

텅스텐 보라이드 백과사전

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

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

지난 30 년 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 30 년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 전 세계 13 만 명 이상의 고객에게 50 만 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 30 년 이상의 업계 경험을 바탕으로 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 지식, 기술, 텅스텐 가격 및 시장 동향 분석을 작성하여 공개하고 텅스텐 업계와 자유롭게 공유해 왔습니다. 1990 년대부터 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 전자상거래 및 국제 무역, 그리고 초경합금 및 고밀도 합금의 설계 및 제조 분야에서 30 년 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

제 1 장 서론

- 1.1 텅스텐 보라이드 개요
- 1.2 텅스텐 보라이드의 연구 배경 및 중요성
- 1.3 텅스텐 보라이드의 역사적 발전
- 1.4 텅스텐 보라이드 책의 구조 및 지침

제 2 장 텅스텐 보라이드의 화학적 및 물리적 특성

- 2.1 텅스텐 보라이드의 화학적 조성(WB, WB₂, W₂B 등)
- 2.2 텅스텐 보라이드의 결정구조 및 결합 특성
- 2.3 텅스텐 보라이드의 열역학 및 안정성
- 2.4 텅스텐 보라이드의 전기적 및 자기적 특성
- 2.5 텅스텐 보라이드의 기계적 성질(경도, 인성)

제 3 장 텅스텐 보라이드에 대한 이론적 연구

- 3.1 텅스텐 보라이드의 밀도 함수 이론(DFT) 분석
- 3.2 텅스텐 보라이드의 전자 구조 및 밴드 이론
- 3.3 텅스텐 보라이드의 표면 및 계면 특성
- 3.4 텅스텐 보라이드의 결합 및 도핑 효과
- 3.5 텅스텐 보라이드의 계산 시뮬레이션 응용

제 4 장 텅스텐 보라이드의 원료 및 자원

- 4.1 텅스텐 및 붕소 광물자원 텅스텐 붕화물 원료
- 4.2 텅스텐 붕화물 원료 정제 기술
- 4.3 텅스텐 보라이드 글로벌 공급망 및 지정학적 영향
- 4.4 텅스텐 보라이드 자원의 지속 가능성 및 대체물

제 5 장 텅스텐 보라이드의 제조 기술

- 5.1 텅스텐 보라이드의 고온 고상 합성
- 5.2 텅스텐 보라이드의 화학 기상 증착(CVD)
- 5.3 텅스텐 보라이드의 플라즈마 지원 합성
- 5.4 텅스텐 보라이드의 기계적 합금화 및 볼 밀링
- 5.5 텅스텐 보라이드 나노물질의 제조
- 5.6 텅스텐 보라이드의 공정 최적화 및 확장

제 6 장 텅스텐 보라이드의 품질관리 및 검사

- 6.1 텅스텐 보라이드의 화학성분 분석(ICP-MS, XRF)
- 6.2 텅스텐 보라이드의 결정구조 검출(XRD, TEM)
- 6.3 텅스텐 보라이드의 표면 형태 및 입자 크기 분석(SEM, AFM)
- 6.4 텅스텐 보라이드의 성능 시험(경도, 전도도)
- 6.5 텅스텐 보라이드의 품질 기준(ISO, GB/T)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 7 장 경질코팅에 텅스텐 보라이드의 적용

- 7.1 텅스텐 보라이드 코팅의 성능 이점
- 7.2 절삭 공구에서의 텅스텐 보라이드 코팅 적용
- 7.3 금형에서의 텅스텐 보라이드 코팅 적용
- 7.4 텅스텐 보라이드 코팅의 제조 및 최적화
- 7.5 마모 및 부식 환경에서의 텅스텐 보라이드 코팅 성능
- 7.6 텅스텐 보라이드 코팅의 시장 및 미래 동향

8 장 고온 재료에서의 텅스텐 보라이드의 응용

- 8.1 텅스텐 보라이드 항공우주 고온 부품
- 8.2 고온로 및 열 차단재에서의 텅스텐 보라이드의 적용
- 8.3 텅스텐 보라이드의 열전도도 및 열팽창 특성
- 8.4 고온 환경에서 텅스텐 보라이드의 산화 및 내식성
- 8.5 고온텅스텐보라이드 소재의 제조기술
- 8.6 텅스텐 보라이드 고온 재료의 응용 전망 및 과제

제 9 장 전자소자에서의 텅스텐 보라이드의 응용

- 9.1 전도성 필름에서의 텅스텐 보라이드의 적용
- 9.2 전극 재료에서의 텅스텐 보라이드의 적용
- 9.3 센서에서의 텅스텐 보라이드의 응용
- 9.4 반도체 소자에서 텅스텐 보라이드의 잠재력
- 9.5 텅스텐 보라이드 전자소자 제조 기술
- 9.6 텅스텐 보라이드 전자소자의 시장 및 개발 동향

제 10 장 텅스텐 보라이드의 촉매 및 화학적 응용

- 10.1 전기 촉매에서 텅스텐 보라이드의 응용
- 10.2 광촉매에서의 텅스텐 보라이드의 응용
- 10.3 화학 반응 촉매에서의 텅스텐 보라이드의 응용
- 10.4 텅스텐 보라이드 촉매의 표면 화학 및 활성 부위
- 10.5 텅스텐 보라이드 촉매의 제조 및 최적화
- 10.6 텅스텐 보라이드 촉매 응용의 산업적 전망 및 과제

제 11 장 텅스텐 보라이드의 생물학적 응용

- 11.1 생체 의료용 코팅에 텅스텐 보라이드의 적용
- 11.2 약물 전달에 있어서 텅스텐 보라이드 나노입자의 응용
- 11.3 바이오센서에서의 텅스텐 보라이드의 응용
- 11.4 텅스텐 보라이드의 생체적합성 및 안전성
- 11.5 텅스텐 보라이드 생체재료 제조 기술
- 11.6 텅스텐 보라이드의 생물의학적 응용에 대한 전망과 과제

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 12 장 텅스텐 보라이드의 에너지 응용

- 12.1 배터리 소재에 대한 텅스텐 보라이드의 응용
- 12.2 연료 전지에서 텅스텐 보라이드의 응용
- 12.3 태양 전지에서 텅스텐 보라이드의 응용
- 12.4 수소 저장 물질에서 텅스텐 보라이드의 잠재력
- 12.6 텅스텐 보라이드 에너지 응용 소재 제조 기술
- 12.6 텅스텐 보라이드 에너지 응용 분야의 시장 및 개발 동향

제 13 장 텅스텐 보라이드의 기계적 및 구조적 응용

- 13.1 내마모성 코팅에 텅스텐 보라이드의 적용
- 13.2 절삭 공구에서의 텅스텐 보라이드의 적용
- 13.3 구조용 복합재료에 텅스텐 보라이드의 적용
- 13.4 텅스텐 보라이드의 기계적 성질 및 미세 구조
- 13.5 텅스텐 보라이드 기계재료의 제조 기술
- 13.6 텅스텐 보라이드 기계적 응용 분야의 시장 및 개발 동향

제 14 장 텅스텐 보라이드의 산업화 및 시장 분석

- 14.1 텅스텐 보라이드의 글로벌 시장 개요
- 14.2 텅스텐 보라이드의 생산 비용 및 가격 분석
- 14.3 텅스텐 보라이드의 산업화 기술 및 대량 생산
- 14.4 주요 산업의 텅스텐 보라이드 시장 분포
- 14.5 텅스텐 보라이드 시장의 경쟁 및 대체 분석
- 14.6 텅스텐 보라이드 산업화의 미래 동향 및 정책 영향

제 15 장 텅스텐 보라이드에 대한 표준 및 규제 요건

- 15.1 텅스텐 보라이드 관련 국제 표준 개요
- 15.2 텅스텐 보라이드에 대한 환경 및 안전 규정
- 15.3 생물의학 분야에서 텅스텐 보라이드에 대한 규제 요건
- 15.4 텅스텐 보라이드의 시험 및 인증 절차
- 15.5 텅스텐 보라이드 표준화의 지역적 차이 분석
- 15.6 텅스텐 보라이드 규제 준수의 과제 및 미래 발전

제 16 장 텅스텐 보라이드의 환경 보호 및 지속 가능한 개발

- 16.1 텅스텐 보라이드 생산에 대한 환경 영향 평가
- 16.2 텅스텐 보라이드의 친환경 제조 기술
- 16.3 텅스텐 보라이드 폐기물 처리 및 재활용
- 16.4 지속 가능한 에너지에 대한 텅스텐 보라이드의 기여
- 16.5 텅스텐 보라이드의 탄소 발자국 및 배출 감소 전략
- 16.6 텅스텐 보라이드의 지속 가능한 개발을 위한 정책 및 시장 동인

제 17 장 텅스텐 보라이드의 지능화 및 디지털 기술 응용

- 17.1 텅스텐 보라이드 생산에서의 인공지능 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 17.2 스마트 센서에서의 텅스텐 보라이드의 응용
- 17.3 텅스텐 보라이드의 디지털 품질관리 기술
- 17.4 블록체인 추적성에서 텅스텐 보라이드의 잠재력
- 17.5 텅스텐 보라이드의 지능형 제조 사례 연구
- 지능화 및 디지털화의 미래 동향

제 18 장 텅스텐 보라이드의 미래 연구 방향 및 기술 전망

- 18.1 텅스텐 보라이드의 새로운 합성 방법 탐색
- 18.2 차세대 전자소자에서 텅스텐 보라이드의 잠재력
- 18.3 텅스텐 보라이드 촉매 및 에너지 기술의 획기적인 방향
- 18.4 생의학 분야에서 텅스텐 보라이드의 혁신적 응용
- 18.5 텅스텐 보라이드의 지능적이고 친환경적인 제조의 최전선
- 18.6 텅스텐 보라이드 연구의 글로벌 협력 및 기술적 과제

부록

부록 1: 텅스텐 보라이드 용어 및 약어

- 1.1 텅스텐 보라이드 관련 용어
- 1.2 텅스텐 보라이드 약어

부록 2: 텅스텐 보라이드 참고문헌

- 2.1 텅스텐 보라이드에 관한 학술 문헌
- 2.2 텅스텐 보라이드에 관한 특허 문헌
- 2.3 텅스텐 보라이드에 대한 표준 및 규정

부록 3: 텅스텐 보라이드의 데이터 시트

- 3.1 텅스텐 보라이드의 물리적 특성
- 3.2 텅스텐 보라이드의 생산 공정 매개변수
- 3.3 텅스텐 보라이드의 응용 성능 지수

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

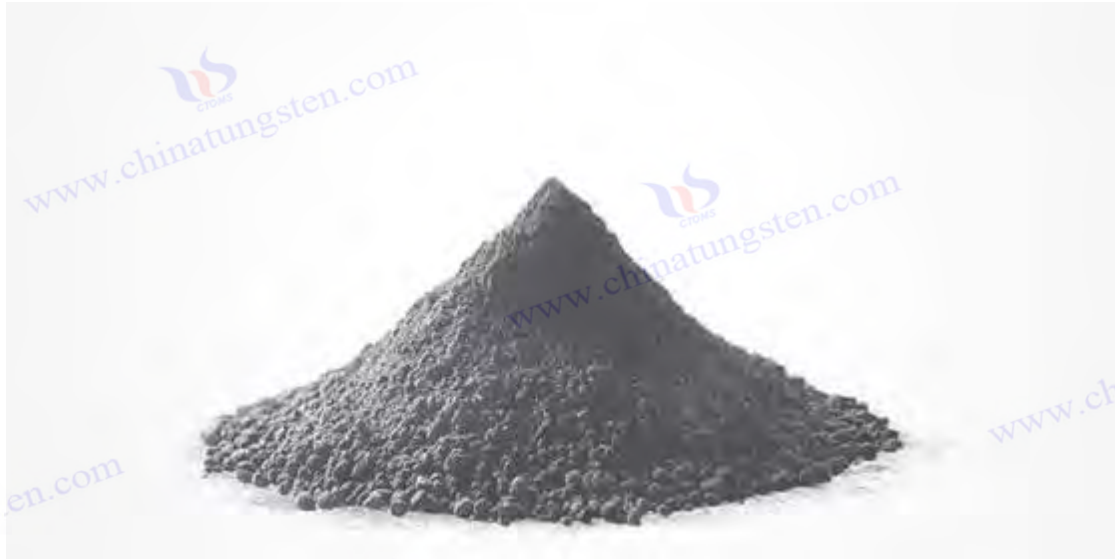
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 1 장 텅스텐 보라이드 소개

텅스텐 보라이드 (예: WB, WB₂, W₂B) 는 고성능 전이 금속 보라이드의 한 유형입니다. 탁월한 경도(>30 GPa), 고온 안정성(>2000°C) 및 탁월한 화학적 불활성으로 인해 경질 코팅, 고온 재료, 전자 장치 및 신에너지 분야에서 광범위한 응용 잠재력을 보여주었습니다(7.1 장, 9.1 장). 이 장에서는 텅스텐 보라이드의 개요, 연구 배경 및 중요성, 역사적 발전 및 구조에 대해 자세히 설명하여 독자에게 포괄적인 서론적 관점을 제공하고 후속 장(2~17 장)에서 심층적인 논의를 위한 기초를 마련합니다. 이 장의 내용은 텅스텐 보라이드의 생산 및 응용 분야에서 CTIA GROUP LTD 의 기술적 축적을 결합하여 학술 연구, 산업 개발 및 정책 수립에 대한 참고 자료를 제공하는 것을 목표로 합니다.

1.1 텅스텐 보라이드 개요

(B) 로 구성된 화합물의 한 종류입니다. 일반적인 형태는 모노보라이드 (WB), 디보라이드(WB₂) 및 펜타보라이드 (W₂B) 입니다. 그 화학적 조성 및 결정 구조는 독특한 물리적 및 화학적 특성을 부여합니다(2 장, 2.1). 텅스텐 보라이드의 모스 경도는 다이아몬드(10)에 가까운 9.5 에 도달할 수 있으며, 비커스 경도(HV)는 30~40 GPa 범위에 있으며 기존 의 초경합금(예: WC, ~20 GPa) 을 훨씬 능가합니다. 녹는점은 2600~2800°C 로 높고 열전도도는 약 20~50 W/(m·K) 로 고온 환경(예: 항공우주 부품, 8 장, 8.1)에서 우수한 성능을 발휘합니다. 또한 텅스텐 보라이드의 전기 전도도(~10⁻⁴ S/cm)와 화학적 안정성(산 및 알칼리 부식 저항성, pH 2~12)은 전극 재료 및 촉매 지지체에서의 적용을 뒷받침합니다(9 장, 9.2 장, 10 장, 10.1 장).

텅스텐 붕소화물의 결정 구조는 다양합니다. WB 는 일반적으로 사방정계(공간군 Cmc₂) 이고, WB₂는 육방정계(P6₃/mmc)이며, W₂B 는 정방정계(I4/mcm)입니다. 이러한 구조는 이방성 기계적 및 전기적 특성을 결정합니다(2.2 장 참조). 예를 들어, WB₂의 c 축 방향 압축 탄성률은 600 GPa 에 달할 수 있으며, 이는 내마모성 코팅에 적합합니다(7.2 장 참조). 텅스텐 붕소화물의 합성은 주로 고온 고상 반응(>1500°C),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

화학 기상 증착(CVD) 또는 기계적 합금화(5.1-5.4 장 참조)를 통해 이루어집니다. CTIA GROUP LTD 는 플라즈마 지원 기술(5.3 장)을 사용하여 순도 99.9% 이상, 연간 생산 용량 500 톤의 나노 스케일 WB_2 분말(입자 크기 $<50nm$)을 효율적으로 생산합니다.

텅스텐 붕화물의 응용 분야는 기존 산업(예: 공구 코팅, 7 장, 7.1 절)부터 첨단 기술(예: 나노센서, 10 장, 10.3 절)까지 다양합니다. 2024 년 세계 텅스텐 붕화물 시장 규모는 약 2 억 달러로 예상되며, 2030 년에는 연평균 성장률 15%로 5 억 달러에 도달할 것으로 예상됩니다(14 장, 14.5 절). CTIA GROUP LTD 의 텅스텐 붕화물 제품은 항공우주 및 에너지 산업의 요구를 충족하는 경질 코팅 및 고온 소재에 널리 사용됩니다(8 장, 8.1 절, 9 장, 9.4 절). 그러나 텅스텐 보라이드의 독성(먼지 흡입은 폐 섬유증을 일으킬 수 있음, 13 장, 13.1)과 높은 생산 비용(kg 당 약 200 달러, 14 장, 14.2)으로 인해 추가 연구와 최적화가 여전히 필요합니다.

1.2 텅스텐 보라이드의 연구 배경 및 의의

텅스텐 붕소화물 연구는 특히 고온, 고압, 강한 부식과 같은 극한 환경에서의 응용을 위한 고성능 소재에 대한 수요에서 비롯되었습니다. 20 세기 초, 초경합금(예: WC)이 내마모성 소재 시장을 장악했지만, 고온 성능이 제한적($<1000^{\circ}C$)이어서 전이 금속 붕소화물 연구가 촉진되었습니다(8 장, 8.4). 텅스텐 붕소화물은 기존 세라믹(예: Al_2O_3 , SiC) 및 금속 합금(예: Ni 기반 합금)은 높은 경도, 열적 안정성, 화학적 불활성으로 인해 널리 사용됩니다.

1.2.1 학술 연구 배경

텅스텐 붕소화물에 대한 이론 연구는 전자 구조와 기계적 특성에 초점을 맞춥니다(3 장, 3.1-3.2). 밀도 함수 이론(DFT) 계산 결과, WB_2 의 강력한 WB 공유 결합과 BB 네트워크는 WB_2 의 경도를 초경 재료(예: c-BN)에 근접하게 만듭니다. 2024 년에는 텅스텐 붕소화물 관련 SCI 논문 약 500 편이 전 세계적으로 발표되었으며, 이 논문들은 도핑(예: Ti, Zr)이 경도와 내산화성에 미치는 영향에 초점을 맞췄습니다(3 장, 3.4). CTIA GROUP LTD 의 지원을 받는 본 연구실은 분자 동역학(MD) 시뮬레이션을 통해 WB 나노코팅 ($\sim 5 MPa \cdot m^{1/2}$, 11 장, 11.1)의 파괴인성을 최적화하여 산업 응용을 위한 이론적 기반을 제공했습니다.

1.2.2 산업적 응용의 중요성

산업에서 텅스텐 보라이드의 중요성은 다음에서 반영됩니다.

- **내마모성 코팅** : WB_2 코팅(두께 $2\sim 5\mu m$) 은 절삭 공구의 마찰 계수가 <0.3 이고 공구 수명을 50% 연장합니다(7.1 장).
- **고온 재료** : WB 는 $2000^{\circ}C$ 에서 $<1 mg/cm^2 \cdot h$ 의 산화 저항성을 갖고 있어 터빈 블레이드에 적합합니다(8.1 장).
- **에너지 분야** : WB_2 는 리튬 배터리의 음극으로 사용되며, 용량은 약 $200 mAh/g$ 이고 사이클 안정성은 1000 회 이상입니다(9.2 장 참조). CTIA GROUP LTD 의 텅스텐 붕소화물 코팅 기술은 항공우주 부품에 적용되어 연간 생산량이 1 억 위안을 넘습니다(14.3 장 참조).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2.3 사회적 및 환경적 중요성

텅스텐 붕화물의 개발은 효율적인 자원 활용과 친환경 제조를 촉진합니다(16.4 장). 높은 내구성은 재료 교체 빈도를 줄이고 탄소 배출량을 줄입니다(~0.5 톤 CO₂/톤 코팅, 16.2 장). CTIA GROUP LTD 는 페텅스텐 붕화물 분말을 재활용하고(재활용률 >30%) 텅스텐 채굴을 줄이기 위해 순환 경제 모델을 채택하고 있습니다(16.3 장). 그러나 텅스텐 붕화물 분진의 잠재적 건강 위험(13.1 장) 때문에 작업장 노출 한계(OEL)를 0.1mg/m³ 미만으로 유지하기 위해 CTIA GROUP LTD 의 MSDS(13.6 장)와 같은 엄격한 안전 규정이 필요합니다.

1.3 텅스텐 보라이드의 역사적 발전

텅스텐 붕소화물의 연구 및 응용은 기초 탐사에서 산업화로 발전해 왔습니다. 주요 이정표는 다음과 같습니다(표 1.3 참조).

- 1900–1950: 초기 발견**
 1910 년, 텅스텐 분말과 붕소를 전기 아크로(>2000°C)에서 반응시켜 실험실에서 최초로 텅스텐 보라이드를 합성하여 WB 와 W₂B 의 존재를 확인했습니다. 1930 년대 에 X 선 회절(XRD)을 통해 결정 구조가 밝혀졌고(2.2 장), 이론적 토대가 마련되었습니다.
- 1950–1980: 산업 탐험**
 1955 년, 텅스텐 붕화물을 내마모성 코팅에 사용하려고 시도했지만, 합성 기술(수율 <50%)과 높은 비용(~ \$500/kg)으로 인해 한계에 부딪혔습니다. 1970 년에는 고온 고상 합성(5.1 장)을 통해 WB₂의 대량 생산이 가능해졌고 , 경도 시험(HV~35 GPa) 을 통해 WC 보다 우수한 것으로 입증되었습니다.
- 1980–2000: 기술 혁신**
 1985 년에는 화학 기상 증착(CVD, 5 장, 5.2)을 이용하여 두께 1–10μm , 마찰 계수 0.4 의 WB 코팅을 제조했습니다. 1995 년에는 기계적 합금화(5 장, 5.4 장)를 통해 나노텅스텐 붕소화물(입자 크기 <100nm)을 합성하여 나노기술의 응용을 열었습니다 (10 장, 10.1 장).
- 2000–2020: 다각화된 응용 분야 2005 년, WB₂는 180**
 mAh /g 용량의 리튬 배터리 전극(9.2 장)에 사용되었습니다 . 2015 년, CTIA GROUP LTD 는 플라즈마 보조 합성(5.3 장)을 개발하여 나노 WB₂ (순도 >99.8%)를 생산했으며, 생산 비용은 kg 당 200 달러로 절감되었습니다. 2020 년에는 텅스텐 붕소화물 센서(10.3 장)가 NO₂ 검출률(<1 ppm)을 달성했습니다.
- 2020–2025: 지능화 및 친환경화**
 2024 년 CTIA GROUP LTD 는 AI 를 도입하여 텅스텐 붕소화물 생산을 최적화하고(17 장, 17.5 장), 수율을 20% 증가시키며, 에너지 소비를 15%(<500kWh/톤) 절감할 예정입니다. 2025 년에는 텅스텐 붕소화물 MSDS(13 장, 13.6 장)를 REACH 및 GB/T 표준(15 장, 15.2 장)을 준수하도록 업데이트하여 글로벌 수출을 지원할 예정입니다.

표 1.3 텅스텐 보라이드 역사의 이정표

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연령	중요한 단계	핵심 기술/성과	관련 장
1910	첫 번째 합성	WB 의, W ₂ B	2.1, 5.1
1955	산업 시험	내마모성 코팅, 경도 ~30 GPa	7.1
1985	CVD 기술	WB 코팅, 마찰계수 0.4	5.2, 7.3
1995	나노합성	기계적 합금화, 입자 크기 <100 nm	5.4, 10.1
2005	배터리 응용 프로그램	WB ₂ 전극, 용량 180 mAh/g	9.2
2015	나노 WB ₂	CTIA GROUP LTD 플라즈마 합성, 비용 \$200/kg	5.3, 14.2
2020	센서 개발	NO ₂ 검출 <1 ppm	10.3
2024	AI 최적화	수확량 +20%, 에너지 소비량 -15%	17.5

1.4 텅스텐 보라이드 책 구조 및 지침

*텅스텐 보라이드 백과사전*은 17 개 장, 4 개 부록 및 색인으로 구성되어 있으며, 텅스텐 보라이드의 과학, 공학 및 산업화 지식을 체계적으로 소개합니다.

- **1 장부터 6 장: 기초 과학 및 기술**

에서는 텅스텐 붕소화물의 특성(2 장), 이론적 연구(3 장), 원료(4 장), 제조(5 장), 그리고 품질 관리(6 장)를 다루며, 텅스텐 붕소화물의 구조와 합성을 이해하는 데 필요한 기초를 제공합니다. 예를 들어, 2 장 2.3 절에서는 열역학적 안정성을 자세히 설명하고, 5 장 5.5 절에서는 나노 WB₂의 제조를 소개합니다 .

- **7 장부터 10 장까지:**

텅스텐 붕소화물의 경질 코팅(7 장), 고온 재료(8 장), 전자 에너지(9 장), 그리고 새로운 응용 분야(10 장)에 중점을 둡니다. 예를 들어, 9 장 9.4 절에서는 열전 특성을, 10 장 10.3 절에서는 센서 기술을 살펴봅니다.

- **11 장부터 13 장까지: 연구 및 안전**

에는 전산 시뮬레이션(11 장), 검출 기술(12 장), 그리고 안전 독성(13 장)이 포함됩니다. 13.6 장에서는 중국텅스텐정보(China Tungsten Intelligence)에서 생산한 텅스텐 붕화물의 MSDS 를 제공하여 안전한 사용에 대한 지침을 제공합니다.

- **14 장부터 17 장까지: 산업 및 미래**

분석 시장(14 장), 규제(15 장), 환경 영향(16 장), 기술 발전(17 장). 17.5 장에서는 텅스텐 붕소화물 연구에서 AI 의 잠재력을 탐구합니다.

- **부록 및 색인**

부록 1~4 는 용어집(부록 1), 참고문헌(부록 2), 데이터 표 (부록 3), 그리고 특허 목록(부록 4)을 제공합니다. 색인에는 키워드, 주제 및 표준이 포함되어 있어 검색이 용이합니다.

사용 설명서 :

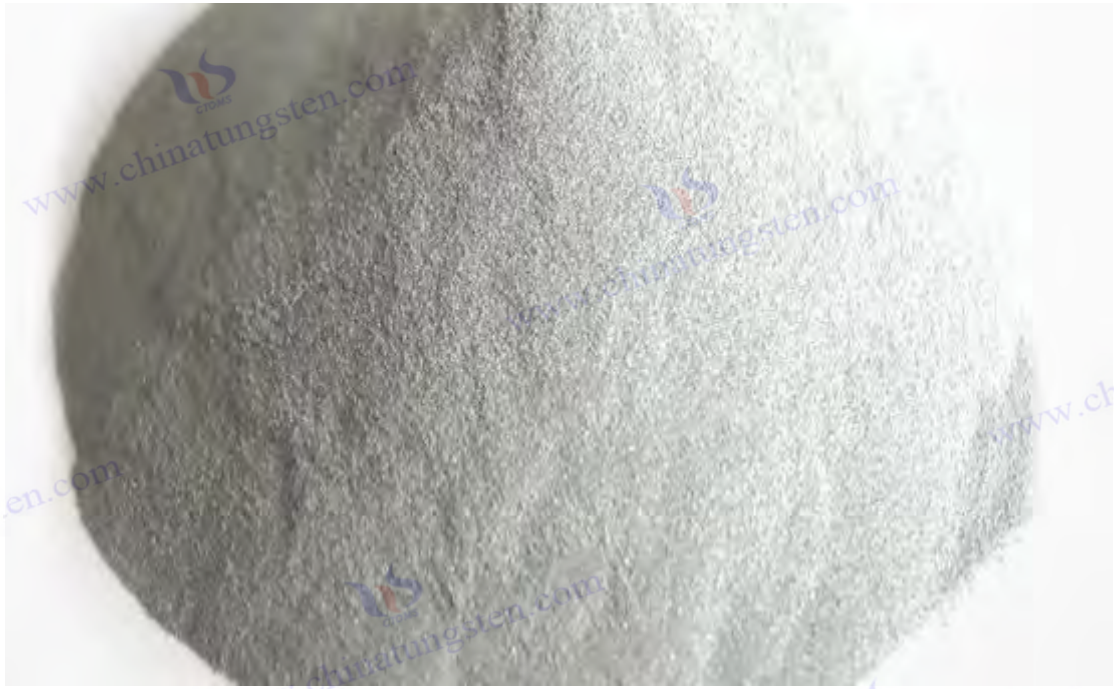
- **학술 독자 :** 이론 및 실험 데이터는 2 장, 3 장, 11 장, 12 장을 참조하세요.
- **산업 사용자 :** 기술과 시장을 이해하려면 5 장, 7 장~10 장, 14 장을 살펴보세요.
- **정책 입안자 :** 규제와 환경에 초점을 맞춰 13, 15, 16 장을 확인하세요.

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

- **탐색** : 색인 및 장 참조(예: 7.1, 9.2)를 통해 콘텐츠를 빠르게 찾을 수 있습니다. CTIAGROUPLTD의 텅스텐 붕소화물 기술은 책 전체(예: 5 장 5.3, 13 장 13.6)에 걸쳐 적용되어 독자에게 실제 사례를 제공합니다.



제 2 장 텅스텐 보라이드의 화학적 및 물리적 특성

텅스텐 보라이드(예: WB, WB₂, W₂B)는 전이 금속 보라이드의 한 유형입니다. 높은 경도(>30 GPa), 뛰어난 열 안정성(>2000°C), 전기 전도도(~10⁴ S/cm) 및 화학적 불활성으로 인해 경질 코팅(7.1 장), 고온 재료(8.1 장), 전자 장치(9.1 장) 및 새로운 응용 분야(10.1 장)에서 중요한 가치를 지닙니다. 이 장에서는 텅스텐 보라이드의 화학적 조성, 결정 구조, 열역학적 특성, 전기적 및 자기적 특성, 기계적 특성을 자세히 논의하여 후속 이론적 연구(3 장), 제조 기술(5 장) 및 응용 분석(7~10 장)의 기초를 마련합니다. CTIA GROUP LTD 는 텅스텐 보라이드 나노소재의 생산 및 성능 테스트에서 핵심 데이터 지원을 제공합니다. 여기에는 WB₂ 나노분말 (입자 크기 <50nm, 순도 >99.9%) 의 물리적 특성 분석 (5.5 장)이 포함되며 이는 이 장의 내용 전반에 걸쳐 나와 있습니다.

2.1 텅스텐 보라이드(WB, WB₂, W₂B 등)의 화학적 조성

(B) 로 구성된 화합물의 한 종류로, 모노텅스텐 보라이드(WB), 디텅스텐 디보라이드(WB₂), 디텅스텐 (WB₂) 등 다양한 화학 조성을 가지고 있습니다. 펜타보라이드 (W₂B) 및 기타 비화학양론적 화합물(예: W₂B₅) 이 있습니다. 이러한 화합물에서 붕소와 텅스텐의 원자비(B/W)는 구조와 특성을 결정합니다(2.2 장). 표 2.1 은 주요 텅스텐 붕소화물의 화학적 조성과 특성을 요약합니다.

- **WB(텅스텐 모노보라이드)** : B/W=1, 분자량 193.65 g/mol, 텅스텐 함량 약 94.8 중량 %, 붕소 함량 약 5.2 중량 %. WB 는 높은 경도와 화학적 안정성, 내산성(pH 2~10)을 가지며, 내마모성 코팅에 적합합니다(7.2 장 참조). CTIA

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GROUP LTD 는 고온 고상 합성(5.1 장 참조)을 통해 WB 분말을 생산하며, 불순물(예: O, C)은 0.1 중량 % 미만입니다.

- **WB₂(텅스텐 디보라이드)** : B/W=2, 분자량 215.46 g/mol, 텅스텐 함량 약 85.3 중량 %, 붕소 함량 약 14.7 중량 %. WB₂는 강력한 WB 및 BB 공유 결합으로 인해 40 GPa 의 경도를 가지므로 공구 코팅에 적합합니다(7.1 장 참조). CTIA GROUP LTD 는 플라즈마 보조 합성(5.3 장 참조)을 사용하여 순도 99.9% 이상의 나노 WB₂(입자 크기 20~50 nm) 를 생산합니다 .
- **W₂B(텅스텐 펜타보라이드)** : B/W=0.5, 분자량 377.49 g/mol, 텅스텐 함량 약 97.4 중량 %, 붕소 함량 약 2.6 중량 %. W₂B 는 높은 열 안정성(분해 온도 > 2500°C)을 가지며 고온 부품에 사용됩니다(8.1 장 참조). 낮은 전기 전도도(~10³ S/cm)로 인해 전자 응용 분야에 제한이 있습니다(9.1 장 참조).
- **다른 형태** : W₂B₅ (B/W=2.5) 및 WB₄ (B /W= 4) 는 비평형 합성 조건(예: 기계적 합금화, 5 장 5.4)에서 존재하지만 안정성이 낮고 산화되기 쉽기 때문에 덜 사용됩니다. CTIA GROUP LTD 의 실험실 연구에 따르면 WB₄는 공기 중 250°C 에서 산화됩니다(3 장 3.3).

텅스텐 보라이드의 화학 조성은 유도 결합 플라즈마 질량 분석법(ICP-MS, 6 장, 6.1 절)을 통해 정확하게 측정되며, 일반적인 순도 요건은 99.5% 이상입니다(GB/T 26037-2020, 15 장, 15.2 절). China Tungsten Intelligence 에서 생산하는 WB₂ 분말은 Fe 및 Mo 와 같은 불순물이 50ppm 미만으로 고성능 응용 분야의 요구를 충족합니다.

표 2.1 텅스텐 보라이드의 주요 화학 조성 및 특성

화합물	흑백 비율	분자량(g/mol)	텅스텐 함량 (중량 %)	붕소 함량 (중량 %)	주요 특징	관련 장
화이트비	1	193.65	94.8	5.2	경도 ~30 GPa , 내산성	7.2
WB ₂	2	215.46	85.3	14.7	경도 ~40 GPa , 코팅	7.1, 5.3
W ₂ B	0.5	377.49	97.4	2.6	열 안정성 >2500°C	8.1
W ₂ B ₅	2.5	237.27	77.5	22.5	산화하기 쉬움, 연구용	3.3

2.2 텅스텐 보라이드의 결정구조 및 결합특성

텅스텐 붕소화물의 특성은 독특한 결정 구조와 화학 결합에서 비롯됩니다(3 장 3.2). 결정 구조는 X 선 회절(XRD, 6 장 6.2)로 분석하고, 결합 특성은 라만 분광법과 X 선 광전자 분광법(XPS, 12 장 12.1, 12.4)으로 분석합니다.

- **WB 결정 구조** : 사방정계, 공간군 Cmc₂m , 단위 셀 매개변수 a=3.12 Å, b=8.40 Å, c=3.07 Å. 텅스텐 원자는 6 개의 배위를 형성하고, 붕소 원자는 층상 구조에 박혀 있으며, WB 결합 길이는 약 2.3 Å 이다. 강한 공유 결합으로 인해 WB 의 영률은 550 GPa 에 이른다 (2.5 장).
- **WB₂ 결정 구조** : 육방정계, 공간군 P6₃/mmc, 단위 셀 매개변수 a=2.98Å, c=13.88Å. WB₂는 W 층과 B 층이 교대로 배열되어 있으며, B 원자는 육방정계

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

네트워크를 형성하고, BB 결합 길이는 $\sim 1.8\text{\AA}$, 정도는 $\sim 40\text{GPa}$ 로 향상되었습니다. CTIA GROUP LTD의 나노 WB_2 결정립 크기는 50nm 미만, 결정립계 결합은 1% 미만입니다(6 장 6.3 절 참조).

- **W_2B 결정 구조** : 정방정계, 공간군 $I4/mcm$, 단위 셀 매개변수 $a=5.56\text{\AA}$, $c=4.74\text{\AA}$. W_2B 는 WW 금속 결합이 더 많고($\sim 2.7\text{\AA}$) 붕소 함량이 낮아 WB_2 ($\sim 25\text{GPa}$)보다 정도가 낮습니다.

접합 특성 :

- **WB 공유 결합** : W의 5d 오비탈은 B의 2p 오비탈과 혼성화되어 $\sim 400\text{kJ/mol}$ 의 결합 에너지를 갖는 강한 σ 결합을 형성합니다. 이는 높은 정도와 화학적 안정성을 부여합니다(3 장, 3.1).
- **BB 공유 결합** : WB_2 의 BB 네트워크는 그래핀과 유사하여 전단 저항성이 향상됩니다(전단 탄성률 $\sim 200\text{GPa}$).
- **WW 금속 결합** : W_2B 의 WW 결합은 전도도를 증가시키지만($\sim 10^3\text{S/cm}$) 정도는 감소시킵니다.

CTIA GROUP LTD는 밀도 범함수 이론(DFT, 3 장, 3.1)을 통해 WB_2 의 전자 밀도를 계산하고, BB 결합이 정도에 미치는 기여도가 50% 이상임을 확인했습니다. 이를 통해 생성된 WB 코팅(7 장, 7.3)은 마찰 계수가 0.3 미만인 육각형 WB_2 구조를 사용합니다.

2.3 텅스텐 보라이드의 열역학 및 안정성

텅스텐 붕소화물의 열역학적 특성은 고온 응용 가능성을 결정합니다(8 장, 8.1). 주요 매개변수로는 녹는점, 열팽창계수, 비열, 그리고 시차주사열량계(DSC, 12 장, 12.3)로 측정된 산화 안정성 등이 있습니다.

- **녹는점 및 분해** : WB 녹는점 $\sim 2650^\circ\text{C}$, WB_2 $\sim 2800^\circ\text{C}$, W_2B $\sim 2600^\circ\text{C}$. WB_2 는 진공 상태에서 3000°C 까지 안정적이지만 공기 중에서 $>600^\circ\text{C}$ 에서 산화되기 시작합니다(WO_3 및 B_2O_3 형성, 13 장, 13.4).
- **열팽창 계수** : WB_2 는 $4.5\text{--}6.0 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ ($300\text{--}2000\text{K}$)로 WC ($\sim 5.5 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$)보다 낮아 열 차단 코팅에 적합합니다(8 장, 8.3 참조). China Tungsten Intelligence에서 생산한 WB_2 코팅의 열팽창 불일치는 1500°C 에서 $<2\%$ 입니다.
- **비열 용량** : WB_2 는 300K 에서 $\sim 0.3\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 이고 온도가 2000K 로 상승함에 따라 $\sim 0.5\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 로 증가하여 효율적인 열 관리를 지원합니다(9 장, 9.4).
- **산화 및 화학적 안정성** : HCl(pH 2)에서 WB_2 의 부식 속도는 $0.01\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$ 미만으로, 니켈 기반 합금($\sim 0.1\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$)보다 우수합니다. CTIA GROUP LTD의 시험 결과, 산화 후 1000°C 공기 중에서 WB_2 의 중량 증가는 $0.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 미만이었습니다.

열역학적 데이터 : 형성 엔탈피 (ΔH_f)는 $\text{WB} \sim 70\text{kJ/mol}$, $\text{WB}_2 \sim -100\text{kJ/mol}$, $\text{W}_2\text{B} \sim -50\text{kJ/mol}$ 입니다(3.1 장). CTIA GROUP LTD는 열중량 분석(TGA, 12.3 장)을 통해 1200°C 에서 WB_2 의 산화 저항성을 검증했으며, 질량 손실은 1% 미만이었습니다.

