔, 2 차 전자의 여기, 지형 이미지(배율 10^2-10^6)를 생성하는 검출기를 기반으로 합니다. 샘플 챔버 진공은 전자 산란($<10^{-4}$ Pa)을 방지합니다. 필드 런치는 높은 밝기($>10^9$ A/m²·sr)를 제공하고 해상도(<1 nm)를 보장합니다.

절차는 시료 전처리로 시작됩니다. WO₃ 분말 (0.01-0.1 g)을 에탄올 (0.1-1 mg / mL)에 분산시키고 실리콘 웨이퍼 (1×1 cm²)에 적하 코팅하거나 직접 고정을 위해 필름 (1-10 cm²)합니다. 샘플 전도성 처리(금 도금, 두께 5-10nm, 비용 \$10). 진공을 $<10^{-4}$ Pa 로 설정하고 가속 전압을 5-15kV(지형)로 설정하고 10-30 분 동안 스캔하고 이미지(해상도 <1 nm)를 획득합니다. 입자 크기(20-200nm, $<10\%$ 편차), 다공성($>50\%$) 및 표면 균일성($<5\%$ 편차)을 분석합니다. 샘플을 제거하고 세척 (에탄올, 잔류 <0.1 mg / cm²). 기기 교정(월당, 표준 샘플, 비용 \$50). 공정은 깨끗해야 합니다(분진 <0.1 mg/m³). 이미지는 ImageJ 소프트웨어로 분석했습니다(입자 크기 분포 $<10\%$).

주요 매개변수의 최적화는 지형 분석에 필수적입니다. 가속 전압은 5-15 kV, 너무 높음(>20 kV), 샘플 손상($>5\%$), 너무 낮음(<2 kV) 및 낮은 해상도(>5 nm)입니다. 진공 수준이 10^{-4} Pa $<$ 너무 높고($>10^{-3}$ Pa) 이미지가 흐릿합니다($>10\%$). 금도금의 두께는 5-10nm 이고 두께(>20 nm)는 지형($>10\%$)을 마스킹합니다. 스캔 시간은 10-30 분이며 너무 짧으면(<50 분) 신호 대 잡음비가 낮습니다($<50:5$). 샘플의 표면은 평평해야 합니다($R_a<0.5\mu\text{m}$). SEM 의 장점은 고해상도(<1 nm)와 직관적인 지형(다공성 $>50\%$)입니다. 투자가 높고(20-100 만 달러/단위) 서비스 수명이 길다(>10 년). 그러나 단점은 샘플을 전기적으로 처리해야 한다는 것입니다(샘플당 \$10). 감지 범위가 제한되어 있습니다(<1 cm²). SEM 은 WO₃ 지형의 정확한 특성화를 제공합니다.

7.7.3 투과 전자 현미경

투과 전자 현미경 (TEM)을 사용하여 WO의 내부 미세 구조, 격자 간격 (0.38 nm) 및 결합 (예 : 전위 $<1\%$)을 분석하여 나노 미터 크기 (20-200 nm) 및 결정 형태 (단사정 비율 $>80\%$)를 검증했다. 이 장치에는 초고분해능(<0.1 nm) 및 전자 에너지 손실 분광법(EELS) 기능이 필요합니다.

TEM(모델 FEI Tecnai G2 F20) 구조는 전자총(필드 발사, 가속 전압 80-200kV), 렌즈 시스템(해상도 0.1nm), 샘플 스테이지(이중 경사 $\pm 45^\circ$), 검출기(CCD, 해상도 4096×4096), 진공 시스템($<10^{-5}$ Pa) 및 EELS 모듈(에너지 해상도 <0.5 eV)로 구성됩니다. 작동 원리는 얇은 샘플(두께 <100 nm)을 관통하는 전자빔을 기반으로 하여 회절 패턴(결정 형태)과 고해상도 이미지(격자)를 생성합니다. 진공 시스템은 전자 산란($<10^{-5}$ Pa)을 방지합니다. 원소 조성의 EELS 분석(W:O 비율 $\approx 1:3$).

절차는 시료 전처리로 시작됩니다. WO₃ 분말 (0.01-0.1 mg)을 에탄올 (0.1 mg / mL)에 분산시키고 구리 메쉬 (공극 크기 0.1-1 μm , 비용 \$ 20 / 정제)에 떨어 뜨렸다. 이온 박막(Ar⁺, 5kV, 비용 \$50)이 있는 박막(<100 nm). 진공을 $<10^{-5}$ Pa 로 설정하고 가속 전압을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

100–200kV 로 설정하고 이미지를 5–30 분 동안 설정하고 고해상도 이미지(격자 간격 0.38nm) 및 선택적 전자 회절(SAED)을 획득합니다. EELS 는 W 및 O 함량(오류 $\leq \pm 1\%$)을 감지하는 데 사용되었습니다. 샘플을 제거하고 구리 메쉬를 회수했습니다($>90\%$). 기기 교정(주당, 표준 Au, 비용 \$100). 공정은 깨끗해야 합니다(분진 $< 0.1\text{mg}/\text{m}^3$). 입자 크기(20–200nm, 편차 $< 5\%$) 및 결함($< 1\%$)에 대한 데이터를 수행했습니다.

주요 매개변수의 최적화는 구조 해석에 필수적입니다. 가속 전압 100–200 kV, 너무 높음(>300 kV), 샘플 파괴($>5\%$), 너무 낮음(<50 kV), 낮은 해상도(>0.5 nm). 샘플 두께는 $100\text{nm} <$ 너무 두꺼우면($>200\text{nm}$) 이미지가 흐릿합니다($>10\%$). 진공 수준은 $< 10^{-5}$ Pa 이고 전자 산란($>5\%$)이 너무 높습니다($>10^{-4}$ Pa). 이미징 시간은 5-30 분이며 너무 짧으면(<2 분) 신호 대 잡음비가 낮습니다($<50:1$). 구리 메쉬 기공 크기 $0.1-1 \mu\text{m}$, 과도($>2 \mu\text{m}$) 샘플 손실($>10\%$). TEM 의 장점은 초고해상도($<0.1\text{nm}$)와 명확한 내부 구조(격자 편차 $< 1\%$)입니다. 투자는 매우 높고(50-200 만 달러/단위) 서비스 수명이 길고(> 10 년). 그러나 단점은 복잡한 샘플 준비(> 1 시간 동안 샘플당 \$50)를 포함합니다. 감지 영역이 작습니다($<1\mu\text{m}^2$). TEM 은 WO_3 미세 구조에 대한 심층적인 특성을 제공합니다.

7.7.4 UV-Vis 분광 광도계

자외선 가시광선 분광 광도계 (UV-Vis)는 밴드 갭 (2.6-2.8 eV), 흡수 계수 ($>10^4 \text{cm}^{-1}$) 및 투과율 ($>80\%$)을 포함한 WO_3 의 광학 특성을 측정하는 데 사용되며, 광촉매 (밴드 갭은 가시 광선에 적합) 및 전기 변색 성능을 평가합니다. 이 장치는 높은 파장 정확도($\pm 0.5\text{nm}$)와 넓은 스펙트럼 범위(200–1100nm)를 필요로 합니다.

UV-Vis(모델 Shimadzu UV-2600) 구조는 광원(중수소 + 할로젠, 200–1100nm), 모노크로메이터(격자, 파장 분해능 0.1nm), 시료 셀(석영, 두께 1–10mm), 검출기(PMT+InGaAs, 감도 $>10^{-4}$ Abs) 및 데이터 처리 시스템(UVProbe 소프트웨어)으로 구성됩니다. 작동 원리는 Lambert-Beale 법칙 ($A = \epsilon lc$)을 기반으로 하며, WO_3 박막 또는 분산액은 빛을 흡수하고, 흡광도는 기록되며(0-2 Abs), 밴드 갭은 계산됩니다 (T_{auc} 공식, $(\alpha hv)^2 = A (hv - E_g)$). 오염을 피하기 위한 석영 풀(순도 $>99.9\%$)(Si $< 1\text{ppm}$).

이 과정은 시료 전처리로 시작됩니다. 석영 셀에 고정 된 WO_3 박막 ($1-10\text{cm}^2$, 두께 10–1000 nm) 또는 물 (전도도 $< 10 \mu\text{S}/\text{cm}$)에 분산 된 분말 ($0.1-1 \text{mg}/\text{mL}$). 200–800nm 의 설정 파장(0.5nm 단계, 속도 100–1000nm/min)에서 기기를 보정(베이스라인 보정, 오류 $\leq 0.1\%$)합니다. 5-10 분 동안 스캔하고 흡수 스펙트럼을 기록합니다. 이 소프트웨어는 밴드갭(2.6–2.8eV, 오류 $\pm 0.01\text{eV}$) 및 투과율($>80\%$)을 분석합니다. 시료 세척(에탄올, 잔류 $< 0.1 \text{mg}/\text{cm}^2$), 석영 셀 재사용(> 1000 사이클). 기기 유지보수(월, 광원 교정, 비용 \$50) 공정은 깨끗해야 합니다(먼지 $< 0.1\text{mg}/\text{m}^3$). 광촉매 성능을 검증하기 위한 데이터(흡수 가장자리 $< 450\text{nm}$).

주요 매개변수의 최적화는 광학 분석에 매우 중요합니다. 파장 단계는 0.5nm 이고 밴드갭 오류($>0.1\text{eV}$)가 너무 큼($>2\text{nm}$). 스캔 속도는 100–1000nm/min 이고 너무 빠르면($>2000\text{nm}/\text{min}$) 신호 대 잡음비가 낮음($<50:1$)됩니다. 샘플 농도는 0.1–1 mg/mL 이고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산란(>10%)이 너무 높았습니다(>5 mg/mL). 광원의 전력은 안정적입니다(변동 <±1%). 석영 셀의 두께는 1-10mm 이고 흡수 편차(>5%)가 너무 두껍습니다(>20mm). UV-Vis 의 장점은 빠른 검출(< 10 분)과 높은 밴드갭 정확도(<±0.01eV)입니다. 투자는 보통(1-50,000 달러/단위)이며 작동이 간단합니다. 그러나 단점은 감지 두께가 제한적이라는 것입니다. 액체 샘플은 균질해야 합니다(편차 10% > 정확도에 영향을 미침). UV-Vis 는 WO₃ 광학 성능의 효율적인 특성화를 제공합니다.



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

제 8 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 검출 원리에 관한 연구

기능성 재료로서 텅스텐 (WO_3)은 광촉매 (분해 효율 >85 %), 전기 변색 (착색 효율 >50 cm^2 / C) 및 센서 (검출 한계 <1 ppm)에 응용되어 고순도 (>99.9 %), 특정 형태 (입자 크기 20-200 nm, 다공성>50%) 및 밴드갭(2.6-2.8eV). 검출 원리에 대한 연구는 다양한 방법을 다루고 있으며, 그 중 분광학은 높은 감도(<1ppm), 비파괴성 및 빠른 응답(<1 분)으로 인해 주류가 되었습니다. 이 장에서는 황색 삼산화 텅스텐 검출에 분광학의 적용에 중점을 두고 전문 데이터 및 실험실 실습과 결합된 X 선 형광 분광법(XRF) 및 라만 분광법의 원리, 장비, 작동, 장점 및 단점을 분석합니다.

8.1 텅스텐 검출 - 분광학

분광학은 전자기파 (X 선, 가시 광선, 적외선 등)와의 상호 작용을 통해 WO의 원소 조성, 결정 구조, 진동 모드 및 전자 구조를 감지하는 데 사용되며 분말 (0.1-1 g), 박막 (두께 10-1000 nm) 및 나노 구조 (입자 크기 20-200 nm)에 적합합니다. 이 방법은 화학적 순도(W:O 비율≈1:3)와 물리적 특성(단사정>80%)을 검증하기 위해 고분해능(<0.1eV), 낮은 검출 한계(<1ppm) 및 견고성(반복성>99%)이 필요했습니다. 분광 분석에는 X 선 형광 분광법(XRF), 라만 분광법, 자외선 가시광선 분광법(UV-Vis) 등이 포함되며, 이 섹션에서는 황색 삼산화 텅스텐 검출에 XRF 및 라만 분광법의 적용에 중점을 둡니다.

8.1.1 텅스텐 검출 - X 선 형광 분광법

X 선 형광 분광법(XRF)은 고에너지 X선으로 WO_3 샘플을 여기시키고, 원자 내부층의 전자 전이가 특징적인 형광을 생성하고, W, O 및 기타 불순물 원소(Fe, Na<5ppm)의 함량을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감지하고, 화학적 조성 및 순도(>99.9%)를 평가합니다. W 원자의 $L\alpha$ 라인(약 8.4keV)이 주요 검출 대상이며, O 원자(약 0.52keV)의 $K\alpha$ 라인이 분석을 돕는 데 사용됩니다. 이 방법은 형광 강도와 원소 농도 사이의 비례 관계($I = k \cdot C$) 표준 곡선 정량화(오차 $\leq \pm 1\%$)와 결합.

X 선 형광 분광법 관련 장비

XRF 장비(모델 Bruker S8 TIGER)는 X 선관(Rh 대상, 전력 1-4kW, 에너지 10-50keV), 시료 챔버(진공 또는 He 대기, 부피 10-100cm³), 결정 스플리터(LiF, 에너지 분해능<0.1keV), 검출기(비례 카운터 또는 실리콘 드리프트 SDD, 감도>10⁴ cps) 및 데이터 처리 시스템(SPECTRAplus 소프트웨어)으로 구성됩니다. 진공 시스템(<10Pa)은 공기 흡수를 줄입니다(O 신호 향상>50%). SDD 검출기는 낮은 Z 원소(O)(<100ppm)에 대한 검출 한계를 높입니다.

X 선 형광 분광법 절차

- 일. 샘플 준비 : WO₃ 분말 (0.5-2 g)을 얇은 시트 (직경 2-5cm, 두께 0.1-1 mm, 압력 10 MPa) 또는 박막 (1-10 cm²)에 직접 배치 (폴리 프로필렌 기관, 순도 >99.9 %). 신호 산란(>5%)을 방지하기 위해 샘플 표면이 평평합니다($R_a < 0.5\mu m$).
- 이. 기기 교정: 표준 샘플(순수 WO₃, W>99.99%)을 사용하여 W $L\alpha$ (8.4keV) 및 O $K\alpha$ (0.52keV) 피크(오류 $\leq \pm 0.01keV$)를 교정합니다. X 선관 전력은 2kW 로 설정되고 전류는 50mA 입니다.
- 삼. 측정: 시료를 시료 챔버에 넣고 <10Pa 까지 진공 청소하며 스캐닝 에너지 범위는 0.5-20keV(0.01keV 단계, 시간 10-30 초/포인트)입니다. 형광 스펙트럼을 기록하고 W, O 및 불순물(Fe, Na) 강도를 분석했습니다.
- 사. 데이터 분석: 소프트웨어는 피크 면적(오차 $\leq \pm 1\%$)을 맞추고 표준 곡선과 결합하여 함량(W \approx 72.2wt%, O \approx 27.8wt%)을 계산했습니다. 불순물이 검출되었습니다(Fe<5ppm, Na<10ppm).
- 오. 후속 처리: 샘플 제거, 세척(에탄올, 잔류 < 0.1 mg/cm²). 기기 유지보수(월 교정, 비용 \$100) 공정은 깨끗해야 합니다(먼지<0.1mg/m³).

X-ray fluorescence spectroscopy 를 위한 핵심 파라미터 최적화

- X 선 에너지: 10 - 50 keV, 너무 높음(>60 keV) 기관 2(>10%), 너무 낮음(<5 keV) O 신호 약함(<10³ cps).
- 시료 두께: 0.1-1mm, 너무 얇음(<0.05mm), 신호 불충분(<10³ cps), 너무 두꺼움(>2mm), 자체 흡수(>5%).
- 측정 시간: 10-30 초/포인트, 너무 짧음(<5 초) 및 낮은 신호 대 잡음비(<50:1).
- 진공도: <10 Pa, 과도하게 높음(>100 Pa) O 감지 높이 한계(>500 ppm).
- 검출기 감도: >10⁴ cps, 오류 >5³ cps 미만 10%.

X 선 형광 분광법의 장점과 단점

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **장점:** 비파괴 검사, 빠름(<5 분/샘플), 고감도(W>99.9%, 불순물<5ppm). 분말 및 필름에 적합합니다 (수율 > 95 %).
- **단점:** 높은 투자(\$10-\$500,000/단위). 경소자(O)의 검출 한계는 제한적입니다(>100ppm). 샘플은 평평해야 합니다(Ra>1 μ m 오차>10%).
- **응용 분야 :** XRF 는 품질 관리를 위해 황색 삼산화 텅스텐의 원소 조성을 정확하게 특성화합니다 (순도 > 99.9 %).

8.1.2 텅스텐 검출 - 라만 분광법

라만 분광법은 레이저로 WO_3 분자 진동을 여기시켜 특징적인 진동 모드(예: W-O-W 텔레스코픽 진동, 약 807cm^{-1})를 감지하고 결정 구조(단사정, 육각형), 결정 형태 비율(단사정>80%) 및 결합(예: 산소 공극<1%). 이 방법은 라만 산란($\Delta v = v_o - v_s$)을 기반으로 하며, WO_3 의 O-W-O 굽힘(270cm^{-1}) 및 W=O 스트레칭(807cm^{-1}) 피크는 정성적 다형체에 사용되며 비정질 피크는 확장됩니다(절반 높이에서 > 50cm^{-1}). 시료 파괴가 없는 고감도(<1ppm).

라만 분광법과 관련된 장비인 라만 분광계(모델 Horiba LabRAM HR Evolution)는 레이저(532nm 또는 785nm, 출력 1-100mW), 현미경(대물렌즈 10x-100x, 분해능<1 μ m) 및 격자(1800g/mm, 파수 분해능< 0.5cm^{-1})로 구성됩니다.), 검출기(CCD, 감도> 10^4 cps) 및 데이터 처리 시스템(LabSpec 소프트웨어). 532nm 레이저는 WO_3 (밴드갭 2.6-2.8eV)에 적합하며 785nm 는 형광 간섭(<10%)을 줄입니다. 미세시료분석을 위한 현미경 검사(<1 μm^2).

라만 분광법의 작동 원리

- 시료 준비:** WO_3 분말(0.01-0.1g), 평탄화(Ra<0.5 μ m) 또는 박막(1-10 cm^2)을 슬라이드(순도>99.9%)에 놓습니다. 표면을 깨끗하게 유지하기 위해 전도성 처리가 필요하지 않습니다(C<1ppm).
- 기기 교정:** 파수(오차 $\leq \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$)는 표준 실리콘(520.7 cm^{-1})을 사용하여 교정되었습니다. 레이저 파장을 532 nm 로 설정하고 출력을 5-10 mW 로 설정합니다(샘플 화상 방지, <1%).
- 측정:** 초점 샘플(대물렌즈 50x, 깊이 < 1 μ m), 스캐닝 범위 $100-1000\text{cm}^{-1}$ (0.5cm^{-1} 단계, 축적 시간 10-60 초). 라만 스펙트럼이 기록되고 특징적인 피크(270, 715, 807cm^{-1})가 검출되었습니다.
- 데이터 분석:** 소프트웨어 기준선 보정(오류 $\leq \pm 1\%$), 피팅 피크 위치(오류 $\leq \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$) 및 절반 높이 너비(<20 cm^{-1}). 다형체(단사정, 807 cm^{-1} 강도> 10^3 cps) 및 결합(추가 피크<1%)을 확인합니다.
- 후속 처리:** 샘플 제거, 세척(에탄올, 잔류 < 0.1 mg/ cm^2). 레이저 유지 보수. 공정은 깨끗해야 합니다(분진<0.1mg/ m^3).

Raman 분광법(Raman spectroscopy)을 위한 핵심 파라미터 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 레이저 출력: 5-10 mW, 너무 높음(>50 mW) 샘플 열 손상(>5%), 너무 낮음(<1 mW), 약한 신호(<10³ cps).
- 파수 범위: 100-1000 cm⁻¹, 너무 좁음(<500 cm⁻¹) 놓친 피크(>10%).
- 누적 시간: 10-60 초, 너무 짧음(<5 초), 낮은 신호 대 잡음비(<50:1).
- 대물렌즈 배율: 50×-100×, 너무 낮음(<10×) 및 낮은 해상도(>5μm).
- 격자 밀도: 1800g/mm, 600g/mm 미만의 해상도 차이(>2cm⁻¹).

Raman 분광법의 장점과 단점

- **장점:** 비파괴, 고속(<1 분/포인트), 미세분석(<1μm²). 고감도 (결정 형태의 <5 % 편차)는 결정질 및 비정질 WO₃ 모두에 대해 가능합니다.
- **단점:** 높은 투자(\$10-\$500,000/단위). 형광 간섭은 레이저에 맞게 최적화되어야 합니다. 표면 거칠기(Ra>1μm)는 신호(>10%)를 감소시킵니다.
- **응용 분야:** 라만 분광법은 텅스텐 결정 형태의 효율적인 특성화 및 나노 구조(입자 크기 20-200nm)에 대한 결합 분석을 제공합니다.

8.2 텅스텐 검출 - 전기 화학 분석

전기 화학 분석은 전해질에서 WO₃의 산화 환원 반응을 통해 전해질에서 WO₃의 전기 화학적 특성(예: 커패시턴스, 전기 변색 효율) 및 표면 활성(비표면적 50m²/g)을 측정하며 박막(두께 10-1000nm) 및 나노 구조(입자 크기 20-200nm). 이 방법은 높은 감도(전류 ± 0.1μA), 넓은 전위 범위(-2 - 2V) 및 안정성(반복성 > 99%)이 필요한 전극 표면의 전류-전위 응답을 기반으로 합니다. 전기 화학 분석에는 전압 전류법 (CV), 전기 화학 임피던스 분광법 (EIS) 등이 포함되며, 이 섹션에서는 황색 삼산화 텅스텐 검출에 전압 전류계의 적용에 중점을 둡니다.

8.2.1 황색 삼산화 텅스텐 검출 - 화산 전류

순환 전압주사법(CV)을 사용하여 WO₃ 전극에 사이클링 전위를 적용하여 전류 응답을 기록함으로써 산화 환원 거동, 용량성 성능 및 전기 변색 특성을 분석했습니다. WO₃는 산성(예: H₂SO₄, 0.1 mol/L) 또는 중성 전해질(예: Na₂SO₄, 0.5 mol/L)에서 반응합니다: WO₃ + xH⁺ + xe⁻ ↔ H_xWO₃ (0<x<1)와 색상 변화(노란색 ↔, 파란색). CV 곡선은 산화 피크(약 0.2-0.5V 대 Ag/AgCl) 및 환원 피크(약 -0.2 - -0.5V), 환원 제어를 반영하는 피크 전류(i_p) 대 스윙 속도(v)(i_p ∝ v^{1/2}) 및 전하 용량(>100mC/cm²)을 계산하기 위한 피크 면적 적분을 보여줍니다. 전기 변색 효율(η = ΔOD/Q, >50cm²/C) 및 사이클링 안정성(> 1000 사이클, 감쇠 < 10%)을 평가하기 위해 방법을 사용했습니다.

전압주사 관련 장비

전위차계 (모델 CHI-660E)는 전위차계 / 전류 제어 모듈 (전위차 ±0.001V, 전류 ± 0.1 μA), 3 전극 시스템 (작동 전극 : WO₃ 박막, 기준 전극 : Ag / AgCl, 상대 전극 : Pt), 전해 전지

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(유리 또는 PTFE, 부피 50-200 mL), 데이터 수집 시스템 (샘플링 속도 >1 kHz) 및 분석 소프트웨어 (CHI). 셀은 N₂ 퍼지(O₂<1ppm)를 지원합니다. 워크스테이션은 넓은 전위 범위(-2 - 2 V)와 다중 모드(CV, EIS, 전위차 조절기)를 제공합니다.

전압전류법의 작동 과정

- 일. 샘플 준비 : WO₃ 박막 (1-10 cm², 두께 10-1000 nm)을 FTO 유리 (저항 10-20 Ω / sq)에 증착하고 세척 (에탄올, 잔류 <0.1 mg / cm²).또는 카본지(면적 1cm²)에 코팅된 카본 블랙, PVDF(8:1:1)와 혼합된 WO₃ 분말(0.1-1 mg).
- 이. 전해질 준비: 0.1 mol/L H₂SO₄ (pH 1-2, 전도도 >10 mS/cm) 또는 0.5 mol/L Na₂SO₄ (pH 6-7), 탈이온수 (전도도 <10 μS/cm). N^oC 로 5 분(O₂<1ppm) 동안 퍼지합니다.
- 삼. 기기 교정: Ag/AgCl 기준 전극을 교정합니다(전위 0.197V 대 SHE, 오류 <±2mV). 전위 창을 -0.8V 에서 0.8V 로 설정하고 스윙 속도를 10-100mV/s 로 설정합니다.
- 사. 측정 : 3 개의 전극이 WO₃를 작업 전극으로 사용하여 셀 (5-10mm 간격)에 배치됩니다. CV 를 5-10 사이클 동안 실행하고 전류-전위 곡선(피크 전류 0.1-1mA/cm²)을 기록합니다. 산화/환원 피크(오류 <±10mV), 피크 면적(전하 >100mC/cm²) 및 사이클 안정성(감쇠<5%)을 분석했습니다.
- 오. 후속 처리: 전극 물 세척(Cl<10ppm), 전해조 세척(잔류 < 0.1mg/cm²). 데이터에는 소프트웨어가 장착되었습니다(커패시턴스 오류<±1%). 이 공정에는 산성 미스트를 제어하기 위해 환기(200m³/h)가 필요합니다.

voltammetry 의 핵심 매개변수 최적화

- 잠재적 창: -0.8 - 0.8 V, 너무 넓은(>±1 V) 전극 열화(>10%), 너무 좁음(<±0.5 V) 피크 누락(>20%).
- 스윙 속도: 10-100mV/s, 너무 빠름(>500mV/s), 피크 모양 왜곡(>10%), 너무 느림(<5mV/s) 및 낮은 효율성(>1 시간).
- 전해질 농도: 0.1-0.5 mol/L, 너무 높음(>1 mol/L)은 전극을 부식시키고(>5%), 너무 낮음(<0.05 mol/L) 및 약한 전류(<0.1 mA/cm²).
- 전극 면적: 1-10 cm², 과도(>20 cm²) 불균일 전류(>10%).
- N₂퍼지: O₂<1ppm, 너무 높음(>10ppm) 산화 간섭(>5%).

voltammetry 의 장점과 단점

- 장점: 전기화학적 성능(커패시턴스 > 100mF/cm²)을 직접 평가하기 위한 고감도(전류 ± 0.1μA). 빠름(< 10 분/샘플)으로 전기 변색(η>50cm²/C)에 적합합니다.
- 단점: 전도성 기판(FTO, 비용 \$10/cm²)이 필요합니다. 전해질 부식성(H₂SO₄ 보호 필요, 비용 \$50/시간). 시료 전처리는 복잡합니다(> 1 시간).
- 응용 분야 : Voltammetry 는 센서 및 전기 변색 장치에 대한 WO₃ 전기 화학적 성능 (사이클링 안정성 >1000 사이클)의 정확한 특성화를 제공합니다.

8.3 기타 황색 삼산화 텅스텐 검출 방법

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

황색 삼산화 텅스텐 테스트에는 열중량 분석 (TGA), 비 표면적 분석 (BET), 적외선 분광법 (FTIR) 및 열 안정성, 표면 특성 및 화학적 결합을 분석하기 위한 기타 방법도 포함됩니다. 이 섹션에서는 황색 삼산화 텅스텐 검출에 열중량 분석의 적용에 중점을 둡니다.

8.3.1 텅스텐 검출 - 열중량 분석

열중량 분석(TGA)은 통제된 대기(N₂, 공기) 및 가열 프로그램(25–1000°C)에서 WO₃ 샘플의 질량 변화를 측정하여 WO<1wt%), 유기 잔류물(<0.1wt%) 및 WO₃ 샘플의 분해 거동을 분석합니다. WO₃는 <100°C(0.5–2 wt%)에서 흡착수, 100–300°C(<1 wt%)에서 결정수를 잃고 >800°C(W₂O₅<1%)에서 휘발될 수 있습니다. 이 방법은 질량-온도 곡선(dm/dT)을 기반으로 열분해 온도(오차±1°C)와 잔류물(순도>99.9%)을 검출했습니다.

열중량 분석 관련 장비

TGA 장비(모델 TA Instruments Q500)는 마이크로 저울(정확도 ± 0.1µg, 용량 0.1–100mg), 용광로(알루미나 세라믹, 온도 25–1200°C, 가열 속도 0.1–50°C/분), 가스 제어 시스템(N₂ 또는 공기, 유량 10–100mL/분), 열전대(K 형, 정확도 ±.5°C) 및 데이터 처리 시스템(TA Universal Analysis)으로 구성됩니다. 오염(Al<5 ppm)을 방지하기 위한 알루미나 도가니(부피 10–100 µL, 순도 > 99.5%). N₂ 분위기 (O₂<1 ppm)는 산화를 방지합니다.

열중량 분석 사용 방법

- 일. 시료 준비: 도가니의 WO₃ 분말(5–20 mg, 입자 크기 20–200 nm) 또는 필름 조각(<10 mg)(500°C 에서 사전 소각, 잔류 < 0.1 µg). 샘플을 건조시킵니다(60°C, 2 시간, 수분 함량<1%).
- 이. 기기 교정: 교정 저울(표준 분동, 오차 <±0.1 µg) 및 온도(표준 In, 156.6°C, 오차 <± 0.5°C). N₂ 유속을 50mL/분(O₂<1ppm)으로 설정합니다.
- 삼. 측정: 도가니를 저울에 올려 놓고 25–1000°C(속도 5–20°C/min)로 예열하고 질량-온도 곡선을 기록했습니다(정확도 ±0.1µg). 수분(< 100°C, <2wt%), 유기물(100–300°C, <0.1wt%), 분해(>800°C, <1wt%)를 분석하였다.
- 사. 데이터 분석: 질량 손실(오차 <±0.1%)과 분해 온도(오차 <± 1°C)를 계산합니다. WO₃ 안정성을 확인합니다(>800°C 에서 큰 손실 없음).
- 오. 후속 처리: 도가니 세척(초음파, 40kHz, 잔류 < 0.1µg). 기기 유지보수(3 개월마다, 비용 \$100) 공정이 깨끗해야 합니다(분진<0.1mg/m³).

thermogravimetric analysis 의 핵심 파라미터 최적화

- 가열 속도: 5–20°C/min, 너무 빠르고(>50°C/min), 질량 변동(>0.1%), 너무 느림(<2°C/min) 및 낮은 효율(>2 시간).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 시료 품질: 5-20 mg, 너무 적음(<1 mg), 약한 신호(<10 µg), 너무 많음(>50 mg) 및 불균일한 열(>5%).
- 기체 유속: 10 - 100 mL/분, 너무 낮음(<5 mL/분), 산화(>1%), 너무 높음(>200 mL/분), 시료 산란(>0.1%).
- 온도 범위: 25-1000°C, 너무 좁음(<500°C), 분해 누락(>10%).
- 도가니 재료: 알루미늄(Al<5ppm), 기타 재료(예: Pt)가 더 비쌉니다(> \$100/개).

열중량 분석의 장점과 단점

- **장점:** 고감도($\pm 0.1\mu\text{g}$), 열 안정성(>800°C) 및 수분(<2wt%)의 정확한 감지. 분말 및 필름에 적합합니다 (수율 > 95 %).
- **단점:** 높은 투자(\$5-\$200,000/단위). 샘플이 파괴적입니다(재사용할 수 없음). 긴 검출 시간(1-2 시간/샘플).
- **응용 분야 :** TGA 는 광촉매 재료 최적화를 위한 WO_3 열 안정성 (분해 < 1 중량 %) 및 순도 분석의 신뢰할 수 있는 특성화를 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO₃) Product Introduction

1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO₃ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO ₃ content (wt%)	≥99.95
Impurities (wt%, max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm ³)
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO₃ content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website www.tungsten-powder.com. For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

9 장 : 황색 삼산화 텅스텐의 응용 분야

텅스텐 (WO_3)은 고순도 (>99.9%), 균일 한 입자 크기 (0.1-10 μm) 및 화학적 안정성 (산 및 알칼리 저항, pH 1-14)으로 인해 텅스텐 제품, 촉매, 전기 변색 장치, 광촉매 재료 및 센서에 널리 사용되는 주요 텅스텐 화합물입니다. 텅스텐 제품에서 텅스텐 옐로우는 전구체로 사용되며, 이는 환원, 소결 및 가공을 통해 고성능 텅스텐 분말, 텅스텐 와이어 및 텅스텐 스트립 (순도 > 99.95 %)으로 변환되어 조명 (수명 > 2000 시간), 전자 (전도성 > 15 % IACS) 및 항공 우주 (밀도 > 19 g / cm^3)의 요구를 충족시킵니다.

9.1 텅스텐 제품에 황색 삼산화 텅스텐 적용

텅스텐 옐로우 (WO_3)는 수소 환원 (H_2 , 순도 99.999 %)에 의해 텅스텐 분말 (입자 크기 > 0.5-5 μm)로 전환 된 다음 소결, 인발 또는 단조되어 텅스텐 와이어 (직경 10-500 μm) 또는 텅스텐 바 (길이 0.1-1 m)를 생산하며, 이는 초경합금 (경도 > 90 HRA)에 널리 사용됩니다. 필라멘트(인장 강도 > 2000MPa) 및 고온 부품(온도 저항 > 2500°C). 황색 삼산화 텅스텐의 높은 산화 상태 (W^{6+}) 및 균질 입자 (0.1-10 μm)는 효율적인 환원 및 가공을 용이하게하며,이 공정은 제품 성능 (밀도 > 19g / cm^3 , 전도성 >15 % IACS)을 보장하기 위해 온도 (600-3000 °C), 대기 ($O < 1$ ppm) 및 불순물 (Fe, C < 50 ppm)의 엄격한 제어가 필요합니다. 이 섹션에서는 텅스텐 분말 준비, 텅스텐 와이어 생산 및 텅스텐 바 제조에서 황색 텅스텐 삼산화물의 특정 응용 분야에 대해 자세히 설명합니다.

9.1.1 텅스텐 분말의 제조에 황색 텅스텐 삼산화물의 적용

텅스텐 금속은 수소에 의해 환원되어 텅스텐 금속 분말 (입자 크기 0.5-5 μm , 순도 >

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

99.95%)을 생성하며, 이는 텅스텐 카바이드 (경도 >90 HRA), 열 용사 (결합 강도 >50 MPa) 및 전자 부품 (전도도 > 15 % IACS)에 사용됩니다. 이 공정은 황색 삼산화 텅스텐 (WO₃, 순도 >99.9 %)을 원료로 사용하여 관형 환원로 (모델 RF-1200, 316L 스테인리스 스틸, 부피 10-100 L)를 사용하고 H₂ 대기에서 단계적으로 환원 : WO₃ → WO_{2.9} (600-700 °C), WO_{2.9} → W (800-1000 °C). 이 장비에는 발열체(실리콘 탄소 막대, 5-20kW), 가스 분배기(0.1-1mm 조리개), 온도 조절기(PID, 정확도 ± 1°C) 및 배기 가스 처리 시스템(물 세척 + 잿물, 회수>95%)이 포함됩니다. 분석 장비에는 레이저 입자 크기 분석기(정확도 ±1%)와 산소 분석기(검출 한계 < 10ppm)가 포함됩니다.

황색 삼산화 텅스텐에 의해 생성된 텅스텐 분말의 작동 공정

체질 (200 메쉬, 잔류 <1 %) 및 건조 (100 °C, 2 시간, 수분 함량 <0.1 %), 황색 삼산화 텅스텐 (0.1-100 kg, 입자 크기 0.1-10 μm)을 알루미늄아 보트 (순도 >99.5 %, 두께 1-5 mm, 충전 밀도 0.5-1 g / cm³)에 고르게 퍼고 용광로에 넣었다. 용광로 본체를 <10 Pa, H₂ (유속 10-50 L/min, 순도 >99.999%)로 세척하고, 5-10°C/분에서 600-700°C 로 가열하고, 1-2 시간 동안 배양한 다음, 800-1000°C 로 올리고, 2-4 시간 동안 단열하고, 총 환원 시간 4-8 시간, >95%를 산출했습니다. <100°C(H₂ 대기, 5-10°C/min)로 냉각하고 텅스텐 분말을 제거하고 체질(100-400 mesh, 입자 크기 0.5-5 μm)했습니다. 레이저 입도 분석기와 ICP-MS 를 사용하여 입자 크기(편차 <±10%), O 함량(<0.1 wt%), 불순물(Fe, Na<50ppm)을 검출했습니다. 용광로 본체를 N₂(잔류 < 0.1mg/cm²)로 퍼지하고, 배기 가스를 세척 및 회수(>95%)하고, 전체 공정을 환기(풍량 500m³/h, 분진 < 1mg/m³)했습니다.

황색 삼산화 텅스텐에서 텅스텐 분말 생산을위한 주요 매개 변수 최적화

환원 온도는 600-1000°C 에서 제어되었으며, 너무 높으면(>1100°C) 입자 성장(>10μm)이 발생하고 너무 낮은(<500°C) 잔류 WO₂(>1%)가 발생했습니다. H₂ 유량은 10-50 L/min 으로 유지되고, 너무 높으면(>100 L/min) 폐가스(>10%), 너무 낮으면(<5 L/min) 감소 시간(>12 시간)이 연장됩니다. 장약 두께는 1-5mm 로 설정되었으며 초과 두께(>10mm)로 인해 불균일한 감소(O>0.2wt%)가 발생했습니다. 가열 속도는 5-10°C/min 으로 최적화되며 너무 빠르면(>20°C/min) 분말 응집(>5%)이 발생합니다. 알루미늄아는 오염을 방지하기 위해 사용되며 배기 가스 처리는 >95%(배출 < 1mg/m³)의 회수율을 보장해야 합니다.

황색 삼산화 텅스텐에 의해 생성된 텅스텐 분말의 장점과 단점

황색 삼산화 텅스텐으로 제조된 텅스텐 분말의 장점은 높은 환원 효율 (수율 >95 %), 우수한 순도 (>99.95 %) 및 제어 가능한 입자 크기 (0.5-5 μm), 대량 생산 (10-100 kg / 배치)에 적합한 성숙한 공정, 텅스텐 카바이드 및 스프레이 (시장 규모 > 5 억 달러 / 년)의 요구를 충족시키는 것을 포함합니다. 황색 삼산화 텅스텐으로 제조된 텅스텐 분말의 단점은 에너지 소비가 높고 (1-5 kWh / kg) H₂의 사용을 엄격하게 안전하게 관리해야하며 (누출 < 1ppm), 미세 분말 (<0.5 μm)이 응집되기 쉽고 (>5%), 이는 균일 성에 영향을 미칩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2 텅스텐 와이어 생산에 황색 삼산화 텅스텐의 적용

텅스텐은 텅스텐 분말 (입자 크기 0.5-5 μm)로 환원되고 백열등 (수명 > 2000 시간), 전자 방출 (방사율 >90 %) 및 발열체 (온도 저항 > 2000 $^{\circ}\text{C}$)에 사용되는 프레스, 소결, 단조 및 와이어 드로잉에 의해 텅스텐 필라멘트 (직경 10-500 μm) 만들어집니다. 소결로(모델 SF-3000, 흑연 난로, 부피 10-50 L)는 H_2 대기(5-20 L/분)에서 작동하며 2500-3000 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열됩니다. 와이어 드로잉 머신 (모델 DM-500)에는 다이아몬드 다이 (조리개 10-500 μm), 윤활 시스템 (흑연 에멀전, 유속 0.1-0.5 L / min) 및 어닐링로 (저항 가열, 1000-1500 $^{\circ}\text{C}$)가 장착되어 있습니다. 분석 장비에는 만능 재료 시험기(정확도 $\pm 1\text{MPa}$)와 SEM(표면 거칠기 $\text{Ra}<0.1\mu\text{m}$)이 포함됩니다.

텅스텐 필라멘트의 텅스텐 생산 작동 과정

황색 삼산화 텅스텐으로 제조 한 텅스텐 분말 (0.1-1 kg, O <0.1 wt %)을 체로 치고(200 메쉬, 잔류 <1%) 스트립(10 MPa, 밀도 > 10 g/cm^3)으로 압착합니다. 스트립을 소결로에 넣고 H_2 (5-20 L/min, 순도 >>99.999%)로 1-20 시간 동안 10-20 $^{\circ}\text{C}$ /분에서 2500-3000 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열하고 1-2 시간 동안 절연하여 텅스텐 빌렛(밀도 19 g/cm^3)을 만듭니다. 텅스텐 빌렛은 회전 단조 (1500-1800 $^{\circ}\text{C}$)를 막대 (직경 1-5mm)로 만들고 와이어 드로잉 머신 (다이 10-500 μm , 속도 0.1-1 m/s, 흑연 에멀전 0.1-0.5 g/m^2)으로 그려집니다. 텅스텐 필라멘트는 4-6 회 도면 주기 (10-1500 $^{\circ}\text{C}$, 10-30 초)마다 10-50 회의 총 도면 주기로 만들어집니다. 인장 강도(>2000 MPa), 표면 거칠기($\text{Ra}<0.1 \mu\text{m}$) 및 전기 전도도(>15% IACS)는 만능 시험기, 4 프로브 방법 및 SEM 을 사용하여 측정했습니다. 텅스텐 필라멘트 세척(탈이온수, 잔류 < 0.1 mg/cm^2), 로 탈탄소(N_2 퍼지, C<50ppm), 환기(풍량 1000 m^3/h).

텅스텐 필라멘트의 텅스텐 생산을 위한 핵심 파라미터 최적화

소결 온도는 2500-3000 $^{\circ}\text{C}$ 에서 제어되며, 너무 높으면(> 3100 $^{\circ}\text{C}$) 너무 큰 입자(>50 μm), 너무 낮은(<2400 $^{\circ}\text{C}$) 및 불충분한 밀도(<18 g/cm^3)가 발생합니다. H_2 유속은 5-20 L/min 으로 설정되었으며 너무 낮으면(<2 L/min) 산화(O>0.2 wt%)가 발생했습니다. 인발 속도를 0.1-1m/s 로 최적화하고 와이어 파손률(>5%)을 너무 빠르게(>2m/s) 높였습니다. 어닐링 온도는 1000-1500 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지되며 너무 높으면(>1600 $^{\circ}\text{C}$) 연성(<1%)이 감소합니다. 윤활유의 양은 0.1-0.5 g/m^2 로 제어되며 너무 적으면(<0.05 g/m^2) 표면 긁힘이 발생합니다. 금형은 구멍 직경 편차가 <5%임을 보장하기 위해 다이아몬드로 만들어집니다.

황색 삼산화 텅스텐에서 텅스텐 와이어 생산의 장점과 단점

황색 삼산화 텅스텐으로 제조 된 텅스텐 필라멘트는 높은 강도 (> 2000 MPa) 및 긴 수명 (> 2000 시간), 제어 가능한 공정, 미세 가공 (직경 < 10 μm)에 적합하며 백열 램프 (밝기 > 10 lm / W) 및 진공관 (방사율 > 90 %) (수율 > 90 %)의 요구를 충족시킵니다. 그러나 매우 높은 에너지 소비(10-50 kWh/kg), 높은 인발 다이 비용 및 H_2 안전 관리에 대한 추가 투자로 인해 저비용 생산이 제한됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.3 텅스텐 바 제조에 황색 텅스텐 삼산화물의 적용

텅스텐은 텅스텐 분말 (입자 크기 0.5-5 μm)로 환원되고 텅스텐 스트립 (폭 10-100 mm, 길이 0.1-1 m)으로 압축, 소결 및 단조되어 항공 카운터 웨이트 (밀도 > 19 g / cm^3), 고온 용광로 (내열성 > 2500MISSc) 및 의료 차폐 (흡수율 >95 %). 소결로(SF-3000 형, 부피 50-200L)는 단조기(HF-500 형, 수압 10-50MPa, 흑연 주형)와 쌍을 이루고 연마기(출력 1-5kW, 연삭 휠 1000-2000 메쉬)는 표면($R_a < 0.5\mu\text{m}$)을 최적화합니다. 분석 장비에는 밀도계(정확도 $\pm 0.01\text{g}/\text{cm}^3$)와 경도 시험기(정확도 $\pm 1\text{HRA}$)가 포함됩니다.

황색 삼산화 텅스텐에 의해 생성된 텅스텐 막대의 작동 과정

텅스텐 분말 (1-10 kg, 순도 >99.95 %)을 건조 (100 °C, 수분 함량 <0.1 %)로 압출 한 다음 밀렛 (20 MPa, 밀도 > 10 g / cm^3)으로 압착했다. 블랭크를 소결로에 넣고 H_2 (10-50 L/min, 순도 >99.999%)를 통과시켜 2-4 시간 동안 10-20°C/min 에서 2500-3000°C 로 가열하고 2-4 시간 동안 절연하여 텅스텐 잉곳(밀도 > 19 g/ cm^3)을 만듭니다. 텅스텐 잉곳은 1500-2000 °C 로 가열되고 단조 (압력 10-50 MPa, 변형 속도 10-20 % / 시간) 또는 압연 (1200-1800 °C, 속도 0.1-0.5 m / s)으로 스트립으로 만들어집니다. 텅스텐 스트립 연마 (연삭 휠 1000-2000 메쉬, $R_a < 0.5\mu\text{m}$), 세척 (탈 이온수, 잔류 < 0.1 mg / cm^2), 밀도(>19.2g/ cm^3), 경도(>70HRA) 및 입자 크기(<50 μm)는 밀도계, 경도 시험기 및 SEM 을 사용하여 측정했습니다. 용광로 세척(N_2 퍼지, C<50ppm), 배기 가스 회수(>95%), 환기 제어 분진(1000 m^3/h , <1mg/ m^3).

황색 텅스텐 삼산화물로부터 텅스텐 바 생산의 주요 매개 변수 최적화

소결 온도는 2500-3000 °C 로 설정되었으며, 너무 낮고(<2400 °C) 높은 다공성(>1%), 너무 높고(>3100 °C) 너무 큰 입자(>50 μm)가 발생했습니다. 단조 온도는 1500-2000°C 로 제어되며 너무 높으면(>2100°C) 입계 균열(>2%)이 발생합니다. 단조 압력은 10-50 MPa 로 최적화되며, 너무 낮으면(<5 MPa) 변형이 불충분(<10%)됩니다. 연마 연삭 휠은 1000-2000 메쉬이고 오버 코어(<500 메쉬)의 표면 거칠기는 $R_a > 1\mu\text{m}$ 입니다. H_2 순도는 > 99.999%(O<1ppm)로 유지되고 산화(O>0.1wt%)는 방지됩니다. 목표 밀도> 19.2g/ cm^3 이며, 이는 19g/ cm^3 (<2000MPa) 미만입니다.

텅스텐 텅스텐 스트립 생산의 장점과 단점

황색 삼산화 텅스텐으로 제조된 텅스텐 스트립은 고밀도 (>19.2 g / cm^3), 고온 저항 (>2500 °C), 안정적인 공정, 대형 가공 (길이 >1m)에 적합하며 항공 카운터 웨이트 (질량 편차 $\pm 1\%$) 및 고온 전극 (수명 > 5000 시간) (수율 > 90 %). 그러나 매우 높은 에너지 소비(20-100kWh/kg), 높은 장비 투자 및 긴 사이클 시간(>24 시간/배치)으로 인해 생산 비용이 증가합니다.

9.1.4 텅스텐 구리 합금에 황색 삼산화 텅스텐 적용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 분말 (입자 크기 0.5-5 μm , 순도 > 99.95 %)은 수소 환원에 의해 생성되며, 구리 분말과 혼합되고 소결되어 텅스텐 구리 합금 (W-Cu, W 함량 50-90 wt %)을 제조합니다. 이 합금은 전극 (전도도 > 30 % IACS), 방열판 (열전도율 > 200 W / m · K) 및 전기 접점 (아크 저항 > 10,000 회)에 사용됩니다. 황색 삼산화 텅스텐의 낮은 불순물 (Fe<50 ppm)과 균질한 입자는 합금의 고밀도 (>98 % 이론 밀도)와 성능 안정성 (인장 강도 > 500 MPa)을 보장한다. 텅스텐 분말은 관형 환원로 (모델 RF-1200, 볼륨 10-100 L)에 의해 제조되고 합금은 소결로 (모델 SF-2000, 볼륨 10-50 L)에 의해 완료됩니다. 이 장비에는 믹서(50-200rpm), 프레스(10-50MPa), 소결로(발열체 흑연, 10-30kW) 및 전도도계(정확도 \pm 1% IACS) 및 SEM(분해능 < 1 μm)과 같은 분석 장비가 포함됩니다.

텅스텐 구리 합금을 생산하는 텅스텐의 작동 공정

스크리닝 (200 mesh, 잔류 < 1 %) 및 건조 (100 ° C, 2 시간, 수분 함량 < 0.1 %), 황색 삼산화 텅스텐 (순도 > 99.5 mm)을 알루미늄 보트 접시 (순도 > 99.5 %, 두께 1-5 mm)에 놓고 환원로에서 <10 Pa로 진공 청소기로 청소하고 H₂ (10-50 L / min, 순도 >9999 %), 600-5 ° C / 분에서 10-로 가열됩니다. 텅스텐 분말 (0.5-5 μm 입자 크기, 수율 >95 %)을 700 ° C (1-2 시간 동안 배양)에서 제조 한 다음 800-1000 ° C (2-4 시간 동안 배양)로 제조 하였다. 텅스텐 분말을 믹서 (50-200 rpm, 2-4 시간, 균질성 편차 <5 %)에서 고순도 구리 분말 (Cu>99.9 %, 입자 크기 1-10 μm , W : Cu = 50 : 50 - 90 : 10 wt %)과 혼합했다. 혼합 분말을 밀렛(10-50 MPa, 밀도 >8 g/cm³)으로 압착하고 H₂ 분위기(1000-1400 ° C, 5-10°C/min, 1-3 시간 유지)에서 소결하여 텅스텐-구리 합금(밀도 > 14 g/cm³)을 만듭니다. 합금 연마(연삭 휠 1000mesh, Ra < 0.5 μm), 전기 전도도(>30% IACS), 열전도율(>200W/m·K) 및 미세 구조(입자 < 10 μm)를 측정했습니다. 용광로 청소(N₂ 퍼지, 잔류 <0.1 mg/cm²), 배기 가스 회수(>95%), 환기 제어 먼지(500 m³/h, <1 mg/m³).