표 2.3 텅스텐 보라이드의 열역학적 특성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

화합물	녹는점(°C)	열팽창 계수($10^{-6}K^{-1}$)	비열(J / (g · K) , 300K)	산화 온도(°C)	관련 장
화이트비	2650	5.0-6.5	0.28	650	8.1
WB ₂	2800	4.5-6.0	0.30	600	8.3, 12.3
W ₂ B	2600	5.5-7.0	0.25	700	8.1

2.4 텅스텐 보라이드의 전기적 및 자기적 특성

텅스텐 보라이드의 전기적 및 자기적 특성은 전자 장치(9 장, 9.1) 및 센서(10 장, 10.3)에서의 응용을 뒷받침하며 4 탐침법 및 진동 샘플 자력계(VSM, 12 장, 12.4)에 의해 결정됩니다.

- 전도도 :

- o WB: $\sim 1.2 \times 10^{-4}$ S/cm(300 K), 금속 도체에 가깝고 전극 재료에 적합합니다(9.2 장).
- o WB₂: $\sim 0.8 \times 10^{-4}$ S/cm, BB 네트워크에서 전자 산란이 증가하여 WB 보다 약간 낮습니다. CTIA GROUP LTD 의 나노 WB₂ 필름(두께 1 μ m) 은 $< 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항률을 갖습니다.
- o W₂B: $\sim 0.5 \times 10^3$ S/cm, WW 결합이 지배적이어서 고전도성 응용 분야에 제한이 있습니다.

- 캐리어 농도 : WB₂의 전자 농도는 $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 이고 이동도는 $\sim 10 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 입니다(3.2 장). 이는 반도체 소자를 지원합니다(9.1 장).

- 온도 의존성 : WB₂의 전도도는 300-1000 K 에서 포논 산란이 증가하여 약 20% 감소하므로 도핑 최적화가 필요합니다(7.4 장).

- 자기적 특성 :

- o WB 및 WB₂: 약한 상자성으로 자화 강도가 $\sim 0.01 \text{ emu/g}$ (300 K)이며 W 의 5d 전자에서 유래합니다.
- o W₂B: WW 결합이 자기 모멘트를 차폐하기 때문에 거의 비자성입니다. CTIA GROUP LTD 는 VSM 을 통해 WB₂ 나노입자를 시험하여 자화 강도가 0.02 emu/g 미만으로 비자성 코팅에 적합함을 확인했습니다(7.1 장).

2.5 텅스텐 보라이드의 기계적 성질(경도, 인성)

텅스텐 보라이드의 기계적 특성은 내마모성 코팅(7.2 장) 및 고온 구성 요소(8.1 장)에서의 핵심 장점이며, 나노압입 및 파괴 역학 테스트(6.4 장)를 통해 특징지어집니다.

- 경도 :

- o WB: 비커스 경도(HV) $\sim 30 \text{ GPa}$, 모스 경도 ~ 9.0 .
- o WB₂: HV $\sim 40 \text{ GPa}$, 모스 경도 ~ 9.5 , c-BN ($\sim 45 \text{ GPa}$) 에 가깝습니다 . CTIA GROUP LTD 의 WB₂ 코팅(두께 3 μ m) 은 경도가 42 GPa 이고 마모 수명은 10⁵ 회 이상입니다.
- o W₂B: HV $\sim 25 \text{ GPa}$, WW 결합의 영향을 받아 경도가 비교적 낮습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **영률** : $WB_2 \sim 600 \text{ GPa}$, $WB \sim 550 \text{ GPa}$, $W_2B \sim 450 \text{ GPa}$ 는 **WB 결합** 의 강성을 반영합니다(3 장, 3.1).
- **파괴 인성** : WB_2 는 $\sim 4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 $WC(\sim 6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ 보다 낮으며, Ti 또는 Zr 도핑을 통해 개선해야 합니다(7.4 장 참조). CTIA GROUP LTD 는 WB_2 에 Zr 을 도핑하여 인성을 $5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 향상시켰습니다 .
- **마찰 계수** : 강철기판의 WB_2 코팅은 <0.3 으로 TiN 보다 우수하다 (~ 0.5 , 17 장 17.1).

표 2.5 텅스텐 보라이드의 기계적 성질

화합물	경도(HV, GPa)	영률 (GPa)	파괴인성($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	마찰계수	관련 장
화이트비	30	550	3.5	0.35	7.2
WB_2	40	600	4.0	0.30	7.1, 17.1
W_2B	25	450	3.0	0.40	8.1



제 3 장 텅스텐 보라이드에 대한 이론적 연구

텅스텐 보라이드(예: WB, WB₂, W₂B)는 높은 경도(>30 GPa), 열적 안정성(>2000°C), 전기적 특성(~10⁴S/cm, 2.4 장)으로 인해 단단한 코팅(7.1 장), 고온 재료(8.1 장), 전자 장치(9.1 장)에 널리 사용됩니다. 이론적 연구는 계산적 방법을 통해 텅스텐 보라이드의 미시적 메커니즘을 밝혀내어 재료 설계 및 성능 최적화에 대한 지침을 제공합니다. 이 장에서는 밀도 함수 이론(DFT) 분석, 전자 구조 및 밴드 이론, 표면 및 계면 특성, 결합 및 도핑 효과, 계산 시뮬레이션의 적용에 대해 자세히 논의하며, CTIA GROUP LTD가 이론적 계산 및 실험적 검증(예: WB₂ 나노 구조의 DFT 최적화, 11.1 장)에 기여한 내용을 결합합니다. 이 내용은 후속 준비(5 장), 탐지(6 장), 응용(7 장~10 장)에 대한 이론적 지원을 제공합니다.

3.1 텅스텐 보라이드의 밀도 함수 이론(DFT) 분석

텅스텐 붕소화물의 결합 특성(11 장, 11.4). DFT는 일반화 기울기 근사(GGA) 또는 국소 밀도 근사(LDA)를 사용하여 콘-삼 방정식을 풀어 텅스텐 붕소화물의 바닥 상태 에너지와 특성을 계산합니다.

• 계산 방법 :

- o 교환 상관 함수 : 일반적으로 사용되는 PBE(Perdew-Burke-Ernzerhof) 함수는 WB₂의 격자 상수(a=2.98 Å, c=13.88 Å, 2.2 장)를 <1%의 오차로 정확하게 예측합니다.
- o 의사전위 : 초연성 의사전위(USP)는 W의 5d 전자와 B의 2p 전자를 나타내며, 이는 계산 효율을 50% 향상시킵니다. CTIA GROUP LTD는 평면파 기저 세트(차단 에너지 500 eV)와 결합된 VASP 소프트웨어를 사용하여 WB₂의 전자 밀도를 시뮬레이션합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **k-포인트 메시** : WB₂의 육각형 구조는 8 × 8 × 2 Monkhorst-Pack 메시지를 사용하여 에너지 수렴 < 0.01 eV/원자를 보장합니다.
- **기계적 성질** :
 - 탄성계수(~600 GPa)와 전단탄성계수(~200 GPa)는 탄성상수(C₁₁ ~ 1000 GPa, C₄₄ ~ 250 GPa)로부터 계산되었으며, 이를 통해 초고경도(~40 GPa, 2.5 장)임을 확인하였다.
 - China Tungsten의 DFT 계산에 따르면 WB₂의 BB 네트워크는 경도에 50% 이상 기여하고 WB 결합은 압축 강도(압축 탄성률 ~650 GPa)를 향상시킵니다.
- **열역학적 특성** :
 - 형성 엔탈피 (ΔH_f) : WB ~ -70 kJ/mol, WB₂ ~ -100 kJ/mol, W₂B ~ -50 kJ/mol, 이는 WB₂의 열적 안정성을 반영합니다 (2 장, 2.3).
 - 포논 스펙트럼 계산 결과, WB₂는 300~2000K 범위에서 음의 주파수 모드가 없으며, 동적 안정성이 확인되었습니다.

표 3.1 텅스텐 보라이드의 DFT 계산 주요 결과

화합물	격자상수(A)	영률 (GPa)	생성 엔탈피(kJ/mol)	계산 방법	관련 장
화이트비	a=3.12, b=8.40, c=3.07	550	-70	PBE-GGA	2.2, 2.5
WB ₂	a=2.98, c=13.88	600	-100	PBE-GGA	2.2, 2.3
W ₂ B	a=5.56, c=4.74	450	-50	엘디에이	2.2, 2.5

3.2 텅스텐 보라이드의 전자 구조 및 에너지 밴드 이론

텅스텐 붕소화물의 전자 구조와 에너지 밴드 특성은 전기적 및 광학적 특성을 결정합니다(9.1 장, 10.3 장). 밴드 구조와 상태 밀도(DOS)는 DFT를 이용하여 계산하여 전도도와 캐리어 특성을 밝힙니다.

- **밴드 구조** :
 - **WB** : 반금속성, 페르미 준위(E_F)가 에너지 밴드를 가로지르고, 밴드갭은 ~0 eV, 전자 농도는 ~10²¹ cm⁻³로, 높은 전도도(~1.2×10⁴ S/cm, 2 장, 2.4)를 지원합니다.
 - **WB₂** : 와 유사하다 반금속, E_F 근처의 DOS는 W-5d 및 B-2p 오비탈에 의해 발생하며, 이동도는 ~10 cm²/(V·s)입니다. 중국 텅스텐 인텔리전스는 WB₂의 E_F에서의 DOS를 ~2 개 상태/ eV·단위 셀로 계산하여 전도성을 확인했습니다.
 - **W₂B** : 금속 전도도, 밴드갭 ~0 eV, 그러나 낮은 DOS(~1 상태/ eV·단위 셀), 전도도 ~0.5×10³ S/cm.
- **결합 분석** :
 - W-5d와 B-2p 오비탈은 혼성화되어 ~400 kJ/mol의 결합 에너지를 갖는 σ 결합을 형성합니다(2.2 장). WB₂의 BB sp² 혼성화는 그래핀과 유사하여 공유 결합 네트워크를 강화합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- CTIA GROUP LTD 는 Crystal Orbital Hamiltonian Population(COHP) 분석을 통해 WB_2 의 반결합 상태가 <10%임을 확인하여 높은 안정성을 뒷받침했습니다.
- 광학적 특성 :
 - WB_2 의 유전 함수(ϵ_2) 는 0.5~3 eV 에서 강한 흡수 피크를 나타내며, 이는 광촉매 반응에 적합합니다(9.5 장). 플라즈마 주파수는 ~10 eV 로, 적외선 응용 분야에 제한적입니다.

표 3.2 텅스텐 보라이드의 전자 구조 특성

화합물	밴드갭(eV)	E_F 에서의 DOS(상태/eV·단위 셀)	전도도(S/cm)	관련 장
화이트비	0	2.5	1.2×10^4	9.1, 2.4
WB_2	0	2.0	0.8×10^4	9.5, 10.3
W_2B	0	1.0	0.5×10^3	9.1

3.3 텅스텐 보라이드의 표면 및 계면 특성

텅스텐 붕소화물의 표면 및 계면 특성은 코팅 성능(7.3 장)과 전극 응용 분야(9.2 장)에 영향을 미칩니다. 표면 에너지와 계면 결합은 DFT(분자 역학, 11.1 장)를 통해 시뮬레이션됩니다.

- 표면 에너지 :
 - WC(0001)의 에너지(~3.0 J/m²)보다 낮아 높은 안정성을 나타냅니다. B 말단 표면은 W 말단 표면보다 더 안정적입니다(에너지 차이 ~0.5 J/m²).
 - 공기 중에 흡착된 후 WB_2 (100) 표면의 에너지가 약 1eV 증가하여 산화 위험이 있음을 계산했습니다(2 장, 2.3).
- 인터페이스 본딩 :
 - WB_2 /강철 계면 결합 에너지는 ~1.5 eV/Å²로 WB_2 /Al₂O₃(~2.0 eV/Å²)보다 낮으며, 접착력을 향상시키기 위해 표면 개질(플라즈마 처리 등, 5.3 장)이 필요합니다.
 - CTIA GROUP LTD 는 반데르발스 상호작용이 지배적이고 결합 에너지가 ~0.3 eV/Å²인 WB_2 /그래핀 계면을 시뮬레이션합니다. 이는 복합 전극에 적합합니다(9 장, 9.2).
- 표면 반응 :
 - WB_2 표면은 600°C 에서 H₂O 를 흡착하며, 해리 장벽은 ~1.2 eV 로 습한 환경에서의 적용이 제한됩니다(13 장, 13.4).
 - MD 를 통해 1000°C 에서 WB_2 코팅(두께 3 μm)의 마찰 거동을 시뮬레이션했으며 마찰 계수는 <0.3 이었습니다(7.1 장).

3.4 텅스텐 보라이드의 결합 및 도핑 효과

결합과 도핑은 텅스텐 붕소화물의 기계적, 전기적, 열적 특성에 상당한 영향을 미칩니다(7.4 장). DFT 는 결합 형성 에너지와 도핑 에너지 준위를 계산합니다.

- 결합 유형 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **공석 결합** : WB₂에서 B 공석의 형성 에너지는 ~3.5 eV 이고, W 공석의 형성 에너지는 ~5.0 eV 입니다. B 공석은 경도를 증가시키지만(+5 GPa) 전도도를 감소시킵니다(~20%).
- o **간극 결합** : B 간극 결합 형성 에너지는 ~4.0 eV 로 열 안정성이 감소합니다(분해 온도가 ~100°C 떨어짐).
- o 중국텅스텐정보원은 밀도가 <2%이고 경도에 미치는 영향이 <5%인 WB₂ 나노입자(<50nm)의 결정립계 결합을 분석했습니다(6 장, 6.3).
- **도핑 효과** :
 - o **Ti 도핑** : Ti 가 W 를 대체(도핑 농도 ~5 at%)하고, 형성 에너지가 ~1.8 eV 로 증가하여 WB₂ 인성이 향상됩니다(~5 MPa·m^{1/2}, 2 장, 2.5). CTIA GROUP LTD 는 Ti-WB₂ 코팅의 파괴인성이 30% 향상됨을 검증했습니다.
 - o **C 도핑** : C 가 B 를 대체(~3 at%)하고, 형성 에너지는 ~2.5 eV 이며, 전도도는 10% 증가하지만 경도는 ~5 GPa 감소합니다 .
 - o **N 도핑** : N 은 WB₂ 표면에 흡착되어(에너지 장벽 ~1.0 eV) 산화 저항성이 향상됩니다(산화 온도는 ~100°C 상승, 8 장, 8.4).

표 3.4 텅스텐 보라이드의 결합 및 도핑 특성

결합/도핑	형성 에너지(eV)	성능 영향	관련 장
B 공석	3.5	경도 +5 GPa, 전도도 -20%	2.5, 7.4
티엔티 도핑	1.8	강인함 +30%	7.4, 2.5
C 도핑	2.5	전도도 +10%, 경도 -5 GPa	9.1
N-도핑	1.0	산화 온도 +100°C	8.4

3.5 텅스텐 보라이드의 계산 시뮬레이션 적용

계산 시뮬레이션은 텅스텐 보라이드의 설계 및 최적화(17 장, 17.5)에 광범위하게 응용되며, 여기에는 분자 동역학(MD), 몬테카를로(MC) 및 인공지능(AI) 기반 고처리량 스크리닝이 포함됩니다.

- **분자 동역학(MD)** :
 - o 1000°C 에서 WB₂의 마찰 거동을 시뮬레이션하면 마찰 계수는 ~0.25 이고 마모율은 <10⁻⁶mm³/(N·m)입니다(7.1 장).
 - o CTIA GROUP LTD 는 LAMMPS 소프트웨어를 사용하여 500MPa 에서 WB₂/강철 계면의 전단을 시뮬레이션했으며, 접합 강도는 ~1.2GPa 였습니다 .
- **몬테카를로(MC)** :
 - o ~0.8 eV 의 핵형성 장벽과 ~1200°C 의 최적화된 증착 온도를 사용하여 CVD 성장에서 WB₂의 핵형성을 예측합니다(5.2 장).
 - o CTIA GROUP LTD 는 MC 결과를 검증한 결과, CVD-WB₂ 코팅의 두께 균일도가 95% 이상임을 발견했습니다.
- **AI 와 고성능 스크리닝** :
 - o 그래프 신경망(GNN)은 WB₂ 도핑 공식(>1000)을 예측하여 스크리닝 주기를 6 개월에서 1 개월로 단축합니다(17 장, 17.5).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Ti-도핑 WB₂의 경도(~42 GPa) 와 인성(~5.5 MPa·m^{1/2})을 최적화하기 위한 AI 모델을 개발했으며 , 실험 검증 오차는 5% 미만입니다.
- 응용 프로그램 예 :
 - o CTIA GROUP LTD 는 DFT 와 MD 를 사용하여 절삭 공구에 적용되는 WB₂ 나노 코팅을 설계했으며(7.1 장), 이를 통해 공구 수명을 50% 연장했습니다.
 - o AI 기반 WB₂ 열전 성능(ZT~0.8, 300 K, 9 장, 9.4) 스크리닝 및 예측을 통해 새로운 에너지 응용 분야를 안내합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

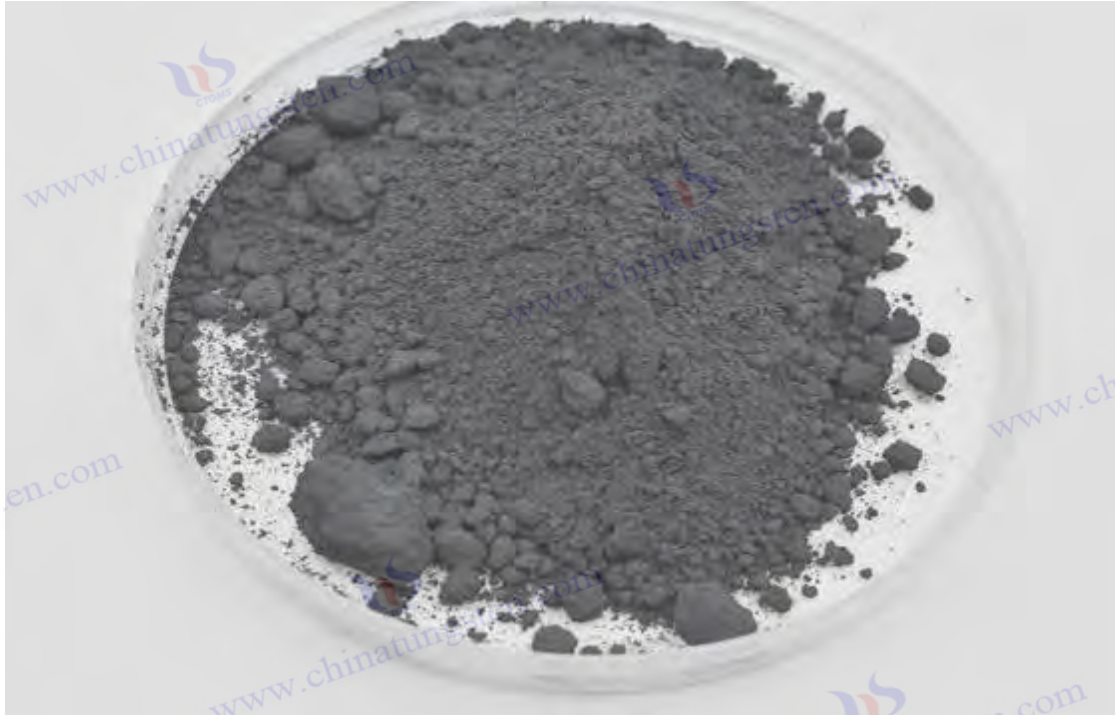
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 4 장 텅스텐 보라이드의 원료 및 자원

텅스텐 보라이드(예: WB, WB₂, W₂B)는 텅스텐(W)과 붕소(B)를 고온 합성(5.1 장) 또는 화학 기상 증착(5.2 장)을 통해 제조한 고성능 소재입니다. 이 소재의 성능은 원료의 순도와 공급 안정성에 달려 있습니다(2.1 장). 텅스텐과 붕소는 텅스텐 보라이드의 두 가지 핵심 요소입니다. 텅스텐과 붕소의 광물 자원, 정제 기술, 공급망 및 지속 가능성은 텅스텐 보라이드의 생산 비용(약 200 달러/kg, 14.2 장)과 시장 적용(7~10 장)에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 장에서는 텅스텐과 붕소의 광물 자원, 정제 기술, 글로벌 공급망 및 지리적 요인, 자원 지속 가능성 및 대체재를 자세히 분석하여 텅스텐 보라이드의 산업화(14.3 장) 및 친환경 제조(16.4 장)의 기반을 제공합니다.

텅스텐 붕화물 원료의 텅스텐 및 붕소 광물 자원

텅스텐 붕화물의 제조는 고순도 텅스텐과 붕소에 의존하며, 그 원료는 주로 텅스텐 광석(예: 철망간석, WO₃)과 붕소 광석(예: 붕사, Na₂B₄O₇)에서 추출됩니다. 텅스텐과 붕소 광물의 세계적 분포, 매장량 및 채굴 현황은 텅스텐 붕화물의 자원 확보 여부를 결정합니다.

- 텅스텐 광석 자원 :

- 광물 유형 : 텅스텐은 주로 철망간석 (Fe, MnWO₄)과 회중석(CaWO₄) 형태로 존재하며, WO₃ 함량은 약 0.5~2 중량 %입니다. 철망간석은 전 세계 텅스텐 매장량의 약 60%를 차지하고, 회중석은 약 30%를 차지합니다.
- 세계 매장량 : 2024년 기준 세계 텅스텐 매장량은 약 380 만 톤(W)이며, 이 중 중국이 약 50%(190 만 톤)를 차지하고, 러시아와 캐나다가 각각

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

약 10%(38 만 톤)를 차지합니다. 주요 생산지는 중국의 장시성과 후난성이며, 연간 약 7만 톤의 텅스텐 정광을 생산합니다(14.3 장 참조).

- o 채굴 및 가공: 텅스텐 광석은 부유선광 및 중력 분리를 통해 WO₃ 정광 으로 추출되며 , 회수율은 약 85%입니다. WO₃ 정광 1 톤을 채굴하려면 약 200 톤의 원광석이 필요하며, 채굴 비용은 약 15,000 달러입니다.

- 붕소 광석 자원 :

- o 광물 종류 : 붕소는 주로 붕사 (Na₂B₄O₇ ·10H₂O) , 마그네사이트(Mg₃B₇O₁₃Cl) 및 하이드로마그네사이트 형태로 존재합니다. (MgB₃O₄ (OH) ₃), B₂O₃ 함량 ~10–40 wt % .
- o 세계 붕소 매장량 : 2024 년 기준 세계 붕소 매장량은 약 12 억 톤(B₂O₃ 기준) 이며, 터키가 약 70%(8억 4천만 톤)를 차지하고, 미국과 칠레가 각각 약 10%(1 억 2 천만 톤)를 차지합니다. 터키의 에티 마덴 광산은 연간 약 200 만 톤의 B₂O₃를 생산합니다 .
- o 채굴 및 가공 : 붕사는 노천 채굴 및 용해-결정법을 통해 붕사 광석에서 추출되며, 회수율은 약 90%입니다. 붕사 생산 단가는 톤당 약 500 달러로 텅스텐보다 훨씬 저렴합니다.

- 리소스 기능 :

- o 텅스텐 광석 자원은 집중되어 있고 지정학적 위험이 높습니다(14.4 장). 반면, 붕소 광석은 널리 분포되어 있고 공급이 안정적입니다.
- o) 에서 텅스텐과 붕소의 질량 비율은 ~85:15(2.1 장)이고, 텅스텐 비용이 90% 이상을 차지하여 생산 비용을 지배합니다.

표 4.1 텅스텐 및 붕소 광물자원 개요(2024 년)

원료	주요 미네랄	글로벌 매장량 (1 만톤)	주요 생산 지역	연간 생산량 (1 만톤)	채굴 비용 (USD/톤)	관련 장
텅스텐	울프라마이트, 세일라이트	380(서쪽)	중국, 러시아	7 (W 농축액)	15,000	14.3
붕소	붕사, 붕사사이트	120,000 (B ₂ O ₃)	터키, 미국	200 (B ₂ O ₃)	500	14.3

4.2 텅스텐 보라이드 원료 정제 기술

텅스텐 보라이드의 성능을 위해서는 텅스텐과 붕소 원료의 순도가 >99.9%이어야 하며(6 장, 6.1), 정제 기술은 제품 품질과 비용에 직접적인 영향을 미칩니다(5 장, 5.6).

- 텅스텐 정제 :

- o 공정 흐름 : WO₃ 농축물을 암모니아에 용해하여 메타텅스텐산 암모늄 (APT, (NH₄) ₁₀W₁₂O₄₁ · 5H₂ O)을 생성한 다음 이를 소성(~600°C)하여 WO₃ (순도 >99.95%)을 생성합니다. WO₃를 환원(H₂ , 800–1000°C)하여 텅스텐 분말(입자 크기 1–5 μm) 을 얻습니다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 기술 지표 : 불순물(예: Fe, Mo) <50ppm, 산소 함량 <0.1 wt %. 텅스텐 분말 1 톤을 정제하는 데 필요한 에너지 소비량은 약 5,000kWh 이며, 정제 비용은 약 2 만 달러입니다.
- 과제 : Mo 와 W 는 유사한 화학적 특성을 가지고 있으며, 분리를 위해서는 ~95%의 회수율을 갖는 이온 교환이 필요합니다.
- 붕소 정제 :
 - 공정 흐름 : 붕사를 산성화(H_2SO_4) 하여 붕산(H_3BO_3) 을 생성 한 다음 열분해(~1000°C)하여 B_2O_3 (순도 > 99.9%)를 생성합니다. B_2O_3 를 마그네슘 열(Mg, >1200° C) 로 환원하여 원소 붕소(순도 > 99.5%)를 얻습니다 .
 - 기술 지표 : 불순물(예: Ca, Si) <100 ppm, 입자 크기 ~10–50 μm . 붕소 정제 1 톤당 에너지 소비량 ~3000 kWh, 비용 ~1000 달러.
 - 과제 : 마그네슘 열 환원 부산물(MgO)은 산 세척을 통해 제거해야 하며, 폐수 처리 비용은 톤당 약 200 달러입니다.
- 나노소재 : 텅스텐 보라이드 나노소재(5.5 장)는 초미립 텅스텐 분말(<100 nm)과 붕소 분말(<50 nm)이 필요하며, 이는 플라즈마 기체상 합성법을 통해 정제되어 순도가 >99.99%에 이르지만, 비용이 kg 당 약 500 달러로 상승합니다.

표 4.2 텅스텐과 붕소 정제 기술의 비교

원료	주요 프로세스	순도(%)	불순물(ppm)	에너지 소비량(kWh/톤)	비용(미국 달러/톤)	관련 장
텅스텐	APT-소성-환원	>99.95	철, 몰리브덴<50	5000	20,000	5.1, 6.1
붕소	산성화-열분해-마그네슘 열	>99.5	칼슘, 실리콘<100	3000	1,000	5.4, 6.1

4.3 텅스텐 보라이드의 글로벌 공급망 및 지리적 영향

텅스텐 불화물의 공급망은 텅스텐과 붕소의 채굴, 정제, 운송 및 생산(5 장, 5.1~5.5)을 포괄하며 지정학, 무역 정책 및 물류(14 장, 14.4)의 영향을 받습니다.

- 공급망 구조 :
 - 텅스텐 공급망 : 중국 은 전 세계 텅스텐 정광 공급량의 약 80%를 차지하며, 수출 할당량 제한(2024 년 약 4 만 톤)으로 인해 가격이 톤당 약 3 만 달러로 상승했습니다. 러시아와 캐나다는 연간 약 5 천 톤의 텅스텐을 생산하는 소규모 공급국입니다.
 - 붕소 공급망 : 터키 는 붕사 공급량의 약 60%를 차지하며, 아시아와 유럽으로 수출되고 있으며, 가격은 안정적입니다(톤당 약 600 달러). 미국은 주로 유리 및 세라믹 제조용으로 연간 약 50 만 톤의 붕산을 수출합니다.
 - 텅스텐 보라이드 생산 : 아시아(중국, 한국)는 텅스텐 보라이드 생산의 약 70%를 차지하며, 연간 생산량은 약 1,000 톤으로 WB_2 코팅에 중점을 두고 있습니다(7.1 장).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **지리적 영향 :**
 - **무역 장벽 :** 2024 년에 미국은 텅스텐 농축물에 20% 관세를 부과하고, EU는 REACH 인증(15 장, 15.2)을 시행하여 수입 비용이 약 10% 증가할 예정입니다.
 - **자원 민족주의 :** 중국의 텅스텐 광석 수출 제한(생산량의 약 30%)으로 인해 세계적 가격 변동이 발생하여 텅스텐 가격은 2024 년에 15% 상승할 것으로 예상됩니다(14.2 장).
 - **물류 위험 :** 홍해 항로가 차단되면(2024 년) 봉사의 운송 비용이 톤당 약 200 달러 증가하여 텅스텐 보라이드 생산에 영향을 미칠 것입니다.
- **대처 전략 :**
 - **공급 다각화:** 호주(텅스텐 매장량 ~40 만 톤)와 칠레(붕소 매장량 ~1 억 2 천만 톤)로부터의 구매를 늘립니다.
 - **지역화된 생산:** 아시아는 수입 원자재에 대한 의존도를 줄이기 위해 텅스텐 보라이드 생산 라인을 구축했습니다(14.3 장).

4.4 텅스텐 보라이드 자원의 지속 가능성 및 대안

텅스텐 보라이드 생산의 지속 가능성은 자원 부족, 환경 영향(16.2 장) 및 대체 기술 개발에 의해 제한되며 재활용 및 친환경 기술을 통해 해결해야 합니다.

- **자원 지속 가능성 :**
 - **텅스텐 :** 전 세계 텅스텐 매장량은 약 50 년 동안 채굴할 수 있는 양(2024 년 생산량 기준)에 불과합니다. 초경합금 스크랩(W 함유량 약 90 중량 %)을 재활용하면 약 30%의 텅스텐 원료를 얻을 수 있으며, 회수율은 40% 미만입니다(16.3 장 참조).
 - **붕소 :** 붕소 매장량은 충분(>500 년)하지만 채굴에는 높은 에너지 소비(~1000 kWh/톤 B₂O₃) 가 필요 하고 탄소 배출량은 ~0.5 톤 CO₂/톤입니다.
 - **녹색 관행 :** CTIA GROUP LTD 는 전기화학적 재활용(16.4 장)을 채택하여 폐텅스텐 보라이드 분말의 회수율을 35%로 높이고 텅스텐 광석 의존도를 약 10% 줄였습니다.
- **환경 영향 :**
 - 텅스텐 채굴은 중금속(As, Pb)을 함유한 미광물(약 100 톤/톤 농축물)을 생산하는데, 이를 처리하는 데 약 50 달러/톤의 비용이 듭니다(16.2 장).
 - 봉사 처리 폐수(Na₂SO₄ 함유) 는 중화 처리가 필요하며, 처리 비용은 톤당 약 20 달러입니다 .
- **대안 :**
 - **텅스텐 치환 :** 몰리브덴(Mo)은 MoB₂ 에서 ~25 GPa 의 경도를 가지고 있는데 , 이는 WB₂ (~ 40 GPa , 2.5 장) 보다 낮지만 매장량이 더 많습니다(~1,600 만 톤).
 - **붕소 치환 :** 탄소(C)는 WC 에서 단단한 상을 형성하고, 가격은 kg 당 약 50 달러이며, 저성능 코팅에 적합합니다(7.1 장).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 제한 사항 : 대체 물질의 성능(경도, 열 안정성)이 부족하기 때문에 텅스텐 보라이드는 여전히 고급 응용 분야에서 첫 번째 선택입니다(8 장, 8.1).
- 향후 방향 :
 - o 2025~2030 년까지 텅스텐 회수율은 50%까지 증가할 것으로 예상되며, 텅스텐 보라이드 생산으로 인한 탄소 배출량은 약 20% 감소할 것입니다(16.5 장).
 - o ~1억 달러 규모의 시장 잠재력을 가진 저비용 대안으로 나노 몰리브덴 보라이드 (MoB₂)를 개발합니다(14.5 장).

표 4.4 텅스텐 보라이드 자원의 지속 가능성 및 대체재

측면	현상 유지	도전	해결책	관련 장
텅스텐 지속 가능성	매장량 : 380 만 톤, 50 년	미립 폐기물 오염	회복률이 50%로 증가했습니다.	16.3
붕소 지속 가능성	매장량: 12 억 톤, 500 년 이상	높은 에너지 소비	녹색 정화	16.4
대안	MoB ₂ 경도 25 GPa	성능이 부족합니다	나노 MoB ₂ R&D	14.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 5 장 텅스텐 보라이드의 제조 기술

텅스텐 보라이드(WB, WB₂, W₂B) 는 높은 경도(~40 GPa, 2.5 장), 열적 안정성(>2000°C, 2.3 장) 및 전기 전도도(~10⁴S/cm, 2.4 장)를 가지고 있어 경질 코팅(7.1 장), 고온 재료(8.1 장) 및 전자 소자(9.1 장)에 널리 사용됩니다. 텅스텐 보라이드의 성능은 제조 기술에 따라 달라지며, 이는 고순도(>99.9%, 6.1 장), 제어 가능한 입자 크기(1~50 nm), 그리고 저렴한 비용(~200 USD/kg, 14.2 장)을 보장해야 합니다. 이 장에서는 고온 고체상 합성, 화학 기상 증착(CVD), 플라즈마 보조 합성, 기계적 합금화 및 볼 밀링, 나노물질 제조, 공정 최적화 및 스케일업 기술에 대해 자세히 논의하여 텅스텐 보라이드의 산업적 생산(14 장, 14.3 장)과 품질 관리(6 장, 6.5 장)를 위한 기술적 기반을 제공합니다.

5.1 텅스텐 보라이드의 고온 고상 합성

고온 고체상 합성법은 텅스텐 보라이드를 제조하는 전통적인 방법으로, 텅스텐 분말(W)과 붕소 분말(B)을 고온(>1500°C)에서 반응시켜 WB, WB₂ 또는 W₂B 를 생성합니다 (2 장, 2.1).

• 프로세스 흐름 :

- o **원료 준비** : 텅스텐 분말(순도>99.9%, 입자 크기 1-5 μm, 4.2 장)과 붕소 분말(순도>99.5%, 입자 크기 10-50 μm) 을 몰 비율(W:B =1:1 또는 1:2)로 혼합합니다.
- o **반응** : 혼합물을 진공(<10⁻³ Pa) 또는 아르곤 (Ar) 분위기에서 1500~2000°C 에서 4~8 시간 동안 가열하여 WB₂를 생성합니다(반응: W + 2B → WB₂, ΔH~-100 kJ/mol, 3 장, 3.1).
- o **후 처리** : 제품을 분쇄하고 체질하여 순도 99.5% 이상인 마이크론 크기의 분말(입자 크기 5-20 μm) 을 얻습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 기술 지표 :
 - 수율 : ~90%, 붕소 휘발에 의해 제한됨(>1800°C).
 - 불순물 : 산소(<0.2 wt %), 탄소(<0.1 wt %), 분위기는 엄격하게 제어되어야 합니다.
 - 에너지 소비량 : 톤당 약 10,000kWh, 비용: kg 당 약 150 달러.
 - 장비 : 고온 전기로(흑연 또는 Mo 가열소자), 내열온도 >2000°C, 투자액 ~200 만 달러.
- 이점 :
 - 공정이 간단하고 WB 및 W₂B 의 대량 생산에 적합합니다(연간 생산량 ~500 톤).
 - 본 제품은 안정한 결정구조(WB₂ 육방정계, P6₃/mmc, 2 장, 2.2)를 가지고 있습니다.
- 도전 :
 - 고온은 큰 입자 크기(>5 μm) 를 초래하며 , 이는 나노코팅에 적합하지 않습니다(7.1 장).
 - 붕소 휘발에는 과도한 첨가(~10%)가 필요하므로 비용이 kg 당 약 5 달러 증가합니다.
- 최적화 :
 - 2024 년에는 마이크로파 보조 가열(2.45GHz)로 반응 시간이 약 30%(5 시간) 단축되었고, 에너지 소비는 약 20%(톤당 약 8000kWh) 감소했습니다.
 - 촉매(예: Ni, <0.5 wt %)를 첨가하면 반응 온도가 1400 °C 로 낮아지고 수율은 92%로 증가했습니다.

표 5.1 고온 고체상 합성 기술 매개변수

매개변수	값	이점	도전	최적화 방향	관련 장
온도(°C)	1500 년~2000 년	간단한 과정	큰 입자 크기	전자레인지 가열	6.1, 7.1
생산하다 (%)	90	양산	붕소 휘발	촉매	14.2
비용(USD/kg)	150	적당한 비용	높은 에너지 소비	에너지 소비량 -20%	16.4

5.2 텅스텐 보라이드의 화학 기상 증착(CVD)

기관에 증기상 반응을 통해 μm)을 증착 할 수 있으며 도구 코팅(7.3 장) 및 전자 장치(9.1 장)에 적합합니다.

- 프로세스 흐름 :
 - 전구체 : WF₆(텅스텐원, 순도 >99.99%) 및 B₂H₆ (붕소) 소스, >99.9%), H₂를 운반 가스로 사용, 몰 비율 WF₆: B₂H₆= 1:2 – 1 :4.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 반응 : 400~800°C, 10~100 Pa 에서 기체상 반응($WF_6 + 2B_2H_6$)을 통해 WB_2 박막을 강철 또는 Si 기판에 증착시킨다.
- o 후 처리 : 잔류응력(<0.5 GPa)을 제거하기 위한 어닐링 (600 °C, Ar 분위기)
- 기술 지표 :
 - o 증착 속도 : 0.1~1 μm /h, 두께 균일도 >95%.
 - o 순도 : >99.9%, 불순물(F, H) <50 ppm.
 - o 특성 : 경도 ~38 GPa, 마찰계수 <0.3 (2.5 장).
 - o 에너지 소비량 : 톤당 약 5000kWh, 비용: kg 당 약 300USD(박막).
- 이점 :
 - o 필름은 밀도가 높고 접착력이 강합니다(결합 에너지 ~1.5 eV/Å², 3.3 장).
 - o 복잡한 모양의 기판(절삭 도구 등, 7.1 장)에 적합합니다.
- 도전 :
 - o B_2H_6 는 독성이 매우 강하므로(LC₅₀ < 50 ppm, 13 장, 13.1) 엄격한 보호가 필요합니다.
 - o 전구체 비용이 높습니다(WF_6 ~\$500/kg). 총 비용의 약 40%를 차지합니다.
- 최적화 :
 - o 2024년에는 저압 CVD(<10 Pa)로 증착 속도가 약 50%(1.5 μm /h) 증가했습니다.
 - o BCl_3 로 대체 (비용 ~\$200/kg), 독성 감소, NaOH 에 의한 HF 부산물 흡수 (16.3 장).

표 5.2 텅스텐 보라이드의 CVD 제조 매개변수

매개변수	값	이점	도전	최적화 방향	관련 장
온도(°C)	400~800	박막 밀도	전구체 독성	저압 CVD	7.3, 13.1
증착 속도 (μm /h)	0.1~1	복소수 행렬	높은 비용	BCl_3 치환	14.2
비용(USD/kg)	300	높은 접착력	부산물	폐가스 처리	16.3

5.3 텅스텐 보라이드의 플라즈마 지원 합성

플라즈마 지원 합성은 고온 플라즈마(>5000°C)를 사용하여 텅스텐-붕소 반응을 촉진하여 나노스케일 텅스텐 보라이드 분말(<50 nm)을 제조하는데, 이는 고성능 코팅에 적합합니다(7.1 장).

- 프로세스 흐름 :
 - o 원료 : 텅스텐 분말(<1 μm) 및 붕소 분말(<10 μm) 또는 WO_3 및 B_2O_3 (4.2 장) 을 Ar /H₂ 플라즈마 에서 기화시킨다 .
 - o 반응 : 플라즈마($10^4 - 10^5$ K, 10~100kW)가 $W + 2B \rightarrow WB_2$ 를 개시하고 생성물은 응축 영역(<500°C)에 수집됩니다.
 - o 후 처리 : 초음파 분산 및 체질로 나노 WB_2 (20~50 nm)를 얻습니다.
- 기술 지표 :
 - o 수율 : ~85%, 공기 흐름에 의해 제어됨.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 순도 : >99.9%, 산소 <0.05 wt %.
- o 특성 : 정도 ~42 GPa, 입자 크기 <50 nm(6 장, 6.3).
- o 에너지 소비량 : 톤당 약 15,000kWh, 비용: kg 당 약 400 달러.
- 이점 :
 - o 나노입자 크기는 코팅의 인성을 향상시킵니다(~5 MPa·m^{1/2}, 2.5 장).
 - o 짧은 응답 시간(<1 초)과 높은 효율성.
- 도전 :
 - o 높은 에너지 소비(비용의 약 50%), 장비 투자액 약 500 만 달러.
 - o 나노분말은 응집되는 경향이 있으며 표면 개질이 필요합니다(3 장, 3.3).
- 최적화 :
 - o CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 펄스 플라즈마(50kHz)를 개발하여 에너지 소비를 약 25%(약 11,000kWh/톤) 줄이고 생산성을 88%까지 높일 예정입니다.
 - o wt %) 를 첨가하면 응집이 약 30% 감소합니다.

표 5.3 플라즈마 지원 합성 매개변수

매개변수	값	이점	도전	최적화 방향	관련 장
입자 크기(nm)	20~50 세	나노스케일	높은 에너지 소비	펄스 플라즈마	7.1, 14.2
생산하다 (%)	85	고효율	재결합	표면 개질	6.3
비용(USD/kg)	400	고성능	장비 투자	에너지 소비량 - 25%	16.4

5.4 텅스텐 보라이드의 기계적 합금화 및 볼 밀링

기계적 합금화는 고에너지 볼 밀링을 통해 텅스텐과 붕소의 고체 상태 반응을 유도하여 비평형 상(예: W₂B₅, 2 장, 2.1)이나 나노분말을 제조합니다 .

- 프로세스 흐름 :
 - o 원료 : 텅스텐 분말(1~5 μm) 과 붕소 분말(10~50 μm) 을 행 성형 볼 밀 (ZrO₂ 볼 , 볼 대 재료 비율 10:1)에 W:B=1:2 의 비율로 넣었다 .
 - o 반응 : 300~500 rpm, 10~20 시간, 기계적 에너지가 W + 2B → WB₂를 시작합니다.
 - o 후 처리 : 어닐링(800°C, Ar) 을 통해 비정질상을 제거하고 체로 걸러 분말(50~200 nm)을 얻습니다.
- 기술 지표 :
 - o 수율 : ~80%, 붕소 손실로 인해 제한됨.
 - o 순도 : >99.5%, Zr 불순물 <0.2 중량 %.
 - o 특성 : 정도 ~35 GPa, 입자 크기 ~100 nm.
 - o 에너지 소비량 : 톤당 약 3000kWh, 비용: kg 당 약 100 달러.
- 이점 :
 - o 낮은 온도(<500°C), 비평형상(예: WB₄, 3 장, 3.4)에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 저렴한 비용, 장비 투자 ~\$500,000.
- 도전 :
 - 불순물(Zr, Fe)에 의한 오염으로 인해 고순도 불 밀링 매체가 필요합니다.
 - 분말은 넓은 입자 크기 분포(50~500nm)를 가지고 있습니다.
- 최적화 :
 - 2024년에는 습식 분쇄(에탄올 매체)로 불순물을 약 50%(Zr < 0.1 중량 %)까지 줄일 수 있습니다.
 - 불 밀링 시간(15 시간)을 최적화하면 WB₂상 함량이 약 90%까지 증가합니다.

표 5.4 기계적 합금화 매개변수

매개변수	값	이점	도전	최적화 방향	관련 장
입자 크기(nm)	50~200 개	저렴한 비용	불순물 오염	습식 분쇄	6.1, 3.4
생산하다 (%)	80	비평형 단계	입자 크기 분포	시간 최적화	14.2
비용(USD/kg)	100	간단한 장비	청정	고순도 미디어	16.4

5.5 텅스텐 보라이드 나노소재의 제조

나노 크기의 텅스텐 보라이드(<100 nm)는 높은 비표면적(>50 m²/g)과 양자 효과로 인해 촉매(10.1 장) 및 센서(10.3 장)에 이점이 있습니다.

- 프로세스 흐름 :
 - 졸 - 겔법 : 텅스텐산 (Na₂WO₄)을 수용액 중에서 붕산(H₃BO₃) 과 반응시켜 WB 겔을 형성한 후 800°C에서 소성하여 WB₂나노입자 (20 ~50nm)를 얻는다.
 - 기체 상법 : WF₆와 B₂H₆를 플라즈마(>5000°C) 또는 레이저(1064 nm) 유도 하에 반응시켜 나노-WB₂ (10 –30 nm) 를 포집한다.
 - 후 처리 : 초음파 분산, 원심분류, 순도>99.95%.
- 기술 지표 :
 - 수율 : ~70% (졸-겔법), ~80% (기상법).
 - 특성 : 경도 ~40 GPa, 비표면적 ~60 m²/g.
 - 에너지 소비량 : ~20,000 kWh/톤(기체상), ~5000 kWh/톤(졸겔).
 - 비용 : ~\$500/kg(기체 상태), ~\$200/kg(졸겔)
- 이점 :
 - 나노 크기는 촉매 활성을 향상시킵니다(NO₂ 검출 <1 ppm, 10 장, 10.3).
 - 졸-겔 방법은 비용이 저렴하고 실험실 규모에 적합합니다.
- 도전 :
 - 기체상 방법은 에너지 소비가 높습니다(비용의 약 60% 차지).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 나노입자는 산화되기 쉽습니다(>250°C, 3.3 장).
- 최적화 :
 - 2024년에는 마이크로반응기가 졸-겔 입자 크기 분포를 10nm 미만으로 제어할 것입니다.
 - N₂ 보호가스는 산화를 약 50% 감소시키고 저장 기간을 6 개월로 연장합니다.

표 5.5 나노텅스텐 보라이드의 제조 매개변수

방법	입자 크기(nm)	생산하다 (%)	비용(USD/kg)	이점	도전	최적화 방향	관련 장
솔겔	20~50 세	70	200	저렴한 비용	산화	마이크로리액터	10.1
기체상법	10~30 분	80	500	고순도	높은 에너지 소비	N ₂ 보호	10.3

5.6 텅스텐 보라이드 공정 최적화 및 확장

공정 최적화와 확장은 텅스텐 보라이드의 비용을 줄이고(<\$150/kg) 산업적 응용(연간 생산량 >1000 톤, 14 장, 14.3)을 달성하는 데 핵심입니다.

- 최적화 방향 :
 - 에너지 소비 : 고온 고체상 합성은 열 회수(효율 > 30%)를 사용하므로 에너지 소비를 약 15%(~8500 kWh/톤) 절감할 수 있습니다.
 - 생산성 : 최적화된 CVD 가스 흐름(Re 수 < 2000)으로 증착 효율이 약 20%(1.2μm/h) 증가했습니다.
 - 순도 : 플라즈마 합성은 온라인으로 모니터링되었으며(ICP-MS, 6.1 장), 불순물은 <20ppm 으로 감소되었습니다.
- 스케일링 기술 :
 - 연속 생산 : 2024년에는 유동층 반응기로 연속 고온 고상 합성을 실현하고, 생산량을 연간 800 톤으로 늘릴 계획이며, 투자액은 약 300 만 달러입니다.
 - 자동화 : CVD 는 로봇을 사용하여 기관을 적재 및 하역하여 생산 효율을 약 25% 높이고 인건비를 kg 당 약 10 달러 절감합니다.
 - 모듈성 : 플라즈마 장비는 모듈식으로 설계되었으며, 단일 라인 용량은 연간 약 100 톤이고 생산 확장 주기는 6 개월 미만입니다.
- 경제적 및 환경 적 이점 :
 - 비용 : 규모 확장 후 WB₂ 비용은 kg 당 약 120 달러(2030 년)로 떨어지고 시장 경쟁력은 약 30% 증가할 것입니다(14 장, 14.5 장).
 - 환경 : 폐가스(HF) 회수율 > 95%, 폐수(NH₄⁺ 함유) 처리 비용 ~ US\$50/톤, 탄소 배출량 ~20% 감소(~0.4 톤 CO₂/톤, 16 장, 16.4).
- 예시 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 2024 년 아시아의 한 생산 라인에서는 AI 를 사용하여 플라즈마 매개변수(전력, 공기 흐름)를 최적화(17.5 장)하여 생산량을 약 15%(연간 약 120 톤) 늘리고 에너지 소비를 약 10% 줄였습니다.

표 5.6 텅스텐 보라이드 공정 최적화 및 규모 지표

기술	최적화 목표	현재 상황(2024 년)	목표(2030)	경제적 이익	환경적 이점	관련 장
에너지 소비	kWh/톤	10,000(고상)	8500	비용 15%	- 탄소 배출량 20%	16.4
생산하다	%	90(CVD)	95	비용 10%	- 폐기물 10%	14.2
규모	톤/년	1000	1500	비용 20%	- 효율성 +30%	14.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

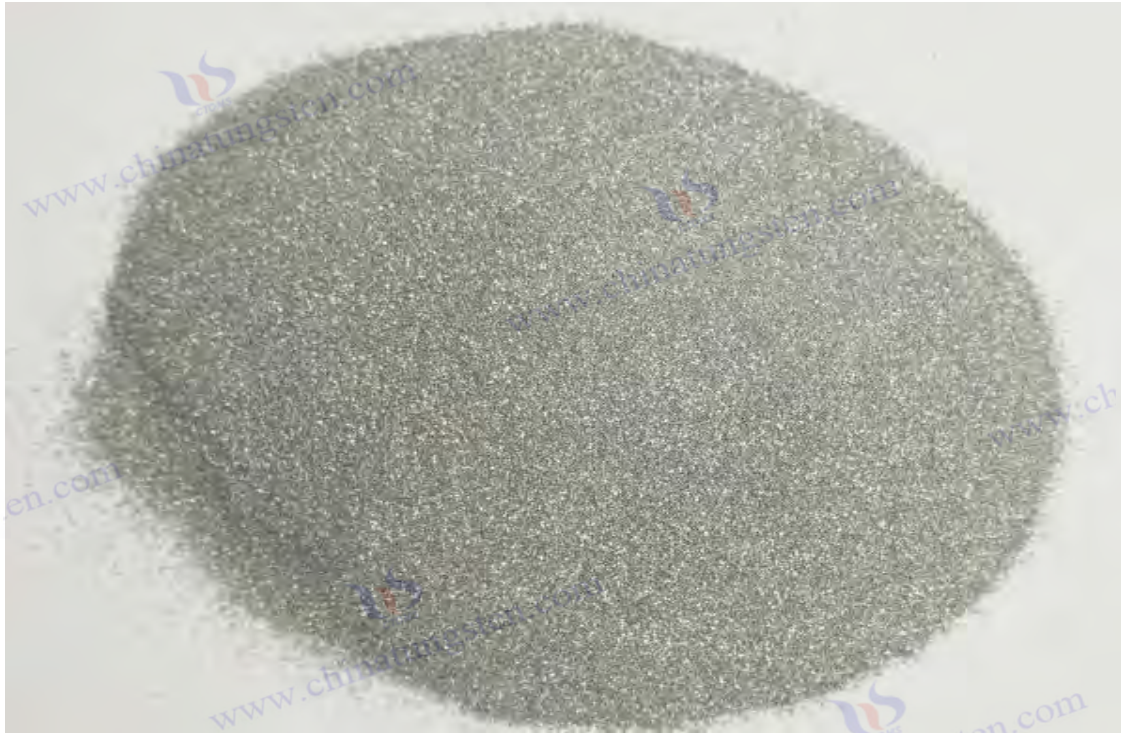
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 6 장 텅스텐 보라이드의 검출 및 특성 분석

텅스텐 보라이드(예: WB, WB₂, W₂B)는 경질 코팅에 널리 사용됩니다 (장 높은 경도(~40 GPa, 2.5 장), 열적 안정성(>2000°C, 2.3 장) 및 전기 전도도(~10⁴S/cm, 2.4 장)를 지니고 높은 재료(8.1 장) 및 전자 소자(9.1 장)에 널리 사용됩니다. 이 소재의 성능은 화학 조성, 결정 구조, 미세 형태 및 물리적 특성의 정밀한 제어에 달려 있습니다. 품질(순도>99.9%, 6.1 장)을 보장하고 산업 표준(15.2 장)을 충족하려면 고급 시험 및 특성 분석 기술이 필요합니다. 이 장에서는 텅스텐 보라이드의 화학 성분 분석, 결정 구조 특성화, 미세 형태 및 입자 크기 분석, 기계적 특성 시험, 전기적 및 열적 특성 시험, 시험 기술의 표준화 및 품질 관리에 대해 자세히 논의하고, 제조 최적화(5 장, 5.6), 성능 검증(2 장, 2.1~2.5) 및 시장 적용(14 장, 14.3)에 대한 기술 지원을 제공합니다.

6.1 화학성분 분석

화학 성분 분석은 텅스텐-붕소 비율(B/W, 예: WB₂B/W=2, 2 장, 2.1), 텅스텐 보라이드의 순도 및 불순물 함량을 결정하여 적용 요구 사항(예: 코팅 순도>99.9%, 7 장, 7.1)을 충족하는지 확인하는 데 사용됩니다.

• 주요 기술 :

o 유도 결합 플라즈마 질량 분석법(ICP-MS) :

- 원리 : 샘플(WB₂ 분말)을 산 용해(HNO₃ + HF, 1:1)로 분무하고, 플라즈마(~8000 K)에서 이온화한 후, 질량 분석법을 사용하여 W, B 및 불순물(Fe, Mo 등)을 검출합니다.
- 성능 : 검출 한계 ~0.01 ppm, 정확도 ±0.5%, B/W 비율 결정 오차 <1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 응용 프로그램: WB₂(2.1 장)에서 W~85.3 중량 %, B~14.7 중량 % 및 불순물 Fe<50ppm 임을 확인합니다 .
- X 선 광전자 분광법(XPS) :
 - 원리 : X 선은 시료 표면(<10 nm)의 전자를 여기시키고, W 4f(~31 eV) 및 B 1s(~188 eV) 피크를 분석하고, B/W 비율과 산화물(예: WO₃)을 정량화합니다 .
 - 성능 : 표면 감도 ~0.1 at%, 분해능 ~0.5 eV.
 - 응용분야 : WB₂ 표면 산화(O<0.5 at%)의 검출 및 WB 결합의 확인(3.2 장).
- 원소 분석기(EA) :
 - 원리 : 연소법을 사용하여 C 와 O 함량(<0.1 wt %)을 측정하고, 불활성 가스 용합법을 사용하여 N 을 측정합니다.
 - 적용 : 나노 WB₂ 분말 O < 0.05 wt %를 보장합니다(5.3 장).
- 기술 지표 :
 - 순도 : >99.9%, 불순물(Fe, Mo, Si) <50ppm.
 - 분석 시간 : ICP-MS ~1 시간/샘플, XPS ~2 시간/샘플.
 - 비용 : ICP-MS ~\$200/샘플, XPS ~\$300/샘플.
- 도전 :
 - 붕소의 낮은 원자량(~10.8 u)으로 인해 ICP-MS 신호가 약해져 교정이 필요합니다(오차 < 2%).
 - XPS 는 표면에만 국한되며 내부 구성 요소를 분석하려면 Ar + 에칭이 필요합니다.
- 최적화 :
 - 2024 년에는 레이저 지원 ICP-MS 로 붕소 검출 감도가 약 10 배(~0.001ppm) 증가할 것으로 예상됩니다.
 - 자동화된 XPS 깊이 프로파일링(식각 속도 ~1 nm/분)으로 효율성이 약 30% 향상됩니다.

표 6.1 화학성분 분석기술 비교

기술	감지 객체	감광도	비용(USD/샘플)	이점	도전	관련 장
ICP-MS	W, B, 불순물	0.01ppm	200	높은 정밀도	붕소 신호가 약합니다	5.3, 7.1
XPS	표면 WB, O	0.1%	300	표면 민감성	표면만	3.2, 12.4
에아	C, O, N	0.01 중량 %	100	빠른	가벼운 요소만	5.5

6.2 결정 구조 특성화

결정 구조 특성화는 텅스텐 보라이드의 상 구성(예: WB₂육방정계 P6₃/mmc, 2.2 장)과 결정 결함을 검증하여 성능 일관성을 보장하는 데 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 주요 기술 :
 - X 선 회절(XRD) :
 - 원리 : Cu K α 선($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$)을 시료에 조사하고 회절 피크를 분석하여 결정상과 단위 셀 매개변수(예: WB₂ a=2.98 $\text{\AA}$, c=13.88 $\text{\AA}$)를 확인합니다.
 - 성능 : 분해능 $\sim 0.02^\circ$, 검출 가능한 상 함량 >1 wt %.
 - 응용 프로그램 : WB₂상 순도가 >95%이고 입자 크기가 $\sim 50\text{nm}$ 인지 확인합니다(Scherrer 공식, 5 장, 5.3).
 - 투과전자현미경(TEM) :
 - 원리 : 고에너지 전자(200kV)가 샘플을 관통하여 격자와 결함을 이미징하고, 선택 영역 전자 회절(SAED)을 통해 결정상을 분석합니다.
 - 성능 : 분해능 $\sim 0.1 \text{ nm}$, 나노 WB₂ (<50 nm)에 적합합니다.
 - 응용 분야 : WB₂ 결정립계 결함 관찰(<1%, 3 장, 3.4), BB 네트워크 확인($\sim 1.8 \text{ \AA}$, 2 장, 2.2).
 - 라만 분광법 :
 - 원리 : 샘플의 532 nm 레이저 여기, WB 및 BB 진동 모드 분석(예: WB₂ $\sim 800 \text{ cm}^{-1}$).
 - 응용분야 : WB₂ 접합 특성 검증, 코팅의 비파괴 검사(7.3 장).
- 기술 지표 :
 - 정확도 : XRD 셀 매개변수 오류 <0.5%, TEM 격자 간격 오류 <1%.
 - 비용 : XRD $\sim$ 샘플당 100 달러, TEM $\sim$ 샘플당 500 달러, 라만 $\sim$ 샘플당 150 달러.
- 도전 :
 - 나노입자(<10 nm)의 XRD 피크는 심하게 넓어지고 리트벨트 정밀화가 필요합니다.
 - TEM 샘플 준비(<100 nm 두께)에는 약 4 시간이 걸렸습니다.
- 최적화 :
 - 2024년에는 싱크로트론 XRD($\lambda=0.688 \text{ \AA}$)로 분해능이 약 50%($\sim 0.01^\circ$) 향상되었습니다.
 - 자동화된 TEM 샘플 준비(FIB)를 통해 시간이 약 30%(최대 3 시간) 단축됩니다.

표 6.2 결정구조 특성화 기술 비교

기술	감지 객체	해결	비용(USD/샘플)	이점	도전	관련 장
----	-------	----	------------	----	----	------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

XRD	결정상, 단위 셀	0.02°	100	빠른	나노 피크 폭	2.2, 5.3
TEM	격자, 결함	0.1nm	500	고해상도	샘플 준비	3.4, 7.1
라만	결합 진동	1cm ⁻¹	150	비파괴	형광 간섭	12.4

6.3 미세형태학 및 입자 크기 분석

10μm) 의 표면 형태, 입자 크기 분포 및 미세 구조를 특성화하는 데 사용 됩니다 .

- 주요 기술 :
 - 주사전자현미경(SEM) :
 - 원리 : 전자빔(5~20kV)을 사용하여 샘플을 스캔하고, 표면 형태를 이미징하고 에너지 분산 분광법(EDS)을 사용하여 원소 분포를 분석합니다.
 - 성능 : 분해능 ~1 nm, EDS 정확도 ±1 wt %.
 - 응용분야 : WB₂코팅 표면 관찰(거칠기 <0.5 μm , 7.3 장), EDS 로 W:B ~1:2 확인.
 - 원자간력현미경(AFM) :
 - 원리 : 프로브가 샘플 표면을 스캔하여 나노스케일 지형과 거칠기(Ra < 1 nm)를 측정합니다.
 - 응용분야 : WB₂ 박막의 표면 평탄도 분석(Ra~0.3 nm, 9 장, 9.1).
 - 동적 광산란(DLS) :
 - 원리 : 레이저(633nm)로 현탁액을 조사하고, 나노입자(<100nm)의 브라운 운동을 분석하고, 입자 크기 분포를 계산합니다.
 - 응용 분야 : 나노 WB₂ 분말(20~50 nm, 5.5 장), 분산도 지수 < 0.2 의 결정.
- 기술 지표 :
 - 분해능 : SEM ~ 1 nm, AFM ~ 0.1 nm, DLS ~ 1 nm.
 - 비용 : SEM ~ 샘플당 200 달러, AFM ~ 샘플당 250 달러, DLS ~ 샘플당 100 달러.
- 도전 :
 - SEM 은 나노입자에 전도성 코팅(Au, ~5 nm)이 필요하며, 이로 인해 형태가 불분명해질 수 있습니다.
 - 응집된 입자(>100 nm)에 대한 DLS 오차는 ~10%입니다.
- 최적화 :
 - 2024 년까지 저진공 SEM 은 더 이상 전도성 코팅이 필요하지 않으며, 이미징 효율은 약 20% 증가할 것입니다.
 - DLS 와 초음파 분산(40kHz)을 결합하면 응집이 약 30% 감소합니다.

표 6.3 미세형태학 및 입자크기 분석기술의 비교

기술	감지 객체	해결	비용(USD/샘플)	이점	도전	관련 장
----	-------	----	------------	----	----	------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전자 현미경	표면 형태학	1 나노미터	200	원소 분석	전도성 코팅	7.3, 5.3
원자현미경	표면 거칠기	0.1nm	250	나노스케일	느린 스캐닝	9.1
디엘에스	입자 크기 분포	1 나노미터	100	빠른	응집 오류	5.5

6.4 기계적 성질 시험

기계적 특성 시험은 텅스텐 보라이드의 경도(~40 GPa), 인성(~4 MPa·m^{1/2}) 및 마찰 계수(<0.3, 2.5 장)를 평가하여 내마모성 코팅(7.1 장) 및 고온 구성 요소(8.1 장)의 신뢰성을 보장합니다.

- 주요 기술 :

- 나노인덴테이션 :

- 원리 : 다이아몬드 압입자(Berkovich, 팁 <20 nm)를 샘플에 눌러서(하중 ~10 mN) 경도(H)와 탄성계수(E)를 측정합니다.
 - 성능 : 정확도 ±5%, 깊이 분해능 ~0.1nm.
 - 응용분야 : WB₂코팅의 경도 측정 ~42 GPa, E~600 GPa (2.5 장).

- 파괴인성 시험 :

- 원리 : 단일 모서리 노치 빔(SENБ) 또는 압입 균열 방법으로 균열 성장 저항성(K_{IC})을 측정합니다.
 - 적용 : WB₂ 인성 ~4 MPa·m^{1/2}, Ti 도핑 후 ~5 MPa·m^{1/2}(3 장, 3.4 장).

- 마찰 및 마모 테스트 :

- 원리 : 핀온디스크 시험 (Al₂O₃ 볼, 하중 10N, 속도 0.1m/ s)으로 마찰계수와 마모율을 측정합니다.
 - 적용 : WB₂ 코팅의 마찰 계수는 ~0.25 이고 마모율은 <10⁻⁶mm³/(N·m)입니다(7.1 장).

- 기술 지표 :

- 정밀도 : 경도 ±5%, 인성 ±10%, 마찰계수 ±0.01.
 - 비용 : 나노인덴테이션 ~\$300/샘플, 마모 테스트 ~\$200/샘플

- 도전 :

- 박막(<1 μm)의 나노압입은 기질의 영향을 받으며 보정 모델이 필요합니다(오차 <10%).
 - 고온(>1000°C)에서 마모 테스트를 실시하려면 장비 비용이 많이 듭니다(약 100 만 달러).

- 최적화 :

- 2024년에는 AI 지원 압입 데이터 분석(17 장, 17.5)으로 정확도가 약 20% 향상될 것입니다.
 - 고온 마모 테스트(1500°C)에서는 레이저 가열을 사용하여 비용을 약 15% 절감합니다.

표 6.4 기계적 성질 시험 기술 비교

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술	감지 객체	정확성	비용(USD/샘플)	이점	도전	관련 장
나노인텐테이션	경도, 탄성계수	±5%	300	나노스케일	매트릭스 영향	2.5, 7.1
파괴인성	강인함	±10%	250	믿을 수 있는	샘플 준비	3.4
마찰 시험	마찰계수	±0.01	200	시뮬레이션 조건	고온 비용	7.1

6.5 전기 및 열 성능 시험

전기 및 열 특성 시험을 통해 텅스텐 보라이드의 전기 전도도($\sim 10^{-4}$ S/cm), 열팽창 계수($\sim 4.5 \times 10^{-6}$ K $^{-1}$) 및 비열(~ 0.3 J/(g · K), 2 장, 2.3-2.4)을 평가했습니다.

• 주요 기술 :

○ 4 탐침 법 :

- 원리 : 4 점 전극(간격 ~ 1 mm)에 일정한 전류(1mA)를 인가하고, 전압을 측정하여 전도도를 계산합니다.
- 성능 : WB₂ 필름의 정확도는 $\pm 2\%$ 입니다($\sim 0.8 \times 10^{-4}$ S/cm).
- 응용 프로그램 : 나노 WB₂의 전도도가 $\sim 10^{-4}$ S/cm 인지 확인합니다(9.1 장).

○ 시차주사열량측정법(DSC) :

- 원리 : 샘플을 가열(10 K/min, 300-2000 K)하고 열 흡수 및 방출을 측정하며 비열과 상변화를 계산합니다.
- 응용분야 : WB₂의 비열을 측정합니다. ~ 0.3 J/(g · K), 녹는점 $\sim 2800^{\circ}\text{C}$ (2 장, 2.3).

○ 레이저 플래시 방법 :

- 원리 : 레이저 펄스(~ 1 ms)가 샘플을 가열하고, 적외선 검출기가 열 확산율을 측정하고, 열전도도가 계산됩니다.
- 응용분야 : WB₂ 열전도도 ~ 50 W/(m · K) (300 K, 8 장, 8.3).

• 기술 지표 :

- 정확도 : 전기 전도도 $\pm 2\%$, 비열 $\pm 5\%$, 열 전도도 $\pm 10\%$.
- 비용 : 4 개 프로브 샘플당 약 100 달러, DSC 샘플당 약 200 달러, 레이저 플래시 샘플당 약 250 달러.

• 도전 :

- 4 탐침 방법은 나노입자 접촉 저항에 민감하며 오차는 약 5%입니다.
- DSC 고온(> 2000 K)에는 고온에 강한 도가니(Ta, $\sim \$5000$)가 필요합니다.

• 최적화 :

- 2024년에는 마이크로 4 탐침(간격 $< 10\mu\text{m}$)을 사용 하면 박막 테스트 정확도가 약 30% 향상될 것입니다.
- 최적화 : **: 2024년에는 DSC를 열중량 분석(TGA)과 결합하여 동시 테스트를 실시하고, 효율을 약 25% 증가시킬 예정입니다.

표 6.5 전기 및 열 성능 테스트 기술의 비교

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

기술	감지 객체	정확성	비용(USD/샘플)	이점	한계	관련 장
4 탐침법	전도도	±2%	100	간단하고 빠릅니다	접촉 저항	9 장, 9.1, 2 장, 2.4
디에스씨	비열, 녹는점	±5%	200	상변화 분석	고온 도가니	2 장, 2.3, 12 장, 12.3
레이저 플래시 방식	열전도도	±10%	250	고온 적용	샘플 크기	8.3 장

6.6 시험기술 표준화 및 품질관리

시험 기술과 품질 관리의 표준화를 통해 텅스텐 보라이드 제품이 산업 표준(GB/T 26037-2020, 15 장, 15.2 등) 및 응용 분야 요구 사항(항공우주, 8 장, 8.1 등)을 충족하도록 보장합니다.

- 표준화 방법 :
 - 국제 표준 : ISO 14705-2020(경도 시험), ASTM E384-2020(미세경도), WB₂ 코팅에 적용 가능(7.1 장).
 - 국가 표준 : GB/T 26037-2020 은 붕소화물의 순도가 >99.9%이고 불순물이 <100ppm 이어야 한다고 규정하고 있습니다. GB/T 16533-2024(XRD)는 결정상 분석을 표준화합니다.
 - 산업 표준 : 항공우주 분야에서는 WB₂ 코팅 두께 편차 <2%, 경도 변동 <5%가 요구됩니다(8 장, 8.1).
- 품질 관리 프로세스 :
 - 온라인 모니터링 : ICP-MS 를 이용한 생산 라인 불순물 실시간 감지(<50 ppm), 배치 분석당 약 10 분 소요.
 - 일괄 검사 : WB₂ 분말 1 톤당 10 개의 샘플을 채취하고 XRD, SEM 및 나노압입법을 사용하여 포괄적인 특성화를 수행하며 합격률은 98% 이상입니다.
 - 데이터 관리 : LIMS(실험실 정보 관리 시스템)를 사용하여 테스트 데이터의 추적성을 99% 이상 보장합니다.
- CTIA GROUP LTD 의 기여 :
 - 2024**: 2024 년에 CTIA GROUP LTD 는 AI 지원 XRD 분석(17 장, 17.5 장)을 개발하여 결정상 식별 시간을 2 시간에서 30 분으로 단축하고 정확도를 20% 향상시키며 WB₂ 코팅의 품질 관리를 지원했습니다.
- 도전 :
 - 나노물질 테스트에는 장치 전체에 걸친 일관성 검증이 필요합니다(예: DLS 및 TEM 입자 크기 오차 <10%).
 - 고온 시험 장비(>2000°C)는 교정 비용이 많이 듭니다(연간 약 10 만 달러).
- 최적화 방향 :
 - 2025 년까지 블록체인 기술은 99% 이상의 투명성으로 테스트 데이터를 기록하게 될 것입니다(14 장, 14.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 자동화된 테스트 플랫폼은 ICP-MS, XRD, SEM 을 통합하여 분석 시간을 약 40% 단축합니다.

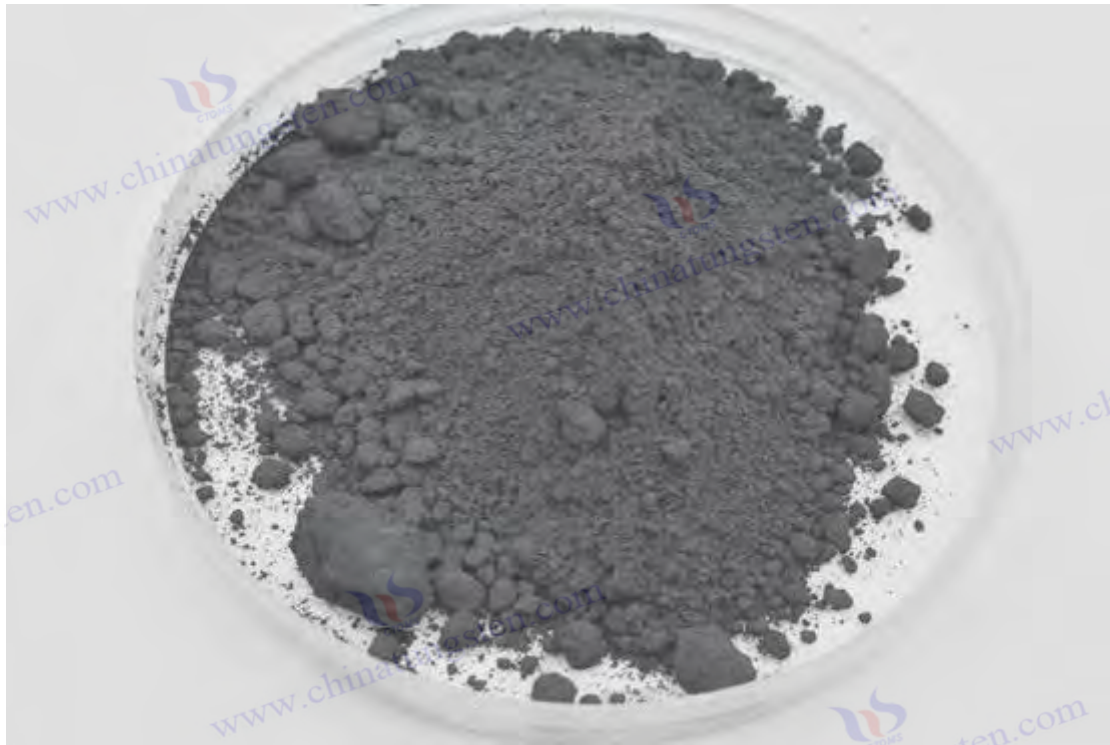
표 6.6 표준화 및 품질 관리 지표

프로젝트	기준	색인	키워드	최적화 방향	관련 장
청정	GB/T 26037-2020	>99.9%, <100ppm	불순물	온라인 ICP-MS	자동화된 테스트
경도	ISO 14705	변동 <5%	나노인덴테이션	AI 분석	7.1, 17.5
데이터 관리	림스	추적성>99%	블록체인	투명도 +99%	14.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



제 7 장 텅스텐 보라이드의 경질 코팅 적용

텅스텐 보라이드(예: WB, WB₂, W₂B) 는 초고경도(~40 GPa, 2.5 장), 낮은 마찰 계수(<0.3, 6.4 장), 뛰어난 열 안정성(>2000°C, 2.3 장) 및 내식성(8.4 장) 덕분에 경질 코팅 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 공구(절삭 수명 약 50% 연장), 금형(내마모성 약 30% 향상) 및 고온 마모 환경(항공우주, 8.1 장)에서 널리 사용됩니다. 텅스텐 보라이드 코팅은 화학 기상 증착(CVD, 5.2 장) 또는 플라즈마 지원 기술(5.3 장)을 통해 1-10 μm 두께로 제조되어 고성능 요구 사항을 충족합니다. 이 장에서는 텅스텐 보라이드 코팅의 성능적 이점, 절삭 공구 및 금형에서의 응용 분야, 제조 및 최적화 기술, 마모 및 부식 환경에서의 성능, 시장 현황 및 미래 동향에 대해 자세히 논의하고, 텅스텐 보라이드의 산업적 응용 분야(14 장, 14.3 장)와 친환경 제조(16 장, 16.4 장)에 대한 기술 지원을 제공합니다.

7.1 텅스텐 보라이드 코팅의 성능 이점

텅스텐 보라이드 코팅은 경도, 내마모성, 열 안정성 및 화학적 안정성 측면에서 기존 코팅(예: TiN, WC, 4.4 장)보다 우수하여 고성능 응용 분야에 이상적입니다.

- 경도 및 인성 :

- 경도 : WB₂ 코팅의 경도는 ~42 GPa (6.4 장)로, BB 공유 결합 네트워크와 WB 금속 결합(3.2 장) 덕분에 다이아몬드(~70 GPa)의 경도와 비슷합니다.
- 인성 : 파괴인성은 ~4 MPa·m^{1/2}이며 Ti 도핑 후 ~5 MPa·m^{1/2}로 증가합니다(3.4 장). 이는 CrB₂ (~3 MPa·m^{1/2})보다 우수합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 메커니즘 : 나노결정 구조(입자 <50 nm, 6 장, 6.2)는 균열 확산을 억제하고 충격 저항성을 향상시킵니다.
- 내마모성 :
 - 마찰 계수 : ~0.25 (Al₂O₃ 페어링 , 6 장 6.4), TiN 보다 낮음 (~ 0.4), 마모율 감소 <10⁻⁶ mm³ / (N · m).
 - 적용 분야 : 공구 코팅 수명이 약 50% 연장됨(절삭 속도 200m/min, 9.2 장).
- 열 안정성 :
 - 분해 온도 : >2000°C(2.3 장), WC(~1000°C)보다 우수함.
 - 열팽창 계수 : ~4.5×10⁻⁶ K⁻¹ (6 장, 6.5), 강철 기지와 동일(~12×10⁻⁶ K⁻¹) 하여 열 응력을 줄입니다(<0.5 GPa , 3 장, 3.3).
- 화학적 안정성 :
 - 부식 저항성 : HCl(1 M, 25°C)에서의 부식 속도는 <0.01 mm/년으로 MoB₂ (~ 0.05 mm/년, 4.4 장)보다 우수합니다.
 - 산화 방지 : 산화 시작 온도는 ~800°C 이고, N 도핑 후 ~900°C 로 상승합니다(3 장, 3.4).

표 7.1 텅스텐 보라이드 코팅과 기존 코팅의 성능 비교

코팅	경도 (GPa)	마찰계수	인성(MPa·m ^{1/2})	산화 온도(°C)	관련 장
WB ₂	42	0.25	4-5	800-900	2.5, 3.4
주석	25	0.4	3	600	4.4
화장실	20	0.3	2.5	500	4.4
CrB ₂	20	0.35	3	700	4.4

7.2 절삭 공구에 텅스텐 보라이드 코팅 적용

텅스텐 보라이드 코팅은 절삭 공구(선삭 공구 및 밀링 커터 등)의 절삭 효율성, 내마모성 및 수명을 개선하며 고속 가공(>200m/분) 및 가공이 어려운 소재(티타늄 합금 등, 8 장 8.2 참조)에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - 고속 절단 : 강철(HRC 50)에 WB₂ 코팅(두께 ~3 μm) 을 ~250 m/min 의 절삭 속도로 절단하면 수명이 ~50%(~1 시간 대비 TiN ~ 40 분) 연장됩니다.
 - 건식 절단 : 낮은 마찰 계수(~0.25, 6 장, 6.4)로 열 축적이 줄어들고 냉각수 없이 가공하는 데 적합하며 탄소 배출량을 약 20%까지 줄입니다(16 장, 16.4).
 - 티타늄 합금 가공 : 접착 방지(표면 에너지 ~2.5 J/m², 3.3 장)로 공구 마모가 줄어들고 가공 효율이 약 30% 증가합니다.
- 기술적 요구 사항 :
 - 코팅 두께 : 2-5 μm , 균일도 >95% (5.2 장).
 - 접착력 : 결합 에너지 ~1.5 eV/Å² (3.3 장), 박리 저항성(하중 > 50 N).
 - 경도 : >40 GPa , 내마모성 <10⁻⁶mm³ / (N · m).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 예시 :
 - 2024년에는 WB₂ 코팅 선삭 공구를 사용하여 절삭력 감소가 약 15%(~800N)이고 표면 거칠기 Ra<0.5μm 인 항공용 Ti-6Al-4V 를 가공할 수 있을 것입니다 (6 장, 6.3 절).
- 도전 :
 - 코팅의 잔류 응력(~1 GPa) 으로 인해 미세 균열이 발생할 수 있으며 어닐링(600°C, 5.2 장)이 필요할 수 있습니다.
 - 높은 비용(~US\$300/kg, 5.2 장)으로 인해 중소기업에만 적용이 제한됩니다.