텅스텐 구리 합금의 텅스텐 생산을 위한 핵심 파라미터 최적화

환원 온도는 600-1000 ° C 로 유지되며, 너무 높고(> 1100 ° C), 입자가 너무 크고(>10 μm), 너무 낮은(<500 ° C), 잔류 WO₂(>1%). H₂ 유량은 10-50L/min 으로 제어되며 너무 낮으면(<5L/min) 감소가 느립니다(>12 시간). 혼합 시간은 2-4 시간, 너무 짧고(<1 시간) 고르지 않습니다(편차 >10%). 소결 온도는 1000-1400°C, 너무 높고(>1500°C), 구리 휘발(>5%), 너무 낮고(<900°C) 밀도가 낮고(<95%)입니다. 가압 압력은 10-50 MPa 이고 녹색 몸체가 너무 낮으면(<5 MPa) 느슨합니다(다공성 >5%). 오염을 방지하기 위해 알루미늄(Al<50ppm)가 사용됩니다.

황색 삼산화 텅스텐에 의해 생성 된 텅스텐 구리 합금의 장점과 단점

황색 삼산화 텅스텐에 의해 제조 된 텅스텐 구리 합금의 장점은 높은 전기 전도성 (>30 % IACS) 및 열전도율 (>200 W / m · K), 이론 값 (>98 %)에 가까운 밀도, 전기 접점 및 방열판 (수명 > 10,000 회)에 적합합니다. 조정 가능한 W:Cu 비율(50:50 - 90:10)을 통한 공정 유연성. 단점으로는 높은 소결 에너지 소비(5-20kWh/kg), 제어된 구리 휘발(비용 10% 증가) 및 높은 혼합 균일성 요구 사항(편차 >5% 성능 저하)이 있습니다. 황색 삼산화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐으로 제조된 텅스텐 구리 합금은 전자 및 항공의 요구를 충족시킵니다.

9.1.5 텅스텐-니켈-철 합금에 황색 삼산화 텅스텐 적용

텅스텐은 니켈 (Ni) 및 철 (Fe) 분말과 혼합되고 소결된 텅스텐 분말을 환원시켜 텅스텐 니켈-철 합금 (W-Ni-Fe, W 함량 85-95 wt %)을 제조하여 항공 카운터 웨이트 (밀도 > 17g / cm³), 방사선 차폐 (흡수율 > 90 %) 및 군사 (> 100mm 강철 투과)에 사용됩니다.

텅스텐의 고순도(>99.9%) 및 미세 입자(0.1-10μm)는 합금의 고밀도(>17.5g/cm³) 및 기계적 특성(인장 강도 > 800MPa)을 보장합니다. 이 공정은 환원로(모델 RF-1200)와 진공 소결로(모델 VF-1500, 볼륨 10-50 L)를 사용합니다. 이 장비에는 믹서(50-200 rpm), 프레스(20-100 MPa), 진공 펌프(펌핑 속도>100 L/s, <10⁻³ Pa) 및 밀도계(±0.01 g/cm³) 및 경도 시험기(±1 HRA)와 같은 분석 기기가 포함됩니다.

텅스텐 니켈-철 합금을 생산하는 텅스텐의 작동 과정

스크리닝 (200 mesh, 잔류 < 1 %) 및 건조 (100 °C, 수분 함량 < 0.1 %), 텅스텐 분말 (0.5-5 μm, 수율 > 95 %)을 알루미늄 보트 접시 (두께 1-5 mm)에 넣고 H₂ (10-50 L/min)를 환원로에 통과시킨 다음 800-1000 °C (2-4 시간 유지)로 제조했다. 텅스텐 분말을 니켈 분말 (Ni>99.9 %, 1-10 μm), 철 분말 (Fe>99.9 %, 1-10 μm, W : Ni : Fe = 90 : 7 : 3 to 95 : 3.5 : 1.5 wt %) (50-200 rpm, 2-4 h, 편차 < 5 %). 혼합 분말을 압착(20-100 MPa, 밀도 > 8 g/cm³)하고 진공로(<10⁻³ Pa)에서 소결(1300-1500 °C, 5-10°C/min, 1-2 시간 유지)하여 합금(밀도 > 17.5 g/cm³)을 형성합니다. 합금 연마(연삭 휠 1000mesh, Ra < 0.5μm), 밀도(>17.5g/cm³), 경도(>30HRA) 및 미세 구조(입자 < 20μm)가 검출되었습니다. 용광로 청소(N₂ 퍼지, 잔류 < 0.1 mg/cm²), 환기 제어 먼지(500 m³/h, < 1 mg/m³).

황색 텅스텐 삼산화물로부터 텅스텐 니켈-철 합금 생산에서 주요 매개 변수의 최적화

환원 온도는 600-1000 °C 이고 너무 높으면(>1100 °C) 입자가 너무 큼니다(>10 μm). 혼합 시간은 2-4 시간, 너무 짧고(<1 시간) 고르지 않습니다(편차 > 10%). 소결 온도는 1300-1500 °C, 너무 높음(>1600 °C), Ni/Fe 휘발(>5%), 너무 낮음(<1200 °C) 및 낮은 밀도(<17 g/cm³)입니다. 진공도는 < 10⁻³ Pa 이고 산화(O>0.1 wt%)가 너무 높습니다(>10⁻² Pa). 가압 압력은 20-100 MPa 이고 녹색 몸체가 너무 낮으면(<5 MPa) 느슨합니다(다공성 > 10%). H₂ 순도> 99.999%(O₂<1ppm)로 오염 방지.

텅스텐 니켈-철 합금 생산에서 텅스텐의 장점과 단점

황색 삼산화 텅스텐으로 제조된 텅스텐 니켈 합금은 고밀도 (>17.5 g / cm³), 우수한 강도 (>800 MPa), 평형 추 및 차폐 (흡수율 > 90 %), 안정적인 공정 및 조정 가능한 Ni : Fe 비율 (7 : 3 내지 3.5 : 1.5)에 적합합니다. 단점으로는 진공 소결에서 높은 에너지 소비(10-30 kWh/kg), Ni/Fe 휘발의 정밀한 제어, 순수 텅스텐보다 낮은 합금 인성(파괴 인성 < 10 MPa·m^{1/2})이 있습니다. 황색 - 텅스텐 합금은 항공 우주 및 군사 산업의 요구를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

충족시킵니다.

9.1.6 초경합금에 황색 삼산화 텅스텐의 적용

텅스텐 엘로우는 텅스텐 분말로 환원되어 텅스텐 카바이드 (WC) 및 코발트 (Co)와 혼합되고 소결되어 절삭 공구 (경도 > 90 HRA), 금형 (내마모성 > 10 배) 및 광산 드릴 비트 (충격 인성 > 10 J / cm²)에 사용되는 초경합금 (WC-Co, W 함량 >80 wt %)을 제조합니다. 텅스텐 카바이드 (0.1-10 μm)의 미세 입자는 텅스텐 카바이드 균질성 (입자 크기 0.5-2 μm)과 합금 특성 (굴곡 강도 > 2000 MPa)을 보장합니다. 이 공정은 환원로(모델 RF-1200), 볼 밀(100-300rpm) 및 진공 소결로(모델 VF-1500)를 사용합니다. 이 장비에는 프레스(20-100 MPa), 진공 펌프(<10⁻³ Pa) 및 경도 시험기(±1 HRA) 및 SEM(분해능 < 1 μm)과 같은 분석 장비가 포함됩니다.

텅스텐 엘로우 텅스텐 삼산화물 생산 초경합금의 작동 과정

스크리닝 (200 mesh, 잔류 < 1 %) 및 건조 (100 °C, 수분 함량 <0.1 %), 텅스텐 분말 (0.5-5 μm, 수율 >95%)을 환원로에서 H₂ (10-50 L / min)를 통과시키고 600-700 °C (1-2 시간 유지)로 가열 한 다음 800-1000 °C (2-4 시간 유지)로 가열하여 제조 하였다. 텅스텐 분말을 흑연 분말 (C >99.9 %, 1-10 μm) (W : C ≈ 94 : 6 wt %)과 혼합하고 흑연로 (1600-2000 °C, H₂ 분위기)에서 탄화시켜 WC (입자 크기 0.5-2 μm)를 생성했다. 볼 밀 습식 밀 (에탄올, 100-300 rpm, 6-12 h, 균일 성 편차 <5 %)에서 코발트 분말 (Co>99.9 %, 1-5 μm, WC : Co = 80 : 20 - 95 : 5 wt%)을 사용한 WC. 슬러리는 건조(80°C, 수분 함량 < 0.1%), 압축(20-100MPa, 밀도 >8g/cm³)에서 소결하고 진공로(<10⁻³ Pa)(1350-1450°C, 5-10°C/분, 1-2 시간 유지)에서 소결하여 초경합금(밀도 > 14g/cm³)을 만듭니다. 합금 연마 (연삭 휠 2000 메쉬, Ra <0.5 μm), 경도 (>90 HRA), 굴곡 강도 (>2000 MPa) 및 입자 크기 (<2 μm)를 테스트했다. 용광로 청소(N₂ 퍼징, 잔류 <0.1 mg/cm²), 환기 제어 먼지.

텅스텐 카바이드 생산에서 핵심 매개 변수의 최적화

환원 온도는 600-1000 °C 이고 너무 높으면(>1100 °C) 입자가 너무 큼니다(>10 μm). 탄화 온도는 1600-2000°C 이고 너무 낮으면(<1500°C) 탄화가 불완전합니다(WC<95%). 볼 연삭 시간은 6-12 시간이며 너무 짧고(<4 시간) 고르지 않습니다(편차>10%). 소결 온도는 1350-1450 °C 이며, 곡물 성장 (>5 μm)에 너무 높고(>1500 °C), 너무 낮고(<1300 °C) 밀도가 낮으며(<95%). 진공도는 < 10⁻³ Pa 이고 산화(O>0.1 wt%)가 너무 높습니다(>10⁻² Pa). 가압 20-100 MPa, 너무 낮고(<10 MPa) 다공성.

텅스텐 카바이드 생산에서 텅스텐의 장점과 단점

황색 삼산화 텅스텐으로 제조 된 텅스텐 카바이드는 높은 경도 (>90 HRA), 높은 내마모성 (>10 배), 절단 및 채광 (수명 >1 년), 제어 가능한 공정, 유연한 WC:Co 비율 (80:20-95:5)을 가지고 있습니다. 단점으로는 높은 에너지 소비(10-30kWh/kg), 높은 코발트 비용(US\$ 20/kg >), 습식 연삭 및 소결의 정밀한 제어(강도를 줄이기 위해 5% > 편차)가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있습니다. 황색 삼산화 텅스텐으로 제조된 텅스텐 카바이드는 공구 산업의 요구를 충족시킵니다.

9.2 환경 분야에서의 황색 삼산화 텅스텐의 적용

와이드 밴드갭 반도체로서 텅스텐(WO_3)은 자외선 또는 가시광선 여기(photolight excitation)에서 전자-정공 쌍(수명 $>1ns$)을 생성하고, 유기 오염 물질(예: VOC, NO_x)의 산화 또는 중금속 이온(예: Cr^{6+})의 환원을 촉진하며, 공기 정화(VOC 분해율 $>85\%$) 및 하수 처리(COD 제거율 $>90\%$)를 실현합니다. 높은 비표면적($>50m^2/g$)과 표면 활성화도(흡착률 $>80\%$)가 높아 오염 물질 제거 효율이 향상됩니다. 이 공정에서는 촉매 효율(양자 수율 $>5\%$)과 안정성(100 사이클 $>$, 100 사이클, 활성 손실 <100 사이클 후 10%)을 보장하기 위해 광원 강도($>10 mW/cm^2$), 촉매 형태(공극 크기 5–100 nm) 및 반응 조건(pH 4–10, 온도 20–60°C)을 제어해야 합니다.

9.2.1 공기 정화에 황색 삼산화 텅스텐 적용

황색 삼산화 텅스텐은 광촉매 산화를 통해 공기 중의 휘발성 유기 화합물 (톨루엔, 포름알데히드와 같은 VOCs $<100ppm$), 질소 산화물 ($NO<10ppm$) 및 박테리아 (살균 속도 $>99\%$)를 분해하며 실내 공기 정화 (PM2.5 제거율 $>80\%$) 및 산업 폐가스 처리 (배출 $<1 mg / m^3$). 황색 삼산화 텅스텐의 밴드 갭 (2.6-2.8 eV)은 자외선 ($<400 nm$) 또는 도핑된 가시광선 (400-700 nm) 하에서 활성 산소 종 (ROS)을 생성하는 데 효율적입니다. OH, O_2^- , 분해 오염 물질(톨루엔 광물화 속도 $>85\%$). 광촉매 반응기 (모델 PCR-500)는 WO_3 박막 (두께 10-1000 nm) 또는 나노 분말 (입자 크기 20-200 nm)을 사용하여 촉매로 사용됩니다. 장비에는 광원(UV 램프 또는 LED, 전력 10–100W), 반응 챔버(석영, 부피 0.1–10L), 기류 제어 시스템(유량 10–100L/min) 및 가스 크로마토그래피(GC, 검출 한계 $<0.1ppm$) 및 콜로니 카운터(정확도 $\pm 1\%$)와 같은 분석 기기가 포함됩니다.

공기 정화 응용 분야의 텅스텐

옐로우 스텐 나노 분말 (0.1-1 g, 순도 $>99.9\%$)은 분무 또는 함침 또는 WO_3 박막 (FTO 유리, 10-1000 nm 에 증착)에 의해 담체 (유리 섬유, 면적 10-100 cm^2 , 다공성 $>50\%$)에 적용됩니다. 촉매를 세정(에탄올, 잔류 $<0.1 mg/cm^2$)하고 반응 챔버(석영, 순도 $>99.5\%$)에 넣고 밀봉(공기 누출률 $<0.01 L/min$)했습니다. 오염된 공기(톨루엔 10–100ppm, $NO_x<10ppm$, 습도 30–70%)가 유입되고 공기 흐름이 조절됩니다(10–100L/분, 체류 시간 1–10 초). UV 램프(365nm, 10–50mW/cm²) 또는 가시광선 LED(450nm, 20–100mW/cm²)를 1-4 시간 동안 켜었을 때 열화율은 $>85\%$ 였습니다. 오염 물질의 농도는 GC(오류 $<\pm 1\%$)로 모니터링하고, 멸균률은 콜로니 카운터($>99\%$)로 검출했습니다. 촉매 재생(100°C 에서 건조, 2 시간, 활성 회복 $>95\%$), 반응 챔버 세척(탈이온수, 잔류 $<0.1mg/cm^2$). 이 공정은 환기(500m³/h) 및 분진 제어($<1mg/m^3$)가 되어야 합니다.

공기 정화 응용 분야에서 텅스텐의 주요 매개 변수 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

광원 강도는 10-50mW/cm²로 제어되며, 너무 높으면(>100mW/cm²) 광부식(활성 손실>10%)을 일으키고 너무 낮으면(<5mW/cm²) 천천히 저하됩니다(<50%). WO₃는 20-200 nm의 입자 크기를 가지며 비 표면적 (<20 m²/g)이 너무 커서 (>500 nm) 너무 큼니다. 기류 속도는 10-100L/min 이고 너무 빠르면(<70L/min) 접촉 시간이 짧습니다(200L/min). 습도 30-70%, 너무 높음(>90%), 표면 흡착 경쟁(효율<60%), 너무 낮음(<20%)· OH 생산이 적습니다. 반응 시간은 1-4 시간이며 너무 짧으면(<0.5 시간) 분해가 불완전합니다(<50%). 캐리어 다공성은 50%> 30% 미만 막힘(효율 <70%)입니다.

공기 정화 응용 분야에서 텅스텐 엘로우의 장점과 단점

공기 정화에서 황색 삼산화 텅스텐의 장점은 높은 분해 효율 (VOC >85 %, NO>80 %), 우수한 살균 효과 (>99 %) 및 사이클 안정성 (> 100 사이클, 손실 <10 %)을 포함하여, 실내 및 산업 응용 분야에 적합합니다. 도핑(예: Ti, N)은 가시광선(효율 20% 증가)까지 확장할 수 있습니다. 단점은 나노 분말이 자외선 의존성으로 인해 쉽게 응집되고(>5%) 정기적으로 재생해야 한다는 것입니다. 텅스텐 광촉매는 공기 정화 (PM2.5 제거율 >80%)의 요구를 충족시킵니다.

9.2.2 하수 처리에 황색 삼산화 텅스텐의 적용

황색 삼산화 텅스텐은 광촉매 산화 및 유기 오염 물질 (예 : 염료, 페놀, 농도 <100 mg / L)의 분해에 의한 산업 폐수 (COD 제거율 >90 %) 및 가정 폐수 처리 (TOC<10 mg / L)에 사용되며, 중금속 (예 : Cr⁶⁺, <10 mg / L) 또는 살균 (E. coli 제거율 >99 %). 높은 산화 전위(+2.7V 대 NHE)는 WO₃에 의해 촉매되어 ·OH(농도 > 1 μmol/L), 광물화 유기물 (염료 분해율 >90 %), Cr⁶⁺에서 Cr³⁺ (전환율 > 95 %)로 환원. 광촉매 반응기 (모델 PWR-1000)는 WO₃ 나노 분말 (20-200 nm) 또는 복합 재료 (예 : WO₃ / TiO₂)를 사용하여 촉매로 사용됩니다. 이 장비에는 광원(UV 램프, 50-200 W), 교반기(100-500 rpm), 반응 셀(유리, 부피 0.5-10 L) 및 TOC 분석기(검출 한계 < 0.1 mg/L) 및 ICP-MS 와 같은 분석 기기가 포함됩니다.

폐수 처리 응용 분야에서 텅스텐의 작동 공정

Yellowsche 분말(0.1-2g, 순도>99.9%)은 탈이온수(0.1-1g/L, 전도도<10μS/cm)에 분산되거나 담체(활성탄, 10-100cm²)에 지지됩니다. 촉매를 초음파로 세척하고(40kHz, 10 분, 잔류 <0.1mg/cm²) 반응 탱크에 첨가(유리, 순도> 99.5%). 폐수(메틸렌 블루 10-100 mg/L, Cr⁶⁺<10 mg/L, pH 4-7, 500 mL-10 L 와 같은 염료), 교반(100-500 rpm, 균질성 편차 <5%)을 주입합니다. UV 램프(365nm, 10-100mW/cm²)를 켜고 반응이 1-6 시간이었을 때 열화율은 >90%였습니다. TOC 분석기는 COD(<20 mg/L)를 모니터링하고, ICP-MS 는 Cr⁶⁺(<0.1 mg/L)를 검출했으며, 콜로니 카운터는 살균 속도(>99%)를 검증했습니다. 촉매 여과(PTFE 멤브레인, 0.45μm, 회수율>98%), 재생(100°C 에서 건조, 2 시간, 활성 회수율>95%). 반응기 탱크 세척(탈이온수, 잔류 < 0.1 mg/cm²), 분진 제어를 위한 환기(500 m³/h, < 1 mg/m³).

폐수 처리 응용 분야에서 텅스텐의 주요 매개 변수 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

광원 강도는 10-100 mW/cm²이고, 촉매가 너무 높으면(>200 mW/cm²) 비활성화되고(>10%), 너무 낮으면(<5 mW/cm²) 저하율이 낮아(<60%)집니다. WO₃ 농도 0.1-1g/L, 너무 높음(>2g/L), 차광(<70% 효율), 너무 낮음(<0.05g/L) 및 불충분한 활성(<50%). pH 4-7, 너무 높음(>9) · OH 생성은 낮고(<0.5μmol/L) 너무 낮을 때(<3) 촉매는 용해(>1%)합니다. 교반 속도 100-500rpm, 너무 낮음(<50rpm) 증착(편차 >10%). 반응 시간은 1-6 시간이며 너무 짧으면(<0.5 시간) 분해가 불완전합니다(<50%). 캐리어의 비표면적은 100m²/g>, 흡착률은 50m²/g 미만으로 낮음(<60%) 제품입니다.

폐수 처리 응용 분야에서 텅스텐의 장점과 단점

폐수 처리에서 황색 삼산화 텅스텐의 장점은 높은 분해율 (유기 > 90 %, Cr⁶⁺>95 %), 우수한 살균 효과 (>99 %) 및 환경 친화성 (2 차 오염 없음), 산업 폐수 (COD<20 mg / L) 및 음용수 처리 (TOC<10 mg / L)에 적합합니다. 복합 WO₃(예: WO₃/g-C₃N₄)는 가시광선 반응을 향상시킵니다(30% 더 효율적). 단점은 광촉매 효율이 광원에 의해 제한되고(UV 램프 비용 \$100/개>), 촉매 회수가 복잡하고(여과 비용이 > \$20/배치), 중성 또는 알칼리성 수역의 효율이 낮다는 것입니다(<70%). 텅스텐 광촉매는 폐수 처리에 대한 수요를 충족시킵니다 (시장 > 5 천만 달러 / 년).

9.3 스마트 재료 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용

스마트 재료에 황색 삼산화 텅스텐 (WO₃)을 사용하는 것은 반도체 특성 (밴드 갭 2.6-2.8 eV)과 가역적 산화 환원 특성 (W⁶⁺↔W⁵⁺)에 의존합니다. 전기 변색 장치에서 WO₃는 전기장에 의해 이온 삽입 / 추출 (예 : H⁺, Li⁺)을 구동하여 색상 전환 (투명 ↔ 파란색, 70 % >투과율 변화)을 달성합니다. 가스 센서에서 WO₃ 표면은 대상 가스(예: NO₂, H₂S)와 반응하여 환경 모니터링(감지 한계 <1ppm)을 위한 저항(감도 >100)을 변경합니다. 이 공정에서는 성능(응답 시간 10 초 <, 주기 안정성 > 1000 cm)을 보장하기 위해 박막 두께(10-1000nm), 형태(다공성>50%) 및 도핑(Ti, Ni<5wt%)의 제어가 필요합니다.

9.3.1 전기 변색 장치에 황색 삼산화 텅스텐의 적용

텅스텐 옐로우는 전기 변색 장치의 핵심 색상 변화 층으로 사용되며, 여기서 이온 삽입 (예 : Li⁺ : WO₃ + xLi⁺ + xe⁻)은 전기장 (±3 V)의 적용에 의해 시작됩니다. ↔ Li_xWO₃)는 스마트 윈도우(에너지 절약>20%), 자동차 미러(눈부심 방지>80%), 디스플레이(명암비 > 100:1)를 위한 광 투과율 조정(400-800nm, 변동>70%)을 위한 것입니다. WO₃ 필름 (두께 10-1000 nm)의 높은 착색 효율 (>50 cm² / C)과 순환 안정성 (> 1000 사이클, 감쇠 < 10 %)이 핵심입니다. WO₃ 박막은 스퍼터링 (전력 100-500 W), 어닐링로 (300-500 °C), 전기 화학 테스트 시스템 (전위차 ±0.001 V) 및 UV-Vis 분광 광도계와 같은 분석 장비를 포함한다. 마그네트론 스퍼터링 (MS-600 유형) 또는 졸 - 겔 방법으로 제조됩니다.

전기 변색 장치 응용 분야의 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

황색 - 텅스텐 분말 (0.1-1 g, 순도 >99.9 % 순도) 또는 텅스텐 대상 (순도 > 99.95 %, 직경 50-100 mm)은 마그네트론 스퍼터링에 사용되어 WO₃ 박막 (대상 기본 거리 50-100 mm, Ar : O₂ = 4 : 1, 압력 0.1-1 Pa, 증착 시간 10-60 분, 두께 10-1000 nm) FTO 유리 (저항 10-20 Ω / sq, 면적 10-1000cm²). 필름 어닐링(300-500°C, 공기, 1-2 시간, 결정화>80%). 대안적으로, WO₃ 전구체(예: WCl₆, 0.1 mol/L)를 에탄올에 용해시키고, FTO 유리에 스핀 코팅(2000-4000 rpm, 30 초)하고, 건조(100°C, 1 h)하고, 졸-겔 방법으로 어닐링(300-500°C, 1-2 h)한다. 박막 세척(탈이온수, 잔류 <0.1 mg/cm²) 및 장치로의 조립(WO₃ 전해질|상대 전극, LiClO₄/PC, 1 mol/L 과 같은 전해질). 전기화학 테스트(-3 - 3 V, 스위프 속도 10-100 mV/s)는 투과율(>70%)과 착색 효율(>50 cm²/C)의 변화를 측정했습니다. 스펙트럼은 분광 광도계(400-800nm)로 검출되었으며 형태(다공성>50%)는 SEM 으로 관찰되었습니다. 장비 세척(에탄올, 잔류 < 0.1 mg/cm²), 환기 제어 분진(500 m³/h, <1 mg/m³).

electrochromic device applications 에서 텅스텐의 주요 매개 변수 최적화

필름 두께는 10-1000nm 로 제어되며 응답 시간은 너무 두꺼운 (> 2000 nm)의 경우 긴 (>30 초), 너무 얇은 (<5 nm)의 경우 투과율 (50 %)의 작은 (<50 %) 변화입니다. 어닐링 온도는 300-500 °C, 입자 성장 (>500 nm)이 너무 높고 (>600 °C), 비정질 상태의 비율이 너무 낮으면 높습니다. 스퍼터링 압력은 0.1-1 Pa 이고 필름은 너무 높으면 다공성 (다공성 >70%)(>2 Pa)입니다. 전해질 농도는 1 mol/L 로 너무 낮고(<0.5 mol/L) 이온 전달이 느립니다. 전기장이 가해지면 ± 1-3V, 너무 높으면(>5V) 필름이 열화됩니다(>10%). 스위프 속도 10-100mV/s, 너무 빠름(>200mV/s), 피크 형상 왜곡(>10%).

electrochromic device application 에서 텅스텐의 장점과 단점

전기 변색 장치에서 텅스텐의 장점은 높은 착색 효율 (>50 cm² / C), 큰 광 투과율 변동 (>70 %) 및 사이클링 안정성 (> 1000 사이클, 감쇠 < 10 %), 스마트 윈도우 (에너지 절약 >20 %) 및 디스플레이 (응답 < 1 초)에 적합합니다. 도핑(예: Ni, Ti)은 가시광선 반응을 향상시킵니다(효율 20% 증가). 단점은 준비 비용이 높고 응답 시간이 유기 물질보다 느리며(>0.5 초) 전해질 누출을 밀봉해야 한다는 것입니다. 텅스텐 일렉트로크로믹은 스마트 빌딩의 요구를 충족시킵니다.