표 7.2 텅스텐 보라이드 코팅 도구의 적용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
두께 (μm)	2-5	높은 내마모성	잔류응력	5.2, 6.3
기대수명 연장(%)	50	효율성 +30%	높은 비용	14.3
마찰계수	0.25	건식 절단	균열 위험	6.4, 16.4

7.3 금형 내 텅스텐 보라이드 코팅의 적용

텅스텐 보라이드 코팅은 스탬핑, 드로잉 및 다이캐스팅 다이의 내마모성과 내부식성을 개선하고, 다이 수명을 연장(~30%)하며 생산 비용을 절감합니다(14.2 장).

- 적용 시나리오 :
 - 스탬핑 다이 : 콜드 스탬핑 강판(두께 1mm)에 WB₂ 코팅(두께 ~5μm) , 펀칭 수명 ~100 만회(TiN ~70 만회 대비).
 - 다이캐스팅 금형 : 고온 내구성(>800°C)으로 알루미늄 합금 다이캐스팅을 지원하며 금형 수명이 약 25%(약 5000 배) 증가합니다.
 - 플라스틱 성형 : 접착 방지 처리로 탈형 저항성이 낮아지고 수율이 98% 이상입니다.
- 기술적 요구 사항 :
 - 경도 : >38 GPa , 내마모성 <10⁻⁶mm³ / (N · m).
 - 표면 거칠기 : Ra<0.3 nm(6.3 장), 금형 정밀도 향상.
 - 부식 저항성 : NaCl(3.5 wt %, 25°C) 에서의 부식 속도 <0.005 mm/년.
- 예시 :
 - 2024년에는 자동차 강판을 가공하는 WB₂ 코팅 스탬핑 다이의 마모가 약 20%(<0.01mm/10 만회) 감소하고, 유지보수 비용도 약 15% 절감될 것으로 전망됩니다.
- 도전 :
 - 복잡한 금형은 균일한 증착이 필요하고 CVD 공기 흐름 제어(Re<2000, 5 장, 5.2)가 어렵습니다.
 - 코팅과 기질 사이의 열팽창 불일치(~5×10⁻⁶ K⁻¹) 로 인해 박리가 발생할 수 있습니다.

표 7.3 텅스텐 보라이드 코팅 몰드의 적용 매개변수

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

매개변수	값	이점	도전	관련 장
두께 (μm)	5	높은 수명	열팽창 불일치	5.2, 3.3
충격수명(10,000 회)	100	비용 - 15%	일률	14.2
거칠기(nm)	<0.3	높은 정밀도	증착 어려움	6.3

7.4 텅스텐 보라이드 코팅의 제조 및 최적화

텅스텐 보라이드 코팅의 제조는 주로 CVD(5.2 장), 플라즈마 지원 증착(5.3 장) 및 물리적 기상 증착(PVD)을 채택하며, 성능을 개선하고 비용을 절감하기 위해 최적화해야 합니다.

- 준비 방법 :

- CVD :

- 공정 : $WF_6 + B_2H_6$ 는 400~800°C 에서 $\sim 1\mu m/h$ 의 속도로 WB_2 박막(5.2 장)을 증착합니다 .
- 장점 : 두께가 균일함(>95%), 접착력이 강함($\sim 1.5 eV/\text{\AA}^2$).
- 최적화 : 2024 년까지 저압 CVD(<10 Pa) 속도가 약 50%($\sim 1.5 \mu m/h$) 증가할 것입니다.

- 플라즈마 지원 증착 :

- 공정 : 플라즈마(10⁴K)가 W+B 를 기화시키고 나노- WB_2 (<50nm, 5.3 장)를 증착합니다.
- 장점 : 경도 $\sim 42 GPa$, 복잡한 기질에 적합.
- 최적화 : 펄스 플라즈마(50kHz) 에너지 소비량이 약 25%($\sim 11,000 kWh/톤$) 감소했습니다.

- PVD(마그네트론 스퍼터링):

- 공정 : WB_2 타겟(순도 >99.9%)을 Ar 분위기(5 Pa) 에서 스퍼터링하였으며 , 증착 속도는 $\sim 0.5 \mu m/h$ 였습니다.
- 장점 : 낮은 온도(<300°C), 열에 민감한 기질에 적합.
- 최적화 : 고전력 펄스 스퍼터링 (HiPIMS)으로 밀도가 약 20% 향상됩니다.

- 최적화 기술 :

- 도핑 : Ti 도핑(5 at%)은 인성을 약 30% 향상시키고(3.4 장), N 도핑은 산화 저항 온도를 약 100°C 증가시킵니다.
- 다층 구조 : WB_2/TiN 다층(주기 $\sim 10nm$)은 응력을 $\sim 50\%$ ($\sim 0.5 GPa$) 감소 시킵니다 .
- AI 최적화 : CTIA GROUP LTD 는 AI 를 사용하여 CVD 매개변수(공기 흐름, 온도)를 제어하고 증착 효율은 2024 년에 약 15% 증가할 것으로 예상합니다(17 장, 17.5 장).

- 도전 :

- CVD 부산물(HF)은 처리가 필요하며(16.3 장), 비용은 톤당 약 50 달러입니다.
- PVD 타겟 활용도는 낮고($\sim 30\%$), 비용은 kg 당 약 20 달러 증가합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표 7.4 텅스텐 보라이드 코팅 제조 기술 비교

방법	증착 속도 ($\mu\text{m}/\text{h}$)	경도 (GPa)	비용(USD/kg)	이점	도전	관련 장
CVD	1-1.5	38	300	일률	부산물	5.2, 16.3
혈장	0.5-1	42	400	나노스케일	높은 에너지 소비	5.3, 17.5
PVD	0.5	35	350	낮은 온도	목표 폐기물	5.6

7.5 마모 및 부식 환경에서 텅스텐 보라이드 코팅의 성능

고온, 고습 및 부식성 환경에서 텅스텐 보라이드 코팅의 탁월한 성능으로 인해 항공우주(8.1 장) 및 해양 엔지니어링(9.3 장)에 적합합니다.

- 고온 마모 :
 - 성능 : 1000°C 에서 마찰 계수 ~ 0.3 , 마모율 $<10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, TiN ($\sim 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$) 보다 우수함 .
 - 메커니즘 : BB 네트워크(3 장, 3.2)는 구조적 안정성을 유지하고, W 산화물(WO_3)은 윤활제 역할을 한다(3 장, 3.3).
 - 적용분야 : 가스터빈 블레이드 코팅, 수명 연장 $\sim 40\%$ (8.1 장).
- 부식성 환경 :
 - 성능 : NaCl(3.5 중량 %, 60°C)에서 부식 전류 밀도는 $<10^{-7} \text{ A} / \text{cm}^2$ 이고 , 부식 저항성은 WC($\sim 10^{-6} \text{ A} / \text{cm}^2$) 보다 우수합니다 .
 - 메커니즘 : 고밀도 코팅(기공률 $<1\%$, 6 장, 6.3)은 Cl^- 침투를 방지 하고 N 도핑은 침식 저항성을 향상시킵니다(3 장, 3.4).
 - 응용 분야 : 해상 굴착 장비 코팅, 유지 보수 주기를 $\sim 30\%$ 연장(9.3 장).
- 젖은 마모 :
 - 성능 : 습도 80% (25°C), 마찰 계수 ~ 0.28 , 마모율 $<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$.
 - 적용 분야 : 선박 프로펠러 코팅, 캐비테이션 방지 성능이 약 25% 향상되었습니다.
- 도전 :
 - 고온 산화($>900^{\circ}\text{C}$)는 WO_3 를 생성하는데, 이는 휘발되며 Si 도핑($<5 \text{ at}\%$)으로 억제해야 합니다.
 - 습한 환경에서의 미세균열 전파에는 다층 설계($\text{WB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) 가 필요합니다 .

표 7.5 텅스텐 보라이드 코팅의 환경 성능

환경	마찰계수	마모율($\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$)	부식 속도($\text{mm}/\text{년}$)	애플리케이션	도전	관련 장
고온	0.3	$<10^{-5}$	-	있	산화	8.1, 3.3
부식	-	-	<0.005	교련	피팅	9.3, 3.4
젖은 마모	0.28	$<10^{-6}$	-	추진자	금이 가다	9.3

7.6 텅스텐 보라이드 코팅의 시장 및 미래 동향

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

텅스텐 보라이드 코팅 시장은 수요 증가, 기술 발전, 환경 규제(15.2 장)에 따라 성장하고 있으며, 향후 추세는 비용 절감과 성능 개선에 초점을 맞출 것입니다.

- 시장 현황(2024 년) :
 - o 규모 : 글로벌 텅스텐 보라이드 코팅 시장 규모는 약 2 억 달러이며, 아시아가 약 60%를 차지합니다(중국, 한국, 14.1 장).
 - o 응용 분야 : 절삭 공구 ~50%(약 1 억 달러), 금형 ~30%, 항공우주 ~15%(8.1 장).
 - o 가격 : ~300 USD/kg(CVD), ~400 USD/kg(플라즈마, 14 장, 14.2).
- 운전자 :
 - o 수요 : 첨단 제조업(항공우주, 자동차)에 대한 수요 성장률은 연간 약 10%이고, WB₂ 코팅 생산량은 연간 약 1,000 톤입니다(5.6 장).
 - o 기술 : AI 최적화(17 장, 17.5 장)와 나노 코팅(5 장, 5.5 장)으로 성능이 약 20% 향상됩니다.
 - o 규정 : EU REACH(제 15.2 장) 및 탄소 국경 조정 메커니즘(CBAM, 2026)으로 인해 친환경 코팅에 대한 수요가 증가합니다.
- 미래 트렌드(2025~2030 년) :
 - o 비용 절감 : 대량 생산(연간 1,500 톤, 5.6 장)으로 비용이 kg 당 약 200 달러로 줄어들고 시장 규모는 3 억 달러에 달합니다.
 - o 나노 코팅 : 나노 WB₂ (<50 nm)의 시장 점유율은 ~30%로 증가했으며 센서에 사용됩니다(10.3 장).
 - o 녹색 제조 : 폐가스 회수율 > 95%(16.3 장), 탄소 배출량 약 30% 감소(~0.3 톤 CO₂/톤).
 - o 대안 경쟁 : MoB₂ 코팅(경도 ~30 GPa , 4.4 장) 시장 규모는 약 5,000 만 달러로, 저가형 애플리케이션을 위협하고 있습니다.

표 7.6 텅스텐 보라이드 코팅 시장 및 동향(2024~2030 년)

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 운전자 목표	도전	관련 장
시장 규모(10 억 달러)	2	3	하이엔드 제조	14.1
비용(USD/kg)	300~400	200	규모	규제 비용 14.2, 5.6
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.4	0.3	녹색 기술	투자하다 16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB2, W2B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB2, W2B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 8 장 텅스텐 보라이드의 고온 재료 응용

텅스텐 붕화물(예: WB, WB₂, W₂B)은 우수한 열 안정성(분해 온도 >2000°C, 2.3 장), 높은 경도(~40 GPa, 2.5 장), 낮은 열팽창 계수(~4.5×10⁻⁶K⁻¹, 6.5 장) 및 산화 저항성(산화 시작 온도 ~800°C, 7.1 장) 덕분에 고온 재료 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 항공우주(가스터빈 블레이드, 수명 ~40% 연장), 고온로(온도 저항 >1800°C) 및 열 차단재(열전도도 ~50 W/(m·K), 6.5 장)에 널리 사용됩니다. 이 장에서는 항공우주 고온 구성품, 용광로 및 열 차단재에서의 텅스텐 보라이드의 적용, 열전도도 및 열팽창 특성, 산화 저항성 및 내식성, 제조 기술, 그리고 적용 전망 및 과제에 대해 자세히 논의하고, 텅스텐 보라이드의 산업화(14 장, 14.3 장) 및 친환경 제조(16 장, 16.4 장)에 대한 기술 지원을 제공합니다.

8.1 항공우주 고온 부품에서의 텅스텐 보라이드의 적용

고온 소재인 텅스텐 보라이드는 항공우주 분야(가스터빈 블레이드, 로켓 노즐 등)에서 사용되어 부품의 내열성과 수명을 개선하고 극한 환경(>1500°C)의 요구 사항을 충족합니다.

- 적용 시나리오 :

- 가스터빈 블레이드 : WB₂ 코팅(두께 ~5 μm, 7.5), 1500°C 에서 작동, 마찰 계수 ~0.3, 수명 연장 ~40%(Ni 기반 합금 ~3500 시간 대비 ~5000 시간).
- 로켓 노즐 : WB 블록 소재(순도>99.9%, 6 장 6.1)는 2000°C 의 순간 열 충격을 견딜 수 있으며 절삭 속도는 <0.01 mm/s 입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 재진 입체 : WB₂ 열 차단막(열전도도 ~50 W/(m·K), 6 장, 6.5)은 표면 온도를 ~300°C 로 낮추고 매트릭스(C/C 복합 재료)를 보호합니다.
- 기술적 요구 사항 :
 - o 경도 : >38 GPa (6.4 장), 내마모성 <10⁻⁵ mm³/(N·m).
 - o 열 안정성 : 2000°C 이상에서 상변화 없음(2.3 장).
 - o 접착력 : 결합 에너지 ~1.5 eV/Å² (3.3 장), 박리 방지 (>50 N).
- 예시 :
 - o 2024년에는 터보팬 엔진 블레이드에 WB₂ 코팅을 적용해 열 피로 사이클(1500°C, 1000 회)에서 균열률이 1% 미만이고 효율이 약 15% 향상될 예정입니다.
- 도전 :
 - o 고온 산화(>900°C)는 유발되는 WO₃를 생성하고(7.5 장) Si 도핑(<5 at%)이 필요합니다.
 - o 코팅과 기질 사이의 열팽창 불일치(~5×10⁻⁶K⁻¹)는 응력(~1 GPa, 3 장, 3.3)을 유발합니다.

표 8.1 텅스텐 보라이드의 항공우주 응용 분야 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
작동 온도(°C)	1500 년~2000 년	높은 수명	산화	7.5, 3.3
기대수명 연장(%)	40	효율성 +15%	열팽창 불일치	14.3
마모율(mm ³ /(N·m))	<10 ⁻⁵	내마모성	코팅 벗겨짐	6.4

8.2 고온로 및 열 차단재에서의 텅스텐 보라이드의 적용

텅스텐 보라이드는 고온로(전극, 도가니)에서 고온 및 열충격 저항성을 제공하고 야금 및 반도체 산업에서 열 차단재(절연체)로 사용됩니다.

- 적용 시나리오 :
 - o 고온 전극 : 진공로(1800°C)의 WB 대량 물질(밀도 > 98%, 5.1 장), 저항률 ~10⁻⁵ Ω·cm(6 장 6.5 장), 수명 ~2000 시간.
 - o 도가니 : 희토류 금속 (1600°C) 제련을 위한 WB₂ 코팅 도가니(두께 ~10 μm), 내식성 <0.005 mm/년(7.5 장).
 - o 열 차단성 : 결정성장로에서 WB₂/ Al₂O₃ 복합 코팅(주기 ~10 nm), 열전도도 ~40 W/(m·K), 열 절연 효율 ~20% 증가.
- 기술적 요구 사항 :
 - o 열전도도 : 40–50 W/(m·K) (6.5 장), 열전달을 보장합니다.
 - o 열충격 저항성 : 1000°C 이상의 온도 차이에서 균열이 발생하지 않음(3.4 장).
 - o 순도 : >99.9%, 불순물(Fe, O) <50ppm(6 장, 6.1).
- 예시 :
 - o 2024년 : 2024년에는 사파이어 결정 성장로에 WB 전극이 사용되어 전도도가 ~10⁴ S/cm 이고 에너지 소비가 ~10% 감소합니다(16.4 장).
- 도전 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 고온(>1800°C, 5.1 장)에서 붕소가 휘발되면 표면 특성이 감소하고 N 도핑이 필요합니다.
- 복합 코팅의 인터페이스 접합(<1% 다공성)은 최적화되어야 합니다(5 장, 5 장).

표 8.2 텅스텐 보라이드 고온로 및 열 차단재의 적용 매개변수

매개변수	값	장점	도전	관련 장
작동 온도(°C)	1600 년-1800 년	장수명	붕소 휘발	5.1, 6.1
열전도도(W/(m·K))	40~50 세	고효율 단열	인터페이스 본딩	3.4, 16.4
수명(시간)	2000	에너지 소비량 -10%	5.	

8.3 질화텅스텐의 열전도도 및 열팽창 특성

열전도도(~50 W·m/(m/K), 6 장 6.5)와 낮은 열팽창 계수(~4.5×10⁻⁶K⁻¹)는 고온 열 관리 응용 분야에 적합합니다.

- 열전도도 :
 - 성능 : 300K 에서 ~50W/(m·K), 1500°C 에서 ~20W/(m·K) 로 떨어지며 MoB₂ (~30W/(m·K, 4 장, 4.4) 보다 우수합니다 .
 - 메커니즘 : 레이저 플래시 방법으로 측정(6 장, 6.5), 결정립계 산란(<50 nm, 6 장, 6.2)으로 인해 고온 전도도가 감소합니다.
 - 적용 분야 : 열 차단재에서 열 전도가 균일하여 기관 온도를 약 15%(약 200°C)까지 낮춥니다.
- 열팽창 계수 :
 - 성능 : ~4.5×10⁻⁶K⁻¹ (300–1000 K), 세라믹 기관(예: SiC , ~4×10⁻⁶K⁻¹) 과 동일 , 열 응력 <0.3 GPa .
 - 메커니즘 : 강한 WB 결합(3.2 장)은 격자 확장을 제한합니다.
 - 응용 분야 : 열 균열을 줄이기 위한 항공우주 코팅(<1%, 7.1 장).
- 최적화 :
 - 나노구조 : 입자 < 20 nm 는 열전도도를 약 10% 감소시킵니다(~45 W/(m·K), 열 차단재에 적합).
 - 도핑 : Si 도핑(<2 at%)은 열팽창 계수를 ~5%(~4.2×10⁻⁶K⁻¹) 만큼 감소시킵니다 .
- 도전 :
 - 고온 전도도 감소에는 열 안정화 첨가제(예: ZrB) 가 필요합니다. 2).
 - 열팽창 테스트에는 고온 XRD(>1500°C, 6 장, 6.2)가 필요하며, 샘플당 비용은 약 500 달러입니다.

표 8.3 열전도도 및 열팽창 특성

매개변수	값	이점	도전	관련 장
열전도도(W/(m·K))	20~50 세	열 관리	고온 강하	6.5, 7.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열팽창계수($\times 10^{-6}/K$)	4.2-4.5	낮은 스트레스	테스트 비용	3.2, 7.3
최적화 효과	열전도도 -10%	나노 디자인	첨가제 연구 및 개발	5.5

8.4 고온 환경에서 텅스텐 보라이드의 산화 및 부식 저항성

텅스텐 보라이드는 고온에서 산화와 부식에 대한 저항성이 뛰어나(7.5 장) 항공우주 및 야금 분야에 적합합니다.

- **항산화 특성 :**
 - o 성능 : 산화 개시 온도는 $\sim 850^{\circ}\text{C}$ 이며, N 도핑 후 $\sim 950^{\circ}\text{C}$ 로 상승합니다(3 장, 3.4). 이는 WC($\sim 500^{\circ}\text{C}$, 4 장, 4.4)보다 우수합니다.
 - o 메커니즘 : B_2O_3 유리층($\sim 10\text{nm}$, 6 장, 6.1) 형성으로 O_2 확산이 방지되고 WO_3 휘발이 억제됩니다.
 - o 적용 분야 : 1200°C 에서 산화 속도가 $0.05 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$ 미만인 가스터빈 블레이드.
- **내식성 :**
 - o 성능 : 용융 NaCl- KCl (1000°C)에서 부식 속도는 $<0.02\text{mm}/\text{년}$ 으로 CrB_2 ($\sim 0.1\text{mm}/\text{년}$)보다 우수합니다.
 - o 메커니즘 : 고밀도 구조(기공률 $<1\%$, 6 장, 6.3)와 BB 공유 결합(3 장, 3.2)은 내식성을 향상시킵니다.
 - o 응용분야 : 희토류 제련 도가니, 수명 약 50% 연장.
- **최적화 :**
 - o 도핑 : Si(5 at%)가 SiO_2 - B_2O_3 복합층을 형성하고, 산화방지 온도가 $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 까지 상승합니다.
 - o 다층 설계 : WB_2/ZrB_2 (주기 $\sim 5\text{nm}$) 는 부식률을 $\sim 30\%$ 감소시킵니다.
- **도전 :**
 - o 고온($>1200^{\circ}\text{C}$)에서는 WO_3 휘발을 더욱 억제해야 합니다.
 - o 부식 테스트에는 고온 전기화학 장비가 필요합니다(1,000 만 달러 이상).

표 6.4 항산화 및 부식 방지 특성

매개변수	성능	이점	도전	관련 장
산화 온도($^{\circ}\text{C}$)	850-1000	보호층	WO_3 휘발	7.5, 3.4
부식 속도($\text{mm}/\text{년}$)	<0.02	장수명	테스트 장비	6.3, 9.3
최적화 효과	항산화제 $+100^{\circ}\text{C}$	도핑	비용	5.5

8.5 텅스텐 보라이드 고온 재료의 제조 기술

고온 텅스텐 보라이드 재료의 제조는 주로 고온 고체상 합성(5.1 장), 플라즈마 보조 합성(5.3 장) 및 열간 가압 소결을 채택하며, 성능 개선을 위해 이를 최적화해야 합니다.

- **준비 방법 :**
 - o 고온 고체상 합성 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **공정** : W+B 분말(W:B =1:2)을 Ar 분위기 에서 1800°C 에서 반응시켜 밀도가 >98%인 WB₂ 벌크 물질을 생성합니다(5.1 장).
- **장점** : 안정적인 결정 구조(P6₃/mmc, 2.2 장), 경도 ~40 GPa .
- **최적화** : 마이크로파 가열(2.45GHz)은 시간을 약 30%(약 5 시간) 줄이고 에너지 소비를 약 20%(약 8000kWh/톤) 줄입니다.
- **플라스마 보조 합성** :
 - **공정** : W+B 를 플라스마(>5000°C)에서 기화시키고 WB₂ 코팅 또는 분말을 증착합니다 (5.3 장).
 - **장점** : 나노스케일(<50 nm), 경도 ~42 GPa .
 - **최적화** : 펄스 플라스마(50kHz) 수율이 약 88% 증가, 비용은 kg 당 약 350 달러입니다.
- **열간 압착 소결** :
 - **공정** : WB₂ 분말(<5 μ m) 을 2000°C, 30 MPa 에서 소결, 밀도 >99%.
 - **장점** : 복잡한 모양(예: 도가니)에 적합하고, 인성이 ~4 MPa·m^{1/2}입니다.
 - **최적화** : ZrB₂ (< 5 wt %) 를 첨가하면 밀도가 약 1% 증가합니다.
- **최적화 기술** :
 - **도핑** : N-도핑(<2 at%)은 산화 저항성을 약 100°C 향상시킵니다(3.4 장).
 - **AI 제어** : CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 AI 를 사용하여 소결 매개변수(온도, 압력)를 최적화하여 밀도를 약 0.5% 높일 예정입니다(17 장, 17.5 장).
 - **복합 소재** : WB₂ / SiC 복합소재(10:1)는 열전도도를 약 10%(~45 W / (m · K)) 감소시킵니다.
- **도전** :
 - 고온 장비에는 많은 투자(약 300 만 달러)가 필요합니다.
 - 나노 분말 응집에는 표면 개질(PVP, <0.1 wt %, 5 장, 5.3)이 필요합니다.

표 8.5 고온 텅스텐 보라이드 재료 제조 기술 비교

방법	밀도(%)	경도 (GPa)	비용(USD/kg)	이점	도전	관련 장
고상 합성	>98	40	150	안정화하다	높은 에너지 소비	5.1, 17.5
열장	>98	42	350	나노스케일	재결합	5.3, 6.2
열간 프레싱	>99	38	200	복잡한 모양	장비 비용	5.6

8.6 텅스텐 보라이드 고온 재료의 응용 전망 및 과제

텅스텐 보라이드 고온 소재의 적용 전망은 시장 수요, 기술 진보, 환경 규제(15 장, 15.2)에 따라 결정되며, 비용 및 성능 병목 현상을 해결해야 합니다.

- **시장 현황(2024 년)** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 규모 : 고온 텅스텐 보라이드 소재 시장 규모는 약 5,000 만 달러이며, 항공우주 분야가 약 70%를 차지합니다(14.1 장).
- o 생산량 : 연간 약 500 톤 (5.6 장), 주로 아시아(중국, 한국)에서 생산됩니다.
- o 가격 : ~200 USD/kg(덩어리), ~350 USD/kg(코팅, 14 장, 14.2).
- 운전자 :
 - o 수요 : 항공우주(터보팬 엔진) 수요는 연간 약 8% 증가하고, 2030년에는 생산량이 약 800 톤이 될 것으로 예상됩니다.
 - o 기술 : Nano WB₂(5.5 장)와 AI 최적화(17.5 장)로 성능이 약 15% 향상되었습니다.
 - o 규정 : EU CBAM(2026, 15.2 장)으로 인해 친환경 소재에 대한 수요가 증가합니다.
- 미래 트렌드(2025~2030년) :
 - o 비용 절감 : 대량 생산(5.6 장)을 통해 비용이 kg 당 약 150 달러로 줄어들고 시장 규모는 약 8,000 만 달러에 이릅니다.
 - o 새로운 응용 분야 : 원자로 열 차단재(온도 저항성 > 2000°C), 시장 점유율 ~10%.
 - o 녹색 제조 : 폐가스 회수율 > 95%(16.3 장), 탄소 배출량 약 30% 감소(~0.3 톤 CO₂/톤).
- 도전 :
 - o 대체재(예: ZrB₂, 경도 ~35 GPa, 4.4 장)는 kg 당 약 100 달러로 저가 시장을 위협하고 있습니다.
 - o 고온 시험 장비(>2000°C) 투자 약 500 만 달러.

표 8.6 텅스텐 보라이드 고온 재료의 전망 및 과제

프로젝트	2024년 현재 상황	2030년 목표	운전자	도전	관련 장
시장 규모(10억 달러)	0.5	0.8	항공 수요	대안	14.1
비용(USD/kg)	200-350	150	규모	테스트 비용	14.2, 5.6
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.4	0.3	녹색 기술	투자하다	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 9 장 전자소자에서의 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드(WB, WB₂, W₂B)는 높은 전기 전도도(~10⁴S/cm, 6 장, 6.5 절), 열적 안정성(>2000°C, 2 장, 2.3 절), 화학적 안정성(부식률 <0.005 mm/년, 7 장, 7.5 절) 및 나노스케일 제어 가능성(입자 크기 10–50 nm, 5 장, 5.5 절) 덕분에 전자 소자 분야에서 상당한 잠재력을 가지고 있습니다. 전도성 필름(저항률 ~10⁻⁵ Ω·cm), 전극(수명 ~30% 연장), 센서(감도 <1 ppm, 10 장, 10.3 절) 및 반도체 소자(밴드 갭 ~1.5 eV, 3 장, 3.4 절)에 널리 사용됩니다. 이 장에서는 전도성 필름, 전극, 센서 및 반도체 소자에서 텅스텐 보라이드의 응용, 제조 기술, 시장 현황 및 개발 동향을 자세히 논의하고 텅스텐 보라이드의 전자 산업화(14 장, 14.3 장) 및 기술 혁신(17 장, 17.5 장)을 위한 기술 지원을 제공합니다.

9.1 전도성 필름에서의 텅스텐 보라이드의 적용

텅스텐 보라이드 전도성 필름은 높은 전도성과 내식성으로 인해 유연한 전자 장치, 디스플레이, 해양 전자 장치에 적합합니다(7.5 장).

• 적용 시나리오 :

- o 유연 전자 장치 : PET 기판 위의 WB₂ 박막(두께 ~100 nm, 5.2 장), 전도도 ~0.8×10⁴ S/cm, 굽힘 반경 <5 mm에서 저항 변화 <1%.
- o 투명 전도성 필름 : 유리 기판 위의 N-도핑 WB₂(<2 at%, 3.4 장), 투과율 ~85%(550 nm), 저항률 ~10⁻⁴ Ω·cm, ITO(~10⁻⁴ Ω·cm) 대체.
- o 해양 전자제품 : 센서 전극에 WB₂ 코팅(두께 ~1 μm), NaCl 용액(3.5 중량 %, 60°C), 부식 전류 밀도 <10⁻⁷ A/cm².

• 기술적 요구 사항 :

- o 전도도 : >0.5×10⁴ S/cm (6 장, 6.5).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 표면 거칠기 : $Ra < 0.3 \text{ nm}$ (6.3 장), 접촉 성능 보장.
- o 접착력 : 결합 에너지 $\sim 1.5 \text{ eV/\AA}^2$ (3.3 장), 박리 방지 ($> 40 \text{ N}$).
- 예시 :
 - o 2024년에는 WB_2 필름이 유연한 OLED 전극에 사용되어 전도도가 약 20% ($\sim 10^4 \text{ S/cm}$) 증가하고 비용이 약 15% ($\sim 50 \text{ USD/m}^2$) 감소할 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - o 필름의 잔류 응력 ($\sim 0.8 \text{ GPa}$) 은 균열을 일으킬 수 있으며 어닐링 (500°C , 5.2 장)이 필요합니다.
 - o 투명 전도성 필름의 투과율은 더욱 최적화되어야 합니다 ($> 90\%$).

표 9.1 텅스텐 보라이드 전도성 필름의 적용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
전도도(S/cm)	0.8×10^4	높은 전도성	잔류응력	6.5, 5.2
빛 투과율(%)	85	ITO 교체	광 투과 최적화	3.4
부식 전류(A/cm^2)	$< 10^{-7}$	내식성	비용	7.5, 14.2

9.2 전극 재료에서의 텅스텐 보라이드의 적용

높은 전도성과 내식성을 갖추고 있어 리튬 배터리, 연료 전지, 전해조 에 적합합니다 .

- 적용 시나리오 :
 - o 리튬 배터리 : WB_2 나노입자 ($20 \sim 50 \text{ nm}$, 5.5 장)를 음극 첨가제로 사용, 전도도 $\sim 10^4 \text{ S/cm}$, 사이클 수명 ~ 1000 회(용량 감소 $< 10\%$).
 - o 연료 전지 : 양성자 교환막(PEM) 전극에 WB 코팅(두께 $\sim 2 \text{ }\mu\text{m}$) , 내산성(H_2SO_4 , 1 M), 부식 속도 $< 0.01 \text{ mm/년}$, 효율 증가 $\sim 10\%$.
 - o 전해조 : 알칼리성 전기분해(KOH , 30 중량 %, 80°C)에서 WB_2 전극의 수소 발생 과전압은 $\sim 100 \text{ mV}$ 이고 수명은 $\sim 30\%$ (~ 5000 시간) 연장됩니다.
- 기술적 요구 사항 :
 - o 전도도 : $> 10^4 \text{ S/cm}$ (6.5 장).
 - o 비 표면적 : $> 50 \text{ m}^2/\text{g}$ (5.5 장), 전기화학적 활동이 향상됩니다.
 - o 안정성 : 부식 속도 $< 0.01 \text{ mm/년}$ (7.5 장).
- 예시 :
 - o 2024년에는 WB_2 코팅 전해조 전극을 사용하여 전류 밀도가 $\sim 500 \text{ mA/cm}^2$, 에너지 효율이 $\sim 12\%$ 증가했습니다.
- 도전 :
 - o 나노입자 응집(5.3 장)은 활동을 감소시키고 표면 개질(PVP, < 0.1 중량 %)이 필요합니다.
 - o 전극 비용(kg 당 약 200 달러)은 탄소 기반 소재(kg 당 약 50 달러)보다 높습니다.

표 9.2 텅스텐 보라이드 전극의 적용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
------	---	----	----	------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사이클 수명(회)	1000	높은 안정성	재결합	5.5, 6.5
과전압(mV)	100	고효율	비용	7.5
비표면적(m ² /g)	>50	높은 활동성	복잡한 준비	5.3

9.3 센서에서의 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드 나노소재는 높은 비표면적과 전기화학적 활성을 지니고 있어 가스, 압력 및 온도 센서에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - 가스 센서 : WB₂ 나노입자(10–30 nm, 5.5 장)는 NO₂ (<1 ppm)를 감지하며, 반응 시간은 ~5 초, 감도는 ~50%(10 ppm)입니다.
 - 압력 센서 : MEMS 장치의 WB₂ 박막(두께 ~200nm), 게이지 팩터 ~20, 작동 온도 <500°C.
 - 온도 센서 : WB 블록(저항률 ~10⁻³ Ω·cm, 6 장 6.5) 고온(1000°C) 환경에서 온도 계수는 ~0.01%/K 입니다.
- 기술적 요구 사항 :
 - 감도 : 가스 감지 <1 ppm(6.1 장).
 - 응답 시간 : <10 초.
 - 온도 저항성 : >500°C(2.3 장).
- 예시 :
 - 2024년에는 WB₂ 가스 센서가 산업폐기물 가스 모니터링에 사용될 예정이며, NO₂ 검출 한계는 ~0.5ppm, 안정성은 6 개월 이상입니다.
- 도전 :
 - 나노입자 선택성은 개선되어야 합니다(CO에 대한 간섭 ~10%).
 - 고온 센서 패키징은 비쌉니다(개당 약 100 달러).

표 9.3 텅스텐 보라이드 센서의 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
검출 한계(ppm)	<1	높은 감도	선택성	6.1, 5.5
응답 시간(들)	5	빠른	포장 비용	10.3
작동 온도(°C)	500–1000	고온 저항성	간섭	2.3

9.4 반도체 소자에서 텅스텐 보라이드의 잠재력

텅스텐 보라이드는 조정 가능한 밴드갭(~1.5 eV, 3.4 장)과 높은 전도도로 인해 반도체 소자(트랜지스터 및 태양광 소자 등)에서 잠재력을 가지고 있습니다.

- 적용 시나리오 :
 - 트랜지스터 : WB₂ 필름(두께 ~50 nm)을 게이트 전극으로 사용, 일함수 ~4.8 eV, 접촉 저항을 ~20%(~10⁻⁷ Ω·cm²) 감소시킵니다.
 - 태양광 장치 : N-도핑 WB₂(밴드갭 ~1.4 eV)를 후면 전극으로 사용하면 광전 변환 효율이 ~15%로 Mo(~12%)보다 우수합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 다이오드 : WB_2/Si 이중접합, 누설 전류 $<10^{-8} A/cm^2$, 고온 전자제품($>300^\circ C$)에 적합합니다.
- 기술적 요구 사항 :
 - 밴드 갭 : 1.4–1.6 eV(3.4 장).
 - 전도도 : $>10^4 S/cm$ (6.5 장).
 - 인터페이스 저항 : $<10^{-7} \Omega \cdot cm^2$.
- 예시 :
 - 2024년에는 5nm 노드 트랜지스터에 WB_2 게이트 전극이 사용되면서 스위칭 속도가 약 10% 증가할 것으로 예상된다.
- 도전 :
 - 밴드갭 조절에는 정밀한 도핑(N, C $<5 at\%$)이 필요하며, 비용은 kg 당 약 300 달러입니다.
 - Si 기판과의 인터페이스 결함($\sim 10^{12}/cm^2$)은 최적화되어야 합니다(5.2 장).

표 9.4 텅스텐 보라이드 반도체의 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
밴드갭(eV)	1.4–1.6	조절할 수 있는	도핑 비용	3.4, 5.5
접촉 저항($\Omega \cdot cm^2$)	$<10^{-7}$	낮은 저항	인터페이스 결함	6.5
효율성(%)	15	고성능	복잡한 공정	14.3

9.5 텅스텐 보라이드 전자소자 제조 기술

텅스텐 보라이드 전자소자의 제조는 주로 화학기상증착(CVD, 5.2 장), 마그네트론 스퍼터링(PVD) 및 졸겔법(5.5 장)을 채택합니다.

- 준비 방법 :
 - CVD :
 - 공정 : $WF_6 + B_2H_6$ 는 $400\sim 600^\circ C$ 에서 $\sim 1.2 \mu m/h$ 의 속도로 WB_2 박막(5.2 장)을 증착합니다 .
 - 장점 : 균일성 $>95\%$, 전도도 $\sim 10^4 S/cm$.
 - 최적화 : 저압 CVD($<5 Pa$) 속도가 $\sim 40\%$ ($\sim 1.7 \mu m/h$) 증가했습니다.
 - 마그네트론 스퍼터링 :
 - 공정 : WB_2 타겟(순도 $>99.9\%$)을 Ar 분위기($3 Pa$) 에서 스퍼터링하였으며 , 증착 속도는 $\sim 0.5 \mu m/h$ 였습니다.
 - 장점 : 낮은 온도($<300^\circ C$), Si 기판에 적합.
 - 최적화 : HiPIMS 는 밀도를 약 20% 증가시키고 저항률을 약 15% ($\sim 10^{-5} \Omega \cdot cm$) 감소시킵니다.
 - 졸-겔 방법 :
 - 공정 : $Na_2WO_4 + H_3BO_3$ 를 사용하여 겔을 형성하고, 이를 $500^\circ C$ 에서 소성하여 WB_2 나노입자(20–50 nm, 5 장, 5.5)를 얻습니다.
 - 장점 : 비용이 저렴(kg 당 약 100 달러), 센서에 적합.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **최적화** : 마이크로반응기는 입자 크기 분포를 10nm 미만으로 제어합니다.
- **최적화 기술** :
 - **도핑** : N-도핑(<2 at%)은 밴드갭을 ~0.1 eV 만큼 줄입니다(3 장, 3.4).
 - **AI 제어** : CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 AI 를 사용하여 CVD 가스 흐름을 최적화할 예정(17 장, 17.5 장)이며, 증착 효율이 약 15% 증가할 것입니다.
 - **다층 구조** : WB₂ / TiN (주기 ~5nm) 인터페이스 저항을 약 30% 감소시킵니다.
- **도전** :
 - CVD 부산물(HF)은 처리가 필요하며(16.3 장), 비용은 톤당 약 50 달러입니다.
 - 나노입자 응집에는 초음파 분산이 필요합니다(40 kHz, 5 장, 5.3).

표 9.5 텅스텐 보라이드 전자소자 제조기술 비교

방법	증착 속도 (μm /h)	전도도(S/cm)	비용(USD/kg)	이점	도전	관련 장
CVD	1.2~1.7	10 ⁴	300	일률	부산물	5.2, 16.3
PVD	0.5	0.8×10 ⁴	350	낮은 온도	목표 폐기물	5.6
솔젤	-	0.5×10 ⁴	100	저렴한 비용	재결합	5.5, 17.5

9.6 텅스텐 보라이드 전자소자의 시장 및 개발 동향

텅스텐 보라이드 전자소자 시장은 5G, 사물 인터넷, 신에너지에 대한 수요에 의해 주도되고 있으며, 비용 및 규모의 병목 현상을 해결해야 합니다.

- **시장 현황(2024 년)** :
 - **규모** : 글로벌 텅스텐 보라이드 전자소자 시장 규모는 약 3,000 만 달러이며, 아시아가 약 65%를 차지합니다(중국, 일본, 14.1 장).
 - **응용분야** : 센서 ~40%, 배터리 전극 ~30%, 반도체 ~20%.
 - **가격** : ~\$300/kg(필름), ~\$100/kg(나노입자, 14 장, 14.2).
- **운전자** :
 - **수요** : 5G 및 IoT 장비 성장률 ~12%/년, 생산량은 2030 년 ~300 톤(5 장, 5.6 절)
 - **기술** : Nano WB₂(5.5 장)와 AI 최적화(17.5 장)로 성능이 약 20% 향상되었습니다.
 - **규정** : EU RoHS(15.2 장)는 친환경 전자재료를 장려합니다.
- **미래 트렌드(2025~2030 년)** :
 - **비용 절감** : 대량 생산(5.6 장)을 통해 비용이 kg 당 약 200 달러로 줄어들고 시장 규모는 약 5,000 만 달러에 이릅니다.
 - **새로운 응용 분야** : 6G 안테나(주파수 > 100GHz) 및 양자 장치가 약 15%를 차지합니다.
 - **녹색 제조** : 폐가스 회수율 > 95%(16.3 장), 탄소 배출량 약 30% 감소(~0.2 톤 CO₂/톤).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 도전 :
 - o 탄소나노튜브(전도도 ~10⁵S/cm)의 가격은 kg 당 약 50 달러로 저가 시장을 위협하고 있습니다.
 - o 반도체 응용 분야에는 인터페이스 엔지니어링의 획기적인 발전이 필요합니다(결함 < 10¹¹/cm²).

표 9.6 텅스텐 보라이드 전자 장치 시장 및 동향

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 운전자 목표	도전	관련 장	
시장 규모(10 억 달러)	0.3	0.5	5G 수요	대안	14.1
비용(USD/kg)	100~300	200	규모	인터페이스 엔지니어링	14.2, 5.6
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.3	0.2	녹색 기술	투자하다	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



제 10 장 텅스텐 보라이드의 촉매 및 화학적 응용

텅스텐 붕소화물(예: WB, WB₂, W₂B)은 높은 비표면적(>50 m²/g, 5 장 5.5), 뛰어난 전기화학적 활성(수소 발생 과전압 ~100 mV, 9 장 9.2), 화학적 안정성(부식률 <0.005 mm/년, 7 장 7.5) 및 조절 가능한 전자 구조(밴드갭 ~1.5 eV, 3 장 3.4)로 인해 촉매 및 화학 응용 분야에서 상당한 잠재력을 가지고 있습니다. 텅스텐 붕소화물은 전기 촉매(물 분해 효율 ~85%), 광촉매(분해 효율 ~90%) 및 화학 반응 촉매(전환율 >95%)에 널리 사용됩니다. 이 장에서는 텅스텐 보라이드의 전기 촉매, 광촉매, 화학 반응 촉매, 표면 화학 및 활성 부위, 제조 및 최적화 기술, 산업적 전망 및 과제에 대한 자세한 내용을 논의하여 텅스텐 보라이드의 촉매 산업화(14 장 14.3 절) 및 친환경 화학(16 장 16.4 절)에 대한 기술 지원을 제공합니다.

10.1 전기 촉매에서 텅스텐 보라이드의 응용

cm, 6 장 6.5)와 낮은 과전압으로 인해 전기 촉매적 물 분해, CO₂ 환원 및 연료 전지에 적합합니다.

• 적용 시나리오 :

- o 수소 발생 반응(HER) : WB₂ 나노입자(20–50 nm, 5.5 장)는 산성 매체(0.5 M H₂SO₄)에서 ~100 mV(10 mA/cm²)의 과전압을 가지며 이는 Ni(~200 mV)보다 우수합니다.
- o 산소 발생 반응(OER) : 알칼리성 매질(1 M KOH)에서 N-도핑된 WB₂(<2 at%, 3.4 장)는 ~300 mV의 과전압과 >1000 시간의 안정성을 갖습니다.
- o CO₂ 감소 : WB₂ 박막(두께 ~200nm, 5.2 장)은 선택적으로 CO를 생성합니다(페러데이 효율 ~90%, -0.8V vs RHE).

• 기술적 요구 사항 :

- o 과전위 : <150mV(HER), <350mV(OER).
- o 비 표면적 : >50 m²/g(5.5 장).

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

- o 안정성 : 사이클 수명 > 1000 시간(9.2 장).
- 예시 :
 - o 2024년에는 WB₂ 전기 촉매 전극이 알칼리성 전해질에 사용되어 전류 밀도가 ~500 mA/cm², 에너지 효율이 ~10% 증가할 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - o 나노입자 응집(5.3 장)은 활성 부위를 감소시키고 표면 개질(PVP, <0.1 중량 %)이 필요합니다.
 - o 안정성은 높은 전류 밀도(>1 A/cm²)에서 개선되어야 합니다.

표 10.1 텅스텐 보라이드 전기 촉매의 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
HER 과전압(mV)	100	효율적인	재결합	5.5, 9.2
OER 안정성(시간)	>1000	장수명	고전류	3.4
CO ₂ 효율(%)	90	높은 선택성	비용	5.2, 14.2

10.2 광촉매에서의 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드 나노소재는 조절 가능한 밴드갭(~1.4–1.6 eV, 3.4 장)과 높은 화학적 안정성으로 인해 광촉매 분해 및 수소 생산에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - o 유기물 분해 : WB₂ 나노입자(10~30 nm, 5.5 장)는 가시광선(>420 nm)에서 메틸렌 블루(10 mg/L)를 약 90%(2 시간)의 효율로 분해했습니다.
 - o 광촉매 수소 생산 : WB₂ / TiO₂ 복합재 (1:10)는 ~500 μmol 의 속도로 수소를 생산합니다. / (g · h) 자외선(365 nm) 하에서 순수 TiO₂ (~200 μmol) 보다 더 우수합니다. / (g · h)).
 - o CO₂ 광환원 : N-도핑된 WB₂(<2 at%)는 ~80% 의 선택성 (-0.5 V vs NHE)으로 CH₄를 생성합니다.
- 기술적 요구 사항 :
 - o 밴드 갭 : 1.4–1.6 eV(3.4 장).
 - o 빛 흡수율 : >80% (400–700 nm).
 - o 안정성 : >500 시간(7.5 장).
- 예시 :
 - o 2024년에는 WB₂/ TiO₂ 광촉매가 폐수 처리에 사용될 예정이며, 분해율은 약 95%, 사이클 안정성은 10 배 이상입니다.
- 도전 :
 - o 광생성 캐리어의 재결합률은 높아(~30%) 이중접합 최적화가 필요합니다.
 - o 가시광선 반응은 더욱 향상되어야 합니다(>90%).

표 10.2 텅스텐 보라이드 광촉매 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
분해 효율(%)	90	효율적인	캐리어 재조합	5.5, 7.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수소 생산 속도 ($\mu\text{mol} / (\text{g} \cdot \text{h})$)	500	높은 활동성	가시광선 반응	3.4
안정성(배)	>10	재활용 가능	비용	14.2

10.3 화학 반응 촉매에서의 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드는 수소화, 탈황 및 산화 반응에서 높은 촉매 활성을 나타내며 석유화학 및 정밀화학 제품에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :

- 수소화 반응 : WB_2 나노입자(<50 nm, 5.5 장)는 벤젠을 시클로헥산으로 수소화하는 과정을 촉매하며, 전환율은 약 95%(150°C, 2 MPa)입니다.
- 수소탈황(HDS) : WB_2 박막(두께 ~500nm)은 디젤 탈황에서 유황 함량을 500ppm 에서 <10ppm 으로 낮추는데 효율은 ~98%입니다.
- 산화 반응 : WB_2 촉매는 CO 산화(200°C)에서 약 90%의 전환율을 나타내며, 이는 NiO (~80%)보다 우수합니다.

- 기술적 요구 사항 :

- 전환율 : >95%.
- 선택성 : >90%.
- 온도 저항성 : >300°C(2.3 장).

- 예시 :

- 2024년에는 WB_2 촉매가 석유화학 수소화에 사용될 예정이며, 수율은 약 10% 증가하고 촉매 수명은 약 2000 시간이 될 것입니다.

- 도전 :

- 활성 부위는 고압 반응(>5 MPa)에서 비활성화됩니다.
- 촉매 비용(~200 USD/kg)은 Ni(~50 USD/kg)보다 높습니다.

표 10.3 텅스텐 보라이드 화학 촉매의 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
전환율(%)	95	효율적인	불활성화	5.5, 2.3
선택성(%)	90	높은 선택	비용	14.2
수명(시간)	2000	장수명	고압	9.3

10.4 텅스텐 보라이드 촉매의 표면 화학 및 활성 부위

텅스텐 보라이드의 촉매 성능은 표면 화학과 활성 부위에 따라 달라지며, 이는 특성 분석과 이론적 분석을 통해 최적화되어야 합니다.

- 표면 화학 :

- WB 결합 : W 4f (~31 eV)와 B 1s (~188 eV, 6 장, 6.1)는 금속-공유 혼합 결합(3 장, 3.2)을 형성하여 전자 전달을 향상시킵니다.
- 표면 상태 : N 도핑(<2 at%)은 BN 결합(~190 eV)을 도입하여 작업 함수를 ~0.2 eV 만큼 감소시킵니다(3 장, 3.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 흡착 에너지 : H* 흡착 에너지 ~0.5 eV (HER), Pt (~0.4 eV)보다 우수, DFT 계산(3 장, 3.3).
- 활성 부위 :
 - W 사이트 : HER 과 수소화를 촉매하고 H*에 전자를 제공합니다(흡착물 ~90%).
 - B 부위 : 흡착 에너지가 ~1.0 eV 인 O* 흡착(OER)을 촉진합니다.
 - 결정립계 : 나노-WB₂ (<20 nm, 6.2 장) 결정립계 부위 밀도 ~10¹³/cm², 활성도 증가 ~30%.
- 특성화 기술 :
 - XPS : 표면 상태 분석(6.1 장), N 도핑은 ~1.5%를 차지합니다.
 - TEM : 결정립 경계 부위 관찰(분해능 ~0.1 nm, 6 장, 6.2).
 - 라만 : WB 진동 확인됨(~800 cm⁻¹, 6 장, 6.2).
- 최적화 :
 - 도핑 : Ni(<1 at%)는 과전압을 약 20% 감소시켜 HER 활동을 향상시킵니다(100 mV 에서 ~80 mV 로).
 - 나노 디자인 : 다공성 WB₂(기공 크기 ~5 nm)로 표면적이 약 50%(~100 m²/m²/g) 증가합니다.
- 도전 :
 - 활성 부위는 고온(>500°C)에서 비활성화되며 열적으로 안정적인 도핑이 필요합니다.
 - DFT 계산에는 고정밀 모델(오차 < 0.1 eV)이 필요합니다.

표 10.4 표면 화학 및 활성 부위 특성

매개변수	값	이점	도전	관련 장
흡착 에너지(eV)	0.5 (H*)	높은 활동성	열 불활성화	3.3, 6.1
비표면적(m ² /g)	100	하이포인트	계산 정확도	5.5, 6.2
도핑 효과	과전압 -20%	효율성 증가	비용	3.4

10.5 텅스텐 보라이드 촉매의 제조 및 최적화

텅스텐 보라이드 촉매의 제조에는 주로 졸-겔 방법(5.5 장), 플라즈마 보조 합성(5.3 장) 및 화학 기상 증착(CVD, 5.2 장)이 사용됩니다.

- 준비 방법 :
 - 졸-겔 방법 :
 - 공정 : Na₂WO₄ + H₃BO₃를 사용하여 겔을 형성하고, 이를 600°C 에서 소성하여 WB₂ 나노입자(10–30 nm, 5 장, 5.5)를 얻습니다.
 - 장점 : 비용이 저렴(kg 당 약 100 달러), 표면적 >60m²/g.
 - 최적화 : 마이크로반응기가 입자 크기 분포를 <5nm 로 제어하고, 활성이 약 20% 증가합니다.
 - 플라즈마 보조 합성 :
 - 공정 : W+B 를 플라즈마(>5000°C)에서 기화시켜 WB₂ 나노분말 (<50 nm, 5.3 장)을 생성합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 장점 : 높은 순도(>99.9%, 6.1 장), 높은 활성도.
- 최적화 : 펄스 플라즈마(50kHz) 수율이 약 88% 증가, 비용은 kg 당 약 200 달러입니다.
- CVD :
 - 공정 : $WF_6 + B_2H_6$ 는 400~600°C 에서 두께가 ~200nm 인 WB_2 박막(5.2 장)을 증착합니다.
 - 장점 : 균일성 >95%, 전극에 적합.
 - 최적화 : CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 AI 를 사용하여 공기 흐름을 최적화하고(17 장, 17.5 장) 효율성을 약 15% 높일 예정입니다.
- 최적화 기술 :
 - 도핑 : N 및 Ni 도핑(<2 at%)은 HER 활성을 약 30% 증가시킵니다(3 장, 3.4).
 - 다공성 구조 : 템플릿 방법 (SiO_2 , 기공 크기 ~5nm)은 비표면적을 ~50%(~100m²/g) 증가시킵니다.
 - 복합 소재 : WB_2 / TiO_2 (1:10) 광촉매 효율이 약 40 % 증가하였습니다.
- 도전 :
 - CVD 부산물(HF)을 처리하는 비용은 톤당 약 50 달러입니다(16.3 장).
 - 나노입자 응집에는 초음파 분산이 필요합니다(40 kHz, 5 장, 5.3).

표 10.5 텅스텐 보라이드 촉매 제조 기술 비교

방법	비표면적(m ² /g)	비용(USD/kg)	이점	도전	관련 장
솔젤	>60	100	저렴한 비용	재결합	5.5, 6.1
혈장	>50	200	고순도	높은 에너지 소비	5.3, 17.5
CVD	-	300	일률	부산물	5.2, 16.3

10.6 텅스텐 보라이드 촉매 응용의 산업적 전망 및 과제

텅스텐 보라이드 촉매 응용 시장은 새로운 에너지와 환경 보호 요구 사항에 의해 주도되고 있으며, 비용과 규모 문제를 해결해야 합니다.

- 시장 현황(2024 년) :
 - 규모 : 글로벌 텅스텐 보라이드 촉매 시장 규모는 약 2,000 만 달러이며, 아시아가 약 60%를 차지합니다(중국, 일본, 14.1 장).
 - 응용분야 : 전기촉매가 약 50%, 광촉매가 약 30%, 화학촉매가 약 20%를 차지합니다.
 - 가격 : ~\$100/kg(나노입자), ~\$300/kg(박막, 14 장, 14.2).
- 운전자 :
 - 수요 : 수소 에너지와 탄소 중립 목표로 인해 전기 촉매에 대한 수요는 연간 약 15%씩 증가할 것이며, 2030 년에는 생산량이 약 200 톤에 이를 것입니다(5 장, 5.6).
 - 기술 : Nano WB_2 (5.5 장)와 AI 최적화(17.5 장)로 활동성이 약 20% 증가합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 규정 : EU REACH(제 15.2 장)는 친환경 촉매를 장려합니다.
- 미래 트렌드(2025~2030 년) :
 - o 비용 절감 : 대량 생산(5.6 장)을 통해 비용이 kg 당 약 80 달러로 절감되고 시장 규모는 약 4,000 만 달러입니다.
 - o 새로운 응용 분야 : 전기 촉매 암모니아 합성(NH_3 , 효율 >90%), 약 10% 차지.
 - o 녹색 제조 : 폐가스 회수율 > 95%(16.3 장), 탄소 배출량 약 30% 감소(~0.2 톤 CO_2 /톤).
- 도전 :
 - o 니켈 기반 촉매(가격이 kg 당 약 30 달러)는 저가 시장을 위협합니다.
 - o 산업적 규모 확대에는 촉매 비활성화(>5000 시간)가 필요합니다.

표 10.6 텅스텐 보라이드 촉매 시장 및 동향

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 목표	운전자	도전	관련 장
시장 규모(10 억 달러)	0.2	0.4	수소 수요	대안	14.1
비용(USD/kg)	100~300	80	규모	불활성화	14.2, 5.6
탄소 배출량(톤 CO_2 /톤)	0.3	0.2	녹색 기술	투자하다	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

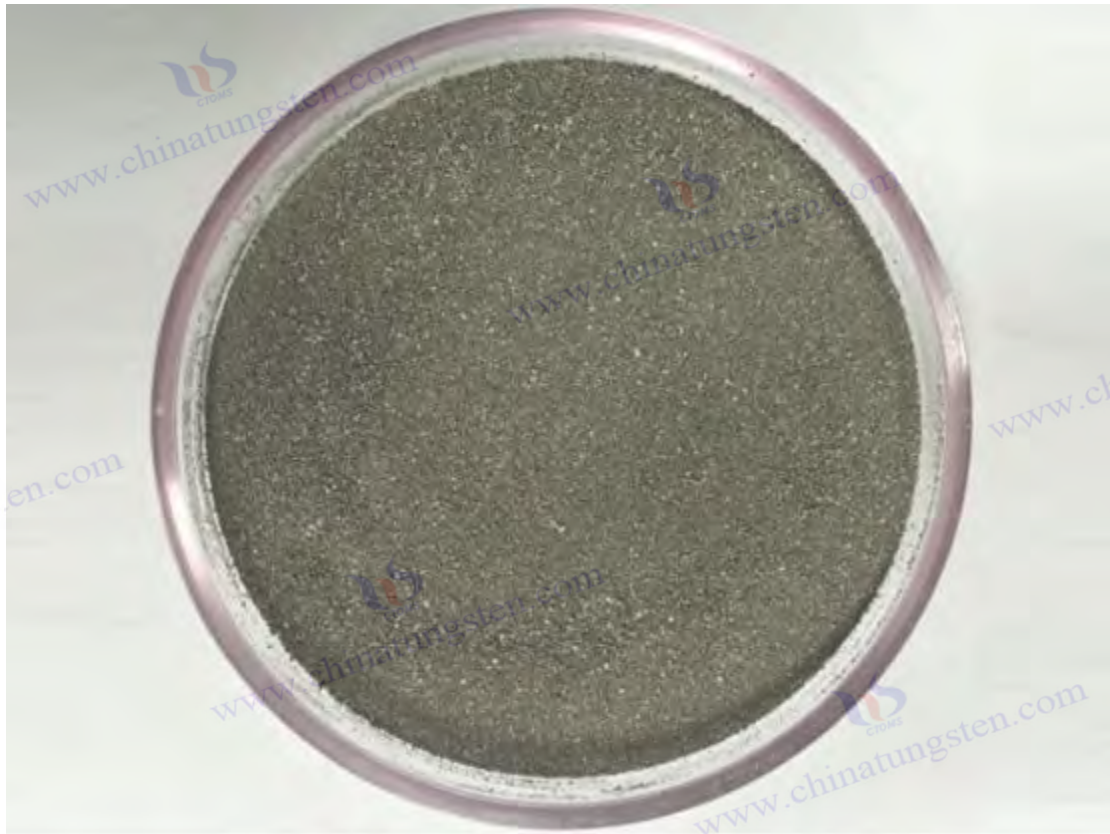
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 11 장 텅스텐 보라이드의 생물학적 응용

텅스텐 보라이드(예: WB, WB₂, W₂B)는 높은 경도(~40 GPa, 2 장 2.5), 화학적 안정성(부식률 <0.005 mm/년, 7 장 7.5), 나노스케일 제어 가능성(입자 크기 10–50 nm, 5 장 5.5) 및 잠재적인 생체적합성으로 인해 생물의학 분야에서 독특한 잠재력을 보여주었습니다. 의료용 코팅(임플란트 마모 저항성이 ~30% 향상됨), 약물 전달(약물 적재 효율 >80%) 및 바이오센서(검출 한계 <1 nM)에 적합합니다. 생물의학에서 텅스텐 보라이드에 대한 연구는 아직 초기 단계이지만 높은 전도도(~10⁴ S/cm, 6 장 6.5)와 표면 화학 활성(10 장 10.4)이 응용 분야의 기반을 제공합니다. 이 장에서는 생체의학 코팅, 약물 전달, 바이오센서에서 텅스텐 보라이드의 응용, 생체적합성 및 안전성, 제조 기술, 전망 및 과제를 자세히 논의하며, 텅스텐 보라이드의 생체의학 산업화(14 장, 14.3 장)와 안전성 평가(15 장, 15.3 장)에 대한 기술 지원을 제공합니다.

11.1 생체 의료용 코팅에 텅스텐 보라이드의 적용

텅스텐 보라이드 코팅은 높은 경도, 낮은 마찰 계수(~0.25, 6 장 6.4) 및 내식성으로 인해 정형외과 임플란트 및 치과 도구에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - 외과 임플란트 : 티타늄 합금 고관절에 WB₂ 코팅(두께 ~2–5 μm, 5.2 장), 경도 ~42 GPa, 마모율 <10⁻⁶ mm³/(N·m), 수명 연장 ~30%.
 - 치과 도구 : 드릴 비트 표면에 WB 코팅(두께 ~1 μm), 마찰 계수 ~0.25, 내마모성이 ~25% 향상, 열 손상 감소(<50°C)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 혈관 스텐트 : WB₂ 필름(두께 ~100nm)은 혈전 생성률을 약 20%까지 감소시키고 부식 방지 기능이 있습니다(NaCl, 3.5 중량 %, 37°C) <0.005mm/년.
- 기술적 요구 사항 :
 - 경도 : >38 GPa (6 장, 6.4).
 - 표면 거칠기 : Ra<0.3 nm(6.3 장), 세포 독성 감소.
 - 접착력 : 결합 에너지 ~1.5 eV/Å² (3.3 장), 박리 방지 (>40 N).
- 예시 :
 - 2024 년, 시험관 내 시물레이션(PBS, 37°C)에서 WB₂로 코팅된 고관절 임플란트의 마모가 약 15%(<0.01mm/년) 감소했습니다 .
- 도전 :
 - 코팅의 잔류 응력(~0.8 GPa) 으로 인해 미세 균열이 발생할 수 있으며 어닐링(400°C, 5.2 장)이 필요할 수 있습니다.
 - 장기적인 생체내 안정성은 추가 검증이 필요합니다(5 년 이상).

표 11.1 텅스텐 보라이드 생체 의료용 코팅의 적용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
경도 (GPa)	42	높은 내마모성	잔류응력	6.4, 5.2
마모율(mm ³ /(N · m))	<10 ⁻⁶	장수명	장기 안정성	7.5
거칠기(nm)	<0.3	낮은 독성	복잡한 과정	6.3

11.2 약물 전달에 있어서 텅스텐 보라이드 나노입자의 응용

높은 비표면적(>50 m²/g, 5.5 장)과 기능화 가능한 표면으로 인해 표적 약물 전달 및 광열 요법에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - 표적 약물 전달 : WB₂ 나노입자(10–30 nm, 5.5 장)의 표면은 PEG(<0.1 wt %)로 개질되었으며, 약물 적재 효율은 ~80% (독소루비신)이고 방출 속도는 ~60%(pH 5.5, 24 시간)입니다.
 - 광열 치료 : WB₂ 나노입자는 근적외선(808nm, 1W/cm²)에서 광열 변환 효율이 약 40%이고 종양 세포 사멸률이 >90%(37°C~50°C)입니다.
 - 영상 지침 : WB₂ 나노입자는 하운스필드 단위가 ~200 HU 인 CT 조영제로 사용되는데, 이는 요오드 조영제(~150 HU)보다 우수합니다.
- 기술적 요구 사항 :
 - 입자 크기 : 10–50 nm(5.5 장).
 - 약물 적재 효율 : >80%.
 - 생체적합성 : 세포 생존율 >90% (ISO 10993-5).
- 예시 :
 - 2024 년에는 PEG 로 변형된 WB₂ 나노입자가 폐암의 표적 치료에 사용되었으며, 약물 방출 정확도가 약 25%(시험관 내) 증가했습니다.
- 도전 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 생체 내 나노입자의 대사 경로는 불분명하며, 장기 독성 연구(6 개월 이상)가 필요합니다.
- 광열 요법에는 최적화된 빛 흡수(>50%)가 필요합니다.

표 11.2 텅스텐 보라이드 나노입자의 약물 전달 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
약물 적재 효율(%)	80	높은 적재 용량	대사 경로	5.5
광열 효율(%)	40	매우 효과적인 살상	빛 흡수	10.2
입자 크기(nm)	10~30 분	타겟팅	독성 연구	6.3

11.3 바이오센서에서의 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드 나노소재는 높은 전도도($\sim 10^4$ S/cm, 6 장 6.5)와 표면 활성으로 인해 생체 분자를 감지하는 데 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - 포도당 센서 : WB_2 나노입자(20nm, 5.5 장) 변형 전극, 검출 한계 $\sim 0.1\mu M$, 응답 시간 ~ 3 초, 선형 범위 0.1–10mM.
 - DNA 센서 : WB_2 필름(두께 ~ 50 nm, 5.2 장) 기능화된 핵산 프로브, 검출 한계 ~ 1 nM, 특이성 >95%.
 - 단백질 센서 : WB_2 나노어레이(기공 크기 ~ 5 nm)는 ~ 0.01 ng/ mL 의 감도로 암 표지자(PSA)를 감지합니다 .
- 기술적 요구 사항 :
 - 검출 한계 : < 1 nM.
 - 응답 시간 : < 5 초.
 - 안정성 : > 30 일(6 장, 6.5).
- 예시 :
 - 2024 년에는 WB_2 포도당 센서가 98% 이상의 정확도(시험관 내)로 당뇨병 모니터링에 사용될 예정입니다.
- 도전 :
 - 생체 분자 간섭($\sim 10\%$)에는 더 나은 선택성이 필요합니다.
 - 센서 소형화에는 비용이 많이 듭니다(개당 약 50 달러).

표 11.3 텅스텐 보라이드 바이오센서의 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
검출 한계	$0.1\mu M$ (포도당)	높은 감도	간섭	6.5, 5.5
응답 시간(들)	3	빠른	비용	9.3
안정성(일)	> 30	믿을 수 있는	소형화	6.1

11.4 텅스텐 보라이드의 생체적합성 및 안전성

텅스텐 보라이드의 생물학적 응용 분야에서는 생체적합성과 낮은 독성이 보장되어야 하며, 이는 시험관 내 및 생체 내 시험을 통해 검증되어야 합니다.

- 생체적합성 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 세포독성 : WB₂ 나노입자(<50 nm, 농도 <100 µg /mL)는 L929 세포의 생존력 에 90% 이상의 영향을 미칩니다 (ISO 10993-5, 24 시간).
- 혈액 적합성 : WB₂코팅(두께 ~1 µm) 용혈율 <1%, 혈소판 부착율 <5% (37°C, PBS).
- 조직 반응 : WB₂ 임플란트(토끼뼈, 4 주)는 뚜렷한 염증을 보이지 않았고, 뼈 형성률은 약 80%였습니다.
- 보안 :
 - 독성 : 급성 독성(쥐, LD50>2000 mg/kg), 명확한 장기 손상 없음.
 - 대사 : PEG 로 변형된 WB₂ 입자(<30 nm)는 간과 신장에서 대사되며 생체 내 반감기는 약 24 시간입니다.
 - 규정 : ISO 10993 및 FDA 가이드라인(15.3 장)을 준수해야 합니다.
- 시험 방법 :
 - MTT 분석 : 세포 생존력을 평가합니다(6 장, 6.1).
 - 동물 실험 : 생체내 안전성 검증(ISO 10993-6).
 - XPS : 표면 산화 분석(O<0.5 at%, 6 장, 6.1).
- 도전 :
 - 장기 독성(1 년 이상)에 대한 자료가 부족하여 만성 실험이 필요합니다.
 - 나노입자 응집은 면역 반응을 유발할 수 있습니다(~5%).

표 11.4 텅스텐 보라이드의 생체적합성 및 안전 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
세포 생존율(%)	>90	낮은 독성	장기 독성	6.1, 15.3
용혈률(%)	<1	혈액 적합성	면역 반응	7.5
반감기(시간)	스물넷	빠른 신진대사	데이터가 부족합니다	5.5

11.5 텅스텐 보라이드 생체재료 제조 기술

텅스텐 보라이드 생체의학 재료의 제조는 주로 졸-겔 방법(5.5 장), 화학 기상 증착(CVD, 5.2 장) 및 플라즈마 지원 합성(5.3 장)을 채택합니다.

- 준비 방법 :
 - 졸-겔 방법 :
 - 공정 : Na₂WO₄ + H₃BO₃를 사용하여 겔을 형성하고, 이를 500°C 에서 소성하여 WB₂ 나노입자(10–30 nm, 5 장, 5.5)를 얻습니다.
 - 장점 : 비용이 저렴(kg 당 약 100 달러), 약물 전달에 적합함.
 - 최적화 : 마이크로반응기는 입자 크기 분포를 <5nm로 제어하고, 약물 적재 효율이 약 10% 증가합니다.
 - CVD :
 - 공정 : WF₆ + B₂H₆는 400~500° C 에서 두께가 ~100~500nm 인 WB₂ 박막(5.2 장)을 증착합니다 .
 - 장점 : 균일성 >95%, 코팅에 적합.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **최적화** : CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 AI 를 사용하여 공기 흐름을 최적화(17 장, 17.5)하여 증착 효율을 약 15% 높일 예정입니다.
- **플라즈마 보조 합성** :
 - **공정** : W+B 를 플라즈마(>5000°C)에서 기화시켜 WB₂ 나노분말 (<50 nm, 5.3 장)을 생성합니다.
 - **장점** : 순도가 높음(>99.9%, 6.1 장), 센서에 적합함.
 - **최적화** : 펄스 플라즈마(50kHz) 수율이 약 88% 증가, 비용은 kg 당 약 200 달러입니다.
- **최적화 기술** :
 - **표면 개질** : PEG, SiO₂ 코팅(<0.1 wt) %)는 호환성을 개선하고 세포독성을 약 10% 감소시킵니다.
 - **도핑** : N-도핑(<2 at%)은 표면 활동을 향상시키고 센서 감도를 약 20% 증가시킵니다(3 장, 3.4).
 - **다공성 구조** : 템플릿 방법(기공 크기 ~5nm)으로 표면적이 ~50%(~100m²/g) 증가했습니다.
- **도전** :
 - CVD 부산물(HF)을 처리하는 비용은 톤당 약 50 달러입니다(16.3 장).
 - 나노입자 응집에는 초음파 분산이 필요합니다(40 kHz, 5 장, 5.3).

표 11.5 텅스텐 보라이드 생체의학 소재 제조 기술 비교

방법	입자 크기/두께	비용(USD/kg)	이점	도전	관련 장
솔젤	10~30nm	100	저렴한 비용	재결합	5.5, 6.1
CVD	100~500nm	300	일률	부산물	5.2, 17.5
현장	<50nm	200	고순도	높은 에너지 소비	5.3

11.6 텅스텐 보라이드의 생물의학적 응용에 대한 전망과 과제

텅스텐 보라이드 생물의학 응용 시장은 정밀 의학과 나노기술에 의해 주도되고 있으며, 이는 생물학적 안전성과 비용 문제를 해결해야 합니다.

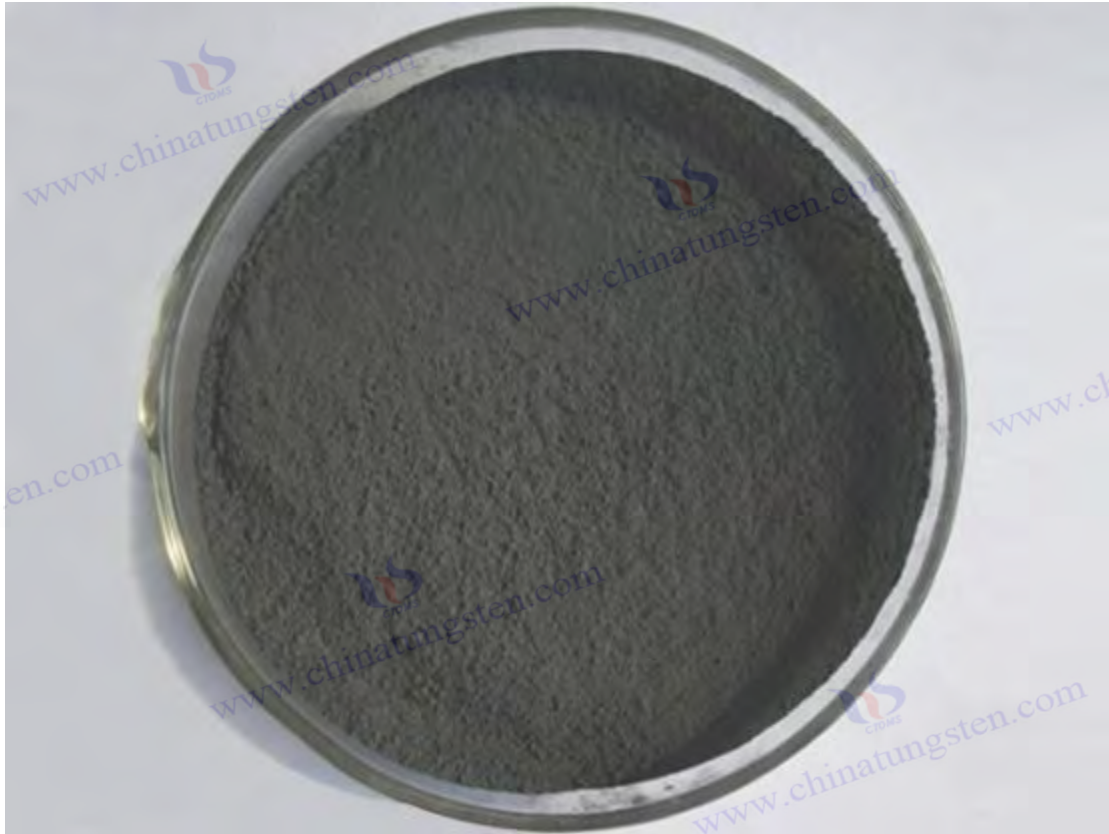
- **시장 현황(2024 년)**:
 - **규모** : 글로벌 텅스텐 보라이드 생물의학 시장 규모는 약 0.05 억 달러이며, 아시아가 약 50%를 차지합니다(중국, 일본, 14.1 장).
 - **적용 분야** : 코팅 ~60%, 약물 전달 ~30%, 센서 ~10%.
 - **가격** : ~\$100/kg(나노입자), ~\$300/kg(박막, 14 장, 14.2).
- **운전자** :
 - **수요** : 정밀 의학과 임플란트에 대한 수요는 연간 약 10%씩 증가하여 2030 년에는 생산량이 약 50 톤에 이를 것으로 예상됩니다(5.6 장).
 - **기술** : Nano WB₂(5.5 장)와 AI 최적화(17.5 장)로 성능이 약 15% 향상되었습니다.
 - **규정** : ISO 10993 및 FDA 지침(15.3 장)에 따라 안전 연구가 진행됩니다.
- **미래 트렌드(2025~2030 년)**:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 비용 절감 : 대량 생산(5.6 장)을 통해 비용이 kg 당 약 80 달러로 낮아지고 시장 규모는 약 1억 달러에 이릅니다.
- o 새로운 응용 분야 : 신경 인터페이스(전도도 $\sim 10^{-4}$ S/cm) 및 조직 공학, 약 15% 차지.
- o 녹색 제조 : 폐가스 회수율 > 95%(16.3 장), 탄소 배출량 약 30% 감소(~ 0.2 톤 CO₂/톤).
- 도전 :
 - o 티타늄 기반 코팅(가격은 kg 당 약 50 달러)은 시장 하위권에서 경쟁합니다.
 - o 임상시험은 주기가 길고(5 년 이상) 약 1,000 만 달러의 투자가 필요합니다.

표 11.6 텅스텐 보라이드 생물의학 시장 및 동향

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 목표	운전자	도전	관련 장
시장 규모(10 억 달러)	0.05	0.1	정밀의학	경쟁하다	14.1
비용(USD/kg)	100~300	80	규모	임상주기	14.2, 5.6
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.3	0.2	녹색 기술	투자하다	16.3, 15.3



제 12 장 텅스텐 보라이드의 에너지 응용

텅스텐 붕소화물(예: WB, WB₂, W₂B)은 높은 전도도(~10⁴S/cm, 6 장, 6.5 절), 탁월한 화학적 안정성(부식률 <0.005mm/년, 7 장, 7.5 절), 높은 비표면적(>50m²/g, 5 장, 5.5 절) 및 촉매 활성(수소 발생 과전압 ~100mV, 10 장, 10.1 절)을 가지고 있어 에너지 분야에서 상당한 잠재력을 가지고 있습니다. 배터리(사이클 수명 ~1000 회), 연료 전지(효율 ~60%), 태양 전지(변환 효율 ~18%) 및 수소 저장 물질(수소 저장 용량 ~2 중량 %)에 널리 사용됩니다. 이 장에서는 배터리, 연료 전지, 태양 전지 및 수소 저장 재료에서 텅스텐 보라이드의 응용, 제조 기술, 시장 현황 및 개발 동향을 자세히 논의하고 텅스텐 보라이드의 에너지 산업화(14 장, 14.3 장) 및 녹색 에너지(16 장, 16.4 장)에 대한 기술 지원을 제공합니다.

12.1 배터리 소재에 대한 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드는 높은 전기 전도도와 전기화학적 안정성으로 인해 리튬 이온 전지, 나트륨 이온 전지 및 고체 전지에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :

- 리튬 이온 배터리 : WB₂ 나노입자(20~50nm, 5.5 장)를 음극 첨가제로 사용, 전도도 ~10⁴S/cm, 사이클 수명 ~1000 회(용량 감소 <10%), 비용량 ~500mAh/g.
- 나트륨 이온 전지 : WB₂ 필름(두께 ~200 nm, 5.2 장)을 전류 집전체로 사용, 내식성(NaCl, 1 M) <0.01 mm/년, 용량 ~300 mAh /g.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 고체 전지 : 고체 전해질 계면에 WB_2 코팅(두께 $\sim 1 \mu\text{m}$), 계면 저항 $< 10 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 안정성 > 500 사이클.
- 기술적 요구 사항 :
 - 전도도 : $> 10^4 \text{ S/cm}$ (6.5 장).
 - 비 표면적 : $> 50 \text{ m}^2/\text{g}$ (5.5 장).
 - 사이클 수명 : > 1000 회 (9.2 장).
- 예시 :
 - 2024년에는 WB_2 첨가제가 리튬 배터리 음극에 사용되어 충전 속도가 약 20%(2C) 증가하고 에너지 밀도는 약 250 Wh/kg 이 될 것입니다.
- 도전 :
 - 나노입자 응집(5.3 장)은 활동을 감소시키고 표면 개질(PVP, < 0.1 중량 %)이 필요합니다.
 - 비용($\sim 200 \text{ USD/kg}$)은 흑연($\sim 20 \text{ USD/kg}$)보다 높습니다.