9.3.2 가스 센서에 텅스텐 적용

텅스텐은 가스에 민감한 물질로서 표면에 대상 가스 (예 : NO₂, H₂S, NH₃ 0.1-100ppm)를 흡착하여 가변 저항 (감도 > 100)을 가지며 환경 모니터링 (감지 한계 <1ppm), 산업 안전 (응답 시간 <10 초) 및 의료 진단 (호흡 분석, NH<1ppm)에 사용됩니다. WO₃ 나노 구조 (입자 크기 20-200 nm, 다공성 >50 %)의 높은 비 표면적 (>50 m² / g)은 가스 흡착 (>80 %)을 향상시킵니다. WO₃ 민감층은 열 증발 (TE-300 유형) 또는 증발에 의한 열수 (50-200 W), 어닐링로 (300-600 °C), 가스 테스트 시스템 (유속 10-100 mL / 분) 및 멀티 미터 (저항 ±0.1 Ω) 및 GC-MS (검출 한계 <0.1 ppm)와 같은 분석 기기.

가스 센서 응용 분야에서 텅스텐 엘로우의 작동 과정

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

황색 텅스텐 분말 (0.1-1 g, 순도 >99.9 %)을 열수 법 (WCl_6 , 0.1 mol / L, 180 ° C, 12-24 h)으로 제조하거나 Al_2O_3 기판 (Pt 전극이있는 1-10 cm^2 , 0.1-1 mm 간격)에서 열적으로 증발시켰다. 열수 생성물을 원심 분리(5000rpm, 10 분, 회수>98%), 건조(80°C, 2 시간) 및 기판(1-10 μ m 두께)에 코팅했습니다. 필름 어닐링(300-600°C, 공기, 1-2 시간, 결정화>80%). 기판 세척(에탄올, 잔류 < 0.1 mg/cm²) 및 가스 테스트 챔버(석영, 부피 0.1-1 L)에 배치. 대상 가스(NO_2 0.1-10ppm, N_2 평형 가스, 유속 10-100mL/분, 습도 30-70%)를 도입하고 기판을 가열(100-400°C)하고 저항 변화(감도 = $\Delta R/R > 100$)를 측정했습니다. GC-MS 는 가스 농도(오류 <±1%)를 검증하고 SEM 은 형태(다공성>50%)를 감지했습니다. 테스트 챔버 세척(N_2 퍼지, 잔류 <0.1ppm), 환기 제어 먼지(500m³/h, <1mg/m³).

가스 센서 응용 분야에서 텅스텐 향의 주요 매개 변수 최적화

WO_3 입자 크기는 20-200 nm 에서 제어되고 비 표면적 (<20 m² / g)은 낮다 (>500 nm). 작동 온도는 100-400°C 이고, 기준선 드리프트는 너무 높고(>500°C) (>10%), 응답이 약하고(감도<10) 너무 낮으며(<50°C) 기체 유량 10-100mL/분, 너무 빠르고(>200mL/분) 흡착 불충분(<50%). 필름 두께는 1-10 μ m 이고 과도한 두께(>20 μ m)에 대해 응답이 느립니다(>30 초). 어닐링 온도는 300-600 ° C 이고 너무 높으면(>700 ° C) 곡물이 자랍니다(>500 nm). 습도 30-70%, 너무 높음(>90%)은 신호(>20%)를 방해합니다.

가스 센서 응용 분야에서 텅스텐 엘로우의 장점과 단점

가스 센서에서 텅스텐 엘로우의 장점은 높은 감도(>100, $NO < 1ppm$), 빠른 응답(< 10 초) 및 선택성(교차 감도 < 10%)을 포함하여 환경 모니터링에 적합합니다. 도핑(예: Pd, Au)은 선택성을 향상시킵니다(30% 증가). 단점은 고온 작동을 위한 높은 에너지 소비(>1W/센서), 습도 간섭에 대한 보상 및 나노 물질의 복잡한 준비입니다. 텅스텐 가스 센서는 산업 및 의료 요구 사항을 충족합니다.

9.4 전자 정보 분야에서의 황색 삼산화 텅스텐의 적용

텅스텐 (WO_3)은 전계 효과 트랜지스터의 채널 재료로 사용되는 n 형 반도체로 캐리어 수송 (전자 농도 >10¹⁶ cm⁻³)을 조절하고 높은 스위칭 비율 (>10¹⁰) 및 낮은 전력 소비 (하위 임계 스윙 <100 mV / dec)를 달성합니다. 메모리 장치에서 WO_3 는 저항 스위칭(고임피던스/저임피던스 상태 비율>10²) 또는 이온 마이그레이션< 통해 데이터 저장(쓰기 속도 100ns)을 가능하게 합니다. 이 공정에는 장치 성능(응답 시간<1 μ s 및 내구성>10 배)을 보장하기 위해 제어된 필름 두께(5-100nm), 결정도(>80%) 및 도핑(N, F<5wt%)이 필요합니다. 이 섹션에서는 전계 효과 트랜지스터 및 메모리 장치에서 텅스텐의 특정 응용 분야에 대해 자세히 조사합니다.

9.4.1 전계 효과 트랜지스터에 텅스텐의 적용

텅스텐은 높은 전자 이동도(>10cm²/V·s) 및 조정 가능한 밴드갭(2.6-2.8eV)으로 효율적인

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

캐리어 전송을 위한 전계 효과 트랜지스터(FET)의 채널 재료로 사용되며, 저전력 논리 회로(전력 소비<1pJ/스위치), 디스플레이 드라이버(스위치 비율>10°C) 및 센서 인터페이스(감도>100)에 적합합니다. WO₃ 필름 (5-100nm 두께)은 전기장에 의한 저항 (10³-10 Ω)을 제어하여 높은 온 / 오프 비율 (>10 °C)을 제공합니다. WO₃ 박막은 ALD 반응기 (증착 속도 0.1-1 Å / 사이클), 스퍼터링 기기 (전력 100-500 W), 어닐링로 (300-600 °C), 반도체 매개 변수 분석기 (전류 ±0.1 nA) 및 XPS (에너지 분해능 <0.5 eV)와 같은 분석 기기.

field-effect transistor applications 에서 텅스텐의 작동 과정

텅스텐 전구체(예: WF₆, 순도 >99.9%)는 ALD 에 사용되어 Si/SiO₂ 기판(SiO₂ 두께 100-300nm, 면적 1-100cm²)에 WO₃ 박막(온도 150-300°C, 압력 0.1-1 Torr, 100-1000 nm 두께, 두께 5-100 nm)을 증착합니다. 또는 Ar:O₂ (4:1, 0.1-1 Pa) (전력 100-300 W, 시간 10-30 분)에 증착 된 WO₃ 타겟 (순도 >99.95 %, 직경 50-100 mm)을 사용하여 마그네트론 스퍼터링에 의해. 박막 어닐링(300-600°C, N₂ 분위기, 1-2 시간, 결정화>80%). 기판 세척 (에탄올 + 탈이온수, 잔류 < 0.1 mg / cm²). 소스/배수 전극(Au/Ti, 50nm) 및 게이트(Al, 100nm)를 포토리소그래피(해상도 < 1µm)로 증착했습니다. 장치 테스트(-10 - 10 V, 10 nA-1 mA)는 이동성(>10 cm²/V·s), 스위칭 비율(>10⁵) 및 하위 임계값 스윙(<100 mV/dec)을 측정합니다. 화학적 상태(W⁶⁺>95%)를 분석하기 위해 XPS 를 사용하였고, SEM(입자 <50 nm)으로 형태를 관찰하였다. 장비 청소(N₂ 퍼지, 잔류 <0.1 mg/cm²), 환기 제어 먼지(500 m³/h, <1 mg/m³).

field-effect transistor applications 에서 tungsten 의 핵심 파라미터 최적화

박막 두께는 5-100nm 에서 제어되며, 두꺼운(>200nm)에 비해 높은 누설 전류(>1nA) 및 얇은 (<2nm)에 비해 불연속 채널(< 10³ 스위칭 비율)이 있습니다. 어닐링 온도는 300-600°C, 너무 높고(>700°C), 입자가 너무 크고(>100nm), 너무 낮고(<200°C), 비정질 상태의 비율이 높음(>50%). ALD 온도 150-300 °C, 너무 높음(>350 °C) 전구체 분해(균일성 < 90%). 스퍼터링 압력은 0.1-1 Pa 이고 필름은 너무 높을 경우 (>60 Pa> 다공성)입니다. 게이트 전압이 10V± 항복(>1%)이 너무 높은(>20V) 기판 SiO₂ 두께는 100-300nm 이고 너무 얇고(<50nm) 전기장 차폐가 약합니다.

field-effect transistor applications 에서 텅스텐의 장점과 단점

FET 에서 텅스텐 엘로우의 장점으로서는 디스플레이 드라이버 및 논리 회로를 위한 높은 이동성(>10cm²/V·s), 우수한 스위칭 비율(>10°C) 및 낮은 전력 소비(<1pJ/스위치)가 있습니다. 도핑(예: N, F)은 전도도를 20% 증가시킵니다. 단점은 높은 준비 비용(ALD 장비 > \$500,000/개), 엄격한 필름 균일성 요구 사항(성능 저하를 위해 편차>5%), 고온에 대한 민감도(> 700°C 이동성 < 5cm²/V·s)입니다. 텅스텐 FET 는 저전력 전자 장치의 요구 사항을 충족합니다.

9.4.2 메모리 장치에 텅스텐 플라범 적용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 엘로우는 메모리 장치의 저항 스위칭 레이어(ReRAM) 또는 충전 트래핑 레이어(플래시)로 사용되어 비휘발성 메모리(쓰기 속도 100ns 및 내구성 >10 배)를 위한 전압 드라이브($\pm 1-5V$)에 의한 고임피던스/저임피던스 상태 변환(비율> 10^2) 또는 전하 저장(> 10 년)을 달성합니다(<100 배). WO_3 박막(10-100nm 두께)의 고저항 변조 기능($10^3-10^8 \Omega$)은 고밀도 스토리지(>1Gb/cm²)를 가능하게 합니다. WO_3 박막은 PLD 시스템 (레이저 에너지 100-500 mJ), 어닐링로 (300-500 °C), 전기 테스트 시스템 (전압 $\pm 0.001 V$) 및 TEM (해상도 <0.1 nm)과 같은 분석 장비.

메모리 장치의 적용에서 텅스텐 엘로우의 작동 과정

황색 텅스텐 타겟 (순도 >99.95 %, 직경 50 mm)을 PLD 에 사용하여 Si 또는 ITO 기판 (면적 1-10 cm²)에 WO_3 박막 (레이저 532 nm, 에너지 100-300 mJ, O₂ 압력 0.1-10 Pa, 증착 시간 10-30 분, 두께 10-100 nm)을 증착했다. 대안적으로, WO_3 전구체(WCl₆, 0.1 mol/L)를 졸-겔 방법으로 기판 상에 스핀 코팅(2000-4000 rpm, 30 sec)하고, 건조(100°C, 1 h) 및 어닐링(300-500°C, 1-2 h)하였다. 필름 어닐링(300-500°C, N₂, 1-2 시간, 결정화>80%). 기판 세척(에탄올, 잔류 < 0.1 mg/cm²). 증착 전극 (Pt/Ti, 50 nm)은 포토리소그래피(해상도 < 1 μm)였다. 장치 테스트($\pm 1-5V$, 펄스 지속 시간 10-100ns)는 저항 대 상태 비율(> 10^2), 쓰기 속도(<100ns) 및 내구성(> 10^4 사이클)을 측정했습니다. TEM 관찰 인터페이스(결함 <1%), 산화 상태의 XPS 분석(W⁶⁺>95%). 장비 청소(N₂ 퍼지, 잔류 < 0.1 mg/cm²), 환기 제어 먼지(500 m³/h, < 1 mg/m³).

메모리 장치 응용 분야에서 텅스텐의 주요 매개 변수 최적화

필름 두께는 10-100nm 에서 제어되며, 높은 전력 소비(>1μJ) 및 과도한 두께(<>200nm) 및 낮은 저항 상태 비율(<10)에 대한 낮은 저항 상태 비율(10)이 있습니다. 어닐링 온도는 300-500 °C, 너무 높음(>600 °C), 산소 공급이 너무 많고(>5%), 너무 낮고(<200 °C) 결정화가 불충분하며(<50%)입니다. PLD 산소 압력은 0.1-10 Pa 이고 필름은 너무 높을 경우(>60 Pa 다공성 >20%)입니다. 인가 전압이 1-5V± 장치 고장(>1%)이 너무 높습니다(>7V). 펄스 지속 시간은 10-100ns 이며 장시간(>1μs)에 비해 에너지 소비가 높고(>10μJ) 있습니다. 전극 재료 Pt/Ti 는 두께가 50nm 이고 과도한 두께(>100nm)로 인해 계면 저항(>10 Ω)이 높습니다.

메모리 장치 응용 분야에서 텅스텐 품미의 장점과 단점

메모리 장치에서 텅스텐 엘로우의 장점은 높은 저항 상태 비율 (> 10^2), 빠른 쓰기 (<100 ns) 및 긴 데이터 보존 (> 10 년)을 포함하며 고밀도 스토리지 (>1Gb / cm², 시장 > 2 억 달러 / 년)에 적합합니다. 도핑(예: Mo)은 내구성을 증가시킵니다(50% 이상). 단점은 준비 과정이 복잡하고(PLD 비용 > 20 USD/cm²), 인터페이스 안정성을 최적화해야 하며(성능 저하를 위해 결함 1% >), 전력 소비가 DRAM(>10pJ/bit)보다 높다는 것입니다. 텅스텐 엘로우 스토리지 장치는 차세대 스토리지의 요구 사항을 충족합니다.

9.5 기계 제조 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 옐로우 (WO_3)는 기계 공학에서 환원에 의해 텅스텐 분말 (입자 크기 0.5-5 μm)을 생산하거나 고 경도 코팅 (두께 1-10 μm) 및 내마모성 부품 (밀도 > 15 g / cm^3)을 준비하기 위한 코팅 재료로 직접 생산됩니다. 공구 코팅에서 WC 또는 WO^{TM} 복합 코팅과 같은 WO_3 파생 재료는 표면 경도(>2000HV)와 내마모성(마찰 계수 < 0.3)을 향상시킵니다. 내마모성 부품 중 WO_3 -매트릭스 복합재 또는 텅스텐 합금은 높은 내마모성(내마모성10^{-6} $mm^3/N \cdot m$)을 제공합니다. 코팅 두께(1-10 μm), 입자 크기(0.5-5 μm) 및 소결 조건(온도 1200-2000°C, 대기 H_2/N_2)을 제어하여 성능(경도 > 2000 HV, 수명 > 10^6 배)을 보장합니다.

9.5.1 공구 코팅에 텅스텐 적용

텅스텐 카바이드 (WC, 입자 크기 0.5-2 μm)는 경도 (>2000 HV) 및 내마모성 (마모율 < 10 $^{\circ}C mm^3 / N \cdot m$) 및 절삭 수명 (>10 배)을 향상시키기 위해 공구 표면 (예 : 고속 강철, 초경합금 기관)에 적용되는 WO_3 기반 복합 코팅에 환원하거나 직접 적용하여 생산되며, 고속 절삭 (>200 m / min) 및 정밀 가공 (표면 거칠기 Ra0.1 μm)에 적합합니다. WC 코팅은 화학 기상 증착 (CVD)에 의해 준비되며 WO_3 복합 코팅은 마그네트론 스퍼터링 (모델 MS-600)입니다. 이 장비에는 CVD 반응기 (모델 CVD-800, 부피 10-50 L), 스퍼터러 (전력 100-500 W), 어닐링로 (300-600 $^{\circ}C$), 경도 시험기 (정확도 ± 1 HV) 및 마찰 및 마모 시험기 (정확도 ± 0.1 mg)가 포함됩니다.

공구 코팅 응용 분야에서 텅스텐을 사용하는 방법

옐로우스텐(0.1-10 kg, 순도>99.9%)을 체질(200 mesh, 잔류 <1%)하고 건조(100°C, 2 시간, 수분 함량<0.1%)한 후 환원로(600-700°C, 1-2 시간)에서 환원(600-700°C, 1-2 시간)하여 텅스텐 분말(>0.5-5 μm , 수율 >95 %). 텅스텐 분말을 흑연 분말 (C >99.9 %, 1-10 μm , W : C \approx 94 : 6 wt %)과 혼합하고 흑연로 (1600-2000 $^{\circ}C$, H_2 분위기)에서 탄화시켜 WC (0.5-2 μm)를 생성한다. WC는 $CH_4 + H_2$ (1:10, 0.1-1 kPa), 1000-1200°C, 1-4 시간 및 두께 1-10 μm 에서 CVD에 의해 공구 기관(HSS, 면적 10-100 cm^2 , Ra <0.5 μm)에 증착되었습니다. 또는 마그네트론 스퍼터링 (Ar : O = 4 : 1, 0.1-1 Pa, 100-300 W, 10-30 분)에 의한 WO_3 타겟 (순도 99.95 %, 50-100 mm 직경)을 사용하여 WO_3 코팅 (1-5 μm), 어닐링 (300-600 $^{\circ}C$, N_2 , 1-2 h)을 증착합니다. 칼 세척(에탄올, 잔류 < 0.1mg/cm 2). 경도 시험은 경도 시험기(>2000 HV)로 시험하고 마모율은 마찰 및 마모 시험기(10^{-6} $mm^3/N \cdot m$), SEM 으로 측정하여 코팅 형태(다공성<5%)를 관찰합니다. 장비 청소(N_2 퍼지, 잔류 < 0.1 mg/cm 2), 환기 제어 먼지(500 m 3 /h, < 1 mg/m 3).

공구 코팅 응용 분야에서 텅스텐의 주요 매개 변수 최적화

WC의 입자 크기는 0.5-2 μm 로 제어되며, 너무 큰 경우 (>5 μm) 코팅이 거칠다 (Ra > 0.2 μm). CVD 온도는 1000-1200°C이고 너무 높고(>1300°C) 기관이 부드러워지고(경도<500HV), 너무 낮고(<900°C) 증착이 느리고(<0.1 μm /h). 코팅 두께는 1-10 μm , 너무 두껍고(>15 μm), 균열(>5%), 너무 얇고(<0.5 μm), 내마모성 불량(마모율> $10^{-5}mm^3/N \cdot m$)입니다. 스퍼터링 압력은 0.1-1Pa이고 코팅이 너무 높으면(>2Pa) 느슨합니다(다공성 >10%). 어닐링 온도는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

300-600 °C이며 너무 높으면(> 700 °C) 곡물이 자랍니다(> 100 nm). CH₄:H₂ 비율 1:10, 너무 높음(>1:5) 탄소 증착(>1wt%).

공구 코팅 응용 분야에서 텅스텐의 장점과 단점

공구 코팅에서 텅스텐 엘로우의 장점은 높은 경도 (>2000 HV)와 낮은 마모율 (<10⁻⁶ mm³ / N · m)을 포함합니다. m) 및 긴 수명(>10⁶ 절단), 고속 절단에 적합합니다. WC 코팅은 고온 (>800 ° C)에 강하고 WO₃ 복합 코팅은 내 산화성을 향상시킵니다 (20 % 이상). 단점은 CVD 의 높은 에너지 소비, 고가의 스퍼터링 장비 및 코팅 접착력을 최적화해야 하는 필요성(스폴링 속도가 1%> 수명 단축)입니다. 텅스텐 코팅은 정밀 가공의 요구를 충족시킵니다.

9.5.2 내마모성 부품에 텅스텐 적용

텅스텐은 텅스텐 분말로 환원되어 다른 금속 (예 : Ni, Co)과 혼합되고 소결되어 내마모성 부품 (예 : 베어링, 씰, 밀도 > 15g / cm³)을 제조하거나 증장비 (마찰 계수 < 0.3) 및 광산 장비 (마모 < 0.1 mm / 년)의 WO₃ 기반 복합 코팅에 직접 사용됩니다. 텅스텐 합금 부품 (W-Ni-Co, W>80 중량 %)은 높은 내마모성 (내마모성 < 10 °C mm³ / N · m)을 갖는다. m) 。 이 공정은 진공 소결로(모델 VF-1500, 볼륨 10-50 L) 또는 플라즈마 스프레이(모델 PS-500)를 사용하여 수행됩니다. 이 장비에는 믹서(50-200rpm), 프레스(20-100MPa), 스프레이 건(10-50kW), 마찰 및 마모 시험기(정확도 ±0.1mg) 및 SEM(분해능 < 1µm)이 포함됩니다.

마모 부품의 적용에서 텅스텐의 작동 과정

환원로에서 황색 삼산화 텅스텐을 환원 (H₂, 10-50 L / min) (600-700 ° C, 1-2 시간, 800-1000 ° C, 2-4 시간)하여 텅스텐 분말 (0.5-5 µm, 수율 >95 %)을 생성한다. 텅스텐 분말을 니켈 분말 (Ni>99.9 %, 1-10 µm), 코발트 분말 (Co>99.9 %, 1-10 µm, W : Ni : Co = 80 : 10 : 10 wt %) (50-200 rpm, 2-4 시간, 균질성 편차 <5 %), 프레스 (20-100 MPa, 밀도 >8 g / cm³)와 혼합했다. 녹색 물체는 진공로(<10⁻³ Pa, 1300-1500°C, 5-10°C/분, 1-2 시간 동안 배양)에서 소결하여 부품(밀도 > 15g/cm³)을 만듭니다. 또는 강철 기관 (면적 10-100 cm², 두께 10-100 µm)에 플라즈마 분무 (Ar + H₂, 10-50 kW, 스프레이 피치 100-150 mm)에 의한 WO₃ 분말 (0.1-1 g, 20-200 nm), 어닐링 (300-500 °C, N₂, 1-2 시간). 연마 된 부품 (연삭 휠 2000 메쉬, Ra<0.5 µm), 청소 (탈 이온수, 잔류 < 0.1 mg / cm²). 마찰 및 마모 시험: 기계 측정 마모율(<10⁻⁶ mm³/N·m), 경도는 경도 시험기(>1000 HV)로 측정하고, 미세 구조는 SEM(입자 < 10µm)으로 관찰했습니다. 장비 청소(N₂ 퍼지, 잔류 < 0.1 mg/cm²), 환기 제어 먼지(500 m³/h, < 1 mg/m³).

내마모성 부품 응용 분야에서 텅스텐의 주요 매개 변수 최적화

텅스텐 분말의 입자 크기는 0.5-5 µm 로 제어되며 과도한 (>10 µm) 다공성은 높습니다 (>5 %). 소결 온도는 1300-1500 ° C이며, 곡물 성장 (> 20 µm)에 너무 높고(> 1600 ° C), 너무 낮고(< 1200 ° C) 밀도가 낮습니다(<14 g/cm³). 진공도는 < 10⁻³ Pa 이고 산화(O>0.1 wt%)가 너무 높습니다(>10⁻² Pa). 분무력 10-50kW, 너무 높음(>60kW), 코팅 균열(>5%), 너무

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

낮음(<5kW), 접착력 불량(<50MPa). 코팅 두께는 10-100 μm 이고 과도한 두께 (>200 μm)가 벗겨집니다 (>2 %). 가압 압력은 20-100 MPa 이며 너무 낮으면(<10 MPa) 녹색 몸체가 느슨해집니다(다공성 > 10%).

내마모성 부품의 적용에서 텅스텐 옐로우의 장점과 단점

내마모성 부품에서 텅스텐의 장점은 높은 내마모성 (마모율< 10⁻⁶ mm³/N·m), 높은 경도 (>1000 HV) 및 긴 수명 (>1 년), 중장비 기계에 적합 (마찰 계수 < 0.3)을 포함합니다. 텅스텐 합금 부품은 부식에 강하고 WO₃ 코팅은 내산화성을 향상시킵니다 (15 % 이상). 단점은 소결의 높은 에너지 소비(10-30kWh/kg), 스프레이 장비의 높은 비용 및 부품 가공에 필요한 높은 정밀도(편차 > 0.1mm 의 성능 저하)입니다. 텅스텐 마모 부품은 광업 및 기계적 요구를 충족합니다.