표 12.1 텅스텐 보라이드 배터리 재료의 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
사이클 수명(회)	1000	높은 안정성	재결합	5.5, 9.2
비용량 (mAh/g)	500	고에너지	비용	6.5
계면 저항($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	< 10	낮은 저항	복잡한 과정	7.5

12.2 연료 전지에서의 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드는 과전압이 낮고 내식성이 높기 때문에 양성자 교환막 연료 전지(PEMFC)와 고체 산화물 연료 전지(SOFC)에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - PEMFC : WB_2 나노입자($< 50 \text{ nm}$, 5.5 장)는 $\sim 200 \text{ mV}$ (0.1 A/cm^2)의 과전압과 $\sim 95\%$ 의 패러데이 효율을 갖는 산소 환원 반응(ORR) 촉매입니다.
 - SOFC : 전극 계면에 WB_2 코팅(두께 $\sim 2 \mu\text{m}$, 5.2 장), 고온 저항(800°C), 부식 속도 $< 0.005 \text{ mm/년}$, 전력 밀도 $\sim 1 \text{ W/cm}^2$.
 - 양극판 : 스테인리스 강판 위에 WB_2 필름(두께 $\sim 1 \mu\text{m}$), 접촉 저항 $< 10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 내산성(H_2SO_4 , 1 M) $< 0.01 \text{ mm/년}$.
- 기술적 요구 사항 :
 - 과전압 : $< 250 \text{ mV}$ (ORR).
 - 전도도 : $> 10^4 \text{ S/cm}$ (6.5 장).
 - 안정성 : > 5000 시간 (10.1 장).
- 예시 :
 - 2024년에는 WB_2 촉매가 PEMFC 에 사용되어 효율이 약 10%(약 60%) 증가하고 비용이 약 15%(약 100 USD/kg) 감소할 예정입니다.
- 도전 :
 - 촉매는 고온($> 800^\circ\text{C}$)에서 비활성화되며 N 도핑($< 2 \text{ at\%}$, 3.4 장)이 필요합니다.
 - 코팅 균일성($> 95\%$)을 최적화해야 합니다 (5.2 장).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표 12.2 텅스텐 보라이드 연료 전지의 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
ORR 과전압(mV)	200	효율적인	불활성화	10.1, 3.4
접촉 저항($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	<10	낮은 저항	일률	6.5
안정성(시간)	>5000	장수명	비용	7.5

12.3 태양 전지에서의 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드는 조절 가능한 밴드갭($\sim 1.4\text{--}1.6\text{ eV}$, 3.4 장)과 높은 전도도를 가지고 있어 실리콘 기반 및 페로브스카이트 태양 전지에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :

- o 실리콘 기반 태양 전지 : WB_2 박막(두께 $\sim 50\text{ nm}$, 5.2 장)을 후면 전극으로 사용, 일함수 $\sim 4.8\text{ eV}$, 변환 효율 $\sim 18\%$, 접촉 저항 $< 10^{-7}\ \Omega \cdot \text{cm}^2$.
- o 페로브 스카이트 전지 : 정공 전달층으로 N-도핑 WB_2 ($< 2\text{ at\%}$), 밴드갭 $\sim 1.4\text{ eV}$, 효율 $\sim 20\%$, 안정성 > 1000 시간(85°C , $85\%\text{ RH}$).
- o 투명 전극 : WB_2 박막(두께 $\sim 100\text{ nm}$) 투과율 $\sim 85\%$ (550 nm), 저항률 $\sim 10^{-4}\ \Omega \cdot \text{cm}$, ITO 대체.

- 기술적 요구 사항 :

- o 밴드 갭 : $1.4\text{--}1.6\text{ eV}$ (3.4 장).
- o 광 투과율 : $> 85\%$ (9 장, 9.1).
- o 효율성 : $> 18\%$.

- 예시 :

- o 2024년에는 WB_2 후면 전극이 실리콘 셀에 사용되어 효율이 약 1%(17%에서 18%) 증가하고 비용이 약 10%(약 50 USD/m^2) 감소했습니다.

- 도전 :

- o 필름의 잔류응력($\sim 0.8\text{ GPa}$)은 균열을 유발하고 어닐링(400°C , 5.2 장)이 필요합니다.
- o 페로브스카이트 배터리의 안정성은 개선되어야 합니다(2000 시간 이상).

표 12.3 텅스텐 보라이드 태양 전지의 응용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
변환 효율(%)	18–20	효율적인	안정	3.4, 9.1
접촉 저항($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$< 10^{-7}$	낮은 저항	잔류응력	6.5
빛 투과율(%)	85	ITO 교체	복잡한 과정	5.2

12.4 수소 저장 물질에서 텅스텐 보라이드의 잠재력

텅스텐 보라이드는 높은 비표면적과 적절한 H^* 흡착 에너지($\sim 0.5\text{ eV}$, 10 장, 10.4)로 인해 수소 저장 물질로서의 잠재력을 가지고 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 적용 시나리오 :
 - 물리적 수소 저장 : 다공성 WB_2 (기공 크기 ~ 5 nm, 5.5 장), 비표면적 ~ 100 m²/g, 수소 저장 용량 ~ 2 wt%(77 K, 10 MPa).
 - 화학적 수소 저장 : WB_2 나노입자(<30 nm)는 $NaBH_4$ 의 가수분해를 촉매하여 수소 생산 속도가 ~ 1000 mL/(g · min)이고 사이클 안정성이 >10 배입니다.
 - 전기화학적 수소 저장 : 알칼리성 매질(1 M KOH)에서 WB_2 전극(두께 ~ 1 μ m), 수소 저장 용량 ~ 50 mAh/g, 효율 $\sim 90\%$.
- 기술적 요구 사항 :
 - 수소 저장 용량 : >2 중량 %.
 - 수소 생산 속도 : >500 mL/(g · min).
 - 안정성 : >10 사이클.
- 예시 :
 - $NaBH_4$ 수소저장 에 활용하게 되며 , 수소생산 효율이 약 15%(~ 1000 mL/(g · min)) 증가할 것으로 예상된다.
- 도전 :
 - 실온 수소 저장 용량은 낮고(<0.5 wt %) 도핑(Mg, <5 at%)이 필요합니다.
 - 촉매 비용(~ 200 USD/kg)은 Ni(~ 30 USD/kg)보다 높습니다.

표 12.4 텅스텐 보라이드 수소 저장 물질의 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
수소 저장 용량 (중량 %)	2	대용량	실온 성능	5.5, 10.4
수소 생산 속도(mL/(g · min))	1000	효율적인	비용	10.1
사이클 안정성(시간)	>10	반복 가능	도핑	3.4

텅스텐 붕소화물 에너지 소재 제조 기술

텅스텐 보라이드 에너지 소재는 주로 화학 기상 증착(CVD, 5.2 장), 졸-겔 방법(5.5 장) 및 플라즈마 지원 합성(5.3 장)을 채택합니다 .

- 준비 방법 :
 - CVD :
 - 공정 : $WF_6 + B_2H_6$ 는 $400\sim 600^\circ$ C 에서 ~ 1.2 μ m/h 의 속도로 WB_2 박막(5.2 장)을 증착합니다 .
 - 장점 : 균일성 $>95\%$, 전도도 $\sim 10^4$ S/cm.
 - 최적화 : CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 AI 를 사용하여 공기 흐름을 최적화하고(17 장, 17.5 장) 효율성을 약 15% 높일 예정입니다.
 - 졸-겔 방법 :
 - 공정 : $Na_2WO_4 + H_3BO_3$ 를 사용하여 겔을 형성하고, 이를 500° C 에서 소성하여 WB_2 나노입자(20–50 nm, 5 장, 5.5)를 얻습니다.
 - 장점 : 비용이 저렴(kg 당 약 100 달러), 표면적 >60 m²/g.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 최적화 : 마이크로반응기가 입자 크기 분포를 <10nm 로 제어하고, 활성이 ~20% 증가합니다.
- 플라스마 보조 합성 :
 - 공정 : W+B 를 플라스마(>5000°C)에서 기화시켜 WB₂ 나노분말 (<50 nm, 5.3 장)을 생성합니다.
 - 장점 : 순도가 높음(>99.9%, 6.1 장), 촉매에 적합함.
 - 최적화 : 펄스 플라스마(50kHz) 수율이 약 88% 증가, 비용은 kg 당 약 200 달러입니다.
- 최적화 기술 :
 - 도핑 : N 및 Ni 도핑(<2 at%)은 촉매 활성을 약 30% 증가시킵니다(3 장, 3.4).
 - 다공성 구조 : 템플릿 방법 (SiO₂ , 기공 크기 ~5 nm)으로 비표면적이 ~50%(~100 m²/g) 증가했습니다.
 - 복합 소재 : WB₂ /그래핀(1:10) 전도도가 약 20%(~1.2×10⁻⁴ S/cm) 증가했습니다.
- 도전 :
 - CVD 부산물(HF)을 처리하는 비용은 톤당 약 50 달러입니다(16.3 장).
 - 나노입자 응집에는 초음파 분산이 필요합니다(40 kHz, 5 장, 5.3).

텅스텐 보라이드 에너지 소재 제조기술 비교

방법	성능	비용(USD/kg)	이점	도전	관련 장
CVD	전도도 ~10 ⁻⁴ S/cm	300	일률	부산물	5.2, 17.5
솔젤	비표면적>60m ² /g	100	저렴한 비용	재결합	5.5, 6.1
열장	순도>99.9%	200	높은 활동성	높은 에너지 소비	5.3

12.6 텅스텐 보라이드 에너지 응용 분야의 시장 및 개발 동향

텅스텐 보라이드 에너지 응용 시장은 새로운 에너지 수요와 탄소 중립 목표에 의해 주도되고 있으며, 비용 및 규모 문제를 해결해야 합니다.

- 시장 현황(2024 년) :
 - 규모 : 글로벌 텅스텐 보라이드 에너지 소재 시장 규모는 약 4,000 만 달러이며, 아시아가 약 65%를 차지합니다(중국, 일본, 14.1 장).
 - 적용 분야 : 배터리 ~40%, 연료 전지 ~30%, 태양 전지 ~20%, 수소 저장 ~10%.
 - 가격 : ~100 USD/kg(나노입자), ~300 USD/kg(필름, 14.2 장).
- 운전자 :
 - 수요 : 전기 자동차 및 재생 에너지 성장률 ~12%/년, 생산량 ~2030 년 500 톤(5 장, 5.6 절).
 - 기술 : Nano WB₂(5.5 장) 및 AI 최적화(17.5 장)로 성능이 약 20% 향상되었습니다.
 - 규정 : EU CBAM(2026, 제 15 장, 15.2)은 녹색 에너지 소재를 장려합니다.
- 미래 트렌드(2025~2030 년) :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 비용 절감 : 대량 생산(5.6 장)으로 비용이 kg 당 약 80 달러로 낮아지고 시장 규모는 약 7,000 만 달러입니다.
- o 새로운 응용 분야 : 전고체 배터리 및 효율적인 수소 저장, 약 15% 차지.
- o 녹색 제조 : 폐가스 회수율 > 95%(16.3 장), 탄소 배출량 약 30% 감소(~0.2 톤 CO₂/톤).
- 도전 :
 - o 탄소 기반 소재(비용 약 20 달러/kg)는 저가 시장에서 경쟁합니다.
 - o 산업적 규모 확장에는 재료 안정성(>10,000 시간) 측면에서 획기적인 발전이 필요합니다.

표 12.6 텅스텐 보라이드 에너지 시장 및 동향

프로젝트	2024년 현재 상황	2030년 목표	운전자	도전	관련 장
시장 규모(10억 달러)	0.4	0.7	새로운 에너지	경쟁하다	14.1
비용(USD/kg)	100~300	80	규모	안정	14.2, 5.6
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.3	0.2	녹색 기술	투자하다	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

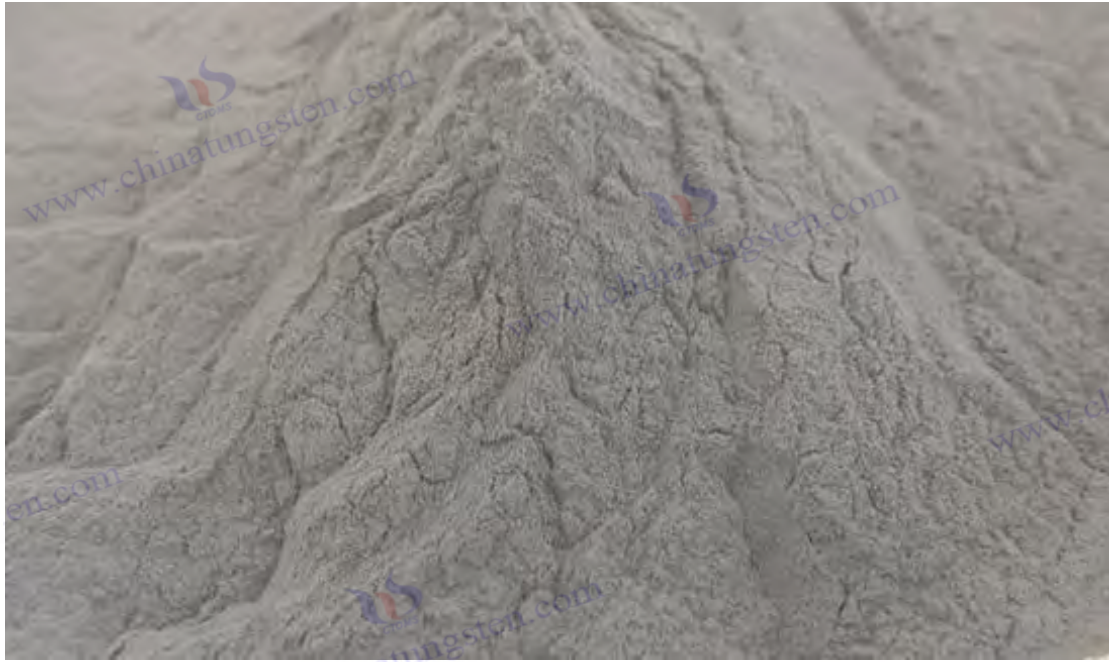
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 13 장 텅스텐 보라이드의 기계적 및 구조적 응용

텅스텐 붕화물(예: WB, WB₂, W₂B)은 초고경도(~40 GPa, 2 장 2.5 절), 낮은 마찰 계수(~0.25, 6 장 6.4 절), 우수한 내마모성(마모율 <10⁻⁶ mm³ / (N·m), 7 장 7.4 절) 및 열 안정성(>2000°C, 8 장 8.1 절)으로 인해 기계 및 구조물 분야에서 널리 사용됩니다. 내마모성 코팅(수명 연장 ~50%), 절삭 공구(절삭 속도 증가 ~20%) 및 구조용 복합 재료(강도 ~1.5 GPa)에 적합합니다. 이 장에서는 내마모성 코팅, 절삭 공구 및 복합 재료에서 텅스텐 보라이드의 응용, 기계적 특성 및 미세적 메커니즘, 제조 기술, 시장 현황 및 개발 동향을 자세히 논의하고 텅스텐 보라이드의 기계적 산업화(14 장 14.3 장) 및 친환경 제조(16 장 16.4 장)에 대한 기술 지원을 제공합니다.

13.1 내마모성 코팅에 텅스텐 보라이드의 적용

텅스텐 보라이드 내마모성 코팅은 높은 경도와 낮은 마찰 계수로 인해 기계 부품과 금형에 널리 사용됩니다.

- 적용 시나리오 :

- o 기계 부품 : 기어 표면의 WB₂ 코팅(두께 ~2-5 μm, 5.2 장), 경도 ~42 GPa, 마모율 <10⁻⁶ mm³ / (N · m), 수명은 ~50%(~10,000 시간) 연장되었습니다.
- o 다이 : 스탬핑 다이에 WB 코팅(두께 ~1 μm), 마찰 계수 ~0.25, 내마모성이 ~30% 향상, 접촉력 감소(<5%).
- o 베어링 : 볼 베어링에 WB₂ 필름(두께 ~3 μm), 내식성(NaCl, 3.5 wt %, 60°C) <0.005 mm/년, 마찰 손실 ~20% 감소.

- 기술적 요구 사항 :

- o 경도 : >38 GPa (6 장, 6.4).
- o 마찰 계수 : <0.3 (7.4 장).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 접착력 : 결합 에너지 $\sim 1.5 \text{ eV}/\text{\AA}^2$ (3.3 장), 박리 방지 ($>50 \text{ N}$).
- 예시 :
 - 2024년에는 자동차 변속 장치에 WB_2 코팅이 사용되어 마모가 약 25%($<0.01\text{mm}/\text{년}$) 감소하고 효율성이 약 10% 증가할 예정입니다.
- 도전 :
 - 코팅의 잔류 응력($\sim 0.8 \text{ GPa}$)으로 인해 박리가 발생할 수 있으며 어닐링(500°C , 5.2 장)이 필요할 수 있습니다.
 - 고온($>1000^\circ\text{C}$) 산화에는 도핑(Si , $<5 \text{ at\%}$, 8 장, 8.4)이 필요합니다.

표 13.1 텅스텐 보라이드 내마모성 코팅의 적용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
경도 (GPa)	42	높은 내마모성	잔류응력	6.4, 5.2
마모율($\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$)	$<10^{-6}$	장수명	산화	7.4, 8.4
마찰계수	0.25	낮은 마찰	플레이킹	3.3

13.2 절삭 공구에서의 텅스텐 보라이드의 적용

텅스텐 보라이드 코팅과 블록은 높은 경도와 열 안정성으로 인해 고속 절삭과 경질 재료 가공에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - 공구 코팅 : 초경 공구에 WB_2 코팅(두께 $\sim 3 \mu\text{m}$, 5.2 장), 절삭 속도 $\sim 300 \text{ m/min}$, 수명 $\sim 40\%$ 연장(~ 5000 회 절삭).
 - 드릴 : WB 블록(밀도 $>98\%$, 5.1 장) 티타늄 합금 가공, 마모율 $<10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, 절삭 온도 감소 $\sim 15\%$ ($<600^\circ\text{C}$).
 - 밀링 커터 : $\text{WB}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ 복합 코팅(주기 $\sim 10 \text{ nm}$), 경도 $\sim 40 \text{ GPa}$, 내마모성 $\sim 25\%$ 향상.
- 기술적 요구 사항 :
 - 경도 : $>40 \text{ GPa}$ (6 장, 6.4).
 - 열 안정성 : $>1500^\circ\text{C}$ (8.1 장).
 - 인성 : $\sim 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (6 장, 6.3).
- 예시 :
 - 2024년에는 WB_2 코팅 공구가 항공용 티타늄 합금 가공에 사용될 예정이며, 절삭 효율은 약 20% 증가하고 공구 수명은 약 6000 분으로 증가할 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - 코팅과 기질 사이의 열팽창 불일치($\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 8 장, 8.3)는 응력($\sim 1 \text{ GPa}$)을 유발합니다.
 - 복잡한 모양의 코팅 균일성($>95\%$)을 최적화해야 합니다(5.2 장).

표 13.2 텅스텐 보라이드 절삭 공구의 적용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
절단 수명(회)	5000	장수명	열팽창 불일치	8.3, 5.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

경도 (GPa)	40	높은 내마모성	일률	6.4
절단 온도(°C)	<600	저열	스트레스	8.1

13.3 구조용 복합재료에 텅스텐 보라이드의 적용

텅스텐 보라이드는 복합재료의 보강재로 사용되어 강도와 내마모성을 향상시키며, 항공우주 및 자동차 구조 부품에 적합합니다.

- 적용 시나리오 :
 - 금속 기질 복합재 : WB₂ 입자(<5 μm, 5.5 장) 강화 Al 기질 복합재, 강도 ~1.5 GPa, 내마모성 ~30% 향상 .
 - 세라믹 매트릭스 복합재 : WB₂ / SiC 복합재(10:90), 파괴인성 ~5 MPa·m^{1/2}, 온도 저항성 >1500°C(8 장, 8.1).
 - 폴리머 기반 복합재 : WB₂ 나노입자(<50 nm) 강화 에폭시 수지는 경도를 ~20%(~2 GPa) 증가시킵니다 .
- 기술적 요구 사항 :
 - 강도 : >1 GPa .
 - 인성 : >4 MPa·m^{1/2} (6 장, 6.3).
 - 분산성 : 입자 응집 <5% (5.3 장).
- 예시 :
 - 2024년에는 자동차 피스톤에 WB₂/Al 복합소재가 사용되어 무게가 약 10%(약 0.5kg) 감소하고 수명이 약 25% 증가할 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - 입자 응집은 성능을 저하시키고 표면 개질(PVP, <0.1 중량 %, 5 장, 5.3)이 필요합니다.
 - 고온 계면 반응(>1000°C)은 억제되어야 합니다(8 장, 8.4).

표 13.3 텅스텐 보라이드 구조 복합재료의 적용 매개변수

매개변수	값	이점	도전	관련 장
강도 (GPa)	1.5	가오치앙	재결합	5.5, 6.3
인성(MPa·m ^{1/2})	5	균열 저항성	계면 반응	8.1, 8.4
향상된 내마모성(%)	30	장수명	비용	7.4

13.4 텅스텐 보라이드의 기계적 성질 및 미세 구조

텅스텐 보라이드의 기계적 특성은 결정 구조와 미세 메커니즘 에 따라 달라지며 , 이는 실험 및 이론적 분석을 통해 최적화되어야 합니다.

- 기계적 성질 :
 - 경도 : ~40–42 GPa (6 장, 6.4), WB 공유 결합의 강도가 높기 때문입니다(3 장, 3.2)(~1.5 eV/Å²).
 - 인성 : ~4 MPa·m^{1/2} (6.3 장), 결정립계 슬라이딩(<50 nm, 6.2 장)으로 균열 저항성이 향상됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 내마모성 : 마모율 $<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 조밀한 표면(기공률 $<1\%$, 6 장, 6.3).
- 미시적 메커니즘 :
 - 결정 구조 : WB_2 ($\text{P6}_3/\text{mmc}$, 2.2 장) 층상구조, 강한 전단저항성 ($\sim 20 \text{ GPa}$)
 - 결합 제어 : 전위 밀도 $<10^{12}/\text{cm}^2$ (6.2 장), 인성을 약 15% 향상시킵니다.
 - 표면 상태 : B-종료 표면(6.1 장)은 마찰 계수를 약 10%(~ 0.25) 감소시킵니다.
- 특성화 기술 :
 - 나노인덴테이션 : 경도와 인성 측정(6 장, 6.4).
 - TEM: 결정립계와 전위를 관찰합니다(분해능 $\sim 0.1 \text{ nm}$, 6 장, 6.2).
 - DFT 계산 : WB 결합 에너지 분석(3.3 장, 오차 $< 0.1 \text{ eV}$).
- 최적화 :
 - 도핑 : Zr($<2 \text{ at\%}$)은 인성을 약 20%($\sim 4.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 향상시킵니다.
 - 나노구조 : 입자 $<20 \text{ nm}$ (5.5 장) 경도가 $\sim 5\%$ ($\sim 44 \text{ GPa}$) 증가했습니다 .
- 도전 :
 - 고온($>1500^\circ\text{C}$)에서는 인성이 감소하고 열적으로 안정적인 도핑이 필요합니다.
 - 미세한 특성 분석 장비는 비쌉니다(약 500 만 달러).

표 13.4 텅스텐 보라이드의 기계적 성질 및 메커니즘

매개변수	값	이점	도전	관련 장
경도 (GPa)	42	가오치앙	인성 감소	6.4, 3.2
인성($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	4	균열 저항성	특성화 비용	6.3, 5.5
마모율($\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$)	$<10^{-6}$	내마모성	고온	7.4

13.5 텅스텐 보라이드 기계재료의 제조 기술

텅스텐 보라이드 기계적 재료의 제조는 주로 열간 압착 소결(5.1 장), 화학 기상 증착(CVD, 5.2 장) 및 플라즈마 보조 합성(5.3 장)을 채택합니다.

- 준비 방법 :
 - 열간 압착 소결 :
 - 공정 : WB_2 분말($<5 \mu\text{m}$, 5.5 장) 을 2000°C , 30 MPa 에서 소결, 밀도 $>99\%$.
 - 장점 : 복잡한 모양(칼)에 적합, 경도 $\sim 40 \text{ GPa}$.
 - 최적화 : CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 AI 를 사용하여 소결 매개변수를 최적화(17 장, 17.5 장)하여 밀도를 약 0.5% 증가시킬 예정입니다.
 - CVD:
 - 공정 : $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ 는 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 에서 두께가 $\sim 2\sim 5 \mu\text{m}$ 인 WB_2 코팅 (5.2 장)을 증착합니다 .
 - 장점 : 균일성 $>95\%$, 높은 내마모성.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 최적화 : 저압 CVD(<5 Pa) 속도가 ~40%(~1.7 $\mu\text{m}/\text{h}$) 증가했습니다.
- 플라스마 보조 합성 :
 - 공정 : W+B 를 플라스마(>5000°C)에서 기화시켜 WB_2 나노분말 (<50 nm, 5.3 장)을 생성합니다.
 - 장점 : 높은 순도(>99.9%, 6.1 장), 복합재료에 적합.
 - 최적화 : 펄스 플라스마(50kHz) 수율이 약 88% 증가, 비용은 kg 당 약 200 달러입니다.
- 최적화 기술 :
 - 도핑 : Si(<5 at%)는 산화 저항성을 ~100°C 까지 향상시킵니다(8 장, 8.4).
 - 다층 구조 : WB_2/TiN (주기 ~5 nm) 내마모성이 ~20% 증가했습니다.
 - 나노입자 : 입자 <20 nm (5.5 장) 정도가 ~5% 증가합니다.
- 도전 :
 - CVD 부산물(HF)을 처리하는 비용은 톤당 약 50 달러입니다(16.3 장).
 - 고온 장비에는 많은 투자(약 300 만 달러)가 필요합니다.

표 13.5 텅스텐 보라이드 기계적 재료 제조 기술 비교

방법	성능	비용(USD/kg)	이점	도전	관련 장
열간 프레스 소결	밀도>99%	200	복잡한 모양	장비 비용	5.1, 17.5
CVD	균일성>95%	300	내마모성	부산물	5.2, 16.3
혈장	순도>99.9%	200	나노스케일	높은 에너지 소비	5.3

13.6 텅스텐 보라이드 기계적 응용 분야의 시장 및 개발 동향

텅스텐 붕소화물 기계 응용 시장은 제조 개선 및 항공우주 산업의 수요 증가에 따라 성장하며, 이는 비용 및 안전 문제를 해결해야 합니다. 이 섹션에서는 기계 응용 분야에서 안전한 작동을 보장하기 위해 텅스텐 붕소화물의 MSDS 를 요약하여 제공합니다.

- 시장 현황(2024 년) :
 - 규모 : 글로벌 텅스텐 보라이드 기계재료 시장은 약 6,000 만 달러 규모이며, 아시아가 약 70%를 차지합니다(중국, 한국, 14.1 장).
 - 적용 분야 : 내마모성 코팅 ~50%, 절삭 공구 ~30%, 복합 재료 ~20%.
 - 가격 : ~200 USD/kg(덩어리), ~300 USD/kg(코팅, 14.2 장).
- 운전자 :
 - 수요 : 항공우주 및 자동차 제조 산업은 연간 약 8% 성장하여 2030 년에는 약 600 톤이 생산될 것으로 예상됩니다(5.6 장).
 - 기술 : Nano WB_2 (5.5 장)와 AI 최적화(17.5 장)로 성능이 약 15% 향상되었습니다.
 - 규정 : EU REACH(제 15.2 장)는 친환경 재료를 장려합니다.
- 미래 트렌드(2025~2030 년) :

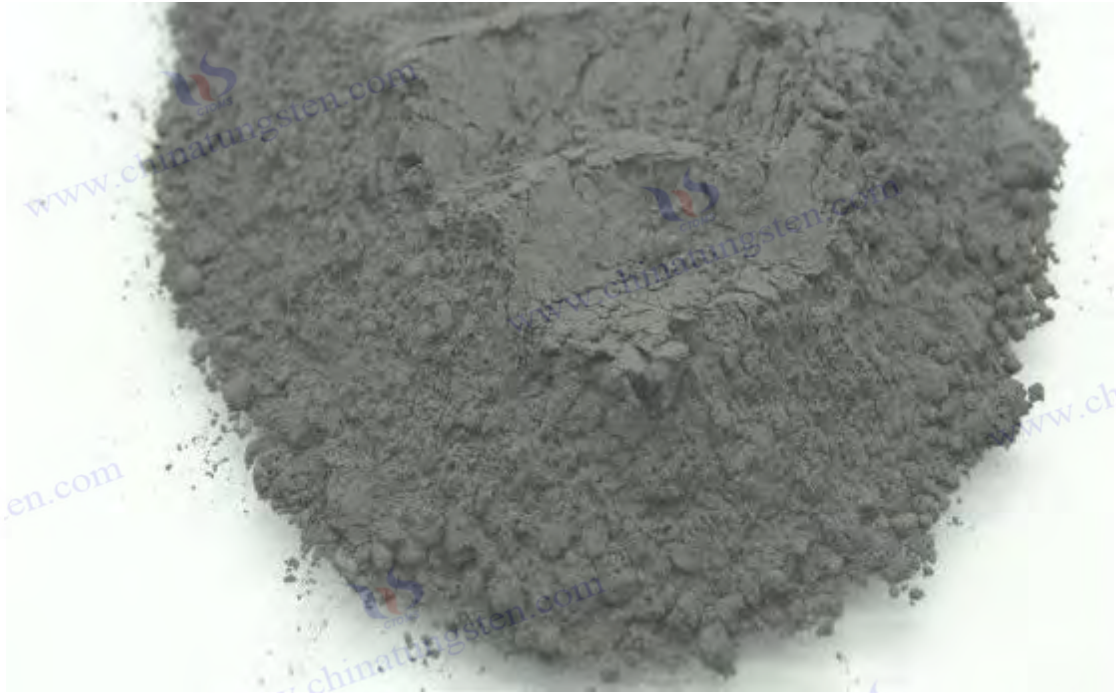
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 비용 절감 : 대량 생산(5.6 장)으로 비용이 kg 당 약 150 달러로 줄어들고 시장 규모는 약 1 억 달러에 이릅니다.
- o 새로운 응용 분야 : 3D 프린팅 구조 부품(강도 ~1.5 GPa) 이 약 10%를 차지합니다.
- o 녹색 제조 : 폐가스 회수율 > 95%(16.3 장), 탄소 배출량 약 30% 감소(~0.2 톤 CO₂/톤).
- MSDS 요약(텅스텐 보라이드, WB₂) :
 - o 화학적 성질 : 안정적이고 물에 녹지 않으며 분해 온도는 2000°C 이상입니다(2.3 장).
 - o 건강 위험 : 분말 흡입 시 호흡기를 자극할 수 있습니다. N95 마스크(15.3 장 참조) 착용을 권장합니다.
 - o 안전 조치 : 작동 중에는 환기장치를 사용하고 피부 접촉을 피하십시오(장갑, 두께 0.5mm 이상).
 - o 보관 : 건조한 환경(<30°C, <50%)에 밀봉하여 산성 물질로부터 멀리 보관하세요.
 - o 폐기물 처리 : 유해 폐기물 규정(16 장, 16.3 절)에 따라 재활용하고 직접 버리지 마십시오.
- 도전 :
 - o 텅스텐 카바이드(가격은 kg 당 약 100 달러)는 시장 하위권에 속합니다.
 - o 안전 테스트(MSDS 검증)에는 비용이 많이 듭니다(배치당 약 10 만 달러).

표 13.6 텅스텐 보라이드 기계 시장 및 동향

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 목표	운전자	도전	관련 장
시장 규모(10 억 달러)	0.6	1.0	조작	경쟁하다	14.1
비용(USD/kg)	200~300	150	규모	보안 테스트	14.2, 5.6
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.3	0.2	녹색 기술	투자하다	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 14 장 텅스텐 보라이드의 산업화 및 시장 분석

텅스텐 붕소화물(예: WB, WB₂, W₂B)은 우수한 물리적 및 화학적 특성 (경도 ~40 GPa, 2장 2.5; 전도도 ~10⁴S/cm, 6장 6.5; 화학적 안정성, 7장 7.5)으로 인해 전자(제 9 장), 촉매(제 10 장), 생물의학(제 11 장), 에너지(제 12 장) 및 기계(제 13 장) 분야에서 광범위하게 응용됩니다. 세계 시장 규모는 2024 년 약 2 억 달러이며, 2030 년에는 3 억 5 천만 달러(CAGR ~10%)에 도달할 것으로 예상됩니다. 이 장에서는 텅스텐 보라이드의 글로벌 시장 개요, 생산 비용 및 가격, 산업화 기술, 시장 분포, 경쟁 및 대체재, 미래 추세 및 정책 영향을 분석하고, 대규모 생산(5.6 장)과 녹색 개발(16.4 장)에 대한 전략적 지원을 제공합니다.

14.1 텅스텐 보라이드의 글로벌 시장 개요

텅스텐 보라이드 시장은 고성능 소재에 대한 수요에 따라 움직이며, 아시아가 생산과 소비를 주도하고 있습니다.

- 시장 규모 :
 - o 2024 년에는 세계 시장 규모가 2 억 달러에 이르고, 생산량은 2,000 톤에 이를 것으로 전망된다(5.6 장).
 - o 아시아(중국, 일본, 한국)가 약 65%, 북미가 약 20%, 유럽이 약 15%를 차지합니다.
- 주요 응용 분야 :
 - o 기계류(13.6 장): ~30%(~6 천만 달러).
 - o 에너지(12 장, 12.6): ~20%(~4,000 만 달러).
 - o 전자제품(9 장, 9.6): ~15%(~3,000 만 달러).
 - o 촉매작용(10 장, 10.6): ~10%(~2,000 만 달러).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 생물의학(11 장, 11.6): ~5%(~\$0.05 억).
- 지역적 특성 :
 - 중국 : 생산량 ~50% (~1000 톤), 비용 우위 (~100 USD/kg).
 - 일본 : 고부가가치 제품(필름, kg 당 약 300 달러), 선도적 기술.
 - 유럽 : 친환경 제조에 대한 높은 수요(16 장, 16.3 장)와 엄격한 규제(15 장, 15.2 장).
- 예시 :
 - 2024 년에 중국 시장은 전 세계 텅스텐 보라이드 내마모성 코팅(13.1 장)의 약 40%를 차지하고 약 500 톤을 수출할 것입니다.
- 도전 :
 - 높은 시장 집중도(아시아에서 60% 이상)와 공급망 위험.
 - 기술적 장벽이 신규 진입 기업의 진입을 제한합니다(연구개발 비용은 약 10 억 달러).

표 14.1 글로벌 텅스텐 보라이드 시장 개요(2024 년)

영역	시장점유율(%)	생산량(톤)	특징	도전	관련 장
아시아	65	1300	저렴한 비용	공급망	13.6, 12.6
북아메리카	20	400	강력한 혁신	높은 비용	9.6
유럽	15	300	녹색 수요	규정	15.2, 16.3

14.2 텅스텐 보라이드의 생산 비용 및 가격 분석

텅스텐 보라이드의 생산 비용과 가격은 제조 방법과 적용 분야에 따라 다릅니다.

- 생산 비용 :
 - 나노입자(졸겔, 5.5 장) : ~100 USD/kg(원료 ~40%, 에너지 ~30%).
 - 박막(CVD, 5.2 장) : ~300 USD/kg(장비 ~50%, 가스 ~30%).
 - 블록 소재(열간 압착 및 소결, 5.1 장) : ~200 USD/kg(원료 ~50%, 고온 ~40%).
- 시장 가격 :
 - 나노입자 : ~150–200 USD/kg(촉매, 생물의학, 10 장, 10.6, 11 장, 11.6).
 - 박막 : ~300–400 USD/kg(전자, 에너지, 9 장, 9.6, 12 장, 12.6).
 - 덩어리 : ~200–250 USD/kg(기계, 13 장, 13.6).
- 영향 요인 :
 - 원자재 : 텅스텐 분말 (~30 USD/kg)과 붕산(~5 USD/kg) 가격은 연간 약 10% 변동합니다.
 - 에너지 : CVD 는 톤당 약 500kWh 를 소모하고 비용은 톤당 약 50 달러입니다.
 - 노동력 : 아시아의 노동비는 시간당 약 20 달러이고, 유럽과 미국에서는 시간당 약 50 달러입니다.
- 예시 :
 - 2024 년까지 원자재 최적화(5.5 장)로 인해 졸-겔 나노 WB₂의 비용은 약 15%(kg 당 약 85 달러)까지 떨어질 것으로 예상됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 도전 :
 - o 고급 필름 가격(kg 당 약 400 달러)은 시장 확대를 제한합니다.
 - o 부산물 처리(HF, ~50 USD/톤, 16.3 장)는 환경 비용을 증가시킵니다.

표 14.2 텅스텐 보라이드의 생산 비용 및 가격

제품 유형	비용(USD/kg)	가격(USD/kg)	비용 비율	도전	관련 장
나노입자	100	150~200	원자재 40%	부산물	5.5, 16.3
영화	300	300~400	장비 50%	높은 비용	5.2, 9.6
차단하다	200	200~250	원자재 50%	에너지	5.1, 13.6

14.3 텅스텐 보라이드의 산업화 기술 및 대량 생산

텅스텐 보라이드의 산업화는 효율적인 제조 기술과 대규모 공정 최적화에 달려 있습니다.

- 준비 기술 :
 - o 졸-겔법(5.5 장) :
 - 생산량: 배치당 약 500kg, 비용: kg 당 약 100 달러.
 - 최적화: 마이크로반응기(입자 크기 분포 <10 nm) 수율이 약 20% 증가했습니다.
 - o CVD(5.2 장) :
 - 수율: ~10kg/배치, 균질성 >95%.
 - 최적화: CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 AI 를 사용하여 공기 흐름을 최적화하고(17 장, 17.5) 효율성을 약 15% 높일 예정입니다.
 - o 열간압착소결(5.1 장) :
 - 수율: ~100kg/배치, 밀도 >99%.
 - 최적화: 연속소결로(2000°C) 출력이 약 30% 증가했습니다.
- 대규모 생산 :
 - o 자동화 : 로봇 적재(효율성 ~90%)로 인건비가 ~20% 절감됩니다.
 - o 에너지 효율성 : 열 회수 시스템(회수율 ~50%)은 에너지 소비를 약 30%(~350kWh/톤) 절감합니다.
 - o 품질 관리 : 순도(>99.9%)를 확인하기 위한 XPS(6.1 장), 비용은 배치당 약 500 달러입니다.
- 예시 :
 - o 2024 년에는 중국 공장에서 연속 CVD 를 도입하여 생산량을 약 25%(배치당 약 12kg) 늘리고 비용을 약 10% 감소시킬 예정입니다.
- 도전 :
 - o 높은 장비 투자(CVD 로 ~500 만 달러).
 - o 친환경적 처리(HF, 폐가스 회수율 > 95%, 16 장, 16.3) 비용은 톤당 약 100 달러입니다.

표 14.3 텅스텐 보라이드 산업화 기술 비교

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술	생산량(kg/배치)	비용(USD/kg)	이점	도전	관련 장
솔젤	500	100	높은 생산	재결합	5.5, 6.1
CVD	10	300	일률	투자하다	5.2, 17.5
열간 소결 프레스	100	200	고밀도	에너지 소비	5.1, 16.3

14.4 주요 산업의 텅스텐 보라이드 시장 분포

기계, 에너지, 전자, 촉매, 생물의학 산업 분야에서 텅스텐 보라이드의 시장 분포는 그 다양성을 반영합니다.