9.6 생물 의학 응용 분야의 텅스텐

Yellowschet (WO₃)은 우수한 생체 적합성 (세포 생존율 >95 %), 높은 비 표면적 (>50 m² / g) 및 광전기 화학적 성능 (밴드 갭 2.6-2.8 eV)으로 인해 생물 의학 분야에서 독보적인 응용 가치를 보여주었습니다. 바이오 센서 및 광열 요법에 황색 삼산화 텅스텐을 적용하는 것은 나노 구조 (입자 크기 20-200 nm, 다공성 >50 %) 및 표면 화학 활성화 (흡착 속도 >80 %)에 의존하여 고감도 검출 (검출 한계 < 1 nM) 및 효율적인 광열 변환 (>40 % 효율)을 가능하게 합니다.

9.6.1 바이오 센서에 텅스텐 적용

텅스텐 향은 전기 화학 또는 광화학 반응에 의한 바이오 마커 (예 : 포도당, DNA, 농도 0.1 nM-1 mM) 검출, 질병 진단 (감도 > 100 μA / mM · cm²) 및 건강 모니터링 (응답 시간 <5 초)을 위해 바이오 센서의 민감한 재료로 사용됩니다. WO₃ 나노 구조의 높은 전자 전달 속도 (>10⁻³ cm / s) 및 표면 기능화 용량 (효소 로딩 속도 >90 %)은 검출 성능을 향상시킵니다 (검출 한계 < 1 nM). WO₃ 나노 물질은 열수 반응기 (부피 50-500 mL), 전기 화학 워크 스테이션 (전류 ± 0.1 nA), UV-Vis 분광 광도계 (과장 정확도 ±0.5 nm) 및 AFM (해상도 < 0.1 nm)과 같은 분석 기기를 포함한 열수 법 (모델 HT-200) 또는 전착 방법으로 제조됩니다.

바이오센서 응용 분야의 텅스텐 옐로우

옐로우세트 전구체(WCl₆, 0.05-0.2 mol/L, 순도>99.9%)를 탈이온수(전도도<10 μS/cm)에 용해시키고, 요소(0.1 mol/L)를 첨가하여 pH 를 6-8 로 조정하고, WO₃ 나노입자(20-200 nm, 수율>90%)를 열수 반응기(180-200°C, 12-24 시간)에서 제조하였다. WO₃ 박막 (두께 10-100 nm)을 FTO 기판 (저항 10-20 Ω / sq, 면적 1-10 cm²)에 -0.5-0.5 V(vs Ag / AgCl, 전해질 Na₂ 0.1 mol / L, pH 6-7)를 10-30 분 동안 적용하여 전착하여 제조했다.

나노 물질 원심분리(5000rpm, 10 분, 회수>98%) 또는 기판 세척(에탄올, 잔류 <0.1mg/cm²),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

어닐링(300-500°C, 공기, 1-2 시간, 결정화>80%). 표면 기능화(예: 포도당 산화효소의 고정화, 0.1 mg/cm², 4°C, 12 h). 센서 테스트(전기화학: 0-0.7 V, pH 7.4 PBS; 광화학: 포도당(0.1nM-1mM, 감도>100μA/mM/cm²)의 경우 365nm, 10mW/cm²). 지형은 AFM(거칠기 Ra<5nm)으로 관찰하고 흡수는 분광 광도법(밴드갭 2.6-2.8eV)으로 측정했습니다. 장비 청소(탈이온수, 잔류 <0.1mg/cm²), 환기 제어 먼지(500m³/h, <1mg/m³).

바이오센서 응용에서 텅스텐의 핵심 매개변수 최적화

WO₃ 입자 크기는 20-200 nm 에서 제어되고 비 표면적 (<20 m² / g)은 낮다 (>500 nm). 열수 온도는 180-200 ° C, 너무 높고(>220 ° C) 응집(>10%), 너무 낮고(<160 ° C) 불충분한 결정화(<50%)입니다. 전착 전압 -0.5 - 0.5 V, 너무 높음(>1 V) 필름 다공성(다공성 > 60%). 어닐링 온도는 300-500 ° C 이고 너무 높으면(>600 ° C) 곡물이 자랍니다(> 500 nm). 효소 loading 은 0.1 mg/cm²였으며, 너무 높으면(>0.5 mg/cm²) 활성 부위를 차단(민감도< 50 μA/mM·cm²)했습니다. pH 6-8 테스트, 너무 낮음(<5) 효소 불활성화(>20%).

바이오 센서 응용 분야에서 텅스텐의 장점과 단점

바이오 센서에서 황색 삼산화 텅스텐의 장점은 높은 감도 (>100 μA / mM · cm²), 낮은 검출 한계 (<1 nM) 및 생체 적합성 (세포 생존율 > 95 %)을 포함하여 당뇨병 감시 및 암 마커 검출 (시장 > 1 억 달러 / 년)에 적합합니다. 기능화(예: Au 나노 입자)는 선택성을 증가시킵니다(30% 이상). 단점은 제제가 복잡하고(물 및 열비> 배치당 \$50), 효소 안정성을 최적화해야 하며(30 일 후 활성<80%), 장기 보관 후 전극이 노화되기 쉽다(저항 10% > 증가)입니다. 텅스텐 옐로우 센서는 정밀 의학의 요구를 충족시킵니다.

9.6.2 광열 요법에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용

텅스텐은 강력한 근적외선 흡수 (800-1200 nm, 흡수 계수 >10 'cm⁻¹')를 사용하여 빛 에너지를 열 에너지 (온도 상승 > 20 ° C)로 변환하여 종양 절제 (>90 % 사멸률) 및 세균 소독 (>99 % 살균률)을 위해 광열 요법의 광열제로 사용됩니다. WO₃ 나노 입자 (20-100 nm)의 높은 광열 변환 효율 (>40 %)과 생물 안전성 (IC50>100 μg / mL)이 핵심입니다. WO₃ 나노 입자는 열수 반응기 (부피 50-500 mL), 레이저 (808 nm, 전력 0.5-2 W / cm²), 적외선 열 화상 카메라 (정확도 ±0.1 ° C) 및 TEM (해상도 < 0.1 nm)과 같은 분석 장비를 사용하여 열수 또는 용매 방법으로 제조됩니다.

광열 요법 응용 분야에서 텅스텐의 작동 절차

WO₃ 나노 입자 (20-100 nm, 수율 >90 %)를 열수 반응기 (160-200 ° C, 12-24 h)에서 제조하고, PEG(0.1 g / mL)를 탈 이온수에 용해시킨 안정제로서 첨가하고, PEG(0.1 g / mL)를 안정제로 첨가 하였다. 펠렛 원심분리(8000rpm, 10 분, 회수율>98%), 세척(탈이온수, 잔류 < 0.1mg/mL), PBS(0.1-1mg/mL, pH 7.4)로 분산. 표면 개질(예: PEG 또는 항체, 로딩 > 90%, 4°C, 12 시간). 샘플을 멸균했습니다(121°C, 20 분, 콜로니<1CFU/mL). 광열 시험 : WO₃ 용액 (0.1-1 mg / mL, 100 μL)을 석영 큐벳 (순도 >99.5 %)에 넣고 808nm 레이저 (0.5-2 W / cm², 5-10

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분)를 조사하고 온도 상승 (>20 ° C)을 열 화상 카메라로 기록했습니다. 세포 분석(중양 세포, 50–200µg/mL, 5 분 방사선 조사)은 사멸률(>90%)을 측정했습니다. TEM 은 입자 형태(분산 편차 <10%)를 관찰하는 데 사용되었으며 UV-Vis 는 흡수(800–1200nm)를 감지하는 데 사용되었습니다. 장비 청소(탈이온수, 잔류 <0.1mg/cm²), 환기 제어 먼지(500m³/h, < 1mg/m³).

광열 요법 응용 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 주요 매개 변수 최적화

WO₃ 입자 크기는 20-100 nm 에서 제어되며 대형 (>200 nm) 셀의 흡수율은 낮습니다 (<50 %). 열수 온도는 160-200 ° C 이고 응집이 너무 높으며(>220 ° C) (>10%). 레이저 출력은 0.5–2 W/cm², 조직 손상(>5%)에 비해 너무 높고(>3 W/cm²), 너무 낮고(<0.3 W/cm²) 불충분한 온도 상승(<10°C)입니다. WO₃ 농도 0.1–1 mg/mL 는 독성이 높고(>2 mg/mL) 독성이 높습니다(생존율 <80%). 조사 시간은 5-10 분이고 열 확산이 너무 길어 (>15 분) (효율 <30 %). PEG 적재율은 >90%로 80% 미만이며 분산이 불량합니다(강수량 > 10%).

광열 요법 응용 분야에서 황색 텅스텐 삼산화물의 장점과 단점

광열 요법에서 황색 삼산화 텅스텐의 장점은 높은 광열 효율 (>40 %), 강력한 사멸률 (>90 %) 및 생물 안전성 (IC₅₀>100 µg / mL)을 포함하여 종양 치료 및 항균에 적합합니다. 도핑(예: Cu)은 NIR 흡수를 증가시킵니다(20% 이상). 단점은 나노 입자 준비의 높은 비용, 생체 내에서 신진대사를 연구해야 하는 필요성(50%/24 시간 < 제거율) 및 레이저 장비의 높은 비용입니다. 황색 텅스텐 광열제는 정밀 처리의 요구를 충족시킵니다.

9.7 광학 디스플레이 분야에서의 황색 삼산화 텅스텐의 적용

텅스텐 옐로우 (WO₃)는 우수한 전기 변색 특성 (착색 효율 >50 cm² / C), 넓은 스펙트럼 응답 (400-2000 nm, 광 투과율 변화 >70 %) 및 높은 화학적 안정성 (산 및 알칼리 저항, pH 1-14)으로 인해 광학 디스플레이 분야에서 상당한 응용 잠재력을 가지고 있습니다. 전기 변색 물질로서, 텅스텐 옐로우는 전기장 제어를 통해 색상 및 광 투과율의 가역적 변화를 달성 할 수 있으며, 디스플레이 (명암비 > 100 : 1), 전자 종이 (재생률 < 1 초) 및 스마트 광학 (전력 소비 < 1mW / cm²)에 적합합니다. 이 섹션에서는 광학 디스플레이 분야에서 텅스텐의 적용에 초점을 맞추고 전문 데이터 및 실제 사례와 결합 된 프로세스 원리, 장비, 운영 프로세스, 주요 매개 변수 최적화, 장점 및 단점을 다루면서 디스플레이에서의 역할을 자세히 분석합니다.

9.7.1 디스플레이에 텅스텐 적용

텅스텐 xone 은 디스플레이에서 전기 변색 층으로 작용하여 저전압 (±3 V)을 적용하여 이온 삽입 / 분리 (예 : Li⁺ : WO₃ + xLi⁺ + xe⁻↔)를 구동합니다. Li_xWO₃는 플렉시블 디스플레이(굽힘 반경 <5mm), 전자 종이(해상도 > 300dpi) 및 저전력 화면(전력 소비 < 1mW/cm²)을 위한 색상 전환(투명 ↔ 파란색, 70%>투과 변화)을 위한 것입니다. WO₃ 필름(10–500nm 두께)의 높은 착색 효율(>50cm²/C)과 빠른 응답 시간(<1 초)이 핵심입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WO₃ 박막은 마그네트론 스퍼터링(모델 MS-600) 또는 줄-겔 방식으로 제조되며, 장비에는 스퍼터러(전력 100-500W), 스�핀 코팅기(1000-5000rpm), 어닐링로(300-500°C), 전기화학 테스트 시스템(전위 ±0.001V) 및 UV-Vis 분광 광도계(과장 정확도±0.5nm).

디스플레이 응용 분야에서 텅스텐 향의 작동 과정

황색 텅스텐 타겟 (순도 >99.95 %, 직경 50-100 mm)은 마그네트론 스퍼터링에 사용되어 ITO 유리 (저항 5-15 Ω/sq, 면적 10-100 cm²)(대상 얹기 거리 50-100 mm, Ar : O₂ = 4 : 1, 압력 0.1-1 Pa, 전력 100-300 W, 증착 시간 10-30 분, 두께 10-500 nm). 대안적으로, 황색 삼산화 텅스텐 전구체(예: WCl₆, 0.1 mol/L)를 에탄올에 용해시키고 ITO 유리(2000-4000rpm, 30 초)에 스�핀 코팅하고 건조(100°C, 1 시간) 및 어닐링(300-500°C, 공기, 1-2 시간, 결정화 속도 >80%)합니다. 박막 세척(탈이온수, 잔류 <0.1 mg/cm²) 및 디스플레이 장치(WO₃ 전해질 상대 전극, LiClO₄/PC, 1 mol/L 와 같은 전해질)에 조립. 전기화학 테스트(-2 - 2 V, 스윙 속도 10-100 mV/s)는 투과율(>70%), 응답 시간(<1 초) 및 착색 효율(>50 cm²/C)의 변화를 측정했습니다. 스펙트럼은 분광 광도계(400-2000nm)로 검출하고 형태(다공성>50%)는 SEM 으로 관찰했습니다. 장비 세척(에탄올, 잔류 <0.1mg/cm²), 환기 제어 분진(500m³/h, <1mg/m³).

디스플레이 응용 분야에서 텅스텐 품질의 핵심 매개 변수 최적화

필름 두께는 10-500nm 로 제어되고, 과두께(>1000nm)의 경우 응답 시간이 연장(>2 초), 과박형(<5nm)의 경우 광 투과율이 변경(<50%)됩니다. 어닐링 온도는 300-500 °C, 너무 높음 (>600 °C), 너무 큰 입자 (>200 nm), 너무 낮음 (<200 °C) 및 비정질 상태의 높은 비율 (>50 %)입니다. 스퍼터링 압력은 0.1-1 Pa 이고 필름은 너무 높을 경우 (>60 Pa) 다공성입니다. 전해질 농도는 0.5-1 mol/L 이며 너무 낮으면(<0.2 mol/L) 이온 전달이 느려집니다. 인가 전압± 1-3V, 너무 높으면(>4V) 필름이 저하됩니다(>10%). 스윙 속도 10-100mV/s, 너무 빠름(>200mV/s), 피크 형상 왜곡(>10%).

디스플레이 응용 분야에서의 텅스텐 옐로우의 장점과 단점

디스플레이에서 텅스텐 옐로우의 장점은 높은 착색 효율 (>50cm² / C), 큰 광 투과율 변화 (>70 %) 및 빠른 응답 (<1 초)으로 플렉시블 디스플레이 및 전자 종이에 적합합니다. 도핑(예: Ni, Mo)은 색상 다양성을 최적화합니다(20% 이상). 단점으로는 높은 준비 비용, 전해질 밀봉의 어려움(누출률>1% 수명 감소), 유기 변색 재료에 비해 약간 느린 응답(>0.5 초)이 있습니다. 텅스텐 일렉트로크로믹은 저전력 디스플레이의 요구 사항을 충족합니다.

9.8 촉매 지지체에 황색 삼산화 텅스텐 적용

텅스텐 옐로우 (WO₃)는 높은 비 표면적 (>50 m² / g), 다공성 구조 (공극 크기 5-100 nm, 다공성 >50 %) 및 강한 산성 부위 (산도 > 0.1 mmol / g)로 인해 촉매 분야에서 우수한 캐리어 재료입니다. 텅스텐 옐로우는 활성 성분 (예 : Pt 및 Pd, 하중 0.1-5 wt %)을 지원하고 촉매 효율 (전환율 >90 %) 및 안정성 (100 사이클>s, 활성 손실 <5 %)을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

향상시킬 수 있으며 석유 화학 산업, 폐가스 처리 (CO 산화율 > 90 %) 및 에너지 촉매 (수소 발생 속도 >1 mmol/h·g)에 널리 사용됩니다.

9.8.1 지지 촉매에 황색 삼산화 텅스텐의 적용

텅스텐 엘로우는 귀금속 (예 :Pt, Pd) 또는 전이 금속 산화물 (예 :NiO, 0.1-5 wt%)과의 합침 또는 공동 침전에 의한 촉매 반응 (예 : CO 산화, 수소화 >90 %)의 수소 발생을 위한 촉매 담체로 사용됩니다. WO₃의 높은 비표면적(>50m²/g)과 표면 활성(흡착률>80%)은 활성 성분(입자 < 10nm)의 분산과 촉매 성능(TOF>10s⁻¹)을 향상시킵니다. 이 공정은 교반기(100-500rpm), 진공 건조 오븐(온도 50-200°C), 관형 로스터(300-800°C), BET 분석기(정확도 1m²/g) 및 TEM(분해능 < 0.1nm)으로 구성된 합침 장비(모델 IM-300) 또는 공동 침전 반응기(유형 CP-500)± 사용합니다.

지원되는 촉매 응용 분야의 텅스텐

황색 텅스텐 분말 (0.1-10 g, 순도 >99.9 %, 입자 크기 20-200 nm)을 열수 법 (WCl₆, 0.1 mol / L, 180 °C, 12-24 h), 원심 분리 (5000 rpm, 10 분, 회수 >98 %), 건조 (80 °C, 2 시간, 수분 함량 <0.1 %)로 제조 하였다. 합침 : 텅스텐을 탈 이온수 (0.1-1 g / mL), Pt 전구체 (예 : H₂PtCl₆, 0.01-0.1 mol / L, Pt 0.1-5 wt %)에 분산시키고, 교반 (200-500 rpm, 2-4 h), 진공 건조 (80 °C, 12 h)하고 관로 (H₂ / N₂, 300-600 °C, 1-2 h)에서 구워서 Pt / WO₃ 촉매를 제조했다. 또는 동시 침전: Ni 염(Ni(NO₃)₂·6H₂O, 0.1 mol/L)(pH 8-10, NaOH 조정), 침전(60°C, 4 시간), 여과(PTFE 멤브레인, 0.45µm), 로스팅(400-800°C, N₂, 2 시간), NiO/WO₃ 준비. 촉매 세척(탈이온수, 잔류 <0.1mg/g). 촉매 테스트(CO 산화: 200-300°C, CO 1vol%, 가스 유량 50mL/min; 수소화 : 150-250 °C, H₂ 10 MPa), 전환율 >90 %). 표면적은 BET (>50 m² / g)로 측정하고, 활성 성분은 TEM 에 의해 분산 (입자 < 10 nm)으로 측정하였다. 장비 청소(탈이온수, 잔류 <0.1mg/cm²), 환기 제어 먼지(500m³/h, < 1mg/m³).

지원되는 촉매 응용 분야에서 텅스텐의 주요 매개 변수 최적화

WO₃ 입자 크기는 20-200 nm 에서 제어되고 비 표면적 (<20 m² / g)은 낮다 (>500 nm). 합침 시간은 2-4 시간이고 너무 짧고(< 1 시간) 부하가 고르지 않습니다(편차 > 10%). 로스팅 온도는 300-800 °C 이고, 활성 성분이 너무 높으면(>900 °C) 응집되고(>20 nm), 너무 낮으면(<200 °C) 결정화가 불량합니다(<50%). 0.1-5 wt%의 하중이 너무 높으면(>10 wt%), 모공이 막힙니다(다공성 < 30%). 반응 온도는 150-300°C 이고 너무 높으면(>400°C) 촉매가 비활성화됩니다(>10%). 공기 흐름 속도는 50-100mL/분이며, 너무 빠르면(>200mL/분) 접촉 시간이 짧습니다(<80%).

지원되는 촉매 응용 분야에서의 텅스텐의 장점과 단점

지지 촉매에서 황색 삼산화 텅스텐의 장점은 높은 비 표면적 (>50 m² / g), 강한 분산 (활성 입자 < 10 nm) 및 높은 촉매 효율 (90 % > 변환)으로 수소화 및 폐가스 처리 (시장 > 2 억 달러 / 년)에 적합합니다. WO₃ 산성 부위는 선택성을 20% 증가시킵니다. 단점으로는 높은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

준비 비용(귀금속의 경우 \$100/g), 높은 로스팅 에너지 소비(1-5kWh/kg) 캐리어 기공 구조의 정밀한 제어(편차 > 10% 효율성 감소)가 있습니다. 텅스텐 촉매는 화학적 및 환경적 요구를 충족시킵니다.

9.9 내화 직물 분야에서 황색 텅스텐 삼산화물의 적용

텅스텐은 도핑 또는 코팅에 의해 섬유 기관 (예 : 면, 폴리 에스테르 또는 아라미드)에 통합되어 열 차폐 (열 흐름 장벽 >80 %) 및 난연성 효과 (연소 속도 < 10mm / min)를 향상시키는 복합 내화성 직물을 형성합니다. WO₃ 나노 입자는 고온에서 산소 억제제를 방출하고 가연성 가스의 농도 (> 40 %)를 감소시키며 화염의 확산을 방지하는 탄화 층 (두께 >0.5 mm)을 형성합니다 (자기 소화 시간 < 2 초). 높은 비표면적(>50m²/g)과 표면 활성(흡착률>80%)은 기관에 대한 접착력을 향상시킵니다(박리 강도 > 5N/cm). 이 공정에는 직물 성능(통기성 > 100mm/s, 난연성 등급 B1)을 보장하기 위해 제어된 텅스텐 첨가(0.5-5 wt%), 분산 균일성(응집<5%) 및 코팅 두께(10-100 μm)가 필요합니다. 이 섹션에서는 산업, 일상 생활 및 대중 교통에서 텅스텐 내화 직물의 특정 응용 프로그램을 자세히 조사합니다.

9.9.1 산업 분야에서 텅스텐 내화 직물의 적용

텅스텐 내화 직물은 고온 (>500 ° C), 화염 및 아크 손상 (보호 등급 >EN ISO 11612)으로부터 사람과 시설을 보호하기 위해 보호 복, 열 커튼 및 장비 덮개를 만들기 위해 산업 부문에서 사용됩니다. WO₃ 나노 입자는 졸 - 겔 또는 디핑 공정에 의해 아라미드 또는 폴리 에스테르 직물 (평균 200-500g/m²)에 적재되어 산소 지수 (LOI > 30 %) 및 열 보호 (TPP > 10 cal / cm² · s)를 향상시킵니다. 이 공정은 함침 밀(모델 IR-500), 고온 오븐(100-300°C) 및 원뿔 열량계(열 흐름 정확도 ±0.1 kW/m²), 인장 시험기(정확도 ± 0.1 MPa) 및 LOI 테스터(정확도 ± 0.1%)를 포함한 테스트 장비를 사용합니다.

옐로우스텐(0.1-10 kg, 순도>99.9%)을 볼 밀링(200-500 rpm, 6-12 시간, 에탄올 매체)에 의해 20-200 nm 로 분쇄하고, 탈이온수(0.1-1 g/L, 전도도<10 μS/cm)에 분산시키고, 분산제(PVA, 0.1-0.5 wt%)를 첨가하여 WO₃ 졸을 제조하였다. 아라미드 직물(200-500g/m², 면적 10-100m²)을 졸(침용 시간 1-5 분, 액체 운반 속도 80-120%)에 담그고 함침 밀(압력 0.1-0.5MPa, 속도 5-20m/분)을 통해 균일하게 코팅합니다. 직물을 건조(100-150°C, 10-30 분), 경화(200-300°C, 1-2 시간)하고 WO₃ 코팅(0.5-5wt%, 두께 10-100μm)을 형성합니다. 직물 세척(탈이온수, 잔류 < 0.1mg/m²), LOI(>30%), 열 흐름 장벽(>80%) 및 인장 강도(>500 N/5cm) 테스트 완료. 연소 열 방출률(HRR<200kW/m²)은 원뿔 열량계로 측정하고 코팅의 형태(다공성<10%)는 SEM 으로 관찰했습니다. 장비 세척(탈이온수, 잔류 < 0.1mg/m²), 환기 제어 분진(500m³/h, <1mg/m³).

주요 매개변수의 최적화는 매우 중요합니다. WO₃ 입자 크기는 20-200 nm 에서 제어되며, 너무 큰 경우 (>500 nm) 코팅이 고르지 않습니다 (편차 >10 %). 첨가량은 0.5-5 wt%, 너무 높음(>10 wt%), 직물 경화(부드러움 <80%), 너무 낮음(<0.1 wt%), 불충분한 난연성(LOI<26%)이었다. 경화 온도 200-300°C, 너무 높음(>400°C), 기관 열화(강도<400

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

N/5cm), 너무 낮음(<150°C), 코팅 접착력 불량(박리 > 10%). 함침 압력은 0.1–0.5 MPa 이고 직물 손상(섬유 파손>5%)이 너무 높습니다(>1 MPa). 산업 분야에서 황색 삼산화 텅스텐 내화 직물의 장점은 높은 난연성 (LOI>30 %), 고온 저항 (>500 °C) 및 긴 수명 (50 배 >세탁, 감쇠 <5 %), 야금, 전력 및 기타 산업 (시장 > 1 억 달러 / 년)에 적합합니다. 단점으로는 높은 준비 비용(WO₃>50 USD/kg), 엄격한 코팅 균일성 요구 사항(성능 저하를 위해 5% >편차) 및 낮은 통기성(<100mm/s)이 있습니다. 텅스텐 옐로우 패브릭은 산업 안전의 요구를 충족시킵니다.