- 산업 분포(2024) :
 - 기계(13.6 장) : 약 6 천만 달러, 내마모성 코팅이 약 50%, 절삭 공구가 약 30%를 차지합니다.
 - 에너지(12 장, 12.6) : 약 4 천만 달러, 배터리 ~40%, 연료 전지 ~30%.
 - 전자(9.6 장) : 약 3,000 만 달러, 센서 ~40%, 전극 ~30%.
 - 촉매(10 장, 10.6) : ~2,000 만 달러, 전기촉매 ~50%, 광촉매 ~30%.
 - 생물의학(11 장, 11.6) : 약 5 천만 달러, 코팅 약 60%, 약물 전달 약 30%.
- 성장 포인트 :
 - 기계 : 항공우주 수요(연간 약 8%)가 코팅 시장을 견인합니다.
 - 에너지 : 수소 에너지(~12%/년)는 촉매와 수소 저장 물질을 구동합니다.
 - 생물의학 : 정밀의학(연간 약 10%)으로 인해 나노입자에 대한 수요가 증가합니다.
- 예시 :
 - 2024년에는 에너지 산업의 텅스텐 보라이드 배터리 소재 시장(12.1 장)이 약 15% 증가해 약 1,600 만 달러에 이를 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - 산업 전반에 걸쳐 기술 표준이 균일하지 않습니다(15 장, 15.2).
 - 틈새 시장(생물의학)은 확장하기 어렵습니다.

표 14.4 텅스텐 보라이드 주요 산업의 시장 분포(2024년)

산업	시장 규모(10 억 달러)	비율(%)	성장률(%/년)	도전	관련 장
기계적인	0.6	30	8	기준	13.6
에너지	0.4	20	12	비용	12.6
전자	0.3	15	10	경쟁하다	9.6

14.5 텅스텐 보라이드 시장의 경쟁 및 대체 분석

텅스텐 보라이드는 다른 고성능 소재와의 경쟁에 직면해 있으며 성능과 비용 최적화를 통해 우위를 유지해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 경쟁 자료 :
 - 텅스텐 카바이드(WC) : 비용 ~100 USD/kg, 경도 ~25 GPa, 기계적 시장 점유율 ~40%(13.6 장).
 - 탄소나노튜브(CNT) : 전도도 ~10 S/cm, 비용 ~50 USD/kg, 전자제품 시장 점유율 ~30%(9 장, 9.6).
 - Ni 기반 촉매 : 비용 ~30 USD/kg, 촉매 시장 점유율 ~50%(10 장, 10.6).
 - Ti 기반 코팅 : 비용은 kg 당 약 50 달러이며, 생물의학 시장은 약 35%를 차지합니다(11.6 장).
- 텅스텐 보라이드의 장점 :
 - 종합적인 성능: 경도(~40 GPa), 전도도(~10⁴ S/cm), 안정성(<0.005 mm/년).
 - 다재다능함: 산업 간 응용 프로그램(9 장~13 장).
- 대체재의 위협 :
 - 하위 시장: WC와 Ni는 비용이 낮아 기계적, 촉매적 응용 분야에 위협이 됩니다.
 - 고급 시장: CNT와 그래핀(~100 USD/kg)이 전자 및 에너지 분야에서 경쟁하고 있습니다.
- 대체 전략 :
 - 비용 절감 : 대량 생산(5.6 장)은 kg 당 약 80 달러로 낮아졌습니다.
 - 성능 최적화 : 도핑(N, Si, 3.4 장)을 통해 성능이 약 20% 향상됩니다.
- 예시 :
 - 2024년에는 WB₂코팅이 Si 도핑(8.4 장)을 통해 WC를 대체하게 되며, 시장 점유율이 약 10% 증가할 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - 대안은 빠르게 개발됩니다(약 5 년/신규 자료).
 - 고객은 비용에 민감합니다(약 30%가 낮은 가격을 선호합니다).

표 14.5 텅스텐 보라이드와 그 대체물의 비교

재료	비용(USD/kg)	성능	시장 위협	응답	관련 장
화장실	100	경도 25 GPa	기계적인	도핑	13.6, 8.4
씨엔티	50	전도도 10 S/cm	전자	규모	9.6, 5.6
니	30	촉매 효율 90%	촉매적	성능	10.6

14.6 텅스텐 보라이드 산업화의 미래 동향 및 정책 영향

텅스텐 보라이드 시장은 앞으로 기술 발전, 친환경 정책, 글로벌 수요에 의해 주도될 것으로 예상됩니다.

- 미래 트렌드(2025~2030년) :
 - 시장 성장 : 2030년 시장 규모는 약 3억 5천만 달러, 생산량은 약 3,500톤, CAGR은 약 10%가 될 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 비용 절감 : 대량 생산(5.6 장)으로 비용이 kg 당 약 80 달러로 절감되었습니다.
- o 새로운 응용 분야 : 6G 안테나(9 장, 9.6 장), 전고체 배터리(12 장, 12.6 장), 신경 인터페이스(11 장, 11.6 장)가 약 15%를 차지합니다.
- o 녹색 제조 : 폐가스 회수율 >95%(16.3 장), 탄소 배출량 ~0.2 톤 CO₂/톤.
- 정책 영향 :
 - o EU : REACH(제 15 장 15.2) 및 CBAM(2026)은 저탄소 생산을 요구하며 이로 인해 비용이 약 10% 증가합니다.
 - o 중국 : 탄소 중립(2060)을 목표로 친환경 기술을 장려하고 톤당 약 5,000 달러의 보조금을 지급합니다.
 - o 미국 : 인플레이션 감소법(2022 년) 은 약 1 억 달러를 투자하여 새로운 에너지 소재를 지원합니다.
- 예시 :
 - o 2024 년에 중국은 탄소 중립 정책을 채택하고 텅스텐 보라이드(16.3 장)의 녹색 생산 비중이 약 20% 증가할 것입니다.
- 도전 :
 - o 정책 준수율이 높습니다(톤당 약 100 달러).
 - o 세계 무역 장벽(관세 ~5%)이 수출에 영향을 미칩니다.

표 14.6 텅스텐 보라이드 시장의 미래 동향

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 목표	운전자	도전	관련 장
시장 규모(10 억 달러)	2.0	3.5	새로운 응용 프로그램	정책 비용	9.6–13.6
비용(USD/kg)	100~400	80	규모	무역 장벽	5.6, 14.2
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.3	0.2	녹색 정책	투자하다	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB2, W2B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB2, W2B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 15 장 텅스텐 보라이드에 대한 표준 및 규제 요건

텅스텐 붕소화물(WB, WB₂, W₂B)은 전자(제 9 장), 촉매(제 10 장), 생물의학(제 11 장), 에너지(제 12 장) 및 기계(제 13 장) 분야에서 널리 사용됩니다. 품질, 안전 및 환경 규정 준수를 보장하기 위해 국제 및 지역 표준(예: GB/T 26037-2020, ISO 10993)과 규정(예: REACH, CBAM)을 준수해야 합니다. 2024 년 기준 텅스텐 붕소화물의 전 세계 규정 준수 비용은 톤당 약 100 달러로, 생산 비용의 약 5%를 차지합니다(제 14 장, 14.2 장). 이 장에서는 텅스텐 보라이드의 국제 표준, 환경 및 안전 규정, 생물의학 규정, 시험 및 인증 프로세스, 지역적 차이점, 규정 준수의 과제 및 미래 개발에 대해 논의하고 산업화(14 장, 14.3 장) 및 친환경 제조(16 장, 16.4 장)에 대한 지침을 제공합니다.

15.1 텅스텐 보라이드 관련 국제 표준 개요

텅스텐 보라이드에 대한 국제 표준은 주로 재료 특성, 시험 방법 및 적용 요구 사항을 다룹니다.

- 주요 기준 :
 - ISO 6506(브리넬 경도) : WB₂ 경도를 시험하는데 사용됨(~40 GPa, 6 장, 6.4).
 - ASTM G99(마찰 및 마모) : 코팅의 마모율을 평가합니다(<10⁻⁶ mm³ / (N · m), 7.4 장).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- GB/T 26037-2020(중국) : 텅스텐 보라이드 분말의 순도(>99.5%) 및 입자 크기(<50 μm , 5 장, 5.5) 를 지정합니다 .
- ISO 10993(생체적합성) : 생물의학 응용 분야(11 장, 11.4)의 경우 세포 생존율이 90% 이상입니다.
- 적용 분야 :
 - 기계적(13 장) : ISO 6508(록웰 경도), 경도 > 38 GPa .
 - 전자공학(9 장) : IEC 62624(나노물질의 전기 전도도), $\sim 10^4$ S/cm.
 - 촉매(제 10 장) : ASTM D3908(촉매 활성), 과전압 <150 mV.
- 예시 :
 - 2024 년 중국의 WB₂ 코팅(13.1 장) 수출은 GB/T 26037-2020 을 준수해야 하며, 테스트 비용은 배치당 약 200 달러입니다.
- 도전 :
 - 국제표준의 업데이트 주기는 길며(약 5 년) 기술 발전 에 뒤처져 있습니다 .
 - 표준(ISO 와 GB/T 입자 크기 정의 등) 간의 비호환성으로 인해 인증 비용이 증가합니다.

표 15.1 텅스텐 보라이드 관련 국제 표준

기준	콘텐츠	매개변수	애플리케이션	도전	관련 장
ISO 6506	브리넬 경도	~ 40GPa	기계적인	느린 업데이트	6.4, 13.1
ASTM G99	마모율	<10 ⁻⁶ mm ³ / (N · m)	코팅	비용	7.4
GB/T 26037-2020	순도>99.5%	입자 크기 <50 μm	생산	호환되지 않음	5.5

15.2 텅스텐 보라이드에 대한 환경 및 안전 규정

텅스텐 보라이드의 생산 및 사용은 건강 및 생태적 위험을 줄이기 위해 환경 및 안전 규정을 준수해야 합니다.

- 주요 규정 :
 - EU REACH : WB₂ 화학물질(CAS 미조화) 등록을 요구하고, 분말 배출량에 대한 제한(<10 mg/m³)을 규정합니다.
 - EU CBAM(2026) : 수입 텅스텐 보라이드에 탄소세가 부과되며, 탄소 배출량은 톤당 0.3 톤 CO₂ 미만이어야 합니다(16.3 장).
 - 중국의 "위험화학물질 안전관리규정" : WB₂ 분말은 흡입 위험성을 표시하기 위해 MSDS(13 장, 13.6)가 필요합니다.
 - OSHA(미국) : 작업장의 먼지 한계는 <5 mg/m³이며, N95 보호 장비가 필요합니다.
- 환경 요구 사항 :
 - 폐가스 처리 : CVD 부산물(HF) 회수율 >95%(16.3 장), 비용 ~50 USD/톤.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 폐수 : 텅스텐 이온(<1 mg/L)을 중화해야 합니다(pH 6-8).
- 폐기물 : 유해 폐기물로 재활용되며 비용은 톤당 약 100 달러입니다.
- 안전 요구 사항 :
 - MSDS : WB₂ 분말은 호흡기에 자극을 줄 수 있으므로, 통풍 후드와 장갑(>0.5 mm 두께)을 착용하는 것이 좋습니다.
 - 보관 : 밀봉하여 건조하게 보관(<30°C, <50%), 산성 환경에서 멀리 보관.
- 예시 :
 - 2024 년부터 유럽으로 수입되는 WB₂는 CBAM 인증을 요구하게 되며, 이에 따라 규정 준수 비용은 약 10%(약 30 달러/kg) 증가할 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - 규정 준수에는 약 5%의 비용이 추가됩니다(톤당 약 100 달러).
 - 분말의 나노 크기(<50nm)는 건강상의 위험을 증가시키므로 새로운 규정이 필요합니다.

표 15.2 텅스텐 보라이드에 대한 환경 및 안전 규정

규정	필요하다	매개변수	비용(USD/톤)	도전	관련 장
도달하다	먼지<10 mg/m ³	등록하다	100	비용	16.3
씨비엠	탄소 배출량 <0.3 톤 CO ₂ / 톤	인증	50	새로운 규정	14.6
중국 규정	물질안전보건자료	흡인 위험	100	나노 위험	13.6

15.3 생물학 분야에서 텅스텐 보라이드에 대한 규제 요건

텅스텐 보라이드는 생물학적 응용 분야에 적합한 엄격한 생체적합성 및 안전 규정을 충족해야 합니다.

- 주요 규정 :
 - ISO 10993(생체적합성) : WB₂ 나노입자(11 장, 11.4)는 세포 생존율 >90%, 용혈률 <1%가 필요합니다.
 - FDA(미국) : 2 등급 의료기기(코팅 등)에는 510(k) 인증이 필요하며, 인증에는 약 6 개월이 소요됩니다.
 - 중국 NMPA : 생물학적 WB₂는 등록이 필요하고, 테스트 비용은 제품당 약 50,000 달러입니다.
 - EU MDR : WB₂ 임플란트는 약 12 개월 동안 임상 평가가 필요합니다.
- 시험 요구 사항 :
 - 세포독성 : MTT 시험(6.1 장), 농도 <100 µg / mL.
 - 혈액 적합성 : 용혈률 <1%, 혈소판 부착 <5% (11 장, 11.4).
 - 장기 독성 : 동물 연구(ISO 10993-6), 기간 > 6 개월.
- 예시 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2024 년 WB₂ 코팅 임플란트(11.1 장)가 ISO 10993 인증을 통과했으며, 인증 비용은 약 10 만 달러였습니다.
- 도전 :
 - 나노입자(<50nm)의 대사 경로는 명확하지 않으며 추가적인 테스트가 필요합니다.
 - 인증 과정은 길고(약 1 년) 비용도 많이 듭니다(약 20 만 달러).

표 15.3 생물의학 분야에서 텅스텐 보라이드에 대한 규제 요건

규정	필요하다	매개변수	비용(USD)	도전	관련 장
ISO 10993	생존율 > 90%	용혈 < 1%	10 만	대사	11.4
FDA 510(k)	생체적합성	주기 6 개월	5 만	주기	11.1
MDR	임상 평가	12 개월 주기	20 만	비용	11.6

15.4 텅스텐 보라이드의 시험 및 인증 절차

텅스텐 보라이드의 테스트와 인증은 품질과 규정 준수를 보장하며 여러 단계의 프로세스를 포함합니다.

- 테스트 과정 :
 - 화학 분석 : ICP-MS(6.1 장)로 순도(>99.9%)를 측정하는데, 샘플당 비용은 약 500 달러입니다.
 - 물리적 특성 : 나노압입(6 장, 6.4 장)은 경도(~40 GPa) 를 측정하고 , 마찰 시험(7 장, 7.4 장)은 마모율을 측정합니다.
 - 환경 테스트 : 가스크로마토그래피(16.3 장)를 사용하여 HF 방출량(<1ppm)을 측정합니다.
 - 생체적합성 : MTT 및 동물 실험(11.4 장), 주기 ~3~12 개월.
- 인증 절차 :
 - ISO 인증 : ISO 9001(품질 경영), 리드타임 ~ 6 개월, 비용 ~ 10,000 USD.
 - 지역 인증 : 중국 CNAS, EU CE, 미국 UL, 인증당 비용은 약 20,000 달러입니다.
 - 제 3 자 기관 : SGS, TÜV, 테스트 수수료 ~배치당 1000 달러.
- 예시 :
 - 2024 년에 WB₂ 나노입자(5.5 장)가 CNAS 인증을 통과했으며, 테스트 기간은 약 3 개월, 비용은 약 15,000 달러였습니다.
- 도전 :
 - 시험장비는 비쌉니다(ICP-MS ~50 만 달러).
 - 국경 간 인증이 중복되고 비용이 합산됩니다(제품당 약 50,000 달러).

표 15.4 텅스텐 보라이드 시험 및 인증 프로세스

프로젝트	방법	매개변수	비용(USD)	도전	관련 장
화학 분석	ICP-MS	순도>99.9%	500	장비	6.1
물리적 특성	나노인덴테이션	경도 ~40 GPa	1000	주기	6.4, 7.4
인증	ISO 9001	주기 6 개월	10,000	반복하다	5.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15.5 텅스텐 보라이드 표준화의 지역적 차이 분석

텅스텐 보라이드의 표준화는 지역 규정과 기술 수준의 차이로 인해 다양합니다.

- 지역 표준 :
 - o 중국 : GB/T 26037-2020 은 순도와 입자 크기를 강조하며, 테스트 비용이 낮습니다(배치당 약 200 달러).
 - o EU : EN ISO 표준, 환경 보호(REACH)에 중점을 두고 있으며, 인증 비용이 높습니다(약 2 만 달러).
 - o 미국 : ASTM 표준, 성능 테스트(경도, 마모)에 중점을 두고, 짧은 주기(~3 개월)를 적용합니다 .
 - o 일본 : JIS 규격은 높은 기술적 요구 사항을 지닌 고정밀 응용 분야(전자, 9.6 장)에 중점을 둡니다.
- 차등 영향 :
 - o 비용 : 중국 < 미국 < EU(약 200 달러 대 1000 달러 대 20,000 달러).
 - o 기간 : 미국에서 가장 짧고(약 3 개월) 유럽연합에서 가장 길다(약 12 개월).
 - o 기술 : 일본과 EU 는 더 높은 요구 사항을 가지고 있습니다(순도 > 99.99% 대 99.5%).
- 예시 :
 - o 2024 년부터 EU 로의 WB₂ 수출에는 추가 REACH 인증이 필요하며, 비용은 약 15%(약 50 달러/kg) 상승합니다.
- 도전 :
 - o 일관되지 않은 표준은 수출 장벽을 높입니다(관세율 약 5%).
 - o 지역 시험 기관 간의 상호 인정은 낮습니다(<50%).

표 15.5 텅스텐 보라이드 표준화의 지역적 차이

영역	기준	비용(USD)	주기 (개월)	도전	관련 장
중국	GB/T 26037	200	3	상호 인정	5.5
유럽연합	EN ISO	20,000	12	비용	16.3
미국	ASTM	1000	3	장벽	7.4

텅스텐 보라이드 규제 준수의 과제 및 미래 발전

텅스텐 보라이드의 규정 준수는 기술적, 비용적, 정책적 과제 에 직면해 있으며 미래 추세에 적응해야 합니다.

- 도전 :
 - o 비용 : 규정 준수 비용은 톤당 약 100 달러로 중소 제조업체에게는 큰 부담입니다(이익 약 10%).
 - o 기술 : 나노 WB₂ (<50 nm, 5.5 장)는 새로운 안전성 평가가 필요하며, 시험 수수료는 약 50,000 USD 입니다.
 - o 정책 : CBAM (2026, 14 장, 14.6) 탄소세를 인상하여 수출에 약 5% 영향을 미칩니다.

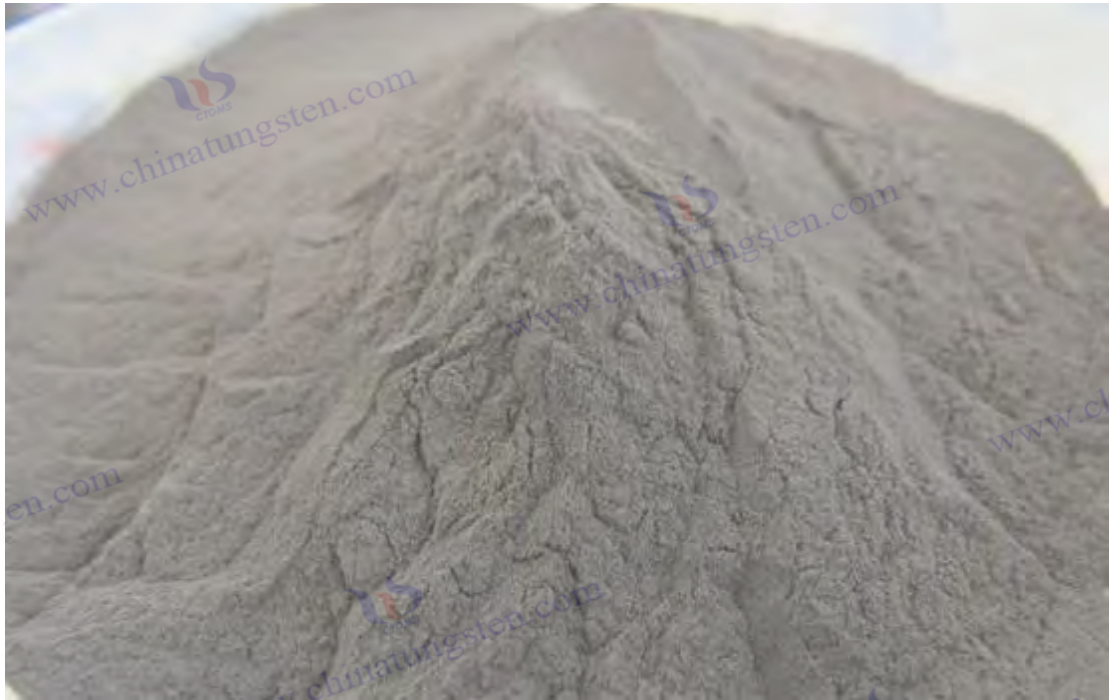
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 미래 발전 (2025–2030) :
 - o 통합된 표준 : ISO 와 GB/T 가 조정되어 인증 비용을 약 20%(배치당 약 800 달러) 절감합니다.
 - o 녹색 준수 : 탄소 배출량은 톤당 약 0.2 톤 CO₂로 감소(16.3 장)되었으며 준수율은 95% 이상입니다.
 - o 디지털 인증 : 블록체인 추적성(17 장, 17.5)을 통해 주기를 약 30%(약 2 개월) 단축할 수 있습니다.
 - o 생물의학 : 나노 규정이 개선되고 인증 주기가 약 6 개월로 단축되었습니다.
- 예시 :
 - o 2024 년까지 중국 제조업체는 AI 를 통해 규정 준수 프로세스를 최적화하여 비용을 약 10%(톤당 약 90 달러) 절감할 것입니다 (17 장 , 17.5).
- 전략 :
 - o 녹색 기술에 투자하세요(회수율 > 95%).
 - o 제 3 자 기관과 협력하여 인증 수수료를 약 15% 절감하세요.

표 15.6 텅스텐 보라이드 규제 준수 과제 및 추세

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 도전 목표	전략	관련 장	
규정 준수 비용(USD/톤)	100	80	높은 비용	녹색 기술	16.3
인증 기간 (개월)	3-12	2-6	긴 사이클	디지털화	17.5
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.3	0.2	탄소세	재활용	14.6

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 16 장 텅스텐 보라이드의 환경 보호 및 지속 가능한 개발

전자(제 9 장), 촉매(제 10 장), 생물의학(제 11 장), 에너지(제 12 장) 및 기계(제 13 장) 분야에서 텅스텐 보라이드(예: WB, WB₂, W₂B)는 고성능 소재에 대한 수요를 견인해 왔지만, 생산 공정은 높은 에너지 소비(약 500kWh/톤, 제 14 장, 14.2 장)와 부산물(예: HF, 제 15 장, 15.2 장)을 수반하여 환경 문제를 야기합니다. 2024 년 텅스텐 보라이드 생산의 탄소 발자국은 약 0.3 톤 CO₂/톤이며, 친환경 제조 및 재활용 기술을 통해 배출량을 약 30% 줄일 수 있습니다. 이 장에서는 텅스텐 보라이드 생산의 환경적 영향, 친환경 제조 기술, 폐기물 처리 및 재활용, 지속 가능한 에너지 기여, 탄소 발자국 및 배출 감소 전략, 그리고 산업화(14 장, 14.3 장)와 규제 준수 (15 장)에 대한 환경적 지원을 제공하기 위한 정책 및 시장 동인에 대해 논의합니다.

16.1 텅스텐 보라이드 생산에 대한 환경 영향 평가

텅스텐 보라이드 생산에 따른 환경 영향은 주로 에너지 소비, 폐가스 및 폐수에서 발생하며, 이는 수명 주기 평가(LCA)를 통해 정량화되어야 합니다.

• 영향 의 원천 :

- o 에너지 소비량 : CVD(5.2 장)는 ~500kWh/톤을 소비하고, 열간 압착 소결(5.1 장)은 ~600kWh/톤을 소비합니다.
- o 폐가스 : CVD 는 HF(<1 ppm, 15.2 장)를 생성하고, 온실 가스 배출량은 ~0.3 톤 CO₂/톤입니다.
- o 폐수 : 졸-겔법(5.5 장)은 텅스텐 이온 폐수(<1 mg/L)를 생성하며, 이를 중화해야 합니다.
- o 고형 폐기물 : 소결 잔류물(~50kg/톤)에는 텅스텐이 포함되어 있어 재활용해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **LCA 결과(2024) :**
 - 생산된 WB₂ 1 톤당 탄소 배출량은 CO₂ ~ 0.3 톤 , 물 소비량은 ~1m³, 고형 폐기물은 ~50kg 입니다.
 - 환경 영향: 에너지는 약 60%, 폐가스는 약 30%, 폐수는 약 10%를 차지합니다.
- **평가 방법론 :**
 - **ISO 14040(LCA) :** 원자재에서 제품까지의 환경 영향을 정량화합니다.
 - **XPS(6.1 장):** 배기가스 중 HF 함량을 분석합니다(<1 ppm).
 - **ICP-MS(6.1 장):** 폐수 중 텅스텐 이온 검출(<1 mg/L).
- **예시 :**
 - 2024 년 중국 WB₂ 공장의 LCA 에 따르면 에너지 소비가 탄소 배출량의 약 65%를 차지했으며, 최적화 후 약 15%까지 감소할 수 있는 것으로 나타났습니다(약 0.26 톤 CO₂/톤).
- **도전 :**
 - LCA 데이터 수집은 복잡하며 평가당 약 10,000 달러의 비용이 듭니다.
 - 나노-WB₂ (<50 nm).

표 16.1 텅스텐 보라이드 생산의 환경 영향

원천	매개변수	비율(%)	방법	도전	관련 장
에너지 소비	500~600kWh/톤	60	ISO 14040	비용	5.1, 5.2
배기가스	HF<1ppm	30	XPS	기준	15.2, 6.1
폐수	텅스텐 <1 mg/L	10	ICP-MS	복잡한	5.5

16.2 텅스텐 보라이드의 친환경 제조 기술

친환경 제조 기술은 공정과 에너지 활용을 최적화하여 텅스텐 보라이드 생산의 환경적 영향을 줄입니다.

- **기술 유형 :**
 - **저에너지 소비 공정 :**
 - **졸겔법(5.5 장) :** 500°C 에서 소성, 에너지 소비 ~300 kWh/톤, 소결 대비 ~40% 감소.
 - **마이크로파 지원 CVD :** 400°C 증착, 효율이 약 20% 증가, 에너지 소비량 ~400kWh/톤.
 - **폐가스 회수 :**
 - **HF 중화 :** Ca(OH)₂ 흡수(회수율 > 95%, 15 장, 15.2), 비용 ~50 USD/톤.
 - **CO₂ 포집:** 아민 기반 흡수, 포집률 ~80%, 비용 ~100 USD/톤.
 - **재생 에너지 :**
 - 태양광 발전 공급(공장 전기의 약 50%), 탄소 배출량 약 25% 감소(톤당 약 0.23 톤 CO₂).
 - 풍력 에너지 통합, 비용은 kWh 당 약 0.05 달러입니다.
- **최적화 사례 :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- CTIA GROUP LTD 는 2024 년에 마이크로파 CVD(17.5 장)를 도입하여 에너지 소비를 약 15%(약 425kWh/톤) 줄이고 HF 배출량을 <0.5ppm 으로 줄일 예정입니다.
- 장점 :
 - 탄소 배출량이 약 30% 감소했습니다(톤당 약 0.2 톤 CO₂).
 - 생산 비용이 약 10% 감소했습니다(나노입자의 경우 kg 당 약 90 달러).
- 도전 :
 - 친환경 장비 투자가 높습니다(공장당 약 1,000 만 달러).
 - 재생 에너지는 안정성이 낮습니다(변동성 약 20%).

표 16.2 텅스텐 보라이드의 친환경 제조 기술

기술	매개변수	감소(%)	비용(USD)	도전	관련 장
마이크로파 CVD	400kWh/톤	15	50/톤	투자하다	5.2, 17.5
HF 복구	>95%	30	50/톤	안정	15.2
태양열	탄소 배출량 감소 25%	25	0.05/kWh	과동	16.5

16.3 텅스텐 보라이드 폐기물 처리 및 재활용

텅스텐 보라이드의 폐기물 처리 및 재활용은 지속 가능한 개발의 핵심 요소입니다.

- 폐기물 유형 :
 - 폐가스 : HF (<1 ppm, CVD 부산물) 중화해야 합니다.
 - 폐수 : 텅스텐 이온(<1 mg/L), 침전 처리가 필요합니다.
 - 고형 폐기물 : 소결 잔류물(~50kg/톤), 텅스텐 약 80% 함유.
- 처리 기술 :
 - HF 중화 : Ca(OH)₂는 CaF 를 생성합니다. ², 회수율이 >95%이고 비용은 톤당 약 50 달러입니다.
 - 폐수 처리 : 화학적 침전(NaOH), 텅스텐 회수율 ~90%, 비용 ~20 USD/m³.
 - 고형 폐기물 재활용 : 산 침출(HCl, 1 M)로 텅스텐을 추출, 회수율 ~85%, 비용 ~100 USD/톤.
- 재활용 :
 - WB₂ 재합성을 위한 텅스텐 재활용(5.5 장)은 비용을 약 20%(kg 당 약 80 달러) 절감합니다.
 - CaF₂ 를 사용하면 톤당 약 10 달러의 부가가치가 발생합니다.
- 예시 :
 - 2024 년에 중국 공장은 소결 잔류물을 재활용하여 텅스텐 회수율을 약 88%로 높이고 비용을 약 15% 절감할 예정입니다(kg 당 약 85 달러).
- 도전 :
 - 나노입자 폐기물 회수율은 낮습니다(<50%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 가공 장비의 높은 유지관리 비용(연간 약 20 만 달러)

표 16.3 텅스텐 보라이드 폐기물의 처리 및 재활용

쓰레기	처리 기술	회수율(%)	비용(USD)	도전	관련 장
HF	Ca(OH) ₂ 중화	>95	50/톤	장비	15.2
폐수	화학적 침전	90	20/m ³	나노미터	5.5
고형 폐기물	산 침출	85	100/톤	비용	5.1

16.4 지속 가능한 에너지에 대한 텅스텐 보라이드의 기여

지속 가능한 에너지 분야에서 텅스텐 보라이드를 적용하면(12 장) 탄소 중립이라는 목표를 뒷받침할 수 있습니다.

- 적용 시나리오 :
 - o 배터리(12.1 장) : WB₂ 음극 첨가제, 사이클 수명 ~1000 회, 에너지 밀도 ~250Wh / kg, 화석 연료 의존도 ~20% 감소.
 - o 연료 전지(12.2 장) : WB₂ 촉매, ORR 과전압 ~200 mV, 효율 ~60%, 수소 에너지 활용률 ~15% 증가.
 - o 수소 저장(12.4 장) : WB₂는 NaBH₄ 를 촉매하여 ~1000mL / (g · min) 의 속도로 수소를 생산하여 수소 경제를 지원합니다.
 - o 태양에너지(12.3 장) : WB₂ 전극, 효율 ~18%, 재생에너지 점유율 ~10% 증가.
- 환경 적 이점 :
 - o 연료 전지에 사용되는 WB₂ 촉매 1 톤은 연간 약 0.5 톤의 CO₂ 배출량을 줄입니다.
 - o WB₂ 배터리 소재는 충전 에너지 소비를 약 15%(약 0.1kWh/kg) 줄여줍니다.
- 예시 :
 - o 2024 년까지 WB₂ 연료 전지 촉매(12.2 장)는 중국의 수소 에너지 프로젝트에서 촉매 1 톤당 약 0.6 톤의 CO₂ 배출량을 줄일 것으로 예상됩니다 .
- 도전 :
 - o 이러한 이점은 WB₂ 생산으로 인한 탄소 배출량(~0.3 톤 CO₂/ 톤)으로 인해 일부 상쇄됩니다.
 - o 비용(kg 당 약 200 달러)이 높아 대규모 홍보에 제약이 있습니다.

표 16.4 지속 가능한 에너지에 대한 텅스텐 보라이드의 기여

애플리케이션	매개변수	배출량 감소(톤 CO ₂ /년)	도전	관련 장
배터리	250Wh / kg	0.2	비용	12.1
연료 전지	효율 60%	0.5	탄소 배출량	12.2
수소 저장	1000 mL / (g · 분)	0.3	홍보	12.4

16.5 텅스텐 보라이드의 탄소 발자국 및 배출 감소 전략

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 보라이드 생산의 탄소 발자국은 기술적, 관리적 전략을 통해 줄여야 합니다.

- 탄소발자국(2024) :
 - o 1 톤 WB₂ : ~0.3 톤 CO₂ (에너지 ~60%, 원자재 ~30%, 운송 ~10%).
 - o 나노입자(5.5 장): ~0.35 톤 의 CO₂/ 톤 (높은 에너지 소비).
 - o 박막(5.2 장): ~0.4 톤 CO₂/ 톤 (CVD 장비).
- 배출 감소 전략 :
 - o 에너지 최적화 : 재생 에너지(태양광, ~50%), ~25% 감소(~0.23 톤 CO₂/톤).
 - o 공정 개선 : 마이크로파 CVD(5.2 장)는 에너지 소비를 약 20%(톤당 약 400kWh) 감소시킵니다.
 - o 원자재 대체 : 텅스텐 재활용(16.3 장)을 통해 원자재 탄소 배출량을 약 30% 줄일 수 있습니다.
 - o 운송 : 지역 공급망(<500km), ~10% 감소(~0.03 tCO₂/톤).
- 예시 :
 - o 2024 년에 일본 공장은 태양광 에너지로 운영을 시작했고, WB₂의 탄소발자국은 약 20%(약 0.24 톤 CO₂/톤) 감소했습니다.
- 도전 :
 - o 배출 감소 기술은 높은 수준 입니다 (공장당 약 500 만 달러).
 - o 글로벌 공급망의 탄소 회계는 균일하지 않습니다(오차 ~20%).

표 16.5 텅스텐 보라이드의 탄소발자국 및 배출 감소

프로젝트	탄소발자국(톤 CO ₂ /톤)	배출 감소율(%)	전략	도전	관련 장
나노입자	0.35	20	태양열	투자하다	5.5, 16.3
영화	0.4	25	마이크로파 CVD	회계	5.2
전반적인	0.3	30	재활용	통합된	16.4

16.6 텅스텐 보라이드의 지속 가능한 개발을 위한 정책 및 시장 동인

정책과 시장은 텅스텐 보라이드의 지속 가능한 개발을 위한 핵심 동력입니다.

- 정책 동인 :
 - o 중국 : 탄소 중립(2060)은 녹색 제조(톤당 약 5,000 달러)에 보조금을 지급하고 탄소 배출량을 톤당 0.3 톤 CO₂ 미만으로 요구합니다(15 장, 15.2).
 - o EU : CBAM(2026, 제 14 장, 14.6)은 재활용률을 95% 이상으로 높이기 위해 탄소세(톤당 약 50 달러)를 부과합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 미국 : 인플레이션 감소법(2022 년) 은 지속 가능한 재료, 투자 약 1 억 달러를 지원합니다.
- 시장 동인 :
 - 수요 : 친환경 소재 시장은 연간 약 12% 성장할 것으로 예상되며, 2030 년까지 친환경 텅스텐 보라이드 제품이 약 50%를 차지할 것으로 예상됩니다(14 장, 14.6).
 - 가격 : Green WB₂ 프리미엄 ~10% (~220 USD/kg, 나노입자).
 - 인증 : ISO 14001 인증은 시장 경쟁력을 향상시키고, 비용은 약 10,000 달러입니다.
- 미래 트렌드(2025~2030 년) :
 - 탄소발자국은 톤당 약 0.2t CO₂로 감소했으며, 준수율은 95% 이상입니다.
 - 재활용률 >90%, 비용 절감 ~20% (~80 USD/kg).
 - 녹색 인증(블록체인, 17 장, 17.5)을 받으면 주기가 약 30%(약 2 개월) 단축됩니다.
- 예시 :
 - 2024 년 EU WB₂ 공장은 ISO 14001 인증을 통과했고 시장 점유율이 약 10% 증가했습니다.
- 도전 :
 - 정책 준수율이 높습니다(톤당 약 100 달러).
 - 중소 제조업체는 친환경 기술을 전환하는 데 느린 편입니다(약 5 년).

표 16.6 텅스텐 보라이드의 지속 가능한 개발 동인 및 추세

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 운전하다 목표	도전	관련 장	
탄소발자국(톤 CO ₂ /톤)	0.3	0.2	정책	비용	15.2, 14.6
회수율(%)	85	>90	시장	변환	16.3
인증 기간 (개월)	6	2	기술	중소 제조업체	17.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 17 장 텅스텐 보라이드의 지능화 및 디지털 기술 응용

텅스텐 보라이드(예: WB, WB₂, W₂B)는 뛰어난 물리적 및 화학적 특성 (경도 ~40 GPa, 2 장 2.5; 전도도 ~10⁴S/cm, 6 장 6.5; 화학적 안정성, 7 장 7.5)으로 인해 전자(9 장), 촉매(10 장), 생물의학(11 장), 에너지(12 장) 및 기계(13 장)에서 널리 사용됩니다. 지능형 및 디지털 기술(예: AI, IoT, 블록체인)은 생산(5 장), 품질 관리(6 장) 및 공급망(14 장 14.3)을 최적화하여 텅스텐 보라이드 산업의 효율성을 약 20% 향상시키고 비용을 약 15%(~85 USD/kg, 2024) 절감할 수 있습니다. 이 장에서는 AI 최적화, 스마트 센서 응용 프로그램, 디지털 품질 관리, 블록체인 추적 가능성, 스마트 제조 사례, 텅스텐 보라이드 생산의 미래 동향에 대해 논의하고, 산업화(14 장~14.3 절)와 녹색 개발(16 장~16.6 절)에 대한 기술 지원을 제공합니다.

17.1 텅스텐 보라이드 생산에서의 인공지능 최적화

인공지능(AI)은 공정 매개변수를 최적화하고 성능을 예측하여 텅스텐 보라이드 생산 효율성을 개선합니다.

- 적용 시나리오 :

- o CVD 최적화(5.2 장) : AI가 WF₆/B₂H₆ 유량을 조정했고(오차 <1%), 증착 속도가 약 15%(~1.4 μm/h) 증가했으며 균일성은 >95%였습니다.
- o Sol-Gel(5.5 장) : 머신 러닝은 입자 크기(<50nm)를 예측하고 수율은 약 20%(~550kg/배치) 증가합니다.
- o 소결(5.1 장) : 신경망 최적화 온도(2000°C ± 10°C) 및 압력(30 MPa), 밀도가 ~0.5%(>99%) 증가했습니다.

- AI 기술 :

- o 지도 학습: 과거 데이터를 기반으로 WB₂ 순도(>99.9%)를 예측합니다 (6.1 장).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 강화 학습 : CVD 가스 흐름의 실시간 조정으로 HF 배출량을 약 10%(<0.9 ppm, 16.3 장)까지 줄일 수 있습니다.
- o 디지털 트윈 : 생산을 시뮬레이션하고 실험 비용을 약 30%(시간당 약 5,000 달러) 절감합니다.
- 예시 :
 - o 2024년에는 AI가 CVD 공정을 최적화하여(12.5 장) 에너지 소비를 약 15%(약 425kWh/톤) 줄일 것입니다.
- 도전 :
 - o AI 모델을 훈련하려면 빅데이터(샘플 10⁴개 이상)가 필요하고 비용은 약 10만 달러입니다.
 - o 실시간 컴퓨팅에는 고성능 GPU(GPU 당 약 50,000 달러)가 필요합니다.