9.9.2 일상 생활에서 텅스텐 내화 직물의 적용

텅스텐 내화 직물은 커튼, 카펫 및 소파 커버와 같은 가정용 직물의 일상 생활에서 사용되어 화재 (<10mm/분 연소)의 위험을 줄이고 가정 안전 (화재 손실이 >50% 감소)을 향상시킵니다. WO₃는 스프레이 또는 폴리 에스테르 - 코튼 직물 (평균 100-300g / m²)에 통합되어 부드러움 (>85 %)과 통기성 (> 150 mm / s)을 유지하는 난연성 코팅 (두께 10-50 μm)을 형성합니다. 이 공정은 분무기(모델 SC-300, 노즐 0.1–0.5mm), 오븐(100–200°C) 및 수직 연소 시험기(정확도 ±0.1 초), 투과성 시험기(정확도 ± 1mm/s) 및 세척 내구성 시험기(50 사이클)를 포함한 테스트 장비를 사용합니다.

텅스텐 분말 (0.1-5 kg, 순도 >99.9 %)을 20-200 nm 로 분쇄하고 수성 콜로이드 (PVA 또는 실란 커플 링제의 경우 0.1-0.5 g / L, 0.1-0.5 wt %)에 분산시켰다. 면직물(100–300 g/m², 면적 10–50 m²)은 전처리(NaOH 0.1 mol/L, 60°C, 30 분), WO₃(0.5–3 wt%)를 분무기(압력 0.1–0.3 MPa, 유속 1–5 L/min)로 도포하고, 건조(100–150°C, 10–20 분) 및 경화(150–200°C, 1–2 시간)합니다. 원단 세탁(탈이온수, 잔류 <0.1mg/m²), 난연성(수직 연소 자기 소화<2 초), 통기성(>150mm/s), 세탁 내구성(> 50 회, LOI>28%). SEM 을 사용하여 코팅의 균일성(응집물 <5%)을 관찰하고 인장 시험기는 강도(>300 N/5cm)를 측정했습니다. 장비 청소(탈이온수, 잔류 <0.1mg/m²), 환기 제어 먼지(500m³/h, <1mg/m³).

최적화 매개변수에는 WO₃ 첨가 0.5-3wt%, 너무 높음(>5wt%), 손 느낌에 영향을 미치는 것(부드러움 <80%)이 포함되었습니다. 입자 크기는 20–200 nm 이고 증착이 너무 크고(>500 nm) 고르지 않습니다(편차 >10%). 스프레이 압력은 0.1–0.3 MPa 이며, 너무 높으면(>0.5 MPa) 재료 낭비(>10%). 경화 온도 150–200°C, 너무 높음(>250°C) 직물 황변(백색도 <85%). 생활 분야에서 텅스텐 내화 직물의 장점은 안전성과 효율성 (LOI>28 %), 우수한 편안함 (통기성 > 150mm / s) 및 내구성 (50 배 >세탁)이며, 국내 시장 (규모 > 5000 만 달러 / 년)에 적합합니다. 단점은 높은 비용 (가공 >\$ / m²), 최적화 된 코팅 공정의 필요성 (균일성 편차 >5 %) 및 난연제의 약간의 마이그레이션 가능성 (<0.1 wt %)입니다. 텅스텐 옐로우 패브릭은 가정의 화재 예방 기준을 높입니다.

9.9.3 대중 교통에서 텅스텐 내화 직물의 적용

텅스텐 난연성 직물은 기차, 비행기 및 버스의 좌석 커버, 커튼 및 카펫에 대한 대중 교통 부문에서 사용되며 엄격한 난연 표준 (예 : EN 45545-2, HL3 클래스)을 충족합니다. WO₃는 함침 또는 플라즈마 스프레이에 의해 폴리 에스테르 또는 나일론 직물 (평균 200-400g /

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

m²)에 적용되어 난연성 (LOI > 32 %) 및 연기 밀도 (Ds < 200)를 증가시키고 화재 위험 (독성 가스 배출 < 1 mg / m³)을 줄입니다. 이 공정은 플라즈마 분무기(모델 PS-500, 출력 10-50kW), 고온 오븐(100-300°C) 및 연기 밀도 시험기(정확도 ± 1ds), 독성 시험기(정확도 ± 0.1mg/m³) 및 연소 성능 시험기(TB/T 3237)를 포함한 테스트 장비를 사용합니다.

텡스텐 (0.1-5 kg, 순도 >99.9 %)을 20-200 nm 로 분쇄하고 수용액 (0.1-0.5 g / L, 실란 커플링제 0.1-0.5 wt %)에 분산시켰다. 폴리 에스테르 직물 (200-400 g / m², 면적 10-100 m²)은 플라즈마 전처리 (전력 1-5 kW, 30 초)이며, 플라즈마 분무 (Ar + H₂, 10-50 kW, 분무 피치 100-150 mm), 건조 (100-150 °C, 10-20 분), 경화 (200-300 °C, 1-2 시간)로 WO₃ (1-5 wt%, 두께 10-100 μm)로 코팅됩니다. 직물 세척(탈이온수, 잔류 <0.1 mg/m²), LOI(>32%), 연기 밀도(Ds<200) 및 독성(CO, HCl<1 mg/m³) 테스트. 연소 테스트는 EN 45545-2(HRR<50kW/m²)를 준수하는지 확인하고 코팅 구조는 SEM(다공성 < 10%)으로 관찰됩니다. 장비 청소(탈이온수, 잔류 <0.1mg/m³), 환기 제어 먼지(500m³/h, <1mg/m³).

주요 매개 변수에는 1-5 wt%의 WO₃ 첨가, 너무 높음 (>10 wt%) 및 체중 증가 (>10 g/m²)가 포함됩니다. 입자 크기 20-200 nm, 과도(>500 nm) 접촉력 불량(박리 > 10%). 스프레이 파워 10-50kW, 너무 높음(>60kW) 직물 손상(섬유 파손>5%). 경화 온도는 200-300 °C 이고 너무 높으면(>400 °C) 기판이 저하됩니다(강도 < 500 N/5 cm). 대중 교통 분야에서 텡스텐 내화 직물의 장점은 높은 난연성 (LOI>32 %), 낮은 연기 독성 (Ds<200) 및 높은 내구성 (> 50,000 마모)으로 교통 안전 기준을 충족합니다. 단점은 높은 공정 비용, 고가의 플라즈마 장비 및 약간의 무게 증가(<5%)입니다. 텡스텐 직물은 대중 교통의 화재 안전을 보장합니다.

산업, 일상 생활 및 대중 교통에서 텡스텐 내화 직물의 사용은 안전성과 내구성을 크게 향상 시켰지만, 비용과 성능의 균형을 맞추는 필요성은 하이 엔드 시장 (성장률 10 % / 년)> 채택을 주도했습니다.

9.10 농업 필름에 황색 삼산화 텡스텐 적용

텡스텐 (WO₃)은 우수한 근적외선 흡수 능력, 화학적 안정성 및 나노 스케일 분산으로 인해 농업용 필름 분야에서 독창적인 응용 가치를 보여주었습니다. 기능성 첨가제로 농업용 필름에 통합되어 온실의 단열 효과를 크게 향상시키고 작물 성장을 촉진하며 농업용 필름의 수명을 연장할 수 있습니다. 텡스텐 옐로우 나노 입자는 근적외선을 효과적으로 흡수하여 열 에너지로 변환하고, 창고의 온도를 2-5 °C 높이고, 유해한 자외선을 차단하고, 농업 필름 매트릭스 재료의 노화를 늦출 수 있습니다. 이 특성으로 인해 황색 삼산화 텡스텐 농업 필름은 보온 및 노화 방지 기능을 유지하면서 높은 가시광선 투과율을 유지하며 현대 농업의 온실 재배 및 과일 및 채소 보호에 널리 사용됩니다.

황색 텡스텐 삼산화물 농업 필름의 제조는 일반적으로 황색 삼산화 텡스텐 나노 입자가 폴리에틸렌 또는 폴리 염화 비닐과 같은 매트릭스 물질과 혼합되는 용융 혼합 또는 코팅 공정을 채택합니다. 생산 과정에서 황색 삼산화 텡스텐은 볼 밀링에 의해 20-200 nm 로 분쇄되어 고르게 분산되도록합니다. 그 후, 황색 삼산화 텡스텐은 고속 믹서에서 매트릭스

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수지 및 분산제와 혼합된 다음 이축 압출기로 과립화하여 기능성 마스터 배치를 만든다. 이러한 마스터 배치는 최종적으로 블로운 필름 기계에서 처리되어 50-200 μm 두께의 농업 필름을 생산합니다. 전체 공정은 농업용 필름의 성능을 보장하기 위해 황색 삼산화 텅스텐의 양, 혼합 균일성 및 송풍 온도를 정확하게 제어해야 합니다.

성능 테스트에서 황색 삼산화 텅스텐 농업 필름의 가시 광선 투과율은 85% 이상에 도달해야 하고 근적외선 흡수율은 80%를 초과해야 하며 자외선 차단율은 90% 이상이어야 합니다. 또한 농업용 필름의 인장 강도는 실제 사용시 기계적 응력에 대처하기 위해 20MPa 이상이어야 합니다. 노화 시험은 황색 삼산화 텅스텐을 사용한 농업 필름의 분해 속도가 1000 시간의 자외선 조사 후 5% 미만으로 일반 농업 필름보다 현저히 우수하다는 것을 보여주었다. 생산 장비에는 고속 믹서, 이축 압출기, 취입 필름 기계, 분광 광도계 및 성능 테스트를 위한 인장 시험기 등이 포함되어 일관된 제품 품질을 보장합니다.

첨가된 황색 삼산화 텅스텐의 양은 일반적으로 0.1-2 중량%로 제어되는 농업 필름의 성능에 영향을 미치는 핵심 요소입니다. 너무 많은 양을 투여하면 비용이 높아지고 광 투과율이 감소하는 반면 너무 낮으면 적절한 절연을 얻을 수 없습니다. 취입 필름 온도는 180-230°C로 유지되어야 하며, 너무 높으면 매트릭스 저하가 발생하고 너무 낮으면 필름 두께가 고르지 않습니다. 분산제의 투여량도 필름의 기계적 특성에 영향을 미치지 않도록 정밀하게 조정해야 합니다. 또한 취입 필름 기계의 송풍 비율은 기포 안정성과 폭 균일성을 보장하기 위해 2-4로 제어해야 합니다.

황색 삼산화 텅스텐 농업 필름의 장점은 놀라운 단일 효과와 우수한 노화 방지 성능으로 작물 수확량을 10% 이상 증가시킬 수 있고 2년 이상의 수명을 가질 수 있으며 특히 대형 온실 재배에 적합하며 시장 수요가 강합니다. 그러나 제조 비용이 높고 텅스텐 나노 입자의 가격이 비싸며 분산 균일성이 엄격한 공정 요구 사항을 가지며 편차가 너무 커서 광학 성능에 영향을 미치지 않습니다. 또한 농업용 필름의 재활용은 여전히 과제에 직면해 있으며 회수율이 낮아 더욱 최적화해야 합니다. 전반적으로, 텅스텐 엘로우 필름은 현대 농업에 효율적인 솔루션을 제공하고 농업 생산 효율의 향상을 촉진합니다.

9.11 에너지 분야에서 황색 삼산화 텅스텐의 적용

텅스텐 (WO_3)은 우수한 전기 화학적 특성과 높은 사이클링 안정성으로 인해 에너지 부문에서 많은 주목을 받았습니다. 와이드 밴드갭 반도체로서 텅스텐은 에너지 저장 및 촉매 분야에서 다재다능함을 보여주었으며, 이는 에너지 장치의 효율성과 서비스 수명을 크게 향상시킬 수 있습니다. 나노 구조와 높은 비표면적은 리튬 이온 배터리, 슈퍼커패시터 및 광촉매와 같은 응용 분야에서 고유한 이점을 제공하여 전기 자동차, 재생 에너지 저장 등의 요구 사항을 충족합니다. 이 섹션에서는 리튬 이온 배터리에서 황색 삼산화 텅스텐의 특정 적용에 초점을 맞추고 그 역할과 공정 특성을 분석합니다.

9.11.1 리튬 이온 배터리에 황색 삼산화 텅스텐 적용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

리튬 이온 배터리의 양극 재료 또는 복합 전극 구성 요소로서 텅스텐 엘로우는 높은 이론적 용량과 안정적인 리튬 이온 임베딩 / 배출 성능을 제공하여 배터리의 에너지 밀도와 사이클 수명을 향상시킬 수 있습니다. 텅스텐 나노 입자의 높은 비 표면적과 다공성 구조는 리튬 이온의 빠른 확산을 촉진하고 충전 및 방전 중 부피 팽창을 줄여 고성능 배터리에 이상적입니다. 이 소재는 전기 자동차 및 휴대용 전자 장치와 같은 응용 분야에 특히 적합하며 장기간 사용 및 고속 방전을 지원할 수 있습니다.

텅스텐 양극의 제조는 일반적으로 열수 법 또는 전착 방법으로 수행됩니다. 열수 법에서, 황색 삼산화 텅스텐 전구체는 산성 조건에서 반응하여 20-200 nm 의 입자 크기를 갖는 나노 입자를 형성한다. 그 후, 펄릿을 원심 분리, 세척 및 건조하여 순도를 보장하고 불순물을 제거합니다. 전착 방법은 황색 삼산화 텅스텐 피막을 구리 호일에 직접 증착시키고 두께를 정밀하게 제어 할 수 있습니다. 제조된 황색 삼산화 텅스텐 물질을 전도체와 바인더와 혼합하고, 집전체에 코팅하고, 전극으로 만든다. 배터리 조립은 불활성 분위기에서 이루어지며, 리튬 호일을 상대 전극으로 사용하고 표준 전해질과 분리막을 사용하여 버튼 배터리를 조립합니다.

성능 테스트는 텅스텐 전극의 품질을 검증하는 중요한 부분입니다. 테스트 장비는 배터리 용량, 사이클 안정성 및 속도 성능을 정확하게 측정할 수 있습니다. 일반적으로 텅스텐 전극의 용량은 200mAh / g 이상에 도달 할 수 있으며 용량 감소는 1000 사이클 후 10 % 미만이며 여전히 높은 속도로 안정적인 출력을 유지할 수 있습니다. 구조 분석은 X 선 회절 및 주사 전자 현미경으로 수행되어 노란색 삼산화 텅스텐의 결정 형태와 형태가 설계 요구 사항을 충족하는지 여부를 확인했습니다. 생산 장비에는 열수 반응기, 볼 밀, 진공 건조 오븐 및 배터리 테스트 시스템이 포함되어 재료 합성에서 배터리 조립에 이르기까지 제어된 프로세스를 보장합니다.

텅스텐 전극의 성능은 다양한 매개 변수의 영향을받습니다. 나노 입자의 입자 크기는 적절한 범위 내에서 제어되어야 하며, 너무 크면 반응성이 감소하고 너무 작으면 응집되기 쉽습니다. 전극 코팅의 두께는 10-100 μm 로 유지되어야 하며, 너무 두꺼우면 이온 전달에 영향을 미치고 너무 얇으면 용량이 제한됩니다. 어닐링 온도는 결정 구조와 전도성을 최적화하기 위해 300-500°C 사이여야 합니다. 충전 속도 및 전해질 농도도 용량과 사이클 수명의 균형을 맞추기 위해 정밀하게 조정해야 합니다. 습기와 산소에 의한 오염을 피하기 위해 글로브 박스 내부의 대기 순도에 특별한 주의를 기울여야 합니다.

리튬 이온 배터리에서 황색 삼산화 텅스텐의 장점은 고용량 및 긴 수명으로 배터리의 에너지 밀도를 크게 향상시키고 전기 자동차와 같은 수요가 많은 시나리오의 적용을 충족시킬 수 있습니다. 탄소 물질과 혼합하면 전도성과 속도 성능이 더욱 향상됩니다. 그러나 첫 번째 충전 및 방전의 효율이 낮고 표면 개질을 통해 최적화해야 합니다. 준비 공정의 복잡성은 특히 열수 방법에는 여러 단계가 포함되기 때문에 생산 비용도 증가합니다. 또한 배터리의 안전성과 텅스텐 재료의 대규모 생산은 여전히 개선되어야 합니다. 텅스텐 전극의 적용은 에너지 저장에 대한 새로운 가능성을 제공하고 고성능 배터리 기술의 개발을 촉진합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.11.2 슈퍼 커패시터에 텅스텐 적용

텅스텐 폼미는 높은 비정전용량(>500F/g), 빠른 충전/방전 기능(응답 시간<1 초) 및 우수한 사이클링 안정성(>10,000 사이클, 감쇠<5%), EV 시동(전력 밀도 >10kW/kg), 웨어러블(에너지 밀도 >50Wh/kg), 그리드 피크 저감(사이클 수명 > 5 년). 텅스텐의 유사 커패시턴스는 표면 산화 환원 반응($W^{II+} \leftrightarrow W^{VI+}$)과 나노 다공성 구조(비표면적 >100m²/g)와 결합되어 이온 수송(확산 계수 >10⁻⁹ cm²/s)을 향상시키기 때문입니다. WO₃ 나노 물질은 열수 반응기 (50-500 mL 용량), 유성 볼 밀 (100-300 rpm), 진공 건조 오븐 (50-200 ° C), 전위차 조절기 (전류±0.1 μA) 및 BET 분석기 (정확도 ± 1 m² / g)와 같은 분석 장비를 사용하여 열수 또는 전착 (HT-300)으로 제조됩니다.

옐로우세터 전구체(예: Na₂WO₄, 0.05-0.2 mol/L, 순도>99.9%)를 탈이온수(전도도<10μS/cm)에 용해시키고, HCl 을 첨가하여 pH 를 1-3 으로 조정하고, WO₃ 나노입자(20-200nm, 수율 >90%)를 180-200°C 에서 12-24 시간 동안 열수 반응기에서 형성하였다. 대안적으로, WO₃ 박막 (두께 10-100 nm)을 탄소 천 (면적 1-10 cm², 저항 < 1 Ω / sq)에 -0.5-0.5 V (Ag / AgCl, 전해질 Na₂SO₄ 0.1 mol / L, pH 6-7)를 10-30 분 동안 도포하여 제조했다. 나노 입자를 원심 분리 (8000 rpm, 10 분, 회수율 >98 %), 세척 (탈 이온수, 잔류 <0.1 mg / mL), 진공 건조 (80 ° C, 12 시간) 및 필름 어닐링 (300-500 ° C, N₂, 1-2 시간, 결정화 >80 %). WO₃는 NMP (볼 밀링, 200 rpm, 6 시간)에서 전도성 카본 블랙, PVDF (8 : 1 : 1 wt%)와 혼합하고 집전체(두께 10-100 μm)에 코팅하고 진공 건조(120 ° C, 12 시간)했습니다. 전극은 -0.5 -1V의 전압 창으로 3전극 시스템(전해질 1M H₂SO₄ 또는 Na₂SO₄)에서 테스트되었으며, 특정 커패시턴스(>500 F/g), 사이클링 안정성(> 10,000 사이클) 및 전력 밀도(>10 kW/kg)를 측정했습니다. BET 로 비표면적(>100m²/g)을 분석하고, SEM 으로 형태(다공성>50%)를 관찰했습니다. 장비 세척(탈이온수, 잔류 <0.1mg/cm²), 환기 제어 분진(500m³/h, < 1mg/m³).

성능을 보장하기 위해 주요 매개 변수를 최적화해야 합니다. WO₃ 입자 크기는 20-200 nm 에서 제어되며, 너무 큰 (<500 nm) 및 너무 작은 경우 (>500 nm / g) 높은 응집 속도 (>10 %)로 (<10 %). 열수 온도는 180-200 ° C, 너무 높은 (>220 ° C), 곡물이 자라는 (>500 nm), 너무 낮음 (<160 ° C) 결정화가 불충분 합니다 (<50 %). 전극 두께는 10-100μm, 너무 두껍고(>200μm), 제한된 이온 확산(커패시턴스 <200 F/g), 너무 얇음(<5 μm) 및 용량 부족(<100 F/g)입니다. 어닐링 온도는 300-500 ° C 이며, 기공 붕괴(다공성 < 30%)에 대해 너무 높고(>600 ° C), 전도성이 좋지 않은 경우(<10⁻³ S/cm)에 대해 너무 낮음(<200 ° C)입니다. 전해질 농도는 0.5-2M 이고 이온 전도도가 너무 낮으면(<0.2M) 낮으면(<5mS/cm) 낮습니다. 텅스텐 전극은 높은 비정전 용량 (>500 F / g), 긴 사이클 수명 (> 10,000 사이클) 및 우수한 전력 밀도 (> 10 kW / kg)로 인해 고효율 응용 분야 (연간 > 1 억 달러)에 적합합니다. 탄소 재료(예: WO₃/그래핀)와 혼합하면 전도성이 최대 30%까지 증가합니다. 그러나 첫 번째 커패시턴스 손실이 크고(<80%), 준비 비용이 높고(수열 > \$50/배치), 전극의 기계적 강도를 개선해야 합니다(파편률>1%). 텅스텐 전극은 슈퍼 커패시터에서 고전력의 개발을 주도하고 있습니다.

텅스텐 옐로우 슈퍼 커패시터의 장점은 전기 자동차 및 웨어러블의 순간적인 높은 전력

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

요구를 충족하면서 긴 서비스 수명을 유지하기 때문에 중요합니다. 그러나 준비 과정은 복잡하고 여러 단계를 포함하므로 생산 비용이 증가합니다. 또한, 습도가 높은 환경에서 전극 재료의 안정성은 실제 응용 분야의 과제를 해결하기 위해 더욱 개선되어야 합니다. 그럼에도 불구하고 슈퍼 커패시터에 노란색 삼산화 텅스텐을 적용하는 것은 유망하여 효율적인 에너지 저장을 위한 신뢰할 수 있는 선택을 제공합니다.

9.11.3 수소로 분할되는 광촉매 물에 황색 삼산화 텅스텐의 적용

광촉매로서, 황색 삼산화 텅스텐은 넓은 밴드 갭 (2.6-2.8 eV)과 강력한 산화 용량 (홀 전위 >2.7 V 대 NHE)을 사용하여 광촉매 수소 생산에 탁월하며, 효율적인 수소 생산 (속도 > 1 mmol / h · g) 및 안정성 (사이클 > 50 시간, 활성 손실 <5 %)을 달성 할 수 있으며 재생 가능 에너지 생산 (태양 에너지 이용률 >5 %). WO₃의 높은 광 흡수 (<460 nm) 및 전자 - 정공 분리 효율 (양자 수율 >5 %)은 물의 산화 및 양성자 감소를 촉진합니다. WO₃ 나노 물질은 열수 반응기 (부피 50-500 mL), 원심 분리기 (회전 속도 5000-10,000 rpm), 관형 로스터 (300-800 °C), 광촉매 반응기 (모델 PCR-500, 부피 0.1-1 L) 및 가스 크로마토 그래피 (검출 한계 < 0.1 μmol) 및 UV-Vis 분광 광도계 (정확도 0.5 nm)와 같은 분석 장비를 사용하여 열수 또는 졸 겔 (HT-200 또는 SG-300)± 제조하였다.

텅스텐 전구체(WCl₆, 0.05-0.2 mol/L, 순도>99.9%)를 탈이온수에 용해시키고 요소(0.1 mol/L)를 첨가하여 pH 를 6-8 로 조정하고, WO₃ 나노 입자(20-200 nm, 수율 > 90%)를 열수 반응기(180-200°C, 12-24 h)에서 제조하였다. WCl₆을 졸-겔 방법으로 에탄올(0.1 mol/L)에 적가하고, FTO 기판(면적 1-10 cm²), 스핀 코팅(30 초 동안 2000-4000 rpm), 건조(100°C, 1 시간), 로스팅(400-600°C, 공기, 1-2 시간) 및 WO₃ 필름(두께 10-100nm)에 적가했습니다. 펠렛 원심분리(8000rpm, 10 분, 회수>98%), 세척(탈이온수, 잔류 <0.1mg/mL), 로스팅(400-600°C, N₂, 1-2 시간). 촉매 (0.1-1 g / L)를 탈 이온수 (pH 6-8, 희생제로 10 vol % 메탄올 함유)에 분산시키고 광촉매 반응기에 넣고 크세논 램프 (300 W, AM 1.5, >10 mW / cm²)를 조사하고 수소 생산 속도를 1-6 시간 동안 >1 mmol / h · g 했다. H₂ 수율은 가스 크로마토그래피(오차 <±1%), 흡수 스펙트럼은 UV-Vis(밴드 갭 2.6-2.8 eV)로 측정하고, 형태는 SEM(다공성>50%)으로 측정했습니다. 장비 청소(탈이온수, 잔류 <0.1mg/cm²), 환기 제어 먼지(500m³/h, < 1mg/m³).

광촉매 효율은 매개변수 최적화에 따라 달라집니다. WO₃ 입자 크기 20-200 nm, 파도(>500 nm), 낮은 광 흡수율(<50%). 열수 온도는 180-200 °C 이고 높은 (>220 ° C) 응집 (>10 %)입니다. 로스팅 온도는 400-600 °C 이며, 곡물 성장(>500 nm)에 대해 너무 높고(>700 °C), 불충분한 결정화(<50%)에 대해 너무 낮은(<300 °C)입니다. 광도는 10mW/cm²>이며 수소 생성이 너무 낮으면(<5mW/cm²) 느려집니다(<0.1mmol/h·g). 촉매 농도는 0.1-1g/L 이고 광차폐가 너무 높고(>2g/L)(효율 <3%). 희생 메탄올 10 vol%, 너무 낮음(<5 vol%), 높은 홀 재결합(>50%). 황색 삼산화 텅스텐 광촉매는 수소 생산 효율이 높고 (>1mmol / h · g), 우수한 안정성 (> 50 시간)을 가지며 녹색 에너지 (시장 > 5 천만 달러 / 년)에 적합합니다. 도핑(예: Ti, N)은 가시광선 반응을 향상시킵니다(30% 증가). 그러나 자외선 의존성(비용 > \$100/m²), 광 부식을 억제해야 하며(>5% 손실), 재결합 효율은 여전히 개선이 필요합니다. 황색 텅스텐 광촉매는 청정 수소의 개발을 촉진했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

광촉매 수소 생산에 황색 삼산화 텅스텐을 적용하면 특히 태양열 시나리오에서 재생 가능 에너지를 위한 지속 가능한 경로를 제공합니다. 그러나 자외선에 대한 의존성은 태양 에너지의 활용률을 제한하며, 이는 도핑 또는 배합으로 최적화해야 합니다. 또한 촉매의 장기적인 안정성은 여전히 복잡한 수질에서 검증되어야 합니다. 이러한 도전에도 불구하고, 텅스텐 광촉매의 잠재력은 청정 에너지 연구의 중요한 방향이 됩니다.

CTIA GROUP LTD

Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO₃) Product Introduction

1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO₃ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO ₃ content (wt%)	≥99.95
Impurities (wt%, max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm ³)
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO₃ content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website www.tungsten-powder.com. For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

제 10 장 황색 삼산화 텅스텐의 안전 및 환경 보호

중요한 기능성 재료로서 텅스텐 (WO_3)은 산업, 에너지, 환경 및 기타 분야에서 널리 사용되어 안전 및 환경 적 영향에 많은 관심을 기울이고 있습니다. 옐로우스텅스텐의 화학적 안정성(산 및 알칼리 저항성, pH 1-14)과 낮은 독성(LD50>2000 mg/kg)으로 인해 일상적으로 사용하기에 안전하지만 생산, 처리 및 폐기 공정에는 먼지 흡입(PM2.5<10 mg/m³), 화학 폐수 배출(COD<100 mg/L) 및 에너지 소비(>1 kWh/kg)가 포함될 수 있습니다.

10.1 텅스텐의 안전 문제

텅스텐 옐로우는 주로 먼지 노출, 화학 물질 노출 및 장비 작동 위험을 포함하여 생산, 가공 및 사용 중에 안전 위험을 유발할 수 있습니다. 텅스텐 분말 (입자 크기 0.1-10 μm)은 분쇄, 체질 또는 혼합 할 때 부유 입자를 형성하는 경향이 있으며, 보호하지 않고 방치하면 흡입 자극 (10 mg / m³의 > 농도에서 호흡기 불편)을 유발할 수 있습니다. 황색 삼산화 텅스텐 자체의 독성은 낮지만 (급성 경구 LD50 > 2000 mg / kg, 쥐), 고농도 (>5 mg / m³, > 6 시간 / 일)에 장기간 노출되면 가벼운 폐 염증이 발생할 수 있습니다. 생산에 사용되는 전구물질(예: WCl_6) 또는 환원 가스(예: H_2 , 순도 > 99.999%)는 부식성 또는 가연성이며 엄격한 누출 제어(<1ppm)가 필요합니다. 또한 고온 장비(예: 환원로, 600-1000°C)는 화상 또는 전기적 손상의 위험이 있습니다.

안전 확보를 위해 다음과 같은 조치가 필요합니다. 생산 홀에는 효율적인 환기 시스템(풍량 > 500m³/h, 먼지 농도 < 1mg/m³)이 설치되어 있으며 작업자는 N95 마스크, 방진 슈트 및 보호 안경을 착용합니다. 전구체는 발화 및 산화제로부터 멀리 떨어진 밀폐 용기(스테인리스 스틸, < 25°C)에 보관됩니다. H_2 는 리크 디텍터(감도<1ppm)와

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

방폭장치(내압 > 0.5MPa)를 탑재하고 있습니다. 고온 장비 작동은 단열복을 착용하고 정기적인 유지 보수(월간 검사, 고장률 <1%)가 필요합니다. 비상 계획에는 먼지 청소(진공 청소, 95% 효율>), 누출 처리(NaOH, pH 6-8 과 같은 중화제) 및 응급 처치 교육(연간 1 회, 적용 범위 >90%)이 포함됩니다. 이러한 조치로 안전 위험을 최소화할 수 있습니다(사고율 <0.1%).

황색 삼산화 텅스텐의 안전 관리 이점은 독성이 낮고 보호 기술이 성숙하여 대규모 생산 (> 1000 톤 / 년)에 적합합니다. 그러나 분진 제어 비용이 높고 H₂ 안전 시설에 대한 투자가 크므로 중소기업은 규정 준수 압력에 직면할 수 있습니다. 안전 규범의 엄격한 이행은 직원의 건강과 생산의 연속성을 효과적으로 보장할 수 있습니다.

10.2 황색 삼산화 텅스텐의 환경 보호

텅스텐 옐로우의 생산 및 폐기에는 에너지 소비, 배기 가스, 액체 폐기물 및 고형 폐기물이 포함되며 이는 환경에 영향을 미칠 수 있습니다. 생산 공정(예: 열수, 로스팅)은 높은 에너지 소비(1-5kWh/kg)와 약 0.5-2kg/kg WO₃의 CO₂ 배출량을 가지고 있으며, 탄소 발자국(목표 <0.1kg/kg)을 줄이기 위해 공정을 최적화해야 합니다. 배기 가스에는 주로 먼지(PM2.5<10mg/m³)와 휘발성 전구체 잔류물(예: HCl, <1ppm)이 포함되며, 이는 백 먼지 제거(효율 >99%) 및 부식성 흡수(회수율 >95%)로 처리해야 합니다. 폐액에는 중금속(예: W⁶⁺, <1 mg/L) 및 산(pH 2-4)이 포함되어 있으며, 이러한 물질은 배출(COD<100 mg/L) 전에 중화(Ca(OH)₂, pH 6-8) 및 침전(회수율 > 90%)해야 합니다. 고형 폐기물에는 고장난 촉매 및 슬래그(W<5wt%)가 포함되며, 이는 재활용(회수율 >80%) 또는 안전하게 매립(침출수 W<0.1 mg/L)할 수 있습니다.

환경 관리는 원천부터 끝까지 완전히 통제되어야 합니다. 에너지 절약 장비(예: 인버터 모터, 에너지 절약 > 20%)와 청정 에너지(태양광, 차지 >30%)가 생산에 사용됩니다. 배기가스 처리 시스템은 정기적인 유지보수(월 1 회, 먼지 제거 효율>99%), 폐액의 후처리 검사(ICP-MS, W<0.1 mg/L)가 필요합니다. 고형 폐기물은 별도로 보관하며(불침투성 용기, 누출률<0.1%), 저급 텅스텐 제품은 우선적으로 재활용 및 준비됩니다(비용< 톤당 US\$50). 정책 준수는 배기가스 배출 표준(예: GB 25466-2010, W<0.5mg/L) 및 EIA 요구 사항(통과율>95%)을 충족해야 합니다. 황색 삼산화 텅스텐 생산의 환경 적 이점은 높은 폐기물 재활용 성 (>80 %)과 낮은 독성 배출 (W<0.1 mg / L)으로 녹색 제조를 지원합니다. 그러나 높은 에너지 소비와 폐기물 처리 비용으로 인해 운영 부담이 가중되고 있으며, 환경 영향을 줄이기 위해 기술 혁신(예: 저온 합성, 에너지 절약 > 30%)이 요구되고 있습니다. 텅스텐 옐로우의 환경 관리는 지속 가능한 개발을 보장합니다.

10.3 황색 삼산화 텅스텐에 대한 안전 데이터 시트 (MSDS)

황색 삼산화 텅스텐의 안전 데이터 시트 (MSDS)는 화학 물질 식별, 위험 개요, 성분 정보, 응급 처치 조치, 화재 방지 조치, 유출 비상 사태, 작동 및 폐기, 보호 조치, 물리적 및 화학적 특성, 안정성, 독성 데이터, 생태 데이터, 폐기물 처리, 운송 정보, 규제 정보 및 기타 정보.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

화학 식별 : 중국 이름 삼산화 텅스텐, 영어 이름 삼산화 텅스텐, CAS 번호 1314-35-8, 분자식 WO_3 , 분자량 231.84 g / mol. **위험 개요**: 저독성 고체 분말(LD50>2000 mg/kg, 쥐), 고농도 분진 흡입(>10 mg/m³)은 호흡기 자극을 유발할 수 있으며, 장기간 노출(>5 mg/m³)은 경미한 폐 손상을 일으킬 수 있으며 비발암성(IARC 에 나열되지 않음). **성분 정보** : WO_3 순도 > 99.9 %, 불순물 (예 : Fe, Na) < 50ppm. **응급 처치 조치**: 흡입 후 환기가 되는 곳으로 이동하여 호흡을 관찰하십시오. 피부 접촉을 위해 비눗물로 씻으십시오. 눈에 들어맞도록 흐르는 물로 15 분 동안 행합니다. 섭취는 구토를 유발하고 의사의 치료를 받습니다. **소방 대책** : 소화를 위한 불연성, 건조 분말 또는 CO_2 , 소방관은 호흡기를 착용합니다. **누출 비상 사태** : 진공 청소로 먼지를 청소하고(효율 > 95%) 먼지를 피하고 밀봉된 밀봉에 폐기물을 수거합니다. **작동 및 폐기**: 폐쇄 작동, 환기 양호(풍량 > 500m³/h), N95 마스크 및 보호복 착용. **보호 조치** : 먼지 필터 (효율 > 99 %) 및 안전한 샤워 시설, 정기 건강 검진 (연간 1 회)을 갖추고 있습니다. **물리적 및 화학적 특성**: 황색 분말, 밀도 7.16g/cm³, 융점 1473°C, 물에 불용성, 강알칼리에 용해. **안정성**: 강력한 환원제와의 접촉을 피하기 위해 화학적으로 안정적(pH 1-14). **독성 데이터** : 급성 독성 없음 (LD50 > 2000 mg / kg), 피부 민감성 없음, 흡입 LC50>5 mg / L (쥐, 4 시간). **생태학적 데이터**: 낮은 생태독성(어류의 LC50>100mg/L, 48 시간), 비누적(BCF<100). **폐기**: 재활용 우선(>80%), 재활용할 수 없는 부분은 유해 폐기물(침출수 W<0.1mg/L)로 매립됩니다. **배송 정보**: 무해물질, UN 번호 없음, 밀봉된 패키지(수분 > 99%). **규제 정보**: REACH, GB/T 16483-2008 준수, 수출 제한 없음.

MSDS 의 장점은 규정 준수 작업을 용이하게 하기 위한 포괄적인 보안 지침을 제공한다는 것입니다(규정 준수율 > 95%). 그러나 새로운 규정에 적응하기 위해 업데이트 빈도(2-3 년마다)를 가속화해야 하며, 다국어 버전(>5)은 준비 비용을 증가시킵니다. 텅스텐 MSDS 는 안전 관리를위한 표준화 된 기초를 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Chapter 11 황색 삼산화 텅스텐에 대한 국내의 표준

중요한 기능성 재료로서 텅스텐 (WO_3)의 품질 관리 및 적용은 제품 일관성, 안전성 및 국제 경쟁력을 보장하기 위해 엄격한 표준을 따라야합니다. 텅스텐 및 관련 제품에 대한 국내 및 국제 표준은 화학 성분 (순도 $>99.9\%$), 입자 크기 ($0.1-10\ \mu m$), 물리적 특성 (밀도 $7.16\ g/cm^3$) 및 환경 보호 요구 사항 (중금속 방출 $<0.1\ mg/L$)을 포함합니다.

11.1 중국 국가 표준

중국 국가 표준 (GB)은 황색 삼산화 텅스텐 및 그 유도체 (예 : 텅스텐 분말 및 텅스텐 바)에 대한 기술 요구 사항, 테스트 방법 및 검사 규칙을 규정하는 중국 표준화 관리 (SAC)에 의해 공식화되고 발표되었습니다. 황색 삼산화 텅스텐 관련 표준은 주로 야금, 전자 및 화학 분야에서의 응용 품질을 보장하기 위해 국가 비철금속 표준화 기술위원회 (TC243)에 의해 중앙 집중화됩니다. 다음은 주요 표준 내용 및 분석입니다.

텅스텐과 직접 관련된 국가 표준은 거의 없지만 텅스텐 제품의 선구자로서 "텅스텐 분말의 기술 조건"(GB / T 3458-2006)과 같은 표준에 의해 간접적으로 제한됩니다. 이 표준은 텅스텐 분말의 화학 조성 ($W > 99.9\%$, 불순물 $Fe < 50\ ppm$, $O < 0.1\ wt\ \%$), 입자 크기 ($0.5-5\ \mu m$) 및 미세 구조 (입자 균일 성 편차 $< 5\ \%$)를 지정하며, 이는 황색 삼산화 텅스텐 환원에 의해 제조 된 텅스텐 분말에 적합합니다. 텅스텐 생산은 후속 공정의 요구 사항을 충족하기 위해 전구체 순도 ($WO_3 > 99.9\%$)와 입자 크기 분포 ($0.1-10\ \mu m$)를 필요로 합니다. 테스트 방법에는 불순물에 대한 ICP-MS(검출 한계 $< 1\ ppm$), 입자 크기 측정을 위한 레이저 입자 크기 분석기($\pm 1\%$ 정확도), 형태를 위한 SEM(해상도 $< 1\ \mu m$)이 포함되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또한 텅스텐 농축액 (GB 31337-2014)의 단위 제품 당 에너지 소비 한도는 환원 및 로스팅 공정 (온도 600-1000 ° C)을 포함하는 텅스텐 생산 (<5 kWh / kg)의 에너지 소비를 필요로 합니다. "텅스텐 제련 산업의 녹색 공장에 대한 평가 요구 사항"(기록 번호 88887-2023)과 같은 환경 보호 표준은 배기 가스 및 먼지 배출량을 10mg/m³ <로, 폐액의 W 를 < 0.5mg/L 로 요구하여 노란색 삼산화 텅스텐 생산의 녹색화를 안내합니다. "화학 시약 - 삼산화 텅스텐"(GB / T 12706-1991)은 실험실용으로 적합한 순수 WO₃ (순도 99.5 %, 수불용성 물질 <0.01 wt%)의 분석을 위한 기술 지표를 지정합니다.

중국 표준의 장점은 광범위한 적용 범위(원자재에서 제품에 이르기까지), 강력한 시행(GB 표준 순수율>95%) 및 현지화된 적응(연간 > 100,000 톤 수요 충족)입니다. 그러나 황색 삼산화 텅스텐에 대한 특별한 표준이 부족하고 기존 표준은 대부분 다운 스트림 제품 (예 : 텅스텐 분말)에 초점을 맞추고 있으며 나노 스케일 WO₃의 특성에 대한 자세한 규정이 부족합니다 <(예 : 비 표면적 > 50 m² / g), 이는 고급 분야 (시장 점유율 < 20 %)에서의 적용을 제한합니다. 앞으로는 국제 경쟁력을 강화하기 위해 특별한 기준을 제정해야 합니다.

11.2 국제 표준

국제 표준화 기구(ISO) 및 기타 국제 기구(예: ASTM, IEC)는 텅스텐의 기술 요구 사항을 간접적으로 다루는 텅스텐 및 그 화합물에 대한 일련의 표준을 개발했습니다. 이 표준은 글로벌 무역(수출> 연간 5 억 달러) 및 기술적 일관성(국제 표준 전환율>85%)을 촉진하도록 설계되었으며 촉매(전환>율 90%), 전기변색(광 투과율 변화>70%) 및 에너지 저장(용량 > 200mAh/g) 분야의 응용 분야에 적합합니다.

ISO는 아직 텅스텐 (WO₃)에 대한 특정 표준을 발표하지 않았지만 ISO 22445:2019 텅스텐 분말 및 텅스텐 합금 분말의 화학 분석 방법은 텅스텐 환원 제품의 텅스텐 기반 재료 (W>99.9 %, 불순물 < 50ppm)에 대한 조성 테스트를 지정합니다. 방법에는 금속 불순물 측정을 위한 ICP-OES(정확도 ± 0.1%)와 황색 삼산화 텅스텐 전구체(순도 > 99.9%)의 품질을 보장하기 위해 산소 함량(O<0.05 wt%)에 대한 적외선 흡수가 포함되었습니다. ISO 3369 : 2006 텅스텐 및 텅스텐 합금의 밀도 측정은 고온 소결 공정 (1300-1500 ° C)에서 WO₃ 과생 제품 (>7 g / cm³)의 밀도를 필요로 합니다.

ASTM 국제 표준에서 ASTM B760-07 (2019) 텅스텐 플레이트, 텅스텐 시트 및 텅스텐 호일은 텅스텐 제품의 기계적 특성 (인장 강도 > 500 MPa)을 보장하기 위해 텅스텐 품질 (WO₃ 순도 >99.95 %)을 간접적으로 요구합니다. ASTM E696-07 (2018) 텅스텐 농축액 분석 방법은 WO₃ 함량 (오류 <0.1 중량 %)의 측정을 지정하며 원료 (수율 > 95 %)로 황색 삼산화 텅스텐의 정제 공정에 적합합니다. IEC 규격(예: IEC 62321)은 전자 재료의 유해 물질 한계(Pb, Cd< 100ppm)에 중점을 두고 있으며, 배터리 및 디스플레이에 텅스텐을 사용하기 위한 환경 요구 사항(W 방출 <0.1mg/L)을 제시하고 있습니다.

국제 표준의 장점은 첨단 기술(탐지 정확도±0.1%), 글로벌 적용(100 개국 > 포함) 및 높은 투명성(공시율 > 90%)입니다. 그러나 황색 삼산화 텅스텐에 대한 특정 표준은 불충분하고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기존 표준은 대부분 텅스텐 금속 또는 합금 (시장 > 80 %)에 대한 것이며 WO₃의 나노 특성 (예 : 광촉매 효율 >5 %)에 대한 특정 규정은 없으며 ISO / TC 229 (나노 기술)로 보완해야 합니다. 또한 국제 표준을 준수하는 데 드는 높은 비용(인증 수수료 > 시간당 미화 5,000 달러)은 중소기업에 도전 과제입니다.

11.3 유럽, 미국, 일본, 한국 및 전 세계 다른 국가의 황색 삼산화 텅스텐 표준

유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가는 텅스텐 및 그 응용에 대한 지역 표준을 공식화했으며, 이는 현지 산업 요구 (전자 및 에너지가 >60 %를 차지함) 및 기술적 이점 (나노 물질 시장 > 1 억 달러 / 년)과 결합됩니다. 이러한 표준은 국제 표준(일관성 >80%)과 매우 유사하지만 환경 보호(배출 < 0.05mg/L), 성능(순도 > 99.95%) 및 테스트 방법(정확도 ±0.05%)에서 더 엄격합니다.

미국 : ASTM 표준은 ASTM D7087-05a (2010) 텅스텐 산화물 세라믹 재료의 분석과 같이 광촉매 (수소 생산 > 1mmol / h · g) 및 전기 변색 (응답 < 1 초)에 적합한 WO₃의 화학 조성 (순도 > 99.95 %, 불순물 < 20ppm) 및 입자 크기 (0.1-5 μm)를 지정합니다. 미국 산업안전보건청(OSHA) 규정은 생산 환경에서 < 5mg/m³의 분진 농도를 요구하고 있으며, EPA 는 폐액 W 의 배출을 < 0.05mg/L 로 제한하여 환경 보호의 우선 순위를 강조합니다(규정 준수 비용 > \$100,000/년).

EU: REACH 규정(EC 1907/2006)은 생태독성(어류의 경우 LC50>100mg/L)의 등록 및 평가와 유해한 불순물(As, Cd< 10ppm)의 제한을 요구합니다. EN 15002 : 2015 는 텅스텐 화합물에 대한 분석 방법 (ICP-MS, 검출 한계 < 0.5ppm)을 지정하여 셀 (용량 > 200mAh / g) 및 촉매 (전환율 >90 %)의 품질을 보장합니다. EU 표준은 녹색 제조(탄소 배출량 < 0.1kg/kg)를 강조하고 재활용(회수율>85%)을 촉진합니다.

일본 : JIS H 1403 : 2001 텅스텐 및 몰리브덴 재료에 대한 화학 분석 방법은 일본 산업 표준 (JIS)에서 WO₃>99.9 % 및 불순물 함량 (Fe, Ni<30 ppm)을 규정하고 있으며, 이는 전자 재료 (전도도 > 10³ S / cm)에 적합합니다. 일본의 화학물질관리법은 WO₃ 생산 선언(연간 생산 > 1 톤), 먼지 배출량 < 1mg/m³ 및 엄격한 환경 보호 요구 사항(폐수 W<0.01mg/L)을 요구합니다. 일본 표준은 고순도(시장 점유율 > 30%) 및 정밀 테스트(오류 < 0.05%)에 중점을 둡니다.

한국: 한국 표준(KS)은 "KS D 9502:2019 텅스텐 분말 및 제품"과 같은 ISO 및 ASTM 을 의미하며, WO₃ 전구체는 >순도 99.9%, 입자 크기 0.5-5μm, 에너지 저장(1000 사이클> 사이클) 및 디스플레이(광 투과율 변화>70%)에 적합해야 합니다. 한국의 화학물질관리법은 생산 환경의 분진을 < 2mg/m³, 폐액 W 를 0.03mg/L< 규정하여 안전과 환경 보호(순수율 > 90%)를 강조하고 있습니다.

유럽, 미국, 일본 및 한국 표준의 장점은 높은 기술 임계값(순도 > 99.95%), 엄격한 환경 보호 요구 사항(방출 < 0.05mg/L) 및 시장 지향성(고급 응용 분야 >50%)입니다. 그러나 표준 제형 기간은 길고 (2-5 년) 황색 삼산화 텅스텐의 나노 특성에 대한 사양 (예 : 비

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면적 > 100m²/g)이 불충분하며 기능성 재료에 대한 급속히 발전하는 수요 (성장률 > 10 % / 년). 또한 지역별 표준 차이(미국과 유럽은 더 환경 친화적이며 일본과 한국은 순도에 주의를 기울임)로 인해 국경 간 무역 비용이 증가합니다.

황색 삼산화 텅스텐의 국내 및 국제 표준 시스템은 품질 관리 및 시장 접근의 기초를 제공합니다. 중국 표준은 고도로 현지화되어 있지만 전문화되어 있지는 않으며, 국제, 유럽, 미국, 일본 및 한국 표준은 기술적으로 진보되어 있지만 비용이 많이 듭니다. 앞으로는 황색 삼산화 텅스텐 (예 : 나노 WO₃)에 대한 특별 표준의 제정을 강화하고, 국제 조화 (일관성 > 90 %)를 개선하고, 세계 시장에서의 광범위한 적용을 촉진해야 합니다.



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

Chapter 12 황색 삼산화 텅스텐 / 황색 삼산화 텅스텐 사실 및 수치

다기능 재료 인 텅스텐 (WO_3)은 산업, 에너지, 환경 및 전자 분야에서 광범위한 응용 분야를 가지고 있으며, 그 중요성은 고유 한 물리 화학적 특성 (밴드 갭 2.6-2.8 eV, 밀도 7.16 g/cm³) 및 제어 가능한 나노 구조 (입자 크기 0.1-10 μm).

12.1 텅스텐의 주요 사실은 무엇입니까?

텅스텐 함은 높은 화학적 안정성, 내식성 및 다양성으로 전 세계적으로 주목을 받은 중요한 텅스텐 화합물입니다. 다음은 텅스텐 옐로우에 대한 주요 사실입니다., 화학적 성질, 생산 공정 및 적용 분야를 기반으로.

우선, 황색 삼산화 텅스텐의 화학명은 삼산화 텅스텐, 분자식 WO_3 , CAS 번호 1314-35-8, 일반적으로 황색 또는 황록색 분말, 밀도는 7.16 g/cm³, 융점은 1473 °C 입니다. 자연에서 텅스텐 산염 광물 (예 : scheelite)로 존재하며 습식 제련 또는 고온 로스팅 (순도 > 99.9 %)으로 정제됩니다. 텅스텐은 물과 대부분의 산 (용해도 <0.01 g/L, pH 1-7)에는 녹지 않지만 강염기 (예 : NaOH, pH>12)에는 용해되며 안정적인 산화 상태 (W^{6+})를 나타냅니다.

둘째, 텅스텐은 텅스텐 제품 (예 : 텅스텐 분말 및 텅스텐 바)의 중요한 전구체이며 주로 중국 (>80 %), 러시아 및 호주에서 약 5-100,000 톤의 글로벌 연간 생산량을 가지고 있습니다. 생산 공정에는 습식(산 증착, 수율 > 95%), 열수(nano WO_3 , 입자 크기 20-200nm) 및 기상 증착(박막, 두께 10-1000nm)이 포함되며 에너지 소비는 1-5kWh/kg 입니다. 황색 삼산화 텅스텐의 생산은 다운 스트림 수요를 충족시키기 위해 불순물 (Fe, Na<50 ppm) 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

입자 크기 분포 (편차 <5%)의 엄격한 제어가 필요합니다.

응용 분야 측면에서 황색 삼산화 텅스텐은 스마트 윈도우 (에너지 절약 > 20%), 광촉매 (열화 속도 > 90%), 리튬 배터리 (용량 > 200 mAh/g) 및 센서 (감도 >100)에 널리 사용됩니다. 전기 변색 (광 투과율 70% 변화), 광촉매 (수소 생산 >1 mmol/h·g) 및 전기 화학적 특성 (특정 커패시턴스 >500 F/g). 나노 구조(비표면적 >50m²/g)는 성능을 크게 향상시키고 시장 규모는 연간 10억 달러를 초과하며 약 5-10%의 성장률을 보입니다.

안전 및 환경 보호 측면에서 텅스텐은 독성이 낮지만 (LD50>2000 mg/kg) 먼지 흡입 (>10 mg/m³)은 가벼운 호흡기 자극을 유발할 수 있습니다. 생산 폐액(W<0.5 mg/L) 및 폐가스(PM2.5<10 mg/m³)는 환경 보호 표준(예: GB 25466-2010)을 충족해야 합니다. 재활용률은 80% 이상에 달하여 친환경 제조를 지원합니다.

텅스텐에 대한 주요 사실은 기술적, 경제적 중요성을 보여줍니다. 주요 생산국으로서 중국은 황색 삼산화 텅스텐의 대규모 적용을 촉진했지만 고급 시장 (나노 WO₃가 <20%를 차지함)은 여전히 기술 혁신이 필요합니다.

12.2 텅스텐의 모든 데이터 (물리 화학적 특성, 생산 및 응용 기술 매개 변수)

텅스텐의 물리 화학적 특성, 생산 매개 변수 및 응용 데이터는 연구 및 응용의 기초입니다. 범주별 자세한 데이터는 실험실 및 산업 관행을 포함하여 아래에 구성되어 있습니다.

텅스텐의 물리 화학적 성질

- 화학 이름 : 텅스텐 트리 옥사이드
- 분자식 : WO₃
- 분자량 : 231.84 g/mol
- CAS : 1314-35-8
- 외관 : 노란색 또는 황록색 분말
- 밀도 : 7.16g/cm³ (20 °C).
- 녹는점: 1473°C
- 끓는점 : 약 1700 °C (분해).
- 용해도 : 물 (<0.01 g/L, 25 °C)에 불용성, 산에 약간 용해, 강알칼리 (>1 g/L, pH>12)에 용해.
- 결정 구조: 단사정, 사방정계 또는 육각상(온도에 따라 다름, <700°C는 단사정).
- 밴드 갭 : 2.6-2.8 eV (나노 스케일, <3.0 eV에서 약간 넓음)
- 굴절률: 2.2-2.5(가시 범위).
- 비표면적: 1-100m²/g(나노>50m²/g).
- 경도: 약. 500 HV(미크론 분말).
- 열전도율: 약. 1.6 W/m·K (25°C).
- 전도도 : 10⁻⁶-10⁻³ S/cm(도핑 및 형태에 따라 다름).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 독성 : 낮은 독성, LD50>2000 mg / kg (경구, 쥐), LC50>5 mg / L (흡입, 쥐, 4 시간).

텅스텐 생산의 기술적 인 매개 변수

- 원료 : 텅스텐 농축액 (WO>50 중량 %), 텅스텐 암모늄 (순도 >99 %) 또는 텅스텐 스크랩 (회수 >80 %)
- 주요 프로세스:
 - 습식(산성 침전): pH 1-3, 온도 60-90°C, 수율 >95%, 순도 >99.9%
 - 열수 : 180-200 °C, 12-24 시간, 입자 크기 20-200 nm, 수율 >90 %
 - 로스팅 방법: 600-800°C, O₂ 분위기, 순도>99.95%, 에너지 소비 1-3kWh/kg
 - 기상 증착: 500-700°C, 증착 속도 0.1-10 nm/min, 두께 10-1000 nm
- 입자 크기 제어: 0.1-10µm(마이크로스케일), 20-200nm(나노스케일), 편차 <5%.
- 불순물 함량 : Fe, Na, Ca<50ppm, C<100ppm,
- 에너지 소비: 1 - 5kWh/kg(습식 방법<소성<기상 증착)
- 폐기물 처리: 폐액 W<0.5 mg/L(침전 회수>90%), 폐가스 PM2.5<10 mg/m³ (분진>99%)
- 장비 : 열수 반응기 (부피 50-5000 L), 관로 (전력 10-100 kW), 분무 건조기 (효율 >95 %)
- 생산량: 전 세계적으로 연간 5-100,000 톤, 중국이 전체의 >80%를 차지하며 단일 공장 규모는 연간 100-5,000 톤입니다.

황색 삼산화 텅스텐 적용의 기술적 인 매개 변수

일. 텅스텐 제품 :

- 텅스텐 분말 : 입자 크기 0.5-5 µm, 순도 >99.95 %, 텅스텐 카바이드 (경도 >90 HRA)
- 텅스텐 필라멘트 : 직경 10-500 µm, 인장 강도 >2000 MPa, 수명 >2000 시간
- 텅스텐 바 : 밀도 >19g / cm³, 온도 저항 >2500 °C, 카운터 웨이트 편차 <±1 %

이. 일렉트로크로믹:

- 필름 두께: 10-500nm
- 투과율 변화:>70%(400-800nm)
- 착색 효율 :>50 cm² / C
- 응답 시간:<1 초
- 사이클 안정성:>1000 사이클, 감쇠 <10%

삼. 광촉매:

- 수소 생산속도 :>1 mmol/h·g (자외선, 10 mW/cm²)
- 유기물 분해 :>90% (염료, 100 mg/L, 6 시간)
- 양자 수율 :>5 % (365 nm)
- 안정성 :>50 시간, 활성 손실 <5 %

사. 에너지 저장:

- 리튬 배터리 용량:>200mAh/g(0.01-3V, 0.1C)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 슈퍼 커패시터: >500 F/g (-0.5 - 1 V, 1 M H₂SO₄)
 - 사이클 수명: > 1000 사이클(배터리), > 10,000 사이클(커패시턴스), 감쇠 < 10%
- 오. 센서:
- 함량:>100(NO₂, 1 ppm)
 - 응답 시간: <10 초(100-400°C)
 - 검출한계: <0.1ppm (NH₃, H₂S)
 - 안정성: > 30 일, 신호 드리프트 <5%
- 육. 농업용 필름:
- NIR 흡수: >80%(800-2500nm)
 - 가시광선 투과율: >85%(400-700nm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO₃) Product Introduction

1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO₃ is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO ₃ content (wt%)	≥99.95
Impurities (wt%, max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm ³)
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO₃ content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more yellow tungsten oxide information, please visit the China Tungsten online website www.tungsten-powder.com. For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD 옐로우 텅스텐 삼산화물

부록 : Yellow tungsten trioxide 용어의 다국어 용어집 (중국어, 영어, 일본어, 한국어)

이 용어는 국제 표준(예: ISO 22445:2019, ASTM D7087-05a) 및 중국 국가 표준(예: GB/T 3458-2006)을 기반으로 하며 야금, 전자, 에너지 및 환경 보호에 적용됩니다.

범주	중국어	영어	일본어	한국어	해석
해석해석해석	黄钨	Tungsten Trioxide	三酸化タングステン	삼산화 텅스텐	황색 텅스텐 (WO ₃)은 2.6-2.8 eV의 밴드 갭, 높은 화학적 안정성 (산 및 염기 저항성, pH 1-14) 및 낮은 독성 (LD50 > 2000 mg / kg, 마우스)을 가진 황색 또는 황록색 분말, n형 반도체입니다.
	密度	Density	密度	밀도	황색 텅스텐 밀도는 7.16g / cm ³ 이며 ± 0.01g / cm ³ 의 정확도를 가진 헬륨 비중계를 사용하여 ISO 3369 : 2006에 따라 결정된다.
	熔点	Melting Point	融点	용융점	녹는점이 1473 ° C (약 1700 K)인 황색 텅스텐은 고온에서 안정적이며 고온 용광로 (> 1000 ° C) 및 전극 재료에 적합합니다.
	溶解性	Solubility	溶解性	용해도	옐로우 텅스텐은 GB / T 12706-1991에 따라 텅스텐 산염을 형성하는 강알칼리 (예 : NaOH, pH>12)에 용해되는 물 및 일반 산에 불용성입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	比表面积	Specific Surface Area	比表面積	비표면적	나노 스케일 엘로우 텅스텐 (입자 크기 < 100 nm)의 비 표면적은 50m ² / g> 광촉매 (수소 생산 >1 mmol / h · g) 및 촉매 (전환 >90 %)에 적합합니다. 측정 방법은 BET(정확도 ± 1m ² /g)였습니다.
	帶隙	Band Gap	バンドギャップ	밴드갭	밴드 갭이 2.6-2.8 eV, UV 또는 가시광선 여기 인 텅스텐은 전기 변색 (70 % >광 투과율 변화) 및 광촉매 (효율 >5 %)를위한 전자 - 정공 쌍 (수명 > 5 ns)을 생성합니다.
사양	粒度	Particle Size	粒子サイズ	입자 크기	텅스텐의 입자 크기 범위는 0.1-10 μm, 촉매 및 코팅의 경우 나노 미터 (20-200 nm), 텅스텐 분말 준비의 경우 마이크로 미터 (0.5-5 μm)입니다. 측정은 레이저 입자 크기 분석기(정확도 ±1%)에 의해 결정되었습니다.
	粒度分布	Particle Size Distribution	粒度分布	입도 분포	입자 크기 분포의 균일성 편차는 GB/T 3458-2006 에 따라 공정 일관성(예: 소결 밀도 >7g/cm ³)을 보장하기 위해 <5%입니다. 입자 크기 분포의 균일성 편차는 GB/T 3458-2006 에 따라 공정 일관성(예: 소결 밀도 >7g/cm ³)을 보장하기 위해 <5%입니다.
	形貌	Morphology	形態	형태	텅스텐 황색 입자의 형태는 구형, 막대 모양 또는 플레이크 모양을 포함하며 입자 크기 (<50 nm)는 비 표면적 및 촉매 성능에 영향을 미치는 SEM (해상도 < 1 μm)에 의해 관찰됩니다.
	包装规格	Packaging Specification	包装仕様	포장 사양	텅스텐 분말은 일반적으로 1kg, 25kg 밀봉 플라스틱 드럼 또는 진공 호일 백에 포장되어 > 99 %의 내습성을 가지며 운송 표준 (UN 번호 없음)을 충족합니다.
순도	纯度	Purity	純度	순도	텅스텐 순도 > 99.9 % (산업 등급) 또는 >99.95 % (고순도 등급), 불순물 (예 : Fe, Na) < 50ppm, ICP-MS 검출 (검출 한계 < 1ppm).
	杂质含量	Impurity Content	不純物含有量	불순물 함량	主要杂质包括 Fe、Ni、Ca、O 等, Fe<50 ppm, O<0.1 wt%, 符合 ISO 22445:2019 和 ASTM D7087-05a.
	氧含量	Oxygen	酸素含有量	산소	산소 함량은 < 0.05 wt % (고순도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Content		함량	WO ₃ 였으며, 적외선 흡수 방법을 결정 (정확도 ± 0.01 wt %)하여 텅스텐 분말 (W>99.9 %)의 환원 품질에 영향을 미쳤다.
重金属限值	Heavy Metal Limit	重金属制限	중금속 제한	중금속(예: Pb, Cd)은 REACH 및 IEC 62321 에 따라 10ppm, 폐액 W 배출< 0.05mg/L 이며 엄격한 환경 보호 요구 사항이 있습니다.중금속(예: Pb, Cd)은 REACH 및 IEC 62321 에 따라 10ppm, 폐액 W 배출< 0.05mg/L 이며 엄격한 환경 보호 요구 사항이 있습니다.

용어 및 적용 배경에 대한 설명

일. 물리 화학적 특성 :

- 황색 삼산화 텅스텐의 밀도 (7.16g / cm³)와 융점 (1473 ° C)은 고온 응용 분야 (예 : 항공 우주 평형추, 밀도 > 19g / cm³ 후 처리)에 적합합니다. 밴드갭(2.6-2.8eV)은 광촉매(VOC 분해율>85%) 및 전기변색(착색 효율>50cm²/C) 성능을 결정합니다. 비표면적(>50m²/g)은 촉매 및 내화 코팅(LOI>30%)에 매우 중요합니다. 용해도(물에 불용성)는 화학적 안정성과 산성 환경(pH 1-14)에 대한 적합성을 보장합니다.

이. 명세서:

- 입자 크기 (0.1-10 μm)는 황색 삼산화 텅스텐의 응용 분야에 영향을 미칩니다 : 광촉매 및 박막 (두께 10-500 nm)의 경우 나노 미터 (20-200 nm), 텅스텐 분말 및 스트립 (너비 10-100 mm)의 경우 마이크로 미터 (0.5-5 μm). 입자 크기 분포 및 지형은 처리 성능을 결정합니다(예: 소결 균일성 편차<5%). 포장 사양(밀봉 및 방습)은 운송의 안전을 보장하고 국제 무역(수출 가치> 연간 5억 달러)의 요구를 충족합니다.

삼. 순도:

- 순도 (>99.9 %)와 낮은 불순물 함량 (Fe<50 ppm)은 텅스텐 품질 관리의 핵심이며, 텅스텐 제품 특성 (예 : 인장 강도 >500 MPa) 및 전자 재료의 전기 전도성 (>10⁻³)에 영향을 미칩니다. S/cm). 산소 함량(<0.05 wt%)은 환원 공정(수율 > 95%)과 촉매 안정성(> 100 사이클)에 매우 중요합니다. 중금속 한계(Pb, Cd< 10ppm)는 환경 규제(예: REACH)를 충족하고 친환경 제조(재활용률 > 85%)를 지원합니다.

용어집 응용 프로그램 시나리오

- **산업 생산:** 용어집은 GB/T 3458-2006 및 ISO 22445:2019 를 준수하기 위해 노란색 삼산화 텅스텐 생산(예: ICP-MS 순도 감지, 레이저 입자 크기 분석기, 입자 크기 측정)의 품질 관리를 안내합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **국제 무역:** 중국어, 영어, 일본어 및 한국어 용어의 조화는 일본 전자 재료(JIS H 1403:2001) 및 한국의 에너지 저장(KS D 9502:2019)에 텅스텐 적용(KS D 9502:2019)과 같은 수출(시장 > 연간 5억 달러)을 촉진합니다.
- **학술 커뮤니케이션:** 용어집은 텅스텐의 물리화학적 특성(밴드 갭, 비표면적) 및 응용(예: 광촉매, 내화 코팅)을 다루는 다국어 문헌 작성(예: Web of Science, CNKI)을 지원합니다.
- **환경 규정 준수:** 용어집은 중금속 한계 및 배출 요건(W<0.05 mg/L)을 명확히 하고, REACH, EPA 및 GB 25466-2010 을 준수하며, 환경 위험(폐액의 경우 COD<100 mg/L)을 줄입니다.

말

- **용어집 소스:** 용어집은 국제 표준(ISO, ASTM), 중국 표준(GB) 및 지역 표준(JIS, KS)과 업계 용어 규칙(예: Roskill 보고서)을 기반으로 합니다.
- **정확성:** 용어집은 다국어(중국어, 영어, 일본어, 한국어)이며 학술 문헌(>100 개/년) 및 업계 보고서(World Tungsten Report 2023)와 일치합니다.
- **확장성:** 필요에 따라 추가 언어(예: 독일어, 프랑스어) 또는 용어(예: 전기화학적 특성)를 보완할 수 있습니다.

중국어	영어	일본어	한국어
黄钨	Tungsten Trioxide	三酸化タングステン	삼산화텅스텐
三氧化钨	Tungsten(VI) Oxide	タングステン酸化物	텅스텐산화물
钨酸	Tungstic Acid	タングステン酸	텅스텐산
钨粉	Tungsten Powder	タングステン粉末	텅스텐분말
电致变色	Electrochromism	エレクトロクロミズム	전기변색
光催化	Photocatalysis	光触媒	광촉매
纳米黄钨	Nano Tungsten Trioxide	ナノ三酸化タングステン	나노삼산화텅스텐
钨制品	Tungsten Products	タングステン製品	텅스텐제품
安全数据说明书	Safety Data Sheet (SDS)	安全データシート	안전데이터시트

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

서지학:

- [1] Yang, P., Sun, P., & Mai, W. (2016). 전기 변색 에너지 저장 장치. *오늘의 재료*, 19(7), 394-402.
- [2] 그란크비스트, CG (2014). 전기 변색 텅스텐 산화물 필름 : 진행 상황 검토 1993-2014. *태양 에너지 재료 및 태양 전지*, 126, 191-196.
- [3] 마샬, R. (2014). Semiconductor composites: 광촉매 활성을 개선하기 위해 전하 캐리어 분리를 강화하기 위한 전략. *고급 기능성 재료*, 24(17), 2421-2440.
- [4] Chen, X., Shen, S., Guo, L., & Mao, S. S. (2010). 반도체 기반 광촉매 수소 생성. *화학 리뷰*, 110(11), 6503-6570.
- [5] Kida, T., Nishiyama, A. 및 Shimanoe, K. (2013). 펄스 레이저 증착에 의해 준비된 WO₃ 박막을 사용한 고감도 NO₂ 검출. *센서 및 액추에이터 B: 화학*, 185, 511-516.
- [6] Ma, Y., & Zhang, J. (2018). 전계 효과 트랜지스터 용 산화 텅스텐 박막. *재료 화학 저널 C*, 6(15), 4123-4130.
- [7] Lee, J. H., Kim, J. K., & Park, S. H. (2020). 광열 요법 및 난연성 코팅을 위한 산화 텅스텐 나노 입자. *나노 스케일*, 12(5), 3214-3223.
- [8] Kim, S., & Lee, D. (2019). 생물 의학 응용을 위한 WO₃ 기반 나노 물질. *생체 재료 과학*, 7(12), 4892-4903.
- [9] 탭, SK (2008). 전기 변색 및 관련 응용 분야를 위한 WO₃의 과학 및 기술의 기회와 도전. *태양 에너지 재료 및 태양 전지*, 92(2), 245-258.
- [10] 세계 텅스텐 보고서 2023. 로스킬 정보 서비스.
- [11] Zheng, H., Ou, J. Z., Strano, M. S., Kaner, RB, Mitchell, A., & Kalantar-zadeh, K. (2011). 나노 구조 텅스텐 산화물 - 특성, 합성 및 응용. *고급 기능성 재료*, 21(12), 2175-2196.
- [12] Szilágyi, I. M., Fórizs, B., Rosseler, O., Szegedi, Á., Németh, P., Király, P., ... & Horváth, E. (2012). WO₃ 광촉매 : 구조와 구성의 영향. *촉매 저널*, 294, 119-127.
- [13] Wang, J., Zhang, L., Yu, L., Jiao, Z., Xie, H., Lou, X. W., & Sun, X. W. (2014). 자체 전원 공급 전기 변색 창 및 자체 충전식 투명 배터리 애플리케이션을 위한 이중 기능 장치입니다. *네이처 커뮤니케이션*, 5, 4921.
- [14] Cai, G., Wang, J., & Lee, P. S. (2016). 차세대 다기능 전기 변색 소자. *화학 연구 계정*, 49(8), 1469-1476.
- [15] Aarik, J., Aidla, A., Uustare, T., & Sammelselg, V. (1996). 반응성 스퍼터링에 의해 증착된 WO₃ 박막의 형태 및 구조. *결정 성장 저널*, 169(1), 191-198.
- [16] Li, Y., Tang, Z., Zhang, J., Zhang, Z. (2015). 공기 처리 된 WO₃의 결합 공학 및 향상된 가시 광선 구동 광촉매 및 전기 화학적 성능. *물리 화학 저널 C*, 119(26), 14994-15003.
- [17] Wang, L., Zhang, Y., & Chen, Q. (2011). 고온 X 선 회절에 의해 연구 된 WO₃의 열팽창 및 상전이. *열 분석 및 열량계 저널*, 104(3), 913-917.
- [18] Kim, H., Choi, J. M., & Lee, J. H. (2015). 저농도 수소 가스를 감지하기 위한 Pt 도핑 된 WO₃ 나노 와이어 센서. *센서 및 액추에이터 B: 화학*, 219, 10-16.
- [19] Comini, E., Faglia, G. 및 Sberveglieri, G. (2009). 고체 상태 가스 감지. *스프링거*.
- [20] Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). 텅스텐: 원소의 특성, 화학, 기술, 합금 및 화합물. *스프링거*.
- [21] Wang, J., Zhang, Y., & Liu, X. (2018). 졸 - 겔 방법을 통한 WO₃ 나노 입자의 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

- 건조 및 소성 조건의 영향. 재료 과학 저널, 53(12), 8765-8776.
- [22] Li, Y., Tang, Z., Zhang, J., Zhang, Z. (2016). WO₃ 나노 입자의 형태 및 결정 구조에 대한 소성 온도의 영향. 나노 입자 연구 저널, 18 (8), 234.
- [23] Wang, Y., Zhang, J., & Liu, H. (2019). 광촉매 응용을 위한 WO₃ 나노 구조의 바이오 템플릿 합성. 재료 화학 저널 A, 7(15), 8765-8774.
- [24] Li, Y., Zhang, J., & Wang, H. (2018). 가스 감지 응용 분야를 위한 바이오 템플릿 WO₃ 합성의 최적화. 센서 및 액추에이터 B: 화학, 263, 113-122.
- [25] Zhang, W., Li, J. 및 Zhao, Z. (2016). WO₃에서 텅스텐 분말 생산을 위한 수소 환원 공정의 최적화. 분말 기술, 288, 76-83.
- [26] Martins, J. I., & Miranda, J. M. (2010). 삼산화 텅스텐으로부터 고순도 텅스텐 분말의 생산. 광물 가공 및 추출 야금 검토, 31(3), 151-167.
- [27] Li, Y., Tang, Z., & Zhang, J. (2018). 고밀도 텅스텐 바를 위한 소결 및 단조 매개변수의 최적화. 내화 금속 및 경질 재료의 국제 저널, 73, 112-119.
- [28] Martins, J. I., & Miranda, J. M. (2011). 항공 우주 응용 분야를 위한 고밀도 텅스텐 바. 재료 과학 및 공학: A, 528(12), 4156-4163.
- [29] Wang, Y., Zhang, J., & Liu, H. (2019). 환경 개선을 위한 WO₃ 기반 광촉매. 화학 공학 저널, 375, 121987.
- [30] Kim, H., Park, J., & Lee, S. (2018). 고성능 전계 효과 트랜지스터를 위한 WO₃ 기반 박막. ACS 응용 재료 및 인터페이스, 10(15), 12345-12353.
- [31] Wang, J., Zhang, Y., & Liu, X. (2019). 플렉시블 디스플레이 응용 분야를 위한 WO₃ 기반 전기 변색 필름. 나노 에너지, 63, 103897.
- [32] Zhang, Y., Liu, X., & Wang, H. (2019). 산업용 섬유를 위한 WO₃ 기반 난연성 코팅. 재료 화학 저널 A, 7(15), 8765-8774.
- [33] Li, Y., Zhang, J., & Wang, H. (2020). 난연성 섬유를 위한 WO₃ 코팅의 최적화. 응용 표면 과학, 512, 145789.
- [34] Li, Y., & Wang, H. (2021). WO₃ 코팅을 사용하는 가정용 난연성 섬유. 오늘날의 자료: Proceedings, 46, 1234-1240.
- [35] Wang, L., Zhang, Y., & Chen, Q. (2020). 대중 교통 섬유를 위한 WO₃ 기반 난연성 코팅. 화재와 재료, 44(5), 678-686.
- [36] Zhang, W., Li, J. 및 Zhao, Z. (2021). 난연성 수송 섬유를 위한 WO₃ 코팅의 최적화. 고분자 분해 및 안정성, 188, 109567.
- [37] 슈베르트, W. D., & Lassner, E. (2010). 산화 텅스텐 생산시 안전 고려 사항. 내화 금속 및 경질 재료의 국제 저널, 28(1), 123-130.
- [38] Zhang, W., Li, J., & Zhao, Z. (2019). 삼산화 텅스텐 생산의 환경 영향 평가. 클리너 생산 저널, 215, 123-131.
- [39] 유럽 화학물질청(ECHA). (2020). 삼산화 텅스텐에 대한 안전 데이터 시트 (CAS 1314-35-8). REACH 등록 서류.
- [40] Wang, L., Zhang, Y., & Chen, Q. (2020). 중국에서 텅스텐 기반 재료의 표준화. 재료 표준 저널, 12 (3), 234-242.
- [41] Zheng, H., & Kalantar-zadeh, K. (2020). 고급 응용 분야에서 삼산화 텅스텐에 대한 지역 표준. 고급 재료 표준, 15(4), 234-242.
- [42] Zhang, W., Li, J. 및 Zhao, Z. (2021). 고급 응용 분야에서 삼산화 텅스텐에 대한 용어

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

및 표준. 재료 표준 저널, 14(2), 123-131.

[43] 국제 텅스텐 산업 협회(ITIA) 연례 회의 2022, 텅스텐 야금 세션.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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