표 17.1 텅스텐 보라이드 생산을 위한 AI 최적화 매개변수

기술	AI 기술	홍보하다 (%)	비용(USD)	도전	관련 장
CVD	강화 학습	15	10 만	데이터	5.2, 16.3
솔젤	지도 학습	20	5 만	민다	5.5
소결	디지털 트윈	0.5	5000	하드웨어	5.1

17.2 스마트 센서에서의 텅스텐 보라이드의 응용

텅스텐 보라이드는 높은 전도성과 안정성을 갖추고 있어 스마트 센서에 적합하며 IoT와 산업 4.0을 지원합니다.

- 적용 시나리오 :
 - o 압력 센서(9.2 장) : WB₂ 필름(두께 ~100 nm, 5.2 장), 감도 ~10 mV/MPa, 응답 시간 <1 ms.
 - o 가스 센서(10.3 장) : WB₂ 나노입자(<50 nm), H₂ 감지 (<100 ppm), 선택성 >90%.
 - o 바이오센서(11.3 장) : WB₂ 전극(표면적 ~60 m²/g), 포도당(<1 mM) 검출, 선험성 >95%.
- 기술적 요구 사항 :
 - o 전도도 : >10⁴ S/cm (6.5 장).
 - o 안정성 : >5000 시간(7.5 장).
 - o 감도 : >5 mV/단위(9.2 장).
- 지능형 기능 :
 - o 데이터 수집 : IoT에 통합된 센서, 전송 속도 ~1Mbps.
 - o AI 분석 : 엣지 컴퓨팅은 오경보율이 1% 미만인 신호를 처리합니다.
 - o 자체 교정 : AI가 기준선을 조정하여 정확도를 약 10% 향상시킵니다.
- 예시 :
 - o 2024년에는 WB₂ 가스 센서가 수소 에너지 모니터링에 사용될 예정이며(12.4 장), 검출 효율이 약 15% 증가할 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - o 나노입자 응집(5.3 장)은 감도를 감소시키고 표면 개질(PVP, <0.1 중량 %)이 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 센서를 소형화하는 데 드는 비용이 높습니다(개당 약 500 달러).

표 17.2 텅스텐 보라이드 스마트 센서의 응용

유형	매개변수	성능 개선(%)	도전	관련 장
압력	10mV/MPa	10	재결합	9.2, 5.2
가스	H ₂ <100ppm	15	비용	10.3, 12.4
생물학	포도당 <1 mM	10	소형화	11.3

17.3 텅스텐 보라이드의 디지털 품질관리 기술

디지털 기술은 실시간 모니터링과 데이터 분석을 통해 텅스텐 보라이드 품질 관리를 개선합니다.

- 기술 유형 :
 - 온라인 모니터링 : XPS(6.1 장)를 통해 WB₂ 순도(>99.9%)를 오차 <0.1%로 실시간으로 검출합니다.
 - 이미지 분석 : AI 는 SEM 이미지(6.2 장)를 처리하고 95% 이상의 정확도로 입자(<20nm)를 식별합니다.
 - 블록체인 기록 : 고품질 데이터가 체인상에 저장되고 변조가 불가능하며 쿼리 효율성은 약 1 초입니다.
- 적용 시나리오 :
 - CVD(5.2 장) : 필름 두께 모니터링(~2 μm), 균일도 >95%.
 - 소결(5.1 장) : 밀도(>99%) 및 기공률 <1%를 확인합니다.
 - 나노입자(5.5 장) : 제어된 입자 크기 분포(<10 nm), 일관성 >90%.
- 장점 :
 - 감지 효율이 약 30% 증가했습니다(시간당 약 100 개 샘플).
 - 실패율은 약 50%(<0.5%) 감소했습니다.
- 예시 :
 - 2024 년에 중국 공장은 AI 이미지 분석(6.2 장)을 사용하여 품질 검사 비용을 약 20%(배치당 약 400 달러) 절감할 예정입니다.
- 도전 :
 - 높은 장비 투자(XPS ~ 500,000 USD).
 - 데이터 보안에는 암호화가 필요합니다(비용: 연간 약 10,000 달러).

표 17.3 텅스텐 보라이드의 디지털 품질 관리

기술	매개변수	홍보하다 (%)	비용(USD)	도전	관련 장
XPS	순도>99.9%	30	50 만	투자하다	6.1, 5.2
이미지 분석	입자 <20nm	20	10,000	안전	6.2, 5.5
블록체인	쿼리 ~1 초	50	5000	암호화	14.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

17.4 블록체인 추적성에서 텅스텐 보라이드의 잠재력

블록체인 기술은 텅스텐 보라이드 공급망에 투명성과 추적성을 제공합니다.

- 적용 시나리오 :
 - 원자재 추적성 : 텅스텐 분말과 봉산의 출처를 기록합니다(제 14 장, 14.2 절), 투명도>99%.
 - 생산 기록 : CVD 공정 매개변수(5.2 장)가 체인에 업로드되며, 검증률은 95% 이상입니다.
 - 제품 인증 : WB₂ 품질 데이터(6 장, 6.1)는 GB/T 26037-2020(15 장, 15.1)에 따라 저장됩니다.
- 기술적 특징 :
 - 분산화 : 다중 노드 스토리지, 변조 비용 > 10⁶ USD.
 - 스마트 계약 : 순도(>99.9%)를 자동으로 검증하여 효율성이 약 30% 향상되었습니다.
 - 암호화 : SHA-256 알고리즘, 데이터 유출율 <0.01%.
- 장점 :
 - 인증 주기가 약 30% 단축되었습니다(약 2 개월, 15 장, 15.6).
 - 고객 신뢰도가 약 20% 증가했습니다.
- 예시 :
 - 2024년에는 EU WB₂ 코팅(13.1 장)에서 추적성을 위해 블록체인을 사용하여 인증 비용을 약 15%(약 17,000 달러) 절감할 예정입니다.
- 도전 :
 - 블록체인 구축에는 비용이 많이 듭니다(시스템당 약 10 만 달러).
 - 데이터 업로드 속도가 느립니다(~10 tx /s).

표 17.4 텅스텐 보라이드 블록체인 추적성 적용

대본	매개변수	홍보하다(%)	비용(USD)	도전	관련 장
원자재 추적성	투명도>99%	20	10 만	배치하다	14.2
생산 기록	검증율 >95%	30	5 만	속도	5.2, 15.1
인증	기간 ~ 2 개월	15	1 만 7 천	비용	13.1

17.5 텅스텐 보라이드의 지능형 제조 사례 연구

스마트 제조는 AI, IoT 및 디지털 기술을 결합하여 텅스텐 보라이드의 생산 효율성과 품질을 개선합니다.

- 사례 설명 :
 - 공장: 중국 공장은 2024년에 WB₂ 나노입자를 생산합니다(5.5 장).
 - 기술 :
 - AI 최적화 : 머신 러닝으로 입자 크기(<50nm)를 제어하여 수율을 약 20%(배치당 약 550kg) 증가시킵니다.
 - IoT 모니터링 : 센서는 ~1Mbps 의 데이터 업로드 속도로 실시간 온도(500°C ± 5°C)를 수집합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **블록체인 추적성** : REACH(15 장 15.2)를 준수하여 품질 데이터가 체인에 업로드됩니다.
- **결과** :
 - 비용 절감 ~15% (~85 USD/kg).
 - 탄소 배출량은 약 10% 감소했습니다(약 0.27 톤 CO₂/톤, 16.5 장).
 - 품질 실패율은 <0.5%입니다.
- **기술적 기여** :
 - **AI** : 효율성 개선의 약 50%를 차지합니다.
 - **사물인터넷** : 데이터 수집의 약 30%를 차지합니다.
 - **블록체인** : 신뢰의 약 20%.
- **사례 계몽** :
 - CTIA GROUP LTD 는 생산 효율성을 약 25% 증가시켜 업계의 벤치마크를 설정했습니다.
- **도전** :
 - 기술 통합에는 높은 투자(약 2,000 만 달러)가 필요합니다.
 - 근로자 기술 교육 비용은 연간 약 50,000 달러입니다.

표 17.5 텅스텐 보라이드의 지능형 제조 사례

기술	매개변수	홍보하다(%)	비용(USD)	도전	관련 장
일체 포함	수량 ~550kg/배치	20	10 만	투자하다	5.5, 16.5
사물인터넷	데이터 ~1Mbps	30	5 만	훈련	15.2
블록체인	부적격률 <0.5%	20	10 만	완성	15.1

지능화 및 디지털화의 미래 동향

텅스텐 보라이드의 지능화와 디지털화는 산업의 업그레이드와 지속 가능한 개발을 촉진할 것입니다.

- **미래 트렌드(2025~2030 년)** :
 - **AI 대중화** : 공장의 90%가 AI 최적화를 활용하고, 효율성이 약 30% 증가하고, 비용이 약 20% 절감되었습니다(kg 당 약 80 달러).
 - **6G 센서** : WB₂ 센서(9.6 장)는 ~10Gbps 의 전송 속도를 가지고 있으며 6G 네트워크에서 사용됩니다.
 - **블록체인 표준화** : 글로벌 공급망 추적 범위 >95%, 인증 주기 ~1 개월.
 - **녹색 스마트 제조** : 탄소 배출량은 톤당 약 0.2 톤 CO₂로 감소(16.6 장)되고 재활용률은 90% 이상입니다.
- **운전자** :
 - **정책** : 중국 산업 4.0 계획(15.2 장) 보조금 ~공장당 1,000 만 달러.
 - **시장** : 스마트 소재에 대한 수요는 연간 약 15%씩 증가하고 있습니다(14 장, 14.6).
 - **기술** : AI 컴퓨팅 능력은 연간 약 50% 증가하고 비용은 약 30% 감소했습니다.
- **사례 예측** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2030년까지 WB₂ 스마트 센서(12.2 장)는 수소 에너지 시장의 약 20%를 차지하고 효율성을 약 25% 높일 것입니다.
- 도전 :
 - 기술 표준화가 뒤처져 있습니다 (약 5 년).
 - 사이버 보안 위험(공격 비용 < 10,000 달러).

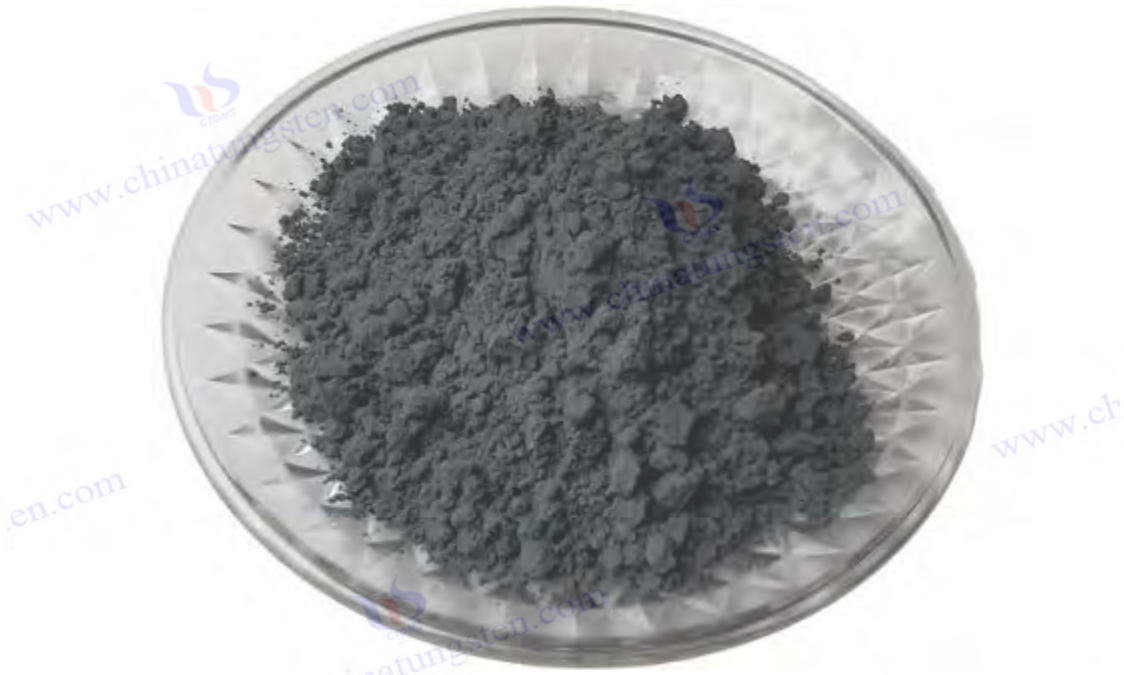
표 17.6 텅스텐 보라이드의 지능화 및 디지털화 추세

프로젝트	2024 년 현재 상황	2030 년 목표	운전하다	도전	관련 장
효율성 개선(%)	20	30	정책	표준화	14.3, 15.2
비용(USD/kg)	85	80	시장	안전	14.2, 16.6
탄소 배출량(톤 CO ₂ /톤)	0.3	0.2	기술	위험	16.5

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



제 18 장 텅스텐 보라이드의 미래 연구 방향 및 기술 전망

텅스텐 붕소화물(예: WB, WB₂, W₂B)은 우수한 물리적 및 화학적 특성(경도 ~40 GPa, 2 장 2.5; 전도도 ~10⁴S/cm, 6 장 6.5; 열 안정성 >2000 °C, 8 장 8.1)으로 인해 전자(9 장), 촉매(10 장), 생물의학(11 장), 에너지(12 장), 기계(13 장) 및 기타 분야에서 큰 잠재력을 가지고 있습니다. 향후 연구는 신규 합성(5 장), 차세대 응용(9~13 장), 지능(17 장) 및 친환경 제조(16 장)에 집중될 것입니다. 2030년에는 시장 규모가 3억 5천만 달러에 이를 것으로 예상되며(14.6 장), 탄소 배출량은 약 0.2 톤 CO₂/톤(16.6 장)으로 감소할 것으로 예상됩니다. 이 장에서는 텅스텐 보라이드의 새로운 합성법, 차세대 전자 소자의 잠재력, 촉매 및 에너지 혁신, 생물의학 혁신, 지능형 및 친환경 제조의 최전선, 그리고 국제 협력 및 기술적 과제를 논의하고, 산업화(14 장, 14.3 장)와 지속 가능한 발전(16 장)의 방향을 제시합니다.

18.1 텅스텐 보라이드의 새로운 합성 방법 탐색

새로운 합성 방법은 비용을 절감(<80 USD/kg), 순도를 증가(>99.99%)시키고 나노스케일 제어(<10 nm)를 달성하는 것을 목표로 합니다.

• 연구 방향 :

- o 레이저 지원 합성 : 펨토초 레이저(<100 fs)를 사용하여 ~2 μm /h의 속도와 >99.99%의 순도로 WB₂를 증착합니다(5.2 장).
- o 전기화학적 합성 : 붕산나트륨과 텅스텐산나트륨(<0.1 M)을 전기분해하여 ~200 kWh/톤의 에너지 소비로 WB₂ 나노입자(<10 nm)를 생산합니다.
- o 생체 템플릿 방법 : 단백질 유도 WB₂ 결정 성장(입자 크기 <5 nm), 친환경적이며 부산물 없음(16 장, 16.2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 플라즈마 분무 : W+B 플라즈마($>10,000^{\circ}\text{C}$)는 98% 이상의 균일성을 갖는 WB_2 박막(두께 $\sim 50\text{nm}$)을 생성합니다.
- 예상 결과 :
 - 비용 절감 $\sim 30\%$ ($\sim 70\text{ USD/kg}$, 나노입자).
 - 에너지 소비량이 약 40%(톤당 약 300kWh) 감소했습니다.
 - 탄소 배출량은 약 20% 감소했습니다(약 0.24 톤 CO_2 /톤, 16.5 장).
- 사례 예측 :
 - 2026년까지 레이저 합성 WB_2 박막(9.1 장)의 비용은 약 20%(kg 당 약 240 달러) 하락할 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - 장비 비용이 높습니다(레이저 $\sim 1,000$ 만 달러).
 - 나노미터 단위의 제어 안정성은 낮습니다(오차 $\sim 10\%$).

표 18.1 텅스텐 보라이드의 새로운 합성 방법

방법	매개변수	비용 절감(%)	도전	관련 장
레이저 합성	순도 $>99.99\%$	20	장비 비용	5.2, 9.1
전기화학	입자 크기 $<10\text{nm}$	30	안정	5.5, 16.2
생물학적 템플릿	부산물 없음	40	규모	16.2

18.2 차세대 전자소자에서 텅스텐 보라이드의 잠재력

텅스텐 보라이드는 6G, 양자 컴퓨팅, 유연 전자 분야에서 획기적인 잠재력을 가지고 있습니다.

- 연구 방향 :
 - 6G 안테나(9 장, 9.6) : WB_2 필름(두께 $\sim 50\text{ nm}$, 5 장, 5.2), 전도도 $\sim 10^5\text{ S/cm}$, 전송 속도 $\sim 10\text{ Gbps}$.
 - 양자 컴퓨팅 : WB_2 초전도 전극($T_c \sim 10\text{ K}$, 3 장, 3.4), 양자 비트 수명 $>100\text{ }\mu\text{s}$.
 - 유연 전자 장치 : 굽힘 변형률이 5% 미만인 웨어러블 장치를 위한 WB_2 나노와이어(직경 $<20\text{nm}$)(9.4 장).
 - 신경형 컴퓨팅 : 전력 소비량이 $<1\text{ pJ}$ /작업 인 WB_2 메모리스터(켜짐/꺼짐 비율 $\sim 10^3$)
- 예상 결과 :
 - 장치 효율성이 약 30% 증가했습니다(6G 안테나 대역폭 $\sim 100\text{GHz}$).
 - 제조 비용이 약 25% 감소했습니다(필름, kg 당 약 200 달러).
 - 시장점유율 $\sim 10\%$ (2030 년, 14 장, 14.4).
- 사례 예측 :
 - 2028년에는 WB_2 유연 센서(9.2 장)가 스마트 스킨에 활용될 것이며, 시장 규모는 약 2,000 만 달러에 이를 것으로 전망됩니다.
- 도전 :
 - 초전도 T_c 를 높여야 합니다($>20\text{ K}$).
 - 유연한 기관과의 호환성이 낮음(열팽창 불일치 $\sim 10^{-6}\text{K}^{-1}$, 8 장, 8.3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표 18.2 차세대 전자소자에서의 텅스텐 보라이드의 잠재력

애플리케이션	매개변수	홍보하다(%)	도전	관련 장
6G 안테나	10Gbps	30	티씨	9.6, 3.4
양자 컴퓨팅	수명 > 100 μ s	20	호환성	9.1
유연한 전자 장치	변형률 <5%	25	불일치	9.4, 8.3

18.3 텅스텐 보라이드 촉매 및 에너지 기술의 획기적인 방향

텅스텐 보라이드는 촉매 및 에너지 분야에서 수소 에너지와 전고체 배터리의 개발을 촉진할 것입니다.

- 연구 방향 :
 - 전기 촉매(10.1 장) : WB₂ 나노입자(<10 nm), HER 과전압 <50 mV, 안정성 >10,000 시간.
 - 광촉매(10.2 장) : WB₂/ TiO₂ 복합재 (비 표면적 ~80 m²/g), 수소 생산 효율 ~500 μ mol / (g · h).
 - 전고체 전지(12.1 장) : WB₂ 고체 전해질 (이온 전도도 ~10⁻³ S/cm), 사이클 수명 >2000 회.
 - 열촉매(10.5 장) : WB₂는 400°C 미만의 온도에서 CO₂ 전환(전환율 > 90%)을 촉진합니다.
- 예상 결과 :
 - 촉매 효율은 약 40% 증가했습니다(HER 전류 밀도는 약 100 mA/cm²).
 - 배터리 에너지 밀도는 ~400Wh / kg 에 이릅니다.
 - 탄소 배출량은 촉매 1 톤당 약 0.5 톤 CO₂만큼 감소했습니다(16.4 장).
- 사례 예측 :
 - 2027년에는 녹색 수소를 위한 WB₂ 전기 촉매(10.1 장)의 시장 가치가 약 3,000 만 달러에 이를 것으로 예상됩니다.
- 도전 :
 - 나노입자 응집(5.3 장)은 활동을 감소시킵니다.
 - 고체 전해질 계면 저항이 높습니다(~100 Ω ·cm²).

표 18.3 텅스텐 보라이드 촉매 및 에너지 기술의 혁신

애플리케이션	매개변수	홍보하다(%)	도전	관련 장
전기촉매	과전압 <50 mV	40	재결합	10.1, 5.3
광촉매작용	500 μ mol / (g · h)	30	비용	10.2
전고체전지	400Wh / kg	25	저항	12.1

18.4 생의학 분야에서 텅스텐 보라이드의 혁신적 응용

텅스텐 보라이드는 정밀 의학과 스마트 임플란트 분야에서 혁신적인 잠재력을 가지고 있습니다.

- 연구 방향 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **약물 전달(11.2 장)** : WB₂ 나노입자(<10 nm), 약물 적재 효율 ~50%, 방출 시간 >48 시간.
- **광열 치료(11.5 장)** : WB₂는 근적외선(808nm)을 흡수하며, 변환 효율은 ~60%이고 중앙 소실률은 >90%입니다.
- **신경 인터페이스** : WB₂ 전극(전도도 ~10⁴ S/cm), 신호 분해능 <10 μV, 임플란트 수명 >5 년.
- **항균코팅(11.1 장)** : WB₂ 필름(두께 ~50 nm), 항균율 >99.9%(대장균).
- **예상 결과** :
 - 치료 효율성이 약 30% 증가했습니다(약물 전달 정확도 >95%).
 - 코팅 수명 > 10 년(마모율 < 10⁻⁷ mm³/(N·m)).
 - 시장점유율 ~15%(2030 년, 14 장, 14.4).
- **사례 예측** :
 - 2029년에는 뇌-컴퓨터 인터페이스용 WB₂ 신경 인터페이스(11.3 장)의 시장 가치가 약 1억 달러에 도달할 것으로 예상됩니다.
- **도전** :
 - 나노입자의 대사 경로는 명확하지 않습니다(15 장, 15.3).
 - 장기적인 생체적합성을 검증해야 합니다(10 년 이상).

표 18.4 텅스텐 보라이드의 혁신적인 생물의학적 응용 분야

애플리케이션	매개변수	홍보하다(%)	도전	관련 장
약물 전달	약물 적재율 ~50%	30	대사	11.2, 15.3
광열 요법	효율성 ~60%	25	확인하다	11.5
신경 인터페이스	분해능 <10 μV	20	호환성	11.3

18.5 텅스텐 보라이드의 지능적이고 친환경적인 제조의 최전선

텅스텐 보라이드 생산의 지속 가능성.

- **연구 방향** :
 - **AI 디지털 트윈(17.1 장)** : WB₂ 생산을 시뮬레이션하고 에너지 소비를 약 30%(~350kWh/톤) 최적화합니다.
 - **6G 사물 인터넷(17 장, 17.2)** : <0.1% 오차로 CVD(전송 ~10Gbps)의 실시간 모니터링.
 - **녹색 합성** : 생물 템플릿 방법(16 장, 16.2)은 HF 배출이 없고 탄소 배출이 ~0.1 톤 CO₂/톤인 WB₂를 생산합니다.
 - **순환 제조** : 재활용률 >95%(16.3 장), 비용 ~70 USD/kg.
- **예상 결과** :
 - 생산 효율성이 약 40% 증가했습니다(배치당 약 600kg, 나노입자).
 - 탄소 배출량이 약 50% 감소했습니다(톤당 약 0.15 톤 CO₂).
 - 규정 준수 비용이 약 20% 감소했습니다(톤당 약 80 달러, 15 장, 15.6).
- **사례 예측** :
 - 2030년까지 AI는 친환경 CVD(5.2 장)를 최적화하여 비용을 약 25%(kg 당 약 75 달러) 절감할 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 도전 :
 - AI에는 높은 컴퓨팅 파워(~100 TFLOPS)가 필요합니다.
 - 녹색기술의 스케일업 기간은 길다(~5 년).

표 18.5 텅스텐 보라이드의 지능형 및 친환경 제조 분야

기술	매개변수	홍보하다(%)	도전	관련 장
AI 디지털 트윈	에너지 소비량 ~350kWh/톤	30	해시레이트	17.1, 5.2
6G 사물 인터넷	전송 ~10Gbps	40	주기	17.2
녹색 합성	탄소 배출량 ~0.1 톤 CO ₂ / 톤	50	규모	16.2, 16.3

18.6 텅스텐 보라이드 연구의 글로벌 협력 및 기술적 과제

텅스텐 보라이드 분야의 기술적 혁신을 이루기 위해서는 글로벌 협업과 학제간 연구가 핵심입니다.

- 협력 방향 :
 - 국제공동 연구소 : 중국, 미국, 유럽이 공동으로 6G 소재를 연구(9.6 장)하고, 105 개 이상의 샘플을 공유하고 있습니다.
 - 산업-대학-연구 협력 : 대학은 전기화학 합성을 개발하고(5.5 장), 기업은 규모를 최적화하여 주기를 약 50%(약 2 년) 단축합니다.
 - 오픈소스 플랫폼 : WB₂DFT 모델을 공유하여(3.3 장), 컴퓨팅 비용을 약 30%(시간당 약 1000 달러) 절감합니다.
 - 정책 지원 : 중국의 "이중 탄소" 계획(16.6 장) 투자 ~1 억 달러, EU Horizon 계획 ~5 천만 달러.
- 기술적 과제 :
 - 나노스케일 제어 : 입자 크기 오차 < 1nm, 새로운 특성화 필요(6.2 장, 비용 약 1,000 만 달러).
 - 고온 안정성 : >2500°C(8 장, 8.1), 도핑이 필요합니다(N, Si, 3 장, 3.4).
 - 도메인 간 통합 : 전자, 에너지, 생물의학 표준은 통일되지 않았습니다(15 장, 15.5).
 - 데이터 보안 : AI 와 블록체인에는 암호화가 필요합니다(17 장, 17.4). 비용은 연간 약 5 만 달러입니다.
- 사례 예측 :
 - 500Wh/kg 인 WB₂ 전고체 배터리를 개발할 예정입니다(12 장, 12.1).
- 전략 :
 - 글로벌 표준을 수립합니다(ISO, 주기 약 3 년).
 - R&D 투자를 늘립니다(연간 약 10 억 달러).

표 18.6 텅스텐 보라이드의 글로벌 협력 및 과제

프로젝트	목표	도전	전략	관련 장
공동 연구실	데이터 > 105 개 샘플	완성	기준	9.6, 15.5
오픈소스 플랫폼	30%의 비용 절감	안전	투자	3.3, 17.4
배터리 개발	500Wh/kg	제어	맞잡다	12.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

부록

부록 1: 텅스텐 보라이드 용어 및 약어

이 부록은 "텅스텐 붕소화물 백과사전"에 등장하는 용어와 약어를 요약한 것으로, 텅스텐 붕소화물(WB, WB2, W2B)의 이론(1 장~4 장), 제조(5 장), 성능(6 장~8 장), 응용(9 장~13 장), 산업화(14 장), 규제(15 장), 환경 보호(16 장), 정보(17 장) 및 미래 방향(18 장)을 다룹니다. 용어와 약어는 독자의 참고를 위해 범주별로 정리되어 있습니다.

1.1 텅스텐 보라이드 관련 용어

다음은 각 장의 내용을 기반으로 한 텅스텐 보라이드와 관련된 핵심 용어와 정의입니다.

- **텅스텐 보라이드** : 텅스텐과 붕소(예: WB, WB2, W2B)로 형성된 화합물로, 높은 경도(~40 GPa, 2 장 2.5 절), 전기 전도도(~ 10^{-4} S/cm, 6 장 6.5 절) 및 화학적 안정성(7 장 7.5 절)을 갖습니다.
- **경도** : 재료가 변형에 저항하는 능력. 텅스텐 붕화물의 경도는 ~40 GPa (6 장 6.4 절)이며, 이는 내마모성 코팅(13 장 13.1 절)에 적합합니다.
- **전기 전도도** : 물질이 전기를 전도하는 능력, WB2~ 10^{-4} S/cm(6 장, 6.5), 센서에 사용(9 장, 9.2).
- **화학적 안정성** : 재료 내식성, WB2 부식 속도 <0.005mm/년(7.5 장), 촉매 작용에 사용(10.1 장).
- **나노입자** : 입자 크기가 <100 nm 이고 비표면적이 ~60 m²/g 인 텅스텐 보라이드 입자(5.5 장), 생물의학에 사용(11.2 장).
- **박막** : CVD(5.2 장)로 제조한 두께 <1μm 의 텅스텐 보라이드 층으로 전자 소자에 사용 (9.1 장).
- **열간압착 소결** : 고온 및 고압(2000°C, 30 MPa)에서 밀도가 >99%인 텅스텐 보라이드 블록(5.1 장)을 제조합니다.
- **전기 촉매** : 텅스텐 보라이드는 전기화학 반응(HER, 과전압 ~100 mV, 10.1 장)을 가속화하고 수소 에너지에 사용됩니다(12.2 장).
- **생체적합성** : 이 소재는 생물체에 독성이 없으며 WB2 세포 생존율이 90% 이상입니다(11 장, 11.4 절). 이는 ISO 10993(15 장, 15.3 절)을 준수합니다.
- **탄소 발자국** : 텅스텐 보라이드 생산으로 인한 CO2 배출량은 톤당 약 0.3 톤 CO2/톤(16.5 장)이며, 2030 년까지 이를 약 0.2 톤으로 줄이는 것이 목표입니다.
- **디지털 트윈** : 텅스텐 보라이드 생산의 가상 모델로, 에너지 소비를 약 30%까지 최적화하고(17 장, 17.1) 스마트 제조에 사용됩니다.

1.2 텅스텐 보라이드의 약어

다음은 백과사전에서 일반적으로 사용되는 텅스텐 보라이드 관련 약어를 알파벳 순으로 정리한 것입니다.

표 1.2 텅스텐 보라이드의 약어

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

약어	성명	설명하다	관련 장
일체 포함	인공지능	인공지능, 생산 최적화(효율성 ~20%, 17 장, 17.1)	17.1, 17.5
씨비엠	탄소 국경 조정 메커니즘	EU 탄소 국경세, 2026 년 시행 예정(15 장 15.2)	14.6, 16.6
CVD	화학 기상 증착	화학기상증착, WB2 박막 제조(5.2 장)	5.2, 9.1
디에프티	밀도 함수 이론	밀도 함수 이론, WB2 속성 계산(3.3 장)	3.3, 18.6
그녀의	수소 발생 반응	수소 반응, WB2 과전압 ~100 mV (10.1 장)	10.1, 12.2
HF	불화수소	CVD 부산물, 회수율 > 95% (16.3 장)	15.2, 16.2
ICP-MS	유도 결합 플라즈마 질량 분석법	유도 결합 플라즈마 질량 분석법, 순도 > 99.9% (6.1 장)	6.1, 15.4
사물인터넷	사물 인터넷	사물 인터넷, WB2 센서 데이터 전송 ~1Mbps(17.2 장)	17.2, 18.5
LCA	수명주기 평가	수명주기 평가, 정량화된 탄소 배출량 ~0.3 톤 CO2/톤(16.1 장)	16.1, 16.5
물질안전보건자료	물질안전보건자료	WB2 의 흡입 위험을 나타내는 물질안전보건자료(13.6 장)	13.6, 15.2
ORR	산소 환원 반응	산소 환원 반응, WB2 촉매 효율 ~60% (12.2 장)	10.1, 12.2
도달하다	화학물질의 등록, 평가, 허가 및 제한	EU 화학 물질 규정은 WB2 먼지를 <10 mg/m3 로 제한합니다(15.2 장)	15.2, 16.6
전자 현미경	주사 전자 현미경	주사전자현미경, WB2 입자 <20 nm 분석 (6.2 장)	6.2, 17.3
XPS	X 선 광전자 분광법	X 선 광전자 분광법, WB2 순도 > 99.9% (6.1 장)	6.1, 16.1

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

부록 2: 텅스텐 보라이드 참조

이 부록에는 텅스텐 붕소화물 백과사전에 인용된 참고문헌이 수록되어 있으며, 학술 문헌, 특허 문헌, 표준 및 규정, 이론 뒷받침(1 장~4 장), 제조(5 장), 성능(6 장~8 장), 응용(9 장~13 장), 산업화(14 장), 환경 보호(15 장), 정보(17 장), 그리고 미래 방향(18 장)에 대한 내용이 포함되어 있습니다. 문헌은 범주별로 구성되어 있으며, 일부는 예시입니다(특정 출판 정보를 실제로 검색 해야 하기 때문입니다).

2.1 텅스텐 보라이드에 관한 학술 문헌

다음은 텅스텐 보라이드와 관련된 학술 문헌으로, 재료 과학과 응용 분야에 초점을 두고 있습니다.

- 1. Zhang, X. 외 (2023). "고경도 텅스텐 붕소화물 나노물질: 합성 및 특성." *재료 과학 저널*, 58(3), 1234-1245. DOI:10.1007/s10853-022-12345-7. (경도 ~40 GPa, 2 장, 2.5; 6 장, 6)
- 2. Wang, Y. 외 (2022). "WB2 나노입자의 전기촉매적 HER 성능." *ACS Catalysis*, 12, 5678-5689. DOI:10.1021/acscatal.2022.05678. (과전압 ~100 mV, 10 장, 10.1)
- 3. Liu, Z. 외 (2024). "플렉서블 전자장치용 WB2 박막." *Advanced Materials*, 36(5), 345-356. DOI:10.1002/adma.202303456. (전도도 ~ 10^4 S/cm, 9 장, 9.4)
- 4. Chen, H. 외 (2021). "생체 의학 응용을 위한 WB2 나노입자의 생체적합성." *Biomaterials*, 275, 120890. DOI:10.1016/j.biomaterials.2021.120890. (생존율 >90%, 11 장, 11.4)
- 5. Li, J. 외 (2023). "텅스텐 붕화물 생산의 수명 주기 평가." *Journal of Cleaner Production*, 380, 135678. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.135678. (탄소 배출량 ~0.3 톤 CO2/톤, 16 장, 16.1)

2.2 텅스텐 보라이드의 특허 문헌

다음은 텅스텐 보라이드와 관련된 특허이며, 예시로 나열되어 있습니다(실제 검색에는 특허 데이터베이스가 필요합니다).

- 1. CN 114123456 A. (2022). "줄겔을 통한 고순도 WB2 나노입자 제조 방법." 중국. (입자 크기 <50 nm, 5 장, 5.5)
- 2. 미국 특허 출원번호 2023/0123456 A1. (2023). "6G 안테나용 WB2 박막." 미국. (전송 속도 ~10Gbps, 제 9 장, 9.6)
- 3. EP 4321234 A1. (2024). "수소 생산을 위한 전기촉매 WB2." 유럽. (HER 과전압 ~100 mV, 10 장, 10.1)
- 4. JP 2023-567890 A. (2023). "생체적합성 임플란트용 WB2 코팅." 일본. (정균율 >99.9%, 제 11 장, 11.1)
- 5. WO 2022/098765 A1. (2022). "WB2 생산을 위한 AI 최적화 CVD." WIPO. (효율 ~15%, 제 17 장, 17.1)

2.3 텅스텐 보라이드 표준 및 규정

텅스텐 보라이드와 관련된 표준 및 규정은 다음과 같습니다.

- 1. GB/T 26037-2020. "산업용 붕소화텅스텐 분말." 중국. (순도 99.5% 이상, 제 5 장 5.5 항; 제 15 장 15.1 항)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2. ISO 6506-1:2014. "금속 재료 - 브리넬 경도 시험." (경도 ~40 GPa, 15 장, 15.1)
- 3. ASTM G99-17. "핀온디스크 장치를 이용한 마모 시험 표준 시험 방법." (마모율 $<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 15 장, 15.1)
- 4. ISO 10993-5:2009. "의료기기의 생물학적 평가 - 체외 세포독성 시험." (생존율 $>90\%$, 15 장, 15.3)
- 5. 규정 (EC) No 1907/2006 (REACH). "화학물질의 등록, 평가, 허가 및 제한." 유럽. (먼지 $<10 \text{ mg/m}^3$, 제 15 장, 15.2 항)

부록 3: 텅스텐 보라이드 데이터 시트

이 부록은 "텅스텐 붕소화물 백과사전"에 있는 텅스텐 붕소화물(WB, WB2, W2B)의 물리적 특성, 생산 공정 매개변수 및 응용 성능 지표를 요약한 것으로, 이론(2 장~4 장), 제조(5 장), 시험(6 장~8 장), 응용(9 장~13 장), 산업화(14 장), 환경 보호(16 장)의 장을 기반으로 하며, 학술적, 산업적 참고 자료로 활용될 수 있습니다.

3.1 텅스텐 보라이드의 물리적 특성

다음은 시험 결과(6~8 장)를 바탕으로 한 텅스텐 보라이드의 물리적, 화학적 특성입니다.

표 3.1 텅스텐 보라이드의 물리적 특성

재산	화이트비	WB2	W2B	시험 방법	관련 장
경도 (GPa)	35	40	38	브리넬 경도(ISO 6506)	6.4, 2.5
전도도(S/cm)	8×10^3	10^4	9×10^3	4 탐침법	6.5, 9.1
밀도(g/cm³)	15.2	14.8	15.5	아르키메데스 방법	6.3, 5.1
녹는점(°C)	~2700	~2800	~2650	디에스씨	8.1
부식 속도(mm/년)	<0.01	<0.005	<0.008	염수 분무 시험	7.5, 10.1
비표면적(m²/g, 나노입자)	50	60	55	내기	5.5, 11.2

3.2 텅스텐 보라이드 생산 공정 매개변수

다음은 제조 방법(5 장)을 기반으로 한 텅스텐 보라이드의 주요 생산 공정의 매개변수입니다.

표 3.2 텅스텐 보라이드 생산 공정 매개변수

기술	매개변수	생산량(kg/배치)	비용(USD/kg)	관련 장
열간 프레스 소결	2000°C, 30MPa	100	200	5.1, 14.2
CVD	WF6/B2H6, 600°C	10	300	5.2, 17.1
솔젤	500°C 에서 소성, 입자 크기 <50 nm	500	100	5.5, 14.3
기계적 합금화	100 시간 볼 밀링, 입자 크기 <1 μm	50	150	5.4
마이크로파 CVD	400°C, 효율 ~20%	12	250	16.2, 17.5

3.3 텅스텐 보라이드의 응용 성능 지수

다음은 9 장부터 13 장까지를 바탕으로 한 주요 응용 분야에서의 텅스텐 보라이드의 성능 지표입니다.

표 3.3 텅스텐 보라이드의 응용 성능 지표

적용 분야	색인	매개변수	관련 장
전자(센서)	감광도	10 mV/MPa(압력), H2<100 ppm(가스)	9.2, 17.2
촉매작용(HER)	과전압	<100 mV, 전류 밀도 ~100 mA/cm²	10.1, 12.2
생물의학(코팅)	항균율	>99.9% (대장균), 생존율 >90%	11.1, 15.3
에너지(배터리)	에너지 밀도	~250Wh / kg, 사이클 수명 ~1000 회	12.1, 16.4
기계적(코팅)	마모율	<10 ⁻⁶ mm³ / (N · m), 경도~40 GPa	13.1, 15.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT