

# 텅스텐산 백과사전

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

텅스텐, 폴리브덴 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](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto: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 촉진하는 데 전념하고 있습니다. 1997년 [www.chinatungsten.com](http://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 30년 가까이 쌓아온 심층적인 경험을 활용하여 모회사의 탁월한 설계 및 제조 역량, 우수한 서비스, 글로벌 비즈니스 명성을 계승하여 텅스텐 화학물질, 텅스텐 금속, 시멘트 카바이드, 고밀도 합금, 몰리브덴 및 몰리브덴 합금 분야에서 포괄적인 애플리케이션 솔루션 제공업체가 되었습니다.

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Tungstic Acid Introduction CTIA GROUP LTD

### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ\text{C}$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu\text{m}$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$\text{Fe} \leq 10, \text{Na} \leq 5, \text{Si} \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$\text{SO}_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 목차

### 머리말

- 글쓰기 배경 및 중요성
- 텅스텐산의 전략적 위치와 응용 잠재력
- 책의 구성 및 지침
- 적용 가능한 독자 및 참조 값

### 제 1 장: 텅스텐산의 기본 개념과 역사적 발전

- 1.1 텅스텐산의 정의 및 분류
- 1.2 텅스텐산의 발견과 명명 진화
- 1.3 무기화학에서 텅스텐산의 상태
- 1.4 텅스텐산 연구의 주요 과정 및 기술적 이정표

### 2 장: 텅스텐산의 물리적 및 화학적 특성

- 2.1 분자 구조 및 결정 구조 분석
- 2.2 열 안정성 및 분해 거동
- 2.3 산도 및 용해도 특성
- 2.4 광학적, 전기적 및 자기적 특성
- 2.5 텅스텐산의 이성질체 및 다형체 연구

### 3 장: 텅스텐산의 제조

- 3.1 APT로부터 텅스텐산 제조
- 3.2  $WO_3$ 로부터 텅스텐산의 습식 추출
- 3.3 다양한 pH/온도 조건에서 텅스텐산 합성
- 3.4 나노텅스텐산 제조 공정(졸겔, 수열, 마이크로에멀전)
- 3.5 CTIA 그룹에서 제조한 텅스텐산 표준 제조 공정 분석

### 제 4 장 텅스텐산의 특성 분석 기술 및 검출 방법

- 4.1 XRD 결정 형태 및 결정 표면 분석
- 4.2 FTIR 및 라만 분광법
- 4.3 SEM/TEM 미세형태 관찰
- 4.4 TG-DSC 열 분석
- 4.5 XPS 표면 원소 원자가 상태 분석
- 4.6 비표면적 및 기공 구조(BET 분석)
- 4.7 전기 및 광학 성능 시험 방법

### 제 5 장: 텅스텐산의 주요 유도체 및 중간체

- 5.1 메타텅스텐산염 (나트륨, 암모늄, 칼슘, 구리 등)
- 5.2 텅스텐산 복합체( 폴리텅스텐산, 이소폴리 산)
- 5.3 유기 텅스텐산염 및 유기 복합물
- 5.4 텅스텐 기반 기능성 소재 및 복합재

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5.5 텅스텐산을 이용한 고가 산화텅스텐 전구체 합성

### 제 6 장: 무기 산업에서의 텅스텐산의 응용

- 6.1 텅스텐 화합물 산업 체인에서 텅스텐산의 역할
- 6.2 발광 재료에 대한 텅스텐산의 응용
- 6.3 고성능 세라믹 원료에 사용되는 텅스텐산
- 6.4 내열성 및 내식성 코팅 재료의 전구체로서 텅스텐산의 역할

### 제 7 장: 기능성 재료 및 에너지 분야에서의 텅스텐산의 응용

- 7.1 광촉매 소재에서의 텅스텐산의 응용(오염물질 등의 분해)
- 7.2 에너지 저장 소재(슈퍼커패시터, 배터리)에서 텅스텐산의 연구 진행 상황
- 7.3 전기변색 및 광학 제어 재료에 대한 텅스텐산의 응용
- 7.4 센서 및 자가 세척 소재에 나노텅스텐산 적용

### 제 8 장: 분석화학 및 시약에서의 텅스텐산의 응용

- 8.1 비색제 및 적정제로서의 텅스텐산
- 8.2 스펙트럼 분석에서 텅스텐산의 배위
- 8.3 중금속 검출 및 분리에 있어서 텅스텐산의 기능
- 8.4 고순도 분석화학물질 내 텅스텐산의 품질 요구사항

### 제 9 장: 텅스텐산의 의학적 및 생물학적 응용 분야 탐구

- 9.1 텅스텐산이 세포 대사에 미치는 영향에 대한 예비 연구
- 9.2 생촉매 및 효소 모방에 있어서 텅스텐산의 잠재력
- 9.3 항균 및 항바이러스 소재에 대한 텅스텐산의 탐색적 응용
- 9.4 텅스텐산의 환경독성 및 생체적합성 연구 현황

### 제 10 장: 텅스텐산의 안전 및 환경 관리

- 10.1 텅스텐산의 MSDS 및 안전 수준 평가
- 10.2 보관, 운송 및 누출 비상 처리 사양
- 10.3 생산 공정에서의 텅스텐산의 직업적 노출 및 예방 및 관리
- 10.4 텅스텐산 폐액 및 부산물의 처리 및 자원 활용

### 제 11 장 텅스텐산 시장 분석 및 산업 현황

- 11.1 세계 텅스텐산 생산능력 및 소비구조 분석
- 11.2 중국 텅스텐산 산업 발전 및 수출 현황 개요
- 11.3 주요 기업 및 공급업체 개요(CTIA 그룹의 위치 강조)
- 11.4 하류 시장 수요: 전자, 코팅, 세라믹, 환경 보호
- 11.5 텅스텐산 제품의 가격 논리 및 비용 구조 분석

### 제 12 장: 텅스텐산 연구의 주요 주제와 최첨단 기술

- 12.1 초미립/나노 텅스텐산 제조의 과제와 기회
- 12.2 지능형 반응 텅스텐산 기반 소재의 연구 개발

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 12.3 기능성 텅스텐산 복합 시스템 구축 전략
- 12.4 텅스텐산 소재에 대한 신에너지 기술 수요 동향
- 12.5 텅스텐산 제품에 대한 지능형 제조 및 자동화 적용

#### 총수

- 부록 1: 텅스텐산의 일반 용어 및 기호
- 부록 2: 텅스텐산 관련 국제 및 국내 표준 비교표
- 부록 3: 텅스텐산 주요 문헌 색인 및 연구 데이터베이스
- 부록 4: CTIA 그룹 텅스텐산 제품 카탈로그 및 기술 서비스 소개



## 머리말

### 글쓰기 배경과 중요성

텅스텐산 (화학식  $H_2WO_4$ ) 은 텅스텐 화학 시스템에서 가장 기본적이고 구조적으로 다양한 무기산 중 하나입니다. 19 세기에 처음 분리된 이후, 현대 텅스텐 재료 과학, 무기 합성 화학, 그리고 기능성 재료 기술의 핵심 중간체로 점차 발전해 왔습니다. 텅스텐산은 다양한 텅스텐 화합물(예: 텅스텐산염, 메타텅스텐산염, 텅스텐산염, 텅스텐 산화물)의 중요한 전구체일 뿐만 아니라, 잠재적인 응용 가치를 지닌 기능성 재료의 한 종류입니다.

에너지 변환, 신소재 개발, 친환경 화학과 같은 핵심 전략 분야에서 텅스텐산과 그 유도체는 폭넓은 응용 가능성을 보여주었습니다. 예를 들어, 광촉매 분해, 수처리, 슈퍼커패시터, 전기변색 소자와 같은 신형 응용 분야에서 텅스텐산은 뛰어난 산화환원 능력, 다층 결정 구조, 그리고 이온 이동 특성으로 많은 주목을 받고 있습니다. 또한, 텅스텐산은 무기염 제조, 텅스텐 금속 추출, 고온 세라믹 합성, 화학 분석 시약과 같은 전통 산업에서도 대체할 수 없는 위치를 차지하고 있습니다.

전 세계적으로 "고성능 금속재료 국산화", "녹색 야금", "신에너지 소재 전환"이 지속적으로 발전함에 따라, 텅스텐 자원과 고급 기능성 소재를 연결하는 핵심 노드인 텅스텐산의 종합적 성능, 제조 기술, 응용 경로, 환경 영향 및 시장 잠재력에 대한 체계적인 정리와 심층 연구가 시급히 필요합니다.

이러한 맥락에서, "텅스텐산 백과사전"의 편찬은 단순히 국내외 텅스텐산 분야의 현재 연구 성과와 산업 관행을 요약하는 데 그치지 않고, 과학 연구 기관, 공학 및 기술 인력, 하이엔드 사용자 기업, 정책 결정 부서에 권위 있고 체계적이며 실무적인 지식 프레임워크와 기술적 기반을 제공하는 데 그 목적이 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 텅스텐산의 전략적 가치

텅스텐산의 중요성은 다음의 네 가지 측면에서 이해할 수 있습니다.

### 1. 전략적 자원 브리지 역할 텅스텐산은

APT(과라 텅스텐산암모늄)와 텅스텐 금속 및 텅스텐 산화물 사이의 전이 형태 로, 텅스텐 산업 체인에서 핵심적인 위치를 차지합니다.

### 2. 재료 R&D 플랫폼 특성

텅스텐산은 결정 형태 조절, 금속 이온 도핑, 다공성 구조 구축 등 재료 공학적 역량을 보유하고 있습니다. 나노텅스텐 재료, 다중산 배위 구조, 그리고 복합 촉매 재료의 제조를 위한 중요한 플랫폼 분자입니다.

### 3. 특성은 친환경 제조 및 기능적 응용 분야에 적합하여

습식 친환경 제조 공정에 적합하며, 에너지 절약 및 배출 감소 요건을 충족합니다. 텅스텐산과 그 염은 다기능 전도성, 광촉매 작용, 열 안정성 등의 특성을 지니고 있어 과학적 연구 및 응용 가치를 모두 갖추고 있습니다.

### 4. 국제 담론력 구축의 기본 단위입니다.

현재 텅스텐 자원의 수출 통제는 점차 강화되고 있습니다 . 텅스텐산과 그 제품은 중국의 전략적 금속 자원 "해외 수출"의 중요한 수출 형태가 되었습니다. 관련 표준화 및 산업화 수준은 중국의 고급 소재 국제 공급망 내 담론력에 직접적인 영향을 미칩니다.

## 이 책의 구성

이 책은 기본부터 시작하여 점차 심화되는 내용을 다루며, 이론과 실무를 모두 중시하고 업계와 최전선의 협력을 결합하는 접근 방식을 채택하고 있습니다. 총 12 개의 장과 4 개의 부록으로 구성되어 있습니다.

- 1-2 장 : 텅스텐산의 기본 개념, 개발 역사, 물리적 및 화학적 특성에 대한 개요로 후속 장에 대한 이론적 뒷받침을 제공합니다.
- 3-4 장 : 중국텅스텐정보의 독점적 공정 참조를 포함한 다양한 주류 제조 방법 및 특성화 기술에 대한 자세한 설명
- 5-6 장 : 일반적인 텅스텐산 유도체 소개 및 무기 산업에서의 응용
- 9 장 : 에너지 소재, 분석 화학, 기능성 코팅 및 생물학적 응용 분야에서 텅스텐산의 최신 개발에 초점을 맞춥니다.
- 10 장 : 텅스텐산의 수명주기 전반에 걸친 안전성, 보관 및 운송 사양과 환경 관리에 초점을 맞춥니다.
- 11-12 장 : 투자 판단과 전략적 연구에 도움이 되는 산업 사슬, 시장, 정책 및 개발 추세에 대한 포괄적인 분석을 제공합니다.
- 부록 : 독자의 참고 및 응용 효율성을 높이기 위해 용어집, 표준 비교, 문헌 색인 및 CTIA GROUP 기술 서비스 정보를 제공합니다.

이 책은 기본 이론, 엔지니어링 기술, 표준 및 사양, 시장 동향, 그리고 친환경 제조의 모든 측면을 포괄합니다. 과학 연구자를 위한 데이터베이스, 엔지니어를 위한 운영 매뉴얼, 대학교수와 학생을 위한 교육 자료, 그리고 정부와 산업계의 의사 결정 참고 자료로 활용할 수 있습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 대상 고객 및 사용

이 책은 다음 그룹에 적합합니다:

- **연구자 및 재료 엔지니어** : 텅스텐산의 물리적, 화학적 특성과 실험 경로를 체계적으로 이해하여 과학적 연구 설계 및 재료 최적화에 도움을 줍니다.
- **분말 가공 및 야금 실무자** : 고품질 텅스텐산 분말의 안정적인 생산을 지원하기 위한 제조 및 응용 분야의 실무 경험을 습득합니다.
- **환경 및 안전 관리자** : 텅스텐산의 환경적 행동, 안전한 운송 및 보관 사양을 이해하여 깨끗한 생산과 규정 준수를 보장합니다.
- **대학 교수 및 대학원생** : 교육 참고 자료, 졸업 논문 작성 및 프로젝트 적용을 위한 기초 문헌으로 활용됨.
- **산업 분석가 및 관련 정부 부서** : 텅스텐산 산업 사슬의 추세, 정책 동향 및 기술적 장벽을 이해하고 개발 계획 수립을 지원합니다.

독자는 자신의 필요에 따라 참조할 장을 선택하는 것이 좋습니다. 이 책에서는 기술자가 실제 프로젝트에서 주요 내용을 빠르게 찾을 수 있도록 교차 색인과 부록 탐색 기능을 제공합니다.

## Tungstic Acid Introduction CTIA GROUP LTD

### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ\text{C}$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu\text{m}$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$\text{Fe} \leq 10, \text{Na} \leq 5, \text{Si} \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$\text{SO}_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 제 1 장 텅스텐산의 기본 개념과 역사적 발전

텅스텐산(화학식  $H_2WO_4$ ) 은 +6 가 텅스텐과 산소 , 수소 로 구성된 산소 함유 산입니다 . 텅스텐 기반 화학에서 가장 중요한 중간체 중 하나입니다 . 텅스텐 세련 및 텅스텐염 제조 공정에 널리 사용될 뿐만 아니라, 기능성 소재, 생촉매, 광전 변환 등 여러 첨단 분야에서 독특한 물리적, 화학적 특성과 응용 가치를 나타냅니다.

### 1.1 텅스텐산의 정의 및 분류

#### 기본 정의

텅스텐 산염(예: 텅스텐산나트륨, 텅스텐산암모늄)과 강산 의 반응으로 침전되는 노란색 비정질 또는 결정질 고체를 말합니다 . 가장 흔한 화학식은  $H_2WO_4 \cdot xH_2O$  입니다. (즉, 수화된 텅스텐 산) . 실제 조성은 반응 조건과 밀접한 관련이 있어 어느 정도 구조적 다양성을 보인다.

#### 분류

텅스텐산은 구조, 수화 상태, 반응성 및 제조 조건에 따라 다음과 같은 범주로 나눌 수 있습니다.

분류 기준	유형	특징
수분 수준	무수텅스텐산 ( $H_2WO_4$ ) 수화 텅스텐산 ( $H_2WO_4 \cdot xH_2O$ )	무수물은 드물며, 수화된 텅스텐산은 산업계에서 텅스텐산의 주요 형태입니다.
구조적 형태	비정질 텅스텐산 결정질 텅스텐산	결정 상태는 사방정계 또는 단사정계이고, 비정질 상태는 콜로이드 침전물입니다.
합성 방법	습식 화학 텅스텐산 열분해 텅스텐산	메타텅스텐산염을 제조하는 데 사용되고 , 후자는 텅스텐 금속의 원료로 사용됩니다.
파생 기능	단량체 텅스텐산 중합체 텅스텐산	메타텅스텐 및 폴리텅스텐 과 같은 복잡한 구조를 형성하기 위해 중합될 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐산은 보통 밝은 노란색 또는 황록색 분말이며, 불산, 암모니아 또는 알칼리 용액에 녹고, 찬물과 알코올에는 녹지 않으며, 산성이 약하고 열 안정성이 높습니다.

## 1.2 텅스텐산의 발견과 명명 진화

텅스텐 원소는 1781년 스웨덴의 화학자 칼 빌헬름 셀레에 의해 처음 발견되었습니다. 원래 광석(울프손)을 염산으로 처리하여 "텅스텐산염 침전물"로 알려진 노란색 침전물을 얻었는데, 이것이 초기 텅스텐산의 원형이었습니다. 1783년, 스페인 형제 후안과 파우스토 엘후야르는 탄소를 이용하여 노란색 물질을 더욱 환원시켜 최초로 금속 텅스텐을 생산했습니다.

19세기 초, 텅스텐산은 유럽 실험실에서 금속의 산화 상태와 산-염기 반응 연구에 중요한 역할을 하게 되었습니다. 무기화학의 발전과 함께 텅스텐산은 체계적으로 6가 금속의 산화산계로 분류되었고, 점차 몰리브덴산, 니오브산 등과 함께 비교적 표준적인 명명 체계를 형성했습니다.

용어는 단일텅스텐 산, 메타텅스텐 산(예:  $H_2W_{12}O_{40}$ ), 헤테로폴리텅스텐 산을 포함하여 명확한 구조를 갖는 다양한 종류로 구체화되고 세분화되기 시작했습니다. 산 등

중국에서는 텅스텐산에 대한 체계적인 연구가 1950년대에 시작되었으며, 특히 장시성, 후난성, 허난성과 같이 텅스텐 광물 자원이 풍부한 지역을 중심으로 연구가 활발히 진행되었습니다. 텅스텐산의 습식 제조 공정 및 결정화 제어 연구는 중국의 텅스텐염 화학 발전에 기여했습니다.

## 1.3 무기화학계에서 텅스텐산의 상태

텅스텐산은 높은 산화수를 갖는 가장 중요한 텅스텐 화합물 중 하나입니다. 텅스텐산의 산성, 배위 및 유도체화 특성은 무기화학 분야에서 텅스텐산이 널리 응용될 수 있는 토대를 마련합니다.

기능 상태는 다음과 같습니다.

- **조정 센터** : 텅스텐산의  $W^{6+}$ 는 O, N, S와 같은 리간드와 함께 안정적인 다핵 착물을 형성할 수 있으며, 다중 금속 착물 합성의 중요한 중심입니다.
- **구성 단위** : 텅스텐산은 종종 이소폴리 산과 폴리텅스텐을 구성하기 위해 폴리음이온 구조(예: 케인 구조)의 기본 골격으로 사용됩니다. 산화물;
- **산-염기 반응 템플릿** : pH 값에 따라 다른 형태를 갖기 때문에 산 분해-침전-착물 형성-재조합과 같은 반응을 연구하는 데 중요한 모델입니다.
- **공학의 기본** : 다양한 온도와 용액 농도에서 다양한 결정 형태를 형성할 수 있으며, 결정 제어와 무기 나노물질 연구의 대표적인 대상입니다.

텅스텐산은 다른 전이 금속 산(크롬산, 몰리브덴산 등)을 연구하기 위한 비교

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

물질이기도 하며, 종종 전자, 광자 및 자기적 특성에 대한 구조적 제어 운반체로 사용됩니다.

#### 1.4 텅스텐산 연구의 주요 역사와 기술적 이정표

지난 2 세기 동안 텅스텐산 연구는 "경험적 추출"에서 "구조 분석", 그리고 "기능적 응용"의 세 단계를 거쳤습니다.

단계	시간	특징
스타트업	18 세기 후반~19 세기 중반	실험실에서의 텅스텐 추출 및 침전, 구조적 지식 부족
분석 단계	20 세기 전반	X 선 회절, 적외선 분광법 및 기타 방법을 사용하여 구조를 확인하기 시작합니다.
기능 확장 단계	1970 년대부터 현재까지	촉매, 광전자공학, 에너지 저장 및 복합 기능성 소재에 중점을 둡니다.

대표적인 기술적 혁신:

- 1955 년 : 결정질  $H_2WO_4$ 가 수열합성 조건 하에서 최초로 합성되었으며, 표준물성곡선이 확립되었다.
- 1983 년: 폴리텅스텐산염의 케진 구조가 밝혀지면서 폴리옥소메탈레이트 연구의 새로운 시대가 열렸습니다.
- 2005 년 : 나노텅스텐산 제조 기술에 획기적인 발전이 이루어져 광촉매 및 슈퍼커패시터에 응용이 가능해졌습니다.
- 지난 10 년 동안 CTIA 그룹과 기타 국내 기업은 고순도 초미립 텅스텐산 산업용 제품을 개발하여 제품 응용 분야를 원자재 수준에서 기능 수준으로 전환했습니다.

#### 요약

이 장에서는 텅스텐산의 화학적 정의, 개발 역사, 학문적 지위 및 연구 발전 경로를 검토하여, 후속 장들에서 텅스텐산의 제조, 특성 분석, 유도체 구조 및 응용 경로에 대한 명확한 역사적 배경과 화학적 틀을 제공합니다. 텅스텐산은 기본적인 무기물일 뿐만 아니라, 텅스텐 재료 과학 시스템의 자원, 이론 및 기능적 응용을 연결하는 핵심 노드입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 제 2 장 텅스텐산의 물리적 및 화학적 특성

텅스텐산( $H_2WO_4$ )은 전형적인 6가 텅스텐 화합물입니다. 텅스텐산의 물리적 외관, 결정 구조, 화학 반응 특성 및 다물성 분야 성능은 화학 산업, 재료 과학 및 응용 기술 분야에서 텅스텐산의 적용 범위를 결정합니다. 이 장에서는 분자 구조부터 기능적 특성까지 텅스텐산의 고유한 특성을 체계적으로 분석하여 후속 공정 제조, 유도체화 및 기능적 응용의 토대를 마련합니다.

### 2.1 분자구조 및 결정구조 분석

#### 분자 구성

텅스텐산의 화학식은 일반적으로  $H_2WO_4$ 이지만, 물 속에서는  $H_2WO_4 \cdot xH_2O$  ( $x$ 는 보통  $1 \sim 2$ )와 같이 수화된 형태로 존재하는 경우가 많습니다. 텅스텐 원자는 +6 산화수에 있으며, 주변 배위 결합은  $[WO_6]$  팔면체 단위를 형성하여 무기산 분자 구조를 형성합니다.

#### 결정 구조

텅스텐산은 다양한 결정 형태를 보일 수 있으며, 그 구조는 합성 조건에 따라 크게 영향을 받습니다. 일반적인 결정 유형은 다음과 같습니다.

- **단사정계** : 가장 흔한 결정 형태이며, 단위 셀에는 산소 브릿지로 연결된  $[WO_6]$  팔면체 사슬이 포함되어 2차원 구조를 형성합니다.
- **사방정계** : 빠른 침전이나 저온 결정화 조건에서 일반적입니다.
- **삼사정계 또는 비정질** : 무질서한 침전이나 급격하게 냉각되는 시스템에서 형성되며, 종종 콜로이드나 느슨한 분말로 나타납니다.

결정 분석 방법은 일반적으로 다음을 사용합니다.

- X선 분말 회절(XRD): 결정 형태와 격자 상수를 결정하는 데 사용됩니다.
- 주사전자현미경(SEM): 표면형태 및 결정집합상태 관찰
- 전자 후방 산란 회절(EBSD): 미세 영역에서 입자의 배열과 선호 방향을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연구합니다.

## 2.2 열 안정성 및 분해 거동

텅스텐산은 높은 원자의 금속 산화물로서 우수한 열 안정성을 나타냅니다. 공기 또는 불활성 분위기에서 열분해 거동은 다음과 같습니다.

- $<100^{\circ}\text{C}$  : 물리적으로 흡착된 물의 손실
- $100\sim 300^{\circ}\text{C}$  : 수화된 텅스텐산은 점차 물을 잃고 무수  $\text{H}_2\text{WO}_4$  또는  $\text{WO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  로 변환합니다 .
- $300\sim 450^{\circ}\text{C}$  : 결정수가 제거되기 시작하고, 구조가 수축하며  $\text{WO}_3$ 가 형성된다.
- $>600^{\circ}\text{C}$  : 안정적으로 노란색 삼산화텅스텐( $\text{WO}_3$ ) 으로 전환되며 , 이는 대부분의 하류 응용 분야의 전구체입니다.

일반적으로 사용되는 열 분석 기술:

- 열중량 분석(TGA): 질량 변화를 모니터링합니다.
- 시차주사열량측정법(DSC): 상변화점과 흡열 및 발열 행동을 결정합니다.
- FTIR 과 라만의 조합: 하이드록실과 W-O 결합의 변환 과정을 결정합니다 .

결론: 텅스텐산은 실온에서 안정적으로 존재할 수 있으며 명확한 열분해 경로를 갖는다. 텅스텐산은 열처리 후 기능성 산화물을 제조하는 데 적합한 고품질 전구체이다.

## 2.3 산성도, 알칼리도 및 용해도 특성

### 산성도와 알칼리도

- 텅스텐산은 물 속에서 약산성을 띠며 이온화도가 낮습니다.
- 강염기가 존재하는 경우 텅스텐산 이온( $\text{WO}_4^{2-}$ ,  $\text{W}_{12}\text{O}_{42}^{10-}$  등)
- $\text{pH} < 1$ 에서는 콜로이드 텅스텐산염으로 침전되고,  $\text{pH} 2\sim 6$  범위에서는 중합된 텅스텐산염으로 존재합니다.

산-염기 거동은 양성 경향을 보이며, 다양한 pH 값에서의 거동 차이는 다음과 같습니다.

pH 범위	존재	화학적 행동
<1	콜로이드 침전	금속 이온과의 공침
2-6	메타텅스테이트	폴리머 형성
>8	$\text{WO}_4^{2-}$ 이온	알칼리에 용해됨

텅스텐산은 종종 용액 속의 텅스텐 형태를 조절하는 데 사용되며, 폴리산 합성과 산-염기 완충 시스템에서 대표적인 물질입니다.

### 용해도

- 찬물과 에탄올 에는 녹지 않으며 , 뜨거운 물에는 약간 녹습니다.
- 알칼리성 용액 에 용해됨 : 암모니아수, NaOH 등, 안정한 텅스텐산을 생성함;
- 불산( $\text{HF}$ ) 에 용해 시 휘발성 텅스텐-불소 복합체를 형성합니다.
- 산성 용액에 잘 녹지 않는 노란색 침전물입니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

습식야금, 재생 및 회수, 전구체 용액 제조에 중요한 지침적 의미를 갖습니다.

## 2.4 광학적, 전기적 및 자기적 특성

전기변색, 센서 및 광전자 재료 분야에 응용하기 위한 이론적 근거가 됩니다.

### 광학 성능

- 텅스텐산은  $W^{6+} \rightarrow O^{2-}$ 의 전하 이동으로 인해 노란색입니다.
- 광학적 밴드갭은 일반적으로 2.6~2.8eV로 넓은 밴드갭 반도체이다.
- 나노텅스텐산 또는 도핑된 텅스텐산은 조절 가능한 밴드갭을 가지고 있어 가시광선 흡수 촉매에 적합합니다.
- 자외선 하에서 전자 전이에 참여하여 자유 전자-홀 쌍을 생성할 수 있습니다.

### 전기적 특성

- 벌크 텅스텐산은 절연체이지만 도핑(Cu, Ag 등)되거나 비화학양론적 구조를 형성한 후에는 특정 전도도를 가질 수 있습니다.
- 다공성 텅스텐 필름은 전기변색 현상을 나타내며 스마트 창문과 디스플레이에 적합합니다.

### 자기적 특성

- 순수한 텅스텐산은 자성을 띠지 않습니다.
- 전이 금속 원소(Fe, Co 등)로 도핑한 후에는 약한 자기 반응을 나타낼 수 있으며, 자기적으로 반응하는 나노캐리어에 적합합니다.

## 2.5 텅스텐산의 이성질체 및 다형체 연구

텅스텐산은 다양한 조건에서 다양한 구조 이성질체와 중합체를 형성할 수 있습니다. 이러한 형태는 물리적 안정성, 촉매 활성 및 흡착 특성이 크게 다릅니다.

### 일반적인 이질적 유형

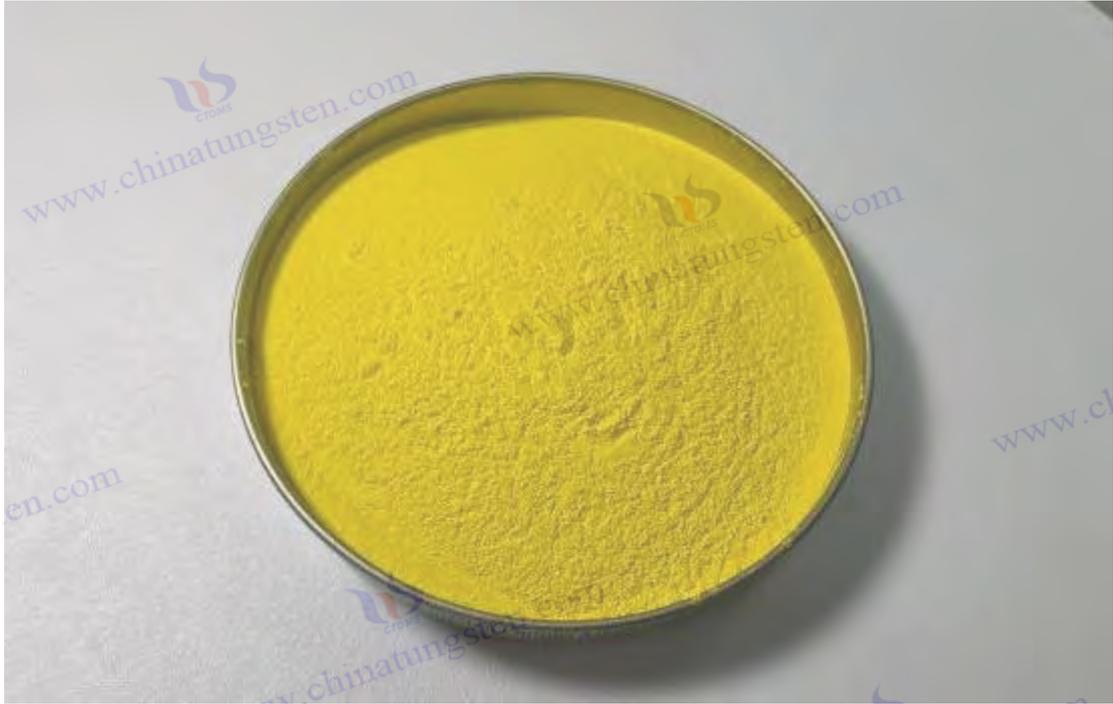
- 단량체  $H_2WO_4$  : 구조가 간단하고 활성도가 높음;
- $PolyH_6W_{12}O_{40}$  : 케진 - 촉매작용에 사용되는 폴리 음이온 유형
- 헤테로폴리산 텅스텐 산염 : 인산 텅스텐 산, 규소텅스텐 산 등은 선택적 산화 능력을 가지고 있습니다.

### 다형성 행동

- 다형체는  $\alpha-H_2WO_4$  및  $\beta-H_2WO_4$ 와 같이 다양한 온도에서 형성될 수 있습니다.
- 수화 상태의 변화는 결정 간격과 열분해 온도에 영향을 미칩니다.
- 시스템에서 유도될 수 있습니다.

결정 형태 조절은 텅스텐산의 기능 개발을 위한 핵심 기술 중 하나로, 이후 촉매 활성, 계면 반응성 및 필름 형성 특성에 큰 영향을 미칩니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



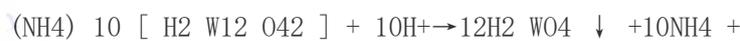
### 제 3 장 텅스텐산의 제조

#### 3.1 APT로부터 텅스텐산 제조

APT (암모늄) 과라텅스테이트(APT) 는 텅스텐 산업 사슬에서 가장 중요한 중간체 중 하나이며, 산업적 규모의 텅스텐산 제조에 가장 일반적으로 사용되는 원료입니다. APT 에 함유된 메타텅스테이트 이온은 적절한 산성 조건 하에서 텅스텐산 침전으로 완전히 전환될 수 있습니다. 따라서 이 방법은 실험실, 산업계, 그리고 고순도 텅스텐 제품의 전구체 제조에 널리 사용됩니다.

##### 1. 프로세스 원리

APT 의 화학식은 일반적으로  $(NH_4)_{10} [ H_2W_{12}O_{42} ] \cdot 4H_2O$  이며, 이는 고도로 중합된 텅스텐산 암모늄염입니다. 묽은 산(예: 질산, 염산)의 작용 하에 APT 는 서서히  $NH_4^+$  이온을 방출하고 고분자 해리를 거쳐 텅스텐산 침전물을 생성합니다. 기본 반응식은 다음과 같습니다.



- 이 반응은 이온교환 침전 반응에 속합니다.
- 이 과정에는 텅스텐산염 침전 형성, 수화 구조 구축 및 결정 성장이 수반됩니다.

##### 2. 주요 원자재 및 장비 요구 사항

원자재 요구 사항:

- APT 분말, 순도  $\geq 99.95\%$ , 건조 후 사용;
- 산성 용액, 일반적으로 묽은 질산 또는 묽은 염산(농도  $1 \sim 3 \text{ mol/L}$ )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 탈이온수는 금속이온 불순물 함량을 0.5ppm 이하로 제어합니다.

**핵심 장비 구성:**

장비 이름	효과
스테인리스 스틸 교반 반응기(산성 라이닝)	APT와 산의 균일한 혼합 및 반응을 달성합니다.
일정 온도의 수조 또는 재킷 제어 시스템	반응 온도 제어
진공 필터 또는 여과 장비	침전된 텅스텐산과 모액의 분리
건조 오븐(에어 블로워/진공)	건조된 텅스텐 분말

고순도 텅스텐산을 제조하려면 공기 정화 시스템, 아르곤 보호 시스템 및 중성 세척 장치도 필요합니다.

**3. 프로세스 개요**

일반적인 APT에서 텅스텐으로의 과정은 다음과 같습니다.

- 산 제조: HNO<sub>3</sub> 또는 HCl을 필요한 농도로 희석한 후 설정 온도(보통 25~50° C)까지 예냉하거나 가열합니다.**
- APT 첨가 및 교반 반응**  
APT를 산 용액에 천천히 첨가하고 교반 속도(300~500 rpm)를 조절하여 30~90 분 동안 반응시킵니다. 이 시간 동안 일정한 온도를 유지하고 응집을 방지합니다.
- 침전 형성 및 숙성**  
초기 텅스텐산 침전물이 형성된 후, 계속 저어주고 1~3 시간 동안 방치하여 결정 성숙 및 탈아민화 반응을 촉진합니다.
- 고액 분리는**  
진공 여과나 압력 여과를 이용해 텅스텐산 침전물과 모액을 분리하고, 남은 액체는 산 제조에 재활용할 수 있습니다.
- 세척 및 건조**  
침전물을 탈이온수로 3~5 회 세척한 후(잔류 불순물 방지), 공기를 불어 넣거나 진공 상태에서 80~100° C에서 건조합니다.
- 완제품 포장 및 분석**  
텅스텐산 분말은 밀봉하여 보관하며, 수분 함량, 순도, 입자 크기 분포, XRD 등의 품질 테스트를 실시합니다.

**4. 주요 공정 매개변수 제어**

매개변수	추천값	제어 목적
pH 종말점	1.5~2.0	헤테로폴리산을 형성하지 않고 텅스텐산의 완전한 침전을 보장합니다.
온도	30~50° C	용해 속도와 결정 품질의 균형 맞추기
반응 시간	≥ 60 분	APT가 완전히 분해되고 완전히 반응했는지 확인하세요.
여과율	5 분/100mL 미만	텅스텐산 줄이 필터를 막는 것을 방지하고 작동 효율을 향상시킵니다.
세척액 의	< 20 μS/cm	잔류 불순물 이온 (Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )을 제어합니다.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

전도도		
-----	--	--

참고: 마이크론 크기의 구형 텅스텐산 분말을 준비해야 하는 경우 결정화 단계에서 계면활성제(예: PEG-400)를 첨가하여 입자 형태를 조절하는 데 도움을 줄 수 있습니다.

### 5. 일반적인 제품 특성

얻어진 텅스텐산 생성물은 일반적으로 다음과 같은 물리적 및 화학적 지표를 갖는다.

자연	매개변수 범위
모습	노란색 또는 밝은 노란색 분말
텅스텐 함량(WO <sub>3</sub> 로 측정)	≥90%
산소 함량	≥15.5% (이론값)
입자 크기 D50	2~ 10 μm
결정 형태	단사정계 또는 사방정계 H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>
총 불순물	≤300ppm(산업용) ≤100ppm(전자용)

### 6. 장점 및 단점 분석

프로젝트	이점	불충분하다
공정 안정성	경로가 성숙하고 반복 가능합니다.	느린 반응 속도론
원자재의 출처	APT는 일반적으로 사용 가능합니다.	텅스텐 원료 가격의 영향
제품 관리	고순도 H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> 를 쉽게 얻을 수 있음	결정 형태와 입자 크기 제어가 최적화되어야 합니다.
환경 보호	온화한 반응 조건, 중금속 오염 없음	모액질소 함유 폐수는 처리가 필요합니다.

### VII. 적용 사례 및 산업 실무 (CTIA) 그룹 )

CTIA GROUP은 APT에서 텅스텐산 생산 경로에 대한 많은 산업 실무 경험을 축적했으며 배치 수준, 테스트 수준 및 고순도 수준의 세 가지 유형의 텅스텐산 생산 공정 플랫폼을 구축했습니다.

- **산업용 배치 텅스텐산 생산 라인** : 연간 생산 용량 ≥ 200 톤, 연속 반응 + 자동 여과 + 온라인 검출 시스템 사용;
- **전자급 텅스텐산 제조 실험실** : 암모니아 없는 시스템을 갖추고 있으며, 제품 불순물은 50ppm 이하로 관리됩니다.
- **맞춤형 시스템** : 하류 요구 사항에 따라 입자 크기(D50=1-5 μm), 비표면적, 분산 성능 등을 직접 제어합니다.

동시에 회사는 국제 시장 진출 요건을 충족하기 위해 수출 시장을 대상으로 REACH 규정을 준수하는 텅스텐산 MSDS와 원산지 인증을 제공합니다.

APT 공정은 텅스텐산 제조에 있어 가장 신뢰성 있고 표준화된 공정 경로 중 하나입니다. 간단한 조작, 온화한 반응, 그리고 안정적인 생성물이라는 장점이 있습니다. 과학 연구 실험, 고순도 텅스텐염 생산, 그리고 대량 산업적 용도에

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적합합니다. 산 농도, 온도, 반응 시간, 세척 효율과 같은 주요 매개변수를 최적화하고 제어함으로써, 입자 크기 조절이 가능한 고순도 텅스텐 산 생성물을 안정적으로 얻을 수 있으며, 이는 후속 유도체화를 위한 견고한 기반을 제공합니다.

### 3.2 WO<sub>3</sub>로부터 텅스텐 산의 습식 추출

APT 경로 외에도, 안정적이고 쉽게 구할 수 있는 또 다른 중간체인 삼산화텅스텐(WO<sub>3</sub>)은 습식 산 가수분해를 통해 텅스텐 산으로 전환될 수 있습니다. 이 방법은 특히 텅스텐 야금 공정의 폐기물 재활용, 재활용 텅스텐 분말 시스템의 폐쇄 루프 제조, 그리고 APT가 아닌 시스템을 위한 맞춤형 텅스텐 산 제조에 적합합니다. 실험실 및 소량 생산에서 일반적으로 사용되는 유연한 공정 경로 중 하나입니다.

#### 1. 프로세스 원리

삼산화텅스텐(WO<sub>3</sub>)은 산성 매질에 직접 용해하기 어렵지만, 특정 조건(가열 + 착화) 하에서 강산이나 착화제와 반응하여 메타텅스텐 산 이온을 생성하고, 중화 또는 냉각 시 텅스텐 산으로 침전될 수 있습니다.

기본 반응 경로는 다음과 같습니다.



또한 HF, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 구연산 등을 포함한 특수매체에서는 다양한 텅스텐 산 복합이온이 생성될 수 있으며, 반응계를 조정하면 후 침전된 텅스텐 산으로 방출됩니다.

#### 2. 원자재 요구 사항 및 적용 조건

원료	필요하다
삼산화텅스텐 (WO <sub>3</sub> )	분말, 순도 ≥99.9%, 입자 크기 <50 μm
산 용액	HNO <sub>3</sub> , HCl 또는 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (농도 1-2 mol/L)
복합화 보조제(선택사항)	NH <sub>4</sub> Cl, 구연산, 아세트산 등을 사용하여 반응 속도 조절
기타 첨가제	계면활성제 또는 분산제(예: Tween-20, PEG)

#### 3. 프로세스

##### 1. WO<sub>3</sub> 전처리: WO<sub>3</sub> 분말을 80° C에서 2시간 동안 건조하여

물리적으로 흡착된 물을 제거합니다. 재활용 재료인 경우 불순물을 제거하기 위해 산 세척이 필요합니다.

##### 2. 산 용해 처리:

60~90° C로 예열된 산 용액을 반응기에 넣고 WO<sub>3</sub>를 천천히 첨가하여 교반하면서 30~60분간 반응시켜 안정된 황색 분산액 또는 텅스텐 콜로이드를 형성한다.

##### 3. 침전을 유도하기 위해 pH를 조절합니다.

중합을 촉진하고 텅스텐 산을 침전시키기 위해 시스템에 암모니아나 알칼리 용액(예: NaOH)을 천천히 첨가하여 pH를 약 2~3으로 맞춥니다.

##### 4. 숙성 및 결정화

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

: 혼합물을 1~2 시간 동안 그대로 두거나 저속으로 저어 결정 성장과 불순물이 모액으로 이동하는 것을 촉진합니다.

5. 여과 및 세척: 미세다공성 여과 장치를 사용하여 침전물을 수집 하고 전도도가 <20

$\mu\text{S}/\text{cm}$  가 될 때까지 따뜻한 물로 3~4 회 반복해서 세척했습니다 .

6. 건조 및 분쇄

80~100°C에서 12 시간 건조한 후 가볍게 분쇄하여 노란색 텅스텐산 생성물을 얻습니다.

#### 4. 주요 공정 제어 매개변수

매개변수	제어 범위	설명하다
산 농도	1 - 2 몰/L (HNO <sub>3</sub> / HCl)	WO <sub>3</sub> 콜로이드 재용해 방지
온도	60~90° C	반응 속도 및 전환 효율 향상
pH 조정 속도	≤0.5/분	응집 및 침전을 유발하기 위해 너무 빠른 알칼리화를 피하십시오.
반응 시간	30~60 분(+ 숙성 1~2 시간)	완전한 반응과 안정적인 결정 구조를 보장합니다.
교반 속도	200~400rpm	분말 현탁액은 충분하지만 와류는 피한다

#### V. 제품 성능 및 적용성

이 공정을 통해 다음과 같은 특성을 가진 텅스텐산을 생산할 수 있습니다.

프로젝트	성과 지표
모습	연한 황록색 미세결정 분말
결정 형태	대부분 단사정계/사방정계 수화 텅스텐산염
불순물 (Fe, Si, Al)	≤200 ppm (산세척으로 조절 가능)
입자 크기	D50 ≈ 1 - 5 $\mu\text{m}$
비표면적	8 - 15m <sup>2</sup> /g (BET)

#### 6. 공정 장단점 비교

프로젝트	장점	불충분하다
원자재의 가용성	WO <sub>3</sub> 는 일반적으로 야금 부산물에서 발견됩니다.	재활용 재료는 불순물을 제거하기 위해 사전 처리가 필요합니다.
공정 장비	특수 장비가 필요 없으며 소량 생산에 적합합니다.	지속적으로 제어하기 어려움
제품 관리	침전 과정을 제어함으로써 입자 크기와 결정 형태를 조절할 수 있습니다.	불순물 제어는 APT 방식보다 약간 더 어렵습니다.
경제적이다	저가 텅스텐 분말 변환에 적합	산 소모량과 폐수 처리 부담이 높다

삼산화텅스텐으로부터 텅스텐산을 제조하는 습식 공정은 유연성, 자원 적응성, 그리고 실험 친화성으로 인해 APT 공정에 중요한 보완재가 되었습니다. 이 공정은 특히 재활용 재료 활용, APT 가 아닌 원료 경로, 그리고 기능성 재료 합성을 위한

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

저비용 전구체 제조에 적합하여 친환경 제조 및 정밀 제어를 위한 신뢰할 수 있는 솔루션을 제공합니다.

### 3.3 나노텡스텐산의 제조기술(졸겔, 수열, 마이크로에멀전 등)

나노소재 과학의 급속한 발전으로, 기존의 마이크론 크기 텡스텐산은 더 이상 입자 크기 제어, 비표면적, 형태 조절 및 계면 활성과 같은 기능적 응용 분야의 요건을 충족할 수 없게 되었습니다. 나노텡스텐산은 매우 작은 입자 크기, 높은 분산성, 그리고 탁월한 광전기 촉매 성능으로 인해 신에너지, 전자, 광촉매, 생체재료 등 최첨단 기술의 연구 중심 분야로 자리 잡았습니다.

위해 연구자와 산업계에서는 졸-겔법, 수열법, 마이크로에멀전법, 템플릿법, 이온 교환법 등 다양한 습식 화학 방법을 개발했습니다. 이 섹션에서는 세 가지 대표적인 공정에 초점을 맞춰 그 적용 가능성과 스케일업 잠재력을 살펴보겠습니다.

#### 1. 졸겔법

##### 프로세스 원리

졸-겔법은 용액 중에 텡스텐 전구체를 형성한 후, 숙성, 건조, 열처리를 통해 나노입자를 형성하여 안정한 콜로이드 졸을 형성하는 방법입니다. 텡스텐산은 3차원 네트워크 구조를 형성하기 위한 전구체로 자주 사용됩니다. 일반적인 반응 경로는 다음과 같습니다.



##### 프로세스 단계

- 전구체 준비** : 텡스텐산나트륨 또는 텡스텐산암모늄을 탈이온수에 녹이고 pH를 1~2로 조정합니다.
- 졸 생성** : 희석된 산(예: HCl)을 천천히 첨가하여 텡스텐 콜로이드 형성을 유도합니다.
- 노화 및 겔 변형** : 실온에 수 시간에서 수 일간 방치하면 안정된 겔이 형성됩니다.
- 건조** : 낮은 온도 건조(40~80° C)로 자유수분 제거
- 열처리 및 결정화** : 200~400° C에서 가벼운 열처리를 수행하여 결정질 또는 준결정질 나노텡스텐산을 얻습니다.

#### 기능 및 응용 프로그램

특징	설명하다
입자 크기 제어	10~100nm 조정 가능
비표면적	최대 60 - 120m <sup>2</sup> /g
결합 관리	산소 공식 조절 및 향상된 광촉매 성능에 적합
한계	건조 공정은 수축되기 쉽고 입자 응집을 최적화해야 합니다.
일반적인 응용 프로그램	광촉매, 전기변색 필름, 박막 증착 코팅 등

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 수열법

### 프로세스 원리

수열합성법은 고온, 고압 조건 하에서 물의 특수한 용해도와 반응성을 활용하여 폐쇄된 반응기 내에서 결정성이 양호하고 형태가 제어 가능한 나노텅스텐산 분말을 합성합니다.

기본적인 반응 프레임워크는 다음과 같습니다.



### 작업 프로세스

- 용액 제조** : 메타텅스텐 산 암모늄 용액을 일정 농도로 제조 하고 소량의 산을 첨가하여 pH 를 1~3 으로 조절합니다.
- 첨가제 추가** : 폴리비닐피롤리돈 (PVP), 구연산 및 기타 형태 조절제 등
- 고압 반응** : 테프론 라이닝 반응기에 넣고 온도를 120~200° C 로 설정하고 6~24 시간 동안 반응시킵니다.
- 냉각 샘플링** : 실온으로 식힌 후 여과하고 물로 세척하고 건조합니다.
- 후 처리** : 필요 에 따라 가벼운 소성 또는 표면 개질 .

### 특징 및 적용성

매개변수	범위
입자 크기	20~80nm
형태	막대, 시트, 볼 조절 가능
결정 형태	직교/단사정계 H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>
생산하다	>90% (산업용 테스트 등급)

뛰어난 제어 가능한 형태: 조절 가능한 온도, 반응 시간 및 결정 성장을 정밀하게 제어하는 첨가제

결정화도 : 높은 요구 사항을 가진 광전자 기능 소재에 적합합니다.

적당히 확장할 수 있으며 시범 플랜트에 적합합니다.

## 3. 마이크로에멀전법

### 프로세스 원리

안정적인 오일-물 계면을 갖는 나노 반응 공동을 구축하여 텅스텐의 핵생성과 성장을 공간적으로 제한하여 제어하는 기술입니다. 본 기술은 초소형 입자 크기와 높은 분산성을 갖는 텅스텐 나노입자 제조에 적합합니다.

일반적으로 사용되는 반응 매체는 물/오일/계면활성제의 3 상 시스템입니다. 예:

- 유상: n-헥산, 시클로헥산;
- 수상: 텅스텐 수용액;
- 계면활성제: CTAB, Span-80, Tween-60 등

W/O(역) 시스템에서는 텅스텐산의 생성이 미세유화액 방울 내부로 제한되어 입자 크기를 정밀하게 제어할 수 있습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 합성 단계

1. 텅스텐 수용액(예: Na<sub>2</sub> WO<sub>4</sub> 용액) 을 준비합니다 .
2. W/O 역미세유화 시스템 구축;
3. 산성상(HCl 미세유화액)을 다른 미세유화액 방울로 ;
4. 고르게 저어주고 몇 시간 동안 반응시킨다.
5. 텅스텐산 나노입자는 유화제거, 추출 및 세척을 통해 얻어졌습니다.
6. 필요하면 말리고 펄세요.

### 장점과 한계

프로젝트	설명하다
이점	균일한 입자 크기 (5~20nm), 높은 분산성, 미세한 형태 제어
결점	계면활성제 잔류물은 완전히 제거하기 어렵고 확장하기 어렵고 비용이 많이 듭니다.
애플리케이션	초미립 촉매 담체, 전자급 텅스텐산 중간체, 투명 전도성 페이스트

### 4. 입자크기 및 형태 제어 메커니즘 비교

기술	입자 크기 제어 방법	결정 형태학	확대
졸-겔법	가수분해 속도, pH, 숙성 시간	구형/겔 클러스터	중간
수열법	온도, 시간, 첨가제 종류	플레이크/막대/구형	좋은
마이크로에멀전법	미세유화 입자 크기 및 계면 안정성	거의 구형의 비정질 나노입자	더 높은 난이도

### 5. 기능화 방향 및 개질 기술

나노텅스텐산의 적용 성능을 더욱 향상시키기 위해 일반적으로 다음과 같은 개질 기술이 결합됩니다.

- **도핑 변형** : 전도도와 광촉매 반응을 개선하기 위해 Cu, Ag, Zn, Fe 및 기타 이온을 도입합니다.
- **표면 코팅** : SiO<sub>2</sub> 로 코팅 TiO<sub>2</sub> 및 폴리머를 사용하여 계면 안정성과 분산력 향상을 달성합니다.
- **이중 구조 구축** : gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub> , MoS<sub>2</sub> 등 을 이용하여 Z 형 광촉매 이중접합을 구성합니다.
- **복합소재 집적** : 탄소소재, 그래핀 등을 이용하여 슈퍼커패시터 전극에 적합한 전도성 골격을 형성합니다.

### VI. 대표적인 산업 사례: CTIA 그룹의 나노텅스텐산 개발

CTIA 그룹은 고순도 텅스텐산 전구체 + 제어 가능한 결정화 + 표면 조절의 3-in-1 플랫폼을 구축하여 광촉매, 자가 세척 코팅, 전기 변색 유리 및 기타 분야에 적합한 나노텅스텐산 제품을 성공적으로 개발했습니다.

- 입자 크기는 수열처리-후처리 결합 경로를 사용하여 20~40nm 로 제어되었습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 전도성 필름을 위한 텅스텐산/PVP 하이브리드 소재 개발
- 안정적인 킬로그램 공급을 위해 연속적인 수열 반응 시스템을 구축합니다.
- 나노텅스텐산 제품은 독일, 일본, 동남아시아 등지의 연구기관과 대학으로 수출되었습니다.

## VII. 요약

나노텅스텐산의 제조 기술은 다양하고 그 메커니즘도 복잡하지만, 공정 변수의 정밀한 제어를 통해 입자 크기, 비표면적, 결정 형태 및 기능적 성능의 다차원적 최적화를 달성할 수 있습니다. 졸-겔법, 수열법, 마이크로에멀전법은 각각 고유한 장점을 가지고 있으며, 실험 연구부터 파일럿 개발까지 다양한 개발 단계에 적합합니다. 저탄소 제조 및 기능성 분말의 급속한 발전과 함께, 나노텅스텐산은 신소재 시스템에서 대체 불가능한 기능성 핵심 소재 중 하나가 될 것입니다.

### 3.4 CTIA GROUP 에서 제조한 텅스텐산 표준 제조 공정 분석

국내 텅스텐 기반 무기 화학 및 기능성 분말 소재 전문 기업인 CTIA 그룹은 오랫동안 텅스텐산 및 그 유도체의 체계적인 연구 개발과 대량 생산에 주력해 왔습니다. 기술 축적과 엔지니어링 실무를 통해 APT, WO<sub>3</sub>, 텅스텐 중간체 재생 및 기타 원료 경로를 아우르는 안정적이고 환경 친화적이며 효율적인 텅스텐산 표준 제조 공정을 완벽하게 구축했으며, 이는 광학 소재, 텅스텐염 중간체, 기능성 세라믹, 전자 페이스트 등 다양한 분야에 널리 사용됩니다.

이 섹션에서는 CTIA 그룹의 핵심 프로세스 시스템을 예로 들어 표준 준비 프로세스, 주요 제어 노드, 품질 관리 시스템 및 산업 관행 결과에 대해 자세히 설명합니다.

#### 1. 프로세스 시스템 개요

CTIA 그룹 텅스텐산 생산 시스템은 세 가지 유형의 제조 경로로 나눌 수 있습니다.

공정 경로	원자재의 출처	애플리케이션
경로 A	APT 산 가수분해	고순도 텅스텐산, 전자급 원료
B 경로	WO <sub>3</sub> 습식 전환법	재활용 소재 활용, 텅스텐 중간체
C 루트	나노텅스텐산 합성 방법	광촉매, 전기변색, 전자기능성 필름 소재

세 가지 경로는 서로 보완되며 폭넓은 적응성과 맞춤형 배송 역량을 갖춘 "표준 + 유연 + 맞춤형"의 통합 생산 모델을 구성합니다.

#### 2. APT 산 가수분해 경로 표준 공정

고순도 텅스텐산 및 벌크 일반용 텅스텐산 제품에 적용 가능  
주요 프로세스 단계:

1. 원료 전처리
  - APT 스크리닝, 수분 측정;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 불순물 검출(Fe, Si, Mo, P);
- 2. 산 가수분해 반응
  - 반응 매개변수:  $\text{HNO}_3$  농도 1.5 mol/L, 온도는 30 - 40° C 로 조절됨
  - 연속 교반 시간: 60~90 분
  - 교반 속도: 350 - 450 rpm
- 3. 침전 및 노화
  - 시스템 pH 는 1.8~2.0 으로 조정되었습니다.
  - 불순물이 옮겨지는 것을 방지하기 위해 숙성시간  $\geq 2$  시간;
  - 결정화 제어 : 동적 온도 제어 + 분자 통합 첨가제(특허 번호 출원됨)
- 4. 여과 및 세척
  - 다단계 여과
  - 3~5 회 세척, 최종 전도도  $\leq 15 \mu\text{S}/\text{cm}$ ;
  - 물 재이용 시스템은 모액산 재생 스테이션과 결합됩니다.
- 5. 건조 및 분쇄
  - 진공 및 공기 분사 건조(80° C, 16 시간)
  - 유동성을 보장하기 위한 가벼운 공기 흐름 분쇄 공정;
  - 완제품 입자 크기 D50 은 3~ 6  $\mu\text{m}$  로 제어 되고 구형도는  $>0.9$  입니다 .
- 6. 패키징 및 샘플링
  - 고도로 밀봉된 PE 백 포장 + 아르곤 밀봉 스테인리스 스틸 배럴;
  - 각 배치에서 3 개의 병을 무작위로 샘플링하여 물리적, 화학적 지수 테스트를 실시합니다.

### 3. $\text{WO}_3$ 전환 경로의 표준 공정

재생 텨스텐 분말의 회수 및 산업 중간체 제조 에 적용 가능

1.  $\text{WO}_3$  분말 분류 및 선별 ;
2. 산 용해 반응 ( $\text{HCl}$  또는  $\text{HNO}_3$  ,  $T = 70 - 85^\circ \text{C}$ )
3. \*\* 텨스텐산을 침전시키기 위해 pH 를 조절합니다( $\text{pH} = 2 - 3$ ).
4. \*\*노화 + 폐쇄형 결정화 제어 기술(오리지널 모듈);
5. \*\* 여과, 세척 및 건조;
6. \*\*입자 크기, 잔류 염소, 텨스텐 함량 및 pH 안정성을 감지합니다.

참고사항: 이 회사는 텨스텐 미립분 회수 시스템을 사용하여  $\text{WO}_3$  슬래그 분말을 재활용하고 있으며, 연간 전환량은 최대 120 톤에 달하여 자원 활용도와 환경적 이점을 크게 개선하고 있습니다.

### 4. 나노텨스텐산 공정 시스템

고급 기능성 소재(스마트 윈도우 필름, 자가세척 세라믹 등) 에 적용 가능

- 핵심기술 : 저온수열+계면활성제 시너지제어+결정조절첨가제
- 다차원 첨가제를 사용하여 결정화 경로를 제어합니다(PEG-400, PVP 등).
- 입자 크기 제어: D50 20 - 50 nm, 비표면적 80 - 110  $\text{m}^2/\text{g}$ ;
- 결정 형태: 규칙적인 조각 또는 구형 입자;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 이후의 코팅, 혼합 및 로딩 공정과 호환 가능
- 폐쇄형 무진공 반응 장치는 광전자 재료의 청결성 요건을 충족하는 데 사용됩니다.

### 5. 품질 관리 시스템

CTIA 그룹은 원자재 보관부터 완제품 배송까지 주요 품질 관리 노드를 설정하여 전체 프로세스 품질 추적 시스템을 구현합니다.

테스트 항목	프로세스 단계	검출 빈도	장비
불순물 분석(ICP-MS)	원자재/중간체	각 배치	애질런트 7900
입자 크기 분포	완제품	각 배치	레이저 입도 분석기(Malvern)
결정 구조	일일 샘플링	XRD	브루커 D8
수분 함량/결정수	완제품	각 배치	TGA-Q500
유동성 및 체적 밀도	엔지니어링 검증	3 일/시간	홀 유량계

품질 관리 시스템은 ISO 9001:2015 를 포함하고 있으며, 제품은 EU RoHS/REACH 지침을 준수하고 전자 재료 데이터 라벨링 시스템(e-MSDS 아카이브)이 구축되었습니다.

### VI. 생산능력 및 시장 지원

- 생산라인 규모 : 반응라인 4 개 + 건조/제트밀링/포장라인 2 개
- 설계 용량 : 텅스텐산 제품 연간 생산량 : 500 톤(고순도, 기능성, 복합형 포함)
- 납품 용량 : 최소 주문량 1kg, 최대 월 공급 용량 40 톤, 고객 맞춤형 생산 능력 제공
- 수출 상황 : 독일, 인도, 일본, 말레이시아, 한국 등 15 개국 및 지역으로 제품이 수출되고 있습니다.
- 데이터 추적성 : 각 제품 배치에는 독립적인 테스트 보고서, 번호, 인증 번호 및 성분 추적 정보가 함께 제공됩니다.

### VII. 특징 및 장점 요약

장점	특징 증상
원자재 출처 관리	자체 APT 및 WO <sub>3</sub> 지원 원자재 시스템으로 안정적인 공급 보장
프로세스 표준화	전체 매개변수 옹고 + 지능형 계측기 피드백 제어
고객 적응성	입자 크기, 결정 형태, 코팅, 표면 개질 등 전체 프로세스가 조정 가능합니다.
강력한 규정 준수	MSDS, REACH, RoHS, ISO9001 등 인증 시스템 보유
환경 규정 준수	재활용수 재사용, 폐산 회수, 질소원 처리 등을 통해 친환경 폐쇄 루프를 실현합니다.

### 8. 요약

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA 그룹은 기술 데이터를 핵심으로, 제품 일관성을 목표로, 그리고 고객 다양성을 지향하는 선진 공정 시스템을 대표하는 기업입니다. 고순도, 효율성, 유연성, 그리고 친환경성을 갖춘 텅스텐산 제조 플랫폼을 구축함으로써, 국내외 고급 시장의 기능성 텅스텐 소재 수요를 충족할 뿐만 아니라, 텅스텐 자원의 고부가가치 활용 및 지속 가능한 개발을 위한 안정적인 지원을 제공합니다.

## Tungstic Acid Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

#### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ\text{C}$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

#### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu\text{m}$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$\text{Fe} \leq 10, \text{Na} \leq 5, \text{Si} \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$\text{SO}_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

#### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

#### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 제 4 장 텅스텐산의 특성 분석 기술 및 검출 방법

### 4.1 XRD 결정형 및 결정면 분석

X 선 회절(XRD)은 재료의 결정 구조와 상 조성을 분석하는 데 사용되는 핵심 기술입니다. 텅스텐산 재료의 연구 및 산업적 제조에서 XRD는 결정 형태(단사정계, 사방정계, 다형체 등)를 식별하는 데 사용될 뿐만 아니라, 다양한 조건에서 텅스텐산의 변형 거동, 결정 성장 방향, 그리고 불순물 도핑을 분석하는 데에도 도움이 될 수 있습니다.

텅스텐산의 구조는 물리화학적 특성과 밀접한 관련이 있으므로, 결정 분석은 제품 품질을 제어하고, 공정 규제를 안내하고, 하류 애플리케이션 성능을 최적화하는 데 있어 핵심 단계가 됩니다.

#### 1. 기술 원리 개요

XRD의 기본 원리는 브래그의 법칙에 기초합니다.

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

안에:

- $n$  은 회절 차수입니다.
- $\lambda$  는 입사 X 선 파장(일반적으로 1.5406 Å, Cu K $\alpha$ )입니다.
- $d$  는 면간 간격입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- $\theta \setminus \text{theta } \theta$  는 입사각/회절각입니다.

결정 시료에 X 선을 조사하면 서로 다른 결정면이 특정 각도에서 반사되어 회절 피크를 형성합니다. 세기와 각도의 관계를 기록함으로써 회절 패턴을 구축하여 결정의 종류와 방향을 결정할 수 있습니다.

## 2. 텅스텐산의 전형적인 결정 형태 및 XRD 특성

텅스텐산은 다양한 제조 방법 및 열처리 조건에서 다음과 같은 주요 결정 형태를 형성할 수 있습니다.

결정 형태	결정계	일반적인 조건	XRD 특성 피크 위치( $2\theta$ , Cu K $\alpha$ )
사방정계	$\alpha - \text{H}_2\text{WO}_4$	APT 산 가수분해 저온 침전	18.3°, 23.4°, 28.6°, 34.1°
단사정계	$\beta - \text{H}_2\text{WO}_4$	열 건조된 제품	22.8°, 24.2°, 29.7°, 36.3°
비정질	-	빠른 강수/냉각	XRD 스펙트럼에는 뚜렷한 날카로운 피크가 없으며 넓은 확산 대역만 있습니다.
준안정 다결정	비표준 구조	나노합성 경로	낮은 강도와 넓은 피크가 나타나며 표준 스펙트럼과 비교해야 합니다.

**참고사항 :** 텅스텐 수화물의 물 분자 수가 다르기 때문에 결정 구조가 약간 변하고 XRD 피크 위치가 약간 이동합니다.

## 3. 시료 준비 방법

고품질 XRD 데이터는 적절한 시료 전처리에 달려 있습니다. 텅스텐산 시료 전처리는 결정 변형 및 시료 응집을 방지하기 위해 특별한 주의가 필요합니다.

단계는 다음과 같습니다.

1. **건조 :** 텅스텐산 샘플을 60~80° C 에서 6~12 시간 동안 건조하여 자유수를 제거합니다.
2. **분쇄 :** 마노 유발로 가볍게 분쇄하여 입자 크기를 1~5  $\mu\text{m}$  이내로 조절합니다 .
3. **도포 :** 약 50mg 의 분말을 취하여 샘플 적재 탱크에 고르게 퍼 바릅니다. 표면은 구멍 없이 최대한 매끈해야 합니다.
4. **제어된 환경 :** 수화 구조를 분석하는 경우 구조적 변화를 피하기 위해 습도가 제어된 조건에서 빠르게 측정하는 것이 좋습니다.
5. **기타 요구 사항 :** 샘플에 자기적, 전도성 오염이나 표면 산화가 없는지 확인하세요.

## 4. 장치 매개변수 설정 및 스캐닝 전략

매개변수	추천값	설명하다
엑스선 소스	Cu K $\alpha$ ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ )	일반적인 파장
스캔 범위	$2\theta = 5^\circ - 80^\circ$	주요 피크 범위를 포괄합니다
스텝 길이	0.02°	속도와 해상도의 균형
스캔 속도	1~2° /분	최고의 모습을 그대로 유지하세요

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

작동 전압/전류	40kV / 30mA	표준 분석 모드
모델	0 - 20 스캔	샘플 표면을 정상적으로 유지하고 입사광을 고정합니다.

결정면의 선호 방향에 관심이 있다면 극점도나 리트벨트 분석을 추가로 사용하여 정량적 정보를 얻을 수 있습니다.

## V. 결과 분석 및 일반적인 사례

### 사례 1 : APT 산 가수분해를 통한 텅스텐산 시료 제조

- 샘플 프로세스:  $APT + HNO_3 \rightarrow H_2WO_4$  (저온 침전)
- XRD 스펙트럼은 사방정계  $H_2WO_4$ 에 해당하는  $18.3^\circ$ ,  $23.4^\circ$  및  $28.6^\circ$  에서 특징적인 피크를 보여줍니다 .
- 피크 모양은 날카롭고 불순물 피크가 없으며 결정 형태가 순수하여 반응이 완료되었고 결정 성장이 충분함을 나타냅니다.
- JCPDS 카드 #08-0450 과 비교됩니다.

### 사례 2: $WO_3$ 전환을 통한 텅스텐산 샘플 준비

- 공정 조건 :  $WO_3$  습식산가수분해 + 숙성 및 건조
- 스펙트럼에는  $22.8^\circ$ ,  $24.2^\circ$ ,  $29.7^\circ$  에 3 개의 피크가 있으며, 이는 단사정계  $H_2WO_4$ 로 추정됩니다 .
- 약한  $22.1^\circ$  피크가 동반되어 불완전하게 변환된  $WO_3$  잔류물이 있을 수 있습니다.

### 사례 3: 나노텅스텐산 샘플

- 수열법으로 제조됨;
- 피크 위치가 상당히 넓어 지고 주 피크 강도는 감소합니다.
- 입자 크기는 (Scherrer 공식) 약  $15\sim 25nm$  로 계산되었습니다.
- 결론: 준결정 상태의 나노- $H_2WO_4$ 입니다. 결정 형태는 유지되지만 크기 효과는 명백합니다.

## VI. 산업 응용 및 품질 판단 기준

CTIA 그룹은 XRD 를 텅스텐산 제품의 핵심 품질 관리 지표 중 하나로 사용하여 주로 다음 사항을 판단합니다.

- 결정 순도 : 목표 결정 형태(사방정계/단사정계 등)인지 확인합니다.
- 결정의 일관성 : 다양한 배치의 피크 위치와 강도를 비교합니다.
- 상대 결정성 : 주요 피크 면적을 통해 분말의 결정 품질을 분석합니다.
- 불순물 검출 : APT,  $WO_3$  또는 비대상 결정 오염 검출
- 입자 크기 추정 : 나노 크기의 텅스텐산 제품은 셰러 공식을 사용하여 입자 크기를 계산해야 합니다.

산업 표준에 따르면 결정 순도 요구 사항은  $\geq 95\%$ , 피크 위치 변화는  $\leq \pm 0.2^\circ$  이며, 2 차 결정상이 없어야 합격 제품 요건입니다.

## 4.2 FTIR 및 라만 분광학 연구

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

푸리에 변환 적외선 분광법(FTIR)과 라만 분광법(Raman)은 무기 물질의 화학 결합 특성, 작용기 존재 형태, 분자 대칭성 및 결정 구조를 분석하는 데 널리 사용되는 두 가지 상호 보완적인 분자 진동 분광법입니다. 텅스텐산( $H_2WO_4$ )과 그 유도체의 경우, 이 두 가지 분광법은 기본적인 W-O 결합, W=O 이중 결합 및 구조 단위의 진동 모드를 밝힐 뿐만 아니라 수화 상태, 중합도 및 도핑 효과를 결정하는 데에도 사용될 수 있습니다.

이 섹션에서는 실제 샘플 스펙트럼을 결합하여 텅스텐산 연구에서 FTIR과 라만의 작동 방법, 일반적인 특성 및 공학적 중요성에 대해 자세히 설명합니다.

## 1. 기본 원칙

### FTIR 원리

FTIR은 분자 진동에 의해 발생하는 적외선 흡수 현상에 기반합니다. 시료의 공유 결합이 신축 또는 굽힘 진동을 겪을 때, 쌍극자 모멘트가 변하면 특정 주파수의 적외선을 흡수하여 적외선 흡수 피크를 생성할 수 있습니다.

일반적으로 분석에 사용됨:

- 결합 유형: W-O, O-H, H-O-H;
- 산 이온의 말단 산소/브리징 산소 구조
- 수화 구조가 변화합니다.

### 라만 원리

라만 분광법은 산란 과정에서 분자에 의해 발생하는 편광도의 변화에 의존합니다. 단색 레이저 광이 분자에 조사되면 대부분의 빛은 탄성 산란(레이리 산란)되고, 작은 빛은 분자 진동으로 인해 비탄성 산란(라만 산란)됩니다.

적용 대상:

- 강한 대칭성을 갖는 무기 이온(예:  $[WO_6]$ )은 진동합니다.
- 결정 대칭 및 응력 상태 분석
- 폴리텅스텐과 같은 다핵 시스템).

FTIR과 라만은 정보 측면에서 상호 보완적입니다. FTIR은 쌍극자 변화에 더 민감한 반면, 라만은 대칭적 신축과 골격 진동에 더 민감합니다.

## 2. 샘플 준비 및 테스트 조건

### FTIR 샘플 준비:

방법	설명하다
KBr 정제법	시료를 건조 KBr 분말과 1:100의 비율로 혼합하여 펠릿 형태로 압축합니다. 중적외선 영역( $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ )에 적합합니다.
ATR 직접법	소량의 샘플이 ATR 결정에 직접 접촉하여 신속한 분석 및 표면 검출에 적합합니다.
기체상/용액 상태	일반적으로 텅스텐산은 열 안정성이 높고 용해도가 낮아 적합하지 않습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

테스트 권장 사항: 샘플링 볼륨 > 1mg, CO<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O 흡수를 방해하지 않도록 샘플을 건조하세요.

**라만 샘플 준비:**

방법	설명하다
분말법	건조된 샘플을 유리 슬라이드 위에 직접 퍼 바르고 바늘로 눌러줍니다.
레이저 소스	일반적으로 사용되는 532nm 또는 785nm 레이저(샘플 형광을 피하기 위해)
힘	샘플 연소나 광분해를 방지하기 위해 5~20mW 로 제어됨
통합 시간	10~30 초, 스캔 범위 100~1200cm <sup>-1</sup>

참고사항: 고출력은 열 드리프트를 쉽게 일으킬 수 있으며, 텅스텐산 수화물은 고에너지 여기 하에서 쉽게 물을 잃고 변성될 수 있습니다.

**3. 텅스텐산의 일반적인 FTIR 분광 특성**

**주요 흡수 섹션(KBr 정제를 예로 들면):**

파수 범위(cm <sup>-1</sup> )	진동 응답	특징
3400 - 3600	- OH 신축 진동	수화된 텅스텐산의 O-H 결합은 수화 정도를 반영할 수 있습니다.
1600 년 - 1650 년	H-O-H 가변각 진동	수화된 분자 사이의 수소 결합
890 - 970	W=O 말단 산소 스트레칭 진동	전형적인 강한 흡수, 강도는 W=O의 수와 관련됩니다.
700 - 850	W-O-W 브리지 산소 진동	이는 고분자 구조 및 결정 형태와 관련이 있습니다. 위치 이동은 결정 형태의 변화를 반영합니다.
<600	W-O 굽힘 및 흔들림 진동	구조적 골격은 종종 여러 개의 피크가 겹쳐져 있음

**스펙트럼 분석 예:**

- **샘플: APT 산 가수분해로 제조된 텅스텐산의 강한 피크가**  
890, 735 및 610 cm<sup>-1</sup>에 나타나며, 이는 전형적인 사방정계 H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>를 나타냅니다.
- **샘플: 건조 후 텅스텐 분말의 -OH 밴드가**  
현저히 약해지고 W=O 흡수가 증가하여 수화 구조가 감소되었음을 나타냅니다.
- **샘플: Cu가 도핑된 텅스텐산염의 W-O 피크 위치가**  
낮은 파수 방향으로 이동하여 구조적 확장과 격자 연화를 나타냅니다.

**4. 텅스텐산의 전형적인 라만 분광 특성**

폴리텅스텐산 및 헤테로폴리산 과 같은 폴리음이온계의 결정 구조와 중합도를 더욱 명확하게 구분할 수 있습니다 .

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

주요 기능 섹션:

파수 범위 (cm <sup>-1</sup> )	진동 응답	의미
850 - 1000	W=0 인장 진동	결정 구조 에서 말단 산소가 많을수록 피크가 강해집니다.
700 - 800	W - O - W 브리지 산소 진동	고분자 구조와 결정면 배열은 상당한 영향을 미친다
400 - 600	W-O 굽힘	결정질 골격 무결성 성능 영역
300 개 미만	격자 진동	주로 도핑 및 결정 결함 검출에 사용됨

일반적인 스펙트럼 비교:

- 나노팅스텐산 vs. 마이크로팅스텐산  
나노분말 피크 위치가 넓어져 격자 왜곡과 크기 효과가 크다는 것을 나타냅니다.
- 폴리머 메타팅스테이트 대 모노머 H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> 전자는 700~800cm<sup>-1</sup>에서 여러 개의 얇은 피크를 보이며, 이는 고차 구조(예: 케진 유형)를 나타냅니다.
- 다양한 열처리를 거친 텅스텐산 샘플의 경우, 스펙트럼 에서 W=0 피크가 날카로울수록 결정 질서가 향상됨을 나타냅니다.

5. FTIR 과 라만 상호 보완적 활용의 공학적 가치

응용 프로그램 대상	FTIR 기여	라만 기여
수분 수준 결정	O-H 및 H-O-H 영역의 변화를 명확히 합니다.	물에 민감하지 않음; 건조 분말에 적합
구조 유형 식별	W=0 및 W-O-W 결합 유형을 식별합니다.	중합도와 대칭성을 명확히 하세요
결정 형태 식별	제한된 용량	격자 변형 및 상 전이를 식별하는 데 도움이 될 수 있습니다.
불순물 검출	유기 잔류물에 민감함	도핑된 금속 산화물에 민감함

GROUP 의 생산 공정에서는 FTIR 을 사용하여 수화된 텅스텐산이 필요한 기준에 따라 건조되었는지 빠르게 확인하고, 라만 분석을 사용하여 결정 구조의 왜곡이나 불완전하게 반응한 원료 잔류물이 있는지 확인합니다.

VI. 일반적인 문제 및 예방 조치

질문	가능한 원인	제안된 작업
----	--------	--------

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

흡수 피크 테일링이 심각합니다(FTIR)	샘플에 물이 많이 포함되어 있고 배경이 불안정합니다.	건조 KBr 을 사용하여 완전히 건조하십시오.
라만 피크의 낮은 강도	레이저 출력이 너무 작거나 초점이 정확하지 않습니다.	여기 조건 및 초점 상태 확인
피크 위치 드리프트	온도 드리프트 또는 계측기 교정 문제	기기를 교정하고 일정한 온도 환경을 유지하세요
FTIR 은 결정 형태를 구별할 수 없습니다.	결정 대칭은 다음과 같습니다.	XRD 또는 라만과 결합하여 추가 확인

## VII. 요약

FTIR 과 라만 분광법은 텅스텐산의 분자 구조, 작용기 상태, 중합도, 결정도를 분석하는 데 중요한 도구입니다. 두 방법 모두 고유한 장점을 가지고 있으며, 이를 함께 사용하면 화학 결합부터 격자 구조까지 텅스텐산 시료의 다차원 분석을 달성할 수 있습니다. 표준 피크 위치 데이터베이스와 스펙트럼 비교 시스템을 구축함으로써 텅스텐산 소재의 연구 개발, 품질 관리 및 엔지니어링 최적화에 강력한 데이터 지원을 제공할 수 있습니다.

### 4.3 SEM/TEM 미세형태 관찰

텅스텐산( $H_2WO_4$ ) 은 복잡한 구조와 다양한 결정 형태를 가진 무기산입니다. 텅스텐산의 미세 형태는 재료 제조 공정 및 결정 성장 거동을 반영할 뿐만 아니라 촉매, 코팅, 전자, 에너지 변환 등의 응용 분야에서의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 따라서 주사전자현미경(SEM)과 투과전자현미경(TEM)을 이용한 텅스텐산 분말의 미세 형태 관찰 및 구조 분석은 기초 연구 및 산업 품질 관리에 필수적인 수단이 되었습니다.

이 섹션에서는 텅스텐산 샘플의 SEM 및 TEM의 작동 과정, 구조적 특성, 전형적인 이미지 및 특성화 값을 체계적으로 소개합니다.

#### 1. 기술 원리에 대한 간략한 설명

##### 주사전자현미경(SEM)

SEM 은 전자빔을 집속하고 2 차 전자 또는 후방산란 전자 신호를 검출하여 시료 표면을 스캔하여 시료의 표면 형태 이미지를 얻습니다. SEM의 분해능은 일반적으로 10nm 미만으로, 입자 크기, 형태, 응집 거동, 표면 거칠기 등의 정보를 관찰하는 데 적합합니다.

##### 투과전자현미경(TEM)

TEM 은 고에너지 전자빔을 시료에 투과시켜 형광판이나 CCD 에 이미지를 형성합니다. TEM의 분해능은 나노미터 이하 또는 피코미터 수준에 달하며, 격자 무늬, 원자 배열, 상 계면, 결합 및 나노결정 구조를 관찰할 수 있습니다.

#### 2. 시료 준비 방법

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### SEM 샘플 준비:

1. **샘플링** : 건조 텅스텐산 분말(약 5~10mg)을 칭량합니다.
2. **분산** : 소량의 에탄올을 첨가하고 초음파로 3~5 분간 분산시킵니다.
3. **샘플 로딩** : 분산액을 전도성 탄소 접착제 위에 떨어뜨린 후 낮은 온도에서 공기 건조하거나 진공 건조합니다.
4. **코팅(필요한 경우)** : 샘플의 전도도가 낮은 경우 전자빔 축적을 방지하기 위해 금이나 탄소 필름(두께 약 5~10nm)으로 코팅할 수 있습니다.

### TEM 샘플 준비:

1. **초음파 분산** : 분말을 에탄올로 분산시키고 10 분간 초음파 처리합니다.
2. **필름 떨어뜨리기** : 소량의 분산액을 구리망(탄소필름 지지대) 위에 떨어뜨립니다.
3. **건조** : 진공 상태에서 용매를 자연적으로 건조하거나 제거하는 것
4. **샘플 두께 요구 사항** : 입자 크기  $\leq 100$  nm가 선호되며, 초미분말은 TEM 관찰에 더 적합합니다.

### 3. SEM 특성화 내용 및 일반적인 이미지

텅스텐산 물질의 특성 분석에 SEM을 적용하는 일반적인 방법은 다음과 같습니다.

- **입자 형태**를 관찰합니다 : 바늘 모양, 조각 모양, 막대 모양, 덩어리 모양, 구형 등.
- **결정화도**를 확인합니다 . 결정성이 높은 샘플은 날카로운 모서리를 갖고, 결정성이 낮거나 비정질인 샘플은 흐릿한 표면을 갖습니다.
- **입자 크기 및 분포** 분석 : 이미지 분석 소프트웨어와 결합하여 입자 D50 및 분포 범위를 계산할 수 있습니다.
- **응집 및 기공 구조** 조사 : 샘플 표면적과 2차 입자 형태를 이해합니다.

예:

1. **텅스텐산 샘플의 APT 산 가수분해**
  - SEM 이미지는 규칙적인 짧은 막대 모양의 결정을 보여줍니다.
  - 평균 길이는 약  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  이고 너비는 약  $300 \sim 600\text{nm}$ 입니다.
  - 결정은 가장자리가 깨끗하고 표면이 매끄러워서 결정화가 잘 되었음을 나타냅니다.
2. **나노텅스텐산의 수열합성**
  - 직경이 약  $50 \sim 100\text{nm}$ 인 구형 입자가 다수 나타났다.
  - 일부 응집은 건조 과정과 관련이 있을 수 있습니다.
  - 다공성 표면 구조는 고배율 이미지에서 볼 수 있으며, 이는 촉매 반응을 위한 활성 부위를 형성하는 데 도움이 됩니다.
3. **WO<sub>3</sub>를 텅스텐으로 전환**
  - SEM은 층상 적층 구조를 보였다.
  - 표면은 거칠고, 입자들은 밀접하게 연결되어 있으며, 층을 이룬 응집 상태입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 주로 코팅재 전구체로 사용됩니다.

## TEM 구조 관찰 및 격자 분석

형태학적 관찰 외에도 TEM은 다음을 포함하여 고해상도 구조 및 결정 정보 분석에 더 중요합니다.

- 결정 결함 관찰;
- 면간 간격 측정;
- 수정 방향 판단;
- 불순물이나 코팅
- 선택 영역 전자 회절(SAED) 스펙트럼 분석.

### 일반적인 관찰 결과:

#### 1. 나노팅스텐산 결정 구조

- HRTEM 이미지는 명확한 격자 무늬를 보여줍니다.
- 측정된 면간 간격  $d = 0.378 \text{ nm}$ 는 사방정계상  $\text{H}_2\text{WO}_4$  (200) 평면과 일치합니다.
- 입자 크기는 약  $30 \sim 50 \text{ nm}$  이고 가장자리는 매끄러워서 입자가 규칙적임을 알 수 있습니다.

#### 2. 비정질 텅스텐산 나노클러스터

- 이미지에는 규칙적인 격자 무늬가 보이지 않으며, 무질서하고 확산된 윤곽으로 나타납니다.
- SAED 패턴은 확산된 링으로, 샘플이 비정질이거나 결정성이 낮음을 확인시켜 줍니다.

#### 3. 도핑된 텅스텐 결정의 관찰

- Cu 도핑 후 약간의 격자 변형이 관찰됩니다.
- 격자 변연부가 구부러지고 전위 결함이 국부적으로 나타납니다.
- 도핑을 통해 전기적 특성을 조절하기 위한 미시적 기초를 제공합니다.

## 5. 이미지 분석 및 정량 측정

ImageJ와 같은 이미지 처리 소프트웨어와 결합하면 SEM/TEM 이미지를 다음과 같이 분석할 수 있습니다.

프로젝트 분석	내용물
입자 크기 측정	수동 또는 자동으로 모서리를 추출하고 D50, D90 등의 매개변수를 생성합니다.
모양 인식	입자의 모양을 구형, 편평형 등으로 분류합니다.
분포 통계	입자 크기 분포 균일성의 히스토그램 분석
면간 간격	격자 $d$ 값을 계산하고 XRD와 결합하여 결정면 특성을 확인합니다.
결함 식별	결함, 구멍 및 가장자리 불완전성의 식별 및 계산

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 데이터는 품질 관리, 프로세스 최적화, 제품 성능 예측에도 활용될 수 있습니다.

## 6. 오류 소스 및 일반적인 문제

질문	원인 분석	제안된 솔루션
심각한 재회	분산이 불충분하거나 건조가 통제되지 않음	분산제를 첨가하고 초음파 시간을 최적화하세요
흐릿한 이미지	전하 축적 또는 초점 오류	표면 코팅 또는 작업 거리 조정
TEM 이미지가 선명하지 않습니다	샘플 두께가 너무 큼	입자 크기 감소 또는 원심 분류
격자무늬 코스팅	샘플 드리프트 및 진동 효과	낮은 온도 또는 안정적인 샘플 플랫폼을 사용하세요

## 7. 텅스텐산 연구의 공학적 응용

CTIA 그룹의 R&D 및 품질 관리 시스템에서는 SEM과 TEM이 다음과 같은 시나리오에서 널리 사용됩니다.

- **제조 공정 의 효과를 평가합니다 .** 즉, 다양한 산 가수분해 경로, 온도, pH가 결정 형태에 미치는 영향을 평가합니다.
- **산 개발 :** 코팅 두께 및 나노결정 코어 분포 관찰
- **파괴 메커니즘 분석 :** 노화, 소결 등으로 인한 결정 균열 및 기공 변화
- **보조 입자 크기 분류 공정 설계 :** 레이저 입자 크기 분석과 연계하여 전체 입자 크기 범위 감지를 달성합니다.

또한, 형태와 결정 형태에 대한 협력적 분석(예: XRD+SEM+TEM)은 고순도 텅스텐산이 하류 고급 응용 분야의 요구 사항을 충족할 수 있는지 여부를 확인하는 중요한 수단입니다.

## 8. 요약

SEM과 TEM 기술은 텅스텐산 소재의 미세 구조 분석에 강력한 도구적 지원을 제공합니다. 전자는 표면 형태와 입자 특성에 중점을 두는 반면, 후자는 내부 구조와 격자 정보에 중점을 둡니다. 두 기술을 상호 보완적으로 활용함으로써 제조 공정 및 품질 관리를 최적화할 수 있을 뿐만 아니라, 에너지 소재, 광전자 소자, 기능성 코팅 등 분야에서 텅스텐산의 고성능 개발을 위한 견고한 형태학적 기반을 제공할 수 있습니다.

### 4.4 TG-DSC 열분석

TG(열중량 분석)와 DSC(시차주사 열량계)는 텅스텐산의 열적 거동을 연구하는 핵심 분석 기법입니다. 텅스텐산( $H_2WO_4$ )은 높은 수화 특성, 열에 민감한 결정 변형, 그리고 고온 조건에 대한 민감성으로 인해 TG-DSC를 이용한 포괄적인 연구에 특히 적합합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이 섹션에서는 TG-DSC의 기본 원리, 시료 거동, 열분해 경로, 매개변수 해석, 공정 설계 및 품질 관리에서의 실제 응용 프로그램을 자세히 소개합니다.

## 1. 기술 원리 개요

### TG 원리

TG 기술은 프로그램된 온도(또는 일정한 온도) 조건에서 샘플의 질량 변화를 측정하여 물질의 분해, 산화, 휘발 또는 탈착을 분석합니다.

텅스텐산은 가열하는 동안 여러 단계의 질량 손실 과정을 거치는데, 이는 주로 물의 방출과 산화 상태의 변화와 관련이 있습니다.

### DSC 원리

DSC는 가열/냉각 중 시료가 흡수하거나 방출하는 열의 변화를 측정합니다. TG와 함께 사용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있습니다.

- 탈수 반응이 흡열반응인지 발열반응인지;
- 결정 변형의 시작 및 최대 온도
- 텅스텐산 분해 생성물의 형성 온도 및 열 안정성 범위.

TG와 DSC를 결합하면 열적 거동의 "정량적 변화"를 알 수 있을 뿐만 아니라, 그 "반응 메커니즘"도 밝혀낼 수 있습니다.

## 2. 샘플 준비 및 테스트 조건

### 샘플 준비 팁:

- 시료 종류 : 건조텅스텐산 분말(순도  $\geq 99\%$ , 입자 크기  $1 - 10 \mu m$ )
- 샘플 질량 : 약  $5 \sim 10mg$ , 도가니에 고르게 퍼 놓음;
- 도가니 종류 : 백금 도가니(고순도, 무오염), 세라믹 도가니(경제적이고 내열성)
- 환경 분위기 :
  - 질소(불활성 분위기) 또는 공기(산화 환경)
  - 가스 유량  $50 - 100 mL/분$
- 가열 속도 :  $5 - 10^\circ C/분$ (반응 강도에 따라 조정 가능)
- 온도 범위 : 일반적으로 실온에서  $800^\circ C$  까지이며, 일부 샘플은  $1000^\circ C$  까지 확장될 수 있습니다.

## 3. 텅스텐산의 전형적인 TG-DSC 거동 및 분해 경로

### 단계 구분 및 행동 설명:

온도 범위	질량 변화(TG)	열 거동(DSC)	반응 설명
$30 \sim 120^\circ C$	약간의 질량 손실 ( $2 \sim 3\%$ )	흡열 변동	물리적으로 흡착된 물의 탈착
$120 \sim 250^\circ C$	품질 $5 \sim 10\%$ 저하	완만한 흡열 피크	부분적인 구조적 물 방출
$250 \sim 400^\circ C$	품질 $10 \sim 20\%$ 저하	명확한 흡열 피크	주요 결정수는 완전히 방출되며, $H_2WO_4 \rightarrow WO_3 \cdot xH_2O$
$400 \sim 600^\circ C$	품질 변동이 적거나 안정적	열 방출이 느림	결정변환, 격자재배열

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

600 도	품질은 기본적으로 뚜렷한 열 효과 없음 변함없이 유지됩니다	안정한 삼산화텨스텐(WO <sub>3</sub> ) 구조 형성
-------	-------------------------------------	------------------------------------

참고사항: 완전히 수화된 H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> → WO<sub>3</sub>의 이론적인 질량 손실은 약 18~21%이며, 이를 사용하여 샘플의 수화 정도를 추정할 수 있습니다.

#### 4. TG-DSC 곡선 분석 예

##### 샘플 1 : APT 산 가수분해로 얻은 텨스텐산

- TG 곡선 :
  - 초기 중량 감소 구간은 50~150° C 로 전체 샘플 질량의 2~3%를 차지합니다.
  - 주요 탈수 단계는 150~350° C 였으며, 누적 중량 손실은 약 14.5%였습니다.
- DSC 곡선 :
  - 150~170° C 에서 명확한 흡열 피크가 나타나며, 이는 결정수가 제거됨을 의미합니다.
  - 360° C 이후에는 작은 발열 변동이 발생하는데, 이는 격자 재배열로 추정됩니다.
- 결론 : 샘플은 H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> · xH<sub>2</sub>O 의 고도로 수화된 형태로, 약 400~600° C 에서 WO<sub>3</sub>로 안정적으로 변환됩니다.

##### 샘플 2: 미세결정 나노텨스텐 산

- TG : 전체적인 체중감량 분포는 비교적 균일하며, 주요 체중감량 구간은 80~250° C 이다.
- DSC : 넓은 흡열 피크는 수화 구조가 비교적 무질서하다는 것을 나타냅니다.
- 참고사항 : 입자가 작고 표면적이 크기 때문에 구조수와 표면수를 구분하기 어렵습니다.

#### 5. 열분해 반응 메커니즘 연구

TG-DSC 데이터는 다음과 같은 반응 공정 모델을 수립하는 데 사용할 수 있습니다.

##### 1. 물리적 흡착 수분 탈착 :

$H_2WO_4 \cdot xH_2O \rightarrow H_2WO_4 + xH_2O \uparrow$   
흡열 과정이므로 품질이 천천히 저하됩니다.

##### 2. 결정수 제거 및 격자 재 배열 :

$H_2WO_4 \rightarrow WO_3 \cdot yH_2O + H_2O \uparrow$

##### 3. 최종 탈수 및 WO<sub>3</sub> 형성 :

$WO_3 \cdot yH_2O \rightarrow WO_3 + yH_2O \uparrow$

이 과정은 모델 피팅(예: Coats-Redfern, Ozawa-Flynn-Wall)을 통해 동역학적으로 분석하여 활성화 에너지 E<sub>a</sub>, 반응 차수 n 및 기타 열분해 동역학 매개변수를 얻을 수 있습니다.

#### VI. 산업 응용 및 공학적 의의

CTIA GROUP 텨스텐산 시리즈 제품의 생산 및 품질 관리 시스템에서 TG-DSC 는 주로 다음 용도로 사용됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **제품 의 수화 상태를 확인합니다 .** 중량 감소 곡선을 기반으로 수화 구조와 저장 안정성을 추론합니다.
- **건조 온도 창을 설정** 하여 과열로 인한 결정 손상이나 조기 반응을 방지합니다.
- **열처리 공정 최적화 :** WO<sub>3</sub> 열 환원 및 텅스텐산 소성 온도 제어 등
- **스크리닝 재료 적합성 :** 다양한 하류 응용 분야(슬러리, 전극 재료 등)에 맞게 전처리 온도를 조정합니다.

예를 들어, 코팅 텅스텐 슬러리를 생산하는 경우, 일정량의 구조수를 유지하고 결합 및 전도성 특성을 향상시키기 위해 소성 온도가 400° C를 넘지 않아야 합니다.

### 7. 예방 조치 및 오류 제어

질문	가능한 원인	제안된 작업
무중력 곡선 플랫폼이 불안정합니다	샘플 습도가 제어되지 않거나 분말이 균일하지 않습니다.	샘플을 건조하고 분쇄를 반복합니다.
DSC 기준선 드리프트	기기의 열 균형이 부족합니다	빈 샘플을 예열하고 0 으로 재설정합니다.
질량 손실이 이론값을 초과함	유기 불순물 또는 부작용	순도 향상, DSC 기준물질 추가
반복성이 낮음	불균일한 샘플링	샘플링 볼륨을 늘리고 혼합 균일성을 개선합니다.

### 8. 요약

TG-DSC 열분석은 텅스텐산의 열 안정성, 분해 경로, 결정 변형 및 수분 함량을 평가하는 핵심 도구입니다. TG-DSC 열분석을 통해 제공되는 품질 및 열 효과에 대한 시너지 정보는 원료 분석, 공정 최적화, 열처리 공정 설정 및 제품 안전성 평가 등 다양한 분야에 활용될 수 있습니다. 표준 곡선 및 열 중량 감소 데이터베이스 구축은 텅스텐산의 수명 주기 전반에 걸친 품질 관리에 중요한 전략적 가치를 지닙니다.

### 4.5 XPS 표면 원소 원자가 분석

X선 광전자 분광법(XPS)은 비파괴적이고 원소 선택성이 높으며 민감한 표면 분석 기술입니다. 재료 표면에서 여기된 광전자의 운동 에너지를 측정하고 결합 에너지를 추론하여 각 원소의 존재, 화학적 상태 및 원자가 변화를 식별합니다. 텅스텐산(H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>) 및 그 유도체 시스템에서 XPS는 주로 텅스텐의 화학적 원자가 상태(예: W<sup>6+</sup>, W<sup>5+</sup>), 산소의 결합 형태(O<sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>, 구조수 등), 불순물 이온의 상태(예: Cu<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> 도핑) 및 표면 개질 효과를 분석하는 데 사용됩니다.

이 섹션에서는 XPS의 이론적 기초, 샘플 준비, 피크 모양 분석 및 실제 응용 프로그램을 자세히 소개하고 텅스텐산 물질 분석에서 중국 텅스텐 인텔리전스의 전형적인 데이터를 사용하여 이를 설명합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. XPS 기술 원리 개요

X 선이 시료 표면에 조사되면, 물질 내 원자의 내부 궤도에 있는 전자가 광자 에너지를 흡수하여 튀어나와 광전자가 될 수 있습니다. 이들의 운동 에너지(KE)와 결합 에너지(BE)의 관계는 다음과 같습니다.

$$BE = h\nu - KE - \phi$$

안에:

- $h\nu$  는 입사 X 선(일반적으로 Al K $\alpha$  선, 1486.6 eV)의 광자 에너지입니다.
- $\phi$  는 광전자 분석기의 일함수이다.
- BE는 결합 에너지로, 전자와 원자핵 사이의 결합 강도를 의미하며, 원소의 종류와 화학적 환경의 영향을 받습니다.

다양한 원소, 다양한 결합가 상태, 다양한 화학적 환경은 특정 결합 에너지 피크 위치와 위성 피크 특성을 보입니다.

### 2. 샘플 준비 및 테스트 매개 변수

샘플 요구 사항:

상태	요청 설명
건조 상태	구조적 물의 증발로 인해 진공 시스템에 영향을 미치지 않도록 분말은 완전히 건조되어야 합니다.
균일한 입자	두꺼운 층 차폐 효과를 방지하기 위해 권장되는 입자 크기는 $\leq 10 \mu m$ 입니다.
휘발성 물질 없음	침전성 유기 잔류물이나 저온 탈착 생성물이 포함되지 않습니다.
샘플 로딩	전도성 테이프나 특수 샘플 슬롯에 분말을 고르게 눌러 압축한 후 표면을 평평하게 만듭니다.

테스트 매개변수:

프로젝트	권장 설정
광원	알 카(Al K $\alpha$ ) (1486.6eV)
해결	고해상도 모드(0.1 eV/단계)
스캔 영역	0 - 1200 eV(전체 스펙트럼), W4f/O1s 집중
제약 환경	고진공( $10^{-9}$ mbar 수준)
중화 시스템	전하 축적을 억제하기 위한 저에너지 전자빔 중화

### 3. 텅스텐산의 주요 원소의 피크 위치 및 원자가 상태 표시

#### 1. W 요소(W4f 영역)

W  $6^+$ 는 텅스텐산에서 가장 흔한 원자가 상태이며, XPS 스펙트럼은 일반적으로 35-40 eV 영역에서 두 개의 명확한 주요 피크를 보여줍니다.

길	피크 위치 범위(eV)	설명하다
W 4f $7/2$	35.5 - 36.0	주요 피크, 더 높은 강도
W 4f $5/2$	37.5 - 38.0	약 2.1 eV 간격의 서브 피크

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 순수한  $H_2WO_4$  : 집중된 피크 위치를 갖는 두 개의 대칭 피크를 보여  $W^{6+}$ 가 단일 원자 상태를 가지고 있음을 나타냅니다 .
- 도핑된 샘플 :  $W^{5+}$  또는  $W^{4+}$  성분이 있는 경우,  $W 4f_{7/2}$ 는 34.0~35.0 eV 사이에 솔더 또는 추가 피크를 보입니다.

## 2. O 원소(O1s 영역)

O 1s 스펙트럼은 서로 다른 화학 환경의 산소 원자에 해당하는 세 가지 공통 피크로 나눌 수 있습니다.

피크 위치(eV)	분배하다	화학적 환경
530.0 - 530.5	격자 O	격자 산소(W=O, W-O-W)
531.5 - 532.0	표면 OH	수산기 또는 흡착수
532.5 - 533.5	$H_2O$ 분자/탄산염	물 또는 환경 오염원

O1s 스펙트럼의 강도 비율의 변화는 샘플의 수화 상태, 표면 수산기 밀도, 청결 수준과 같은 정보를 반영할 수 있습니다.

## 3. 불순물 및 도핑 원소(Na, Cu, P 등)

- Na 1s: 약 1071 eV;
- Cu 2p: 932.5 - 935.5 eV(Cu<sup>+</sup>는 Cu<sup>2+</sup>와 구별 가능) ;
- Cl 2p: 198 - 200 eV(Cl<sup>-</sup> 잔류물 식별)
- Mo 3d: 229 - 233 eV ( 불순물 Mo 도핑으로 확인 ) .

불순물 함량, 도핑 수준, 화학적 상태는 전체 스펙트럼 스캐닝을 통해 함께 얻을 수 있습니다.

## 4. 데이터 해석 및 그래프 분석 사례

### 샘플 A: $H_2WO_4$ 의 표준 APT 산 가수분해

- W 4f 스펙트럼: 35.8 eV 및 37.9 eV 에서 이중 피크가 나타나  $W^{6+}$  특성과 일치합니다.
- O 1s 스펙트럼: 530.4 eV 에서 주 피크(격자 산소), 532.0 eV 에서 2 차 피크(표면 OH);
- $5+$  또는 금속 텅스텐이 검출되었습니다.

### 샘플 B: 텅스텐산 샘플을 제조하기 위한 $WO_3$ 습식법

- O 1s 스펙트럼의 피크는 비교적 강하다.
- 533 eV 에서 약간의 피크가 보이는데, 이는 흡착된 물인 것으로 추정됩니다.
- XRD 는 결정 형태가 약간 이상적이지 않음을 보여주었고, XPS 는 표면 활동성이 높고 수화도가 강함을 확인했습니다.

### 샘플 C: Cu 도핑 텅스텐산염

- Cu 2p<sub>3/2</sub> 는 933.2 eV 에 위치하며 위성 피크가 있는데, 이는 Cu<sup>2+</sup>로 확인됩니다.
- W 4f 피크 위치는 0.3 eV 만큼 낮은 에너지로 이동하여 격자 전자의 재분배를 나타냅니다.
- O1s 스펙트럼 폭이 증가하여 하이드록실 환경의 변화를 나타냅니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5. 정량 분석 및 화학계량 계산

원소 원자 비율 분석은 피크 면적과 감도 계수를 사용하여 수행할 수 있습니다.

$$\text{원자비} = \frac{IB}{SB} \frac{IA}{SA}$$

여기서 III는 피크 면적이고 SSS는 원소 감도 계수입니다.

예를 들어:

- W:O 원자비가 1:4에 가까우면 표준  $H_2WO_4$  구조로 확인 가능하다.
- 표면 O 함량이 높으면 ( $O/W > 4.5$ ), 구조수나 수산기가 포함되어 있을 수 있습니다.
- 도핑 후 W 피크에 낮은 원자가 피크가 나타나면 도핑 전달 전자의 수를 추정할 수 있습니다.

### 6. 표면 개질/코팅 평가

XPS는 다음과 같은 텅스텐산 표면 코팅 개질 재료를 연구하는 데 특히 적합합니다.

- **SiO<sub>2</sub>로 코팅된 텅스텐산**: Si 2p 피크를 관찰할 수 있음(약 102 - 104 eV);
- **유기 리간드 변형**: C 1s 스펙트럼은 C-O, C=O 및 COOH와 같은 화학 결합 피크를 보여줍니다.
- **그래핀이 함유된 텅스텐산**: sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> 성분 분해능 향상 및 C 1s에서의 D/G 비율 변화

심층 박리 또는 Ar<sup>+</sup> 이온 에칭을 통해.

### 7. CTIA GROUP의 XPS 데이터 활용 사례

그룹의 고급 텅스텐산 소재 개발에 있어 XPS는 다음 분야에서 널리 사용됩니다.

애플리케이션	분석 목표	성과의 예
고순도 텅스텐산 개발	W <sup>6+</sup> 의 순도 및 불순물 유형을 확인하세요.	W <sup>6+</sup> 비율 > 99%, W <sup>5+</sup> 어깨 없음
도핑 소재 디자인	도핑 가치 및 분포 균일성 결정	Cu <sup>2+</sup> 및 Ag <sup>+</sup> 도핑 샘플의 원자가 상태의 명확한 제어
코팅 기능층 평가	표면 Si/P/N 및 기타 원소 결합 방법	필름 형성 텅스텐산 샘플 표면의 C/O/P 비율은 명확합니다.
프로세스 품질 평가	세척 후 Cl <sup>-</sup> 및 Na <sup>+</sup>	O1s의 흡착피크가 약화되어 청정도가 기준을 충족합니다.

### 8. 요약

XPS 기술은 텅스텐산의 표면 구조, 화학적 상태, 도핑 메커니즘 및 계면 반응에 대한 핵심 정보 지원을 제공합니다. W 4f, O 1s 및 불순물 스펙트럼의 심층 분석을 통해 구조 검증부터 정량 분석, 결합 식별부터 박막 형성 제어까지 광범위한 특성 분석을 수행할 수 있습니다. 고성능 텅스텐산 기반 재료 시스템 구축, 산업 제품의 품질

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

안정성 확보, 그리고 텅스텐 화학 시스템 연구 지원에 있어 XPS 기술은 대체할 수 없는 중요한 가치를 지닙니다.

#### 4.6 비표면적 및 기공구조(BET 분석)

비표면적과 기공 구조는 텅스텐산 분말 재료의 물리적 특성과 응용 효과를 결정하는 중요한 지표이며, 특히 광촉매, 전극 재료, 가스 센서, 흡착제 및 표면 반응 시스템에서 중요합니다. BET (Brunauer-Emmett-Teller) 방법은 재료의 표면적을 평가하는 표준 방법입니다. BJH(Barrett-Joyner-Halenda) 또는 DFT(Density Functional Theory) 및 기타 분석 방법과 결합하여 재료의 기공 크기 분포, 기공 부피 및 기공 유형을 더욱 심층적으로 분석할 수 있습니다.

이 섹션에서는 BET 기술 원리, 샘플 테스트, 텅스텐산의 일반적인 데이터 분석 및 엔지니어링 응용 시나리오를 자세히 소개하여 독자가 텅스텐산 재료의 비표면적과 미세구조 조절 및 기능적 성능 간의 관계를 완전히 이해하는 데 도움을 줍니다.

##### 1. 기술 원리 개요

BET 법은 물리적 흡착 원리에 기반합니다. 저온에서 고체 표면에 불활성 기체(예: 질소)의 단분자층을 형성하는 과정을 통해 시료의 단위 질량당 흡착될 수 있는 기체의 총량을 측정하여 물질의 비표면적( $m^2/g$ )을 계산합니다.

핵심 방정식:

$$\frac{1}{v[(P_0/P) - 1]} = \frac{c - 1}{v_m c} \cdot \frac{P}{P_0} + \frac{1}{v_m c}$$

안에:

- $v_v$  : 흡착된 가스 부피
- $v_{mv} - v_m$  : 단층 흡착에 필요한 부피;
- $P/P_0$  : 상대 압력;
- $c$  : 상수, 흡착 잠재력을 반영함.
- 비표면적 SSS:  $v_{mv} - v_m$  과 흡착된 가스 분자의 단면적에서 계산됩니다.

기공 부피, 기공 크기 분포 및 기공 구조 유형도 등은 흡착/탈착 곡선을 통해 얻을 수 있습니다.

##### 2. 샘플 준비 및 테스트 프로세스

샘플 요구 사항:

상태	필요하다
건조 상태	구조수 및 흡착수 없음, 수분함량 <0.5%
분말 입자 크기	큰 입자가 탈착 속도에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 $1 \sim 20 \mu m$ 가 적합합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

품질 요구 사항	≥100mg(일반 분석), ≥300mg(기공 크기 분포)
휘발성 불순물 없음	흡착 동작을 방해하는 유기 잔류물을 피하십시오.

**전처리 과정:**

- **탈기** : 120~200° C 에서 4 시간 이상 진공 처리하여 가스와 수분을 제거합니다.
- **냉각** : 실온으로 냉각한 후 흡착 시험을 실시합니다.
- **분석 가스** : 일반적으로 사용되는 질소(N<sub>2</sub>) , 측정온도는 77K(액체질소 환경)입니다.
- **상대 압력 범위** : 일반적으로 BET 피팅의 경우 P/P<sub>0</sub> = 0.05 - 0.3 사이로 설정됩니다.

**3. 데이터 분석: 비표면적, 기공 직경, 기공 부피**

**1. 비표면적(BET 표면적)**

	BET 면적 범위(m <sup>2</sup> /g)	특징
마이크론 크기의 H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>	2 - 10	표면 거칠기가 낮음, 주로 입자 간 간격
나노 H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>	20~60 세	입자 크기가 작을수록 외부 표면적이 더 넓어집니다.
기공 구조 제어 샘플	60 - 150	미세다공성/중다공성 구조의 출현은 흡착 및 확산에 도움이 됩니다.

**2. 기공 구조**

- **총 기공 부피** : 샘플 1g 당 포함될 수 있는 가스의 부피(cm<sup>3</sup>/g), 일반적으로 0.01~0.5 범위입니다.
- **기공 크기 분포** :
  - 미세기공 (<2 nm)
  - 중공성 (2 - 50 nm);
  - 거대공극 (>50 nm)
- **일반적으로 사용되는 모델** :
  - BJH 방법은 중공 분석에 적합합니다.
  - DFT 방법은 미세다공성 구조의 고해상도 분석에 적합합니다.
  - NLDFT 는 복잡한 혼합 기공 시스템에 적합합니다.

**3. 흡착/탈착 등온식 (IUPAC 분류)**

유형	특징	적용 가능한 지침
I 형	미세 다공성 물질, 빠르게 포화됨	이는 해당 물질이 고에너지 미세다공성 구조를 가지고 있음을 나타냅니다.
II/III 형	비다공성 재료	입자 크기가 크고 기공률이 낮은 거친 분말에서 더 흔함

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

4형	히스테리시스 루프의 존재는 중공 구조를 나타냅니다.	기능성 텅스텐 분말에서 가장 흔히 발견됨
V/VI형	특수 표면 흡착 거동	이는 표면 활성 중심이 고르지 않거나 여러 개로 분포되어 있음을 나타냅니다.

#### 4. 대표적인 텅스텐산 시료의 BET 분석 사례

##### 샘플 1 : APT 산 가수분해 텅스텐산(마이크로미터 수준)

- 비표면적: 5.8 m<sup>2</sup>/g;
- 기공 부피: 0.023 cm<sup>3</sup>/g;
- 흡착곡선은 II 형으로, 주로 입자 사이의 물리적 축적 기공을 나타냅니다.

##### 샘플 2: 나노 H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>의 수열 합성

- 비표면적: 42.6 m<sup>2</sup>/g;
- 기공 크기 분포 중심: 3.8 nm(일반적인 중기 공)
- 히스테리시스 루프의 존재는 열린 중공 채널의 존재를 나타냅니다.
- 이온 교환, 전기 촉매 및 에너지 저장에 적합합니다.

##### 샘플 3: PVP 템플릿을 이용한 중공성 텅스텐산 합성

- 비표면적: 92.1 m<sup>2</sup>/g;
- 총 기공 부피: 0.261 cm<sup>3</sup>/g;
- 평균 기공 크기: 8.7nm
- 이는 샘플이 높은 다공성과 좋은 확산 능력을 가지고 있음을 나타냅니다.

#### 5. 구조-성능 관계 분석

BET 결과는 텅스텐산 물질의 특성과 밀접한 관련이 있으며, 다음과 같은 상관관계가 일반적입니다.

구조적 특징	해당 응용 프로그램 성능
높은 비표면적	광촉매 및 전기화학 반응 속도 향상
메조포어 분포	가스 확산 및 전해질 침투를 용이하게 합니다.
좁은 기공 크기 분포	반응 선택성 및 안정성 향상
높은 기공 부피	흡착제, 에너지 저장 소재 및 지속 방출 플랫폼에 적합

예를 들어:

- **광촉매** : 높은 비표면적의 나노텅스텐산은 더 많은 표면 활성 부위를 제공하고 산화환원 효율을 개선할 수 있습니다.
- **전자 슬러리** : 균일한 기공 크기를 갖는 재료는 필름 형성 및 밀도 제어에 도움이 됩니다.
- **가스에 민감한 소재** : 중공 구조는 가스 분자 포집 능력과 반응 속도를 향상시킵니다.

#### VI. CTIA GROUP BET 테스트 표준 및 데이터 적용

CTIA GROUP 텅스텐산 분말 엔지니어링 시스템에서는 BET 분석이 다음과 같은 측면에서 사용됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

응용 프로그램 시나리오	테스트 목표	일반적인 매개변수 범위
프로세스 최적화	건조/결정화/기공형성 효과 확인	공정 전후 비표면적 차이가 10% 이상
완제품 수락	배치 안정성 제어	배치 차이 < ± 5% (비표면적)
애플리케이션 매칭	광촉매 및 전극 소재에 맞게 맞춤 제작	표면적 ≥40 m <sup>2</sup> /g, 기공 크기 3 - 10 nm
재료 선별	나노스케일 제품 품질 등급	고부가가치 시장을 위한 고표면적 세그먼트

모든 테스트는 ISO 9277 표준에 따라 수행되며, 데이터는 CTIA GROUP의 "기능성 분말 품질 데이터베이스"에 자동으로 보관됩니다.

## VII. 요약

BET 비표면적 및 기공 구조 분석은 텅스텐산 소재의 내부 미세 구조를 밝히고, 소재의 반응성을 평가하며, 적용 경로를 선정하는 데 중요한 수단입니다. 기공 크기 제어 전략과 비표면적 제어 기술을 결합하면 고성능 에너지 저장, 분자 인식, 광전자 소자와 같은 최첨단 소재에서 텅스텐산 분말의 성능을 정확하게 최적화할 수 있습니다. 이는 텅스텐 화합물의 고부가가치 활용 및 엔지니어링 기능화 연구를 촉진하는 데 중요한 전략적 의의를 지닙니다.

### 4.7 전기적 및 광학적 특성 시험 방법

텅스텐산(H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>) 과 그 유도체는 기능성 무기 재료이며 광전자, 센서, 전기변색 소자, 에너지 소재 및 기타 분야에서 널리 사용됩니다. 이러한 재료의 성능은 재료의 전기적 및 광학적 특성에 달려 있으며, 이는 화학 조성뿐만 아니라 재료의 결정 형태, 미세 구조, 불순물 함량 및 전자 상태와도 밀접한 관련이 있습니다.

이 섹션에서는 텅스텐산의 전기적, 광학적 특성을 측정하기 위해 일반적으로 사용되는 시험 방법을 체계적으로 소개합니다. 여기에는 시험 원리, 장비 요구 사항, 데이터 해석 및 텅스텐산의 기능 평가와 응용 프로그램 개발에 있어서 이러한 시험 방법의 공학적 중요성이 포함됩니다.

#### 1. 전기적 성능 시험 방법

##### 1. 전도도 시험(저항법/4 탐침법)

적용 대상:

- 텅스텐산 분말 정제;
- 텅스텐산 필름;
- 도핑된 반도체 텅스텐산.

테스트 방법:

- 4 탐침 법 :
  - 플레이크 샘플에 적합합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 전압-전류 응답은 4 개의 바늘을 동시에 샘플 표면에 접촉시켜 측정합니다.
- 접촉 저항이 측정 오차에 미치는 영향을 줄입니다.
- 2 탐침/표면 저항 측정기 :
  - 일반적으로 분말 정제의 저항을 대략적으로 측정하는 데 사용됩니다.

일반적인 매개변수 범위:

재료 유형	전도도 범위(S/m)	특징
순수 텅스텐산(비전도성)	$10^{-8} - 10^{-12}$	전기 절연 재료, 주로 유전체 용도
도핑된 텅스텐산(Cu, Na 등)	$10^{-6} - 10^{-2}$	전기변색소자에 적용 가능한 반도체 동작

## 2. 유전특성 시험(LCR 측정)

교류 전기장 하에서 텅스텐산 물질의 분극 능력과 에너지 손실을 평가하는 데 사용됩니다.

측정 매개변수:

- 유전율( $\epsilon'$ )
- 유전 손실 계수( $\tan \delta$ )

테스트 조건:

- 주파수 범위: 100Hz - 1MHz
- 온도 조절: 실온 ~ 150° C
- 샘플 형태 : 압착정 또는 필름 형태, 전극 도금(은 페이스트/금 필름)이 필요합니다.

## 3. 전기변색 시험

텅스텐산은 전기변색 특성을 가지고 있어 전압을 인가하면 색이 변할 수 있습니다. 스마트 유리, 조광 장치 등에 자주 사용됩니다.

테스트 방법:

- ITO 전도성 유리 + 텅스텐산 필름 + 전해질 + 상대 전극을 준비합니다.
- 인가 전압(예:  $\pm 1V$ )
- 색상 변화 시간, 반응 속도, 반복 사이클 안정성을 기록합니다.
- UV-Vis 스펙트럼은 빛 투과율의 변화를 기록하는 데 사용할 수 있습니다.

주요 지표:

- 빛의 가변 투과율 차이( $\Delta T$ )
- 착색 효율( $\eta$ ,  $cm^2/C$ )
- 자전거 안정성(50~1000 회 이상)

## 4. 전기화학 테스트(CV/EIS/GCD)

이 기술은 슈퍼커패시터, 배터리, 촉매에서 텅스텐산의 전기화학적 특성을 연구하는 데 적합합니다.

방법	테스트 내용	설명하다
----	--------	------

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CV(순환 전압 전류법)	산화환원반응, 정전용량 특성	곡선 사각형이 표준적일수록 이상적인 커패시터에 더 가깝습니다.
EIS(전기화학 임피던스 분광법)	전하 전달 저항 및 정전용량 피팅	나이퀴스트 플롯 피팅 등가 회로
GCD(정전류 충전 및 방전)	비정전용량, 충전 및 방전 효율	에너지 저장 성능 및 안정성 평가

## 2. 광학 성능 시험 방법

### 1. UV-Vis 흡수 스펙트럼

이는 텅스텐산이 다양한 파장의 빛에 대해 흡수하는 능력을 측정하고 광학적 밴드갭과 광 응답 범위를 분석하는 데 사용됩니다.

#### 실험 대상:

- 텅스텐산 분말(고체 확산 반사 모드);
- 텅스텐산 박막(투과/흡수 측정);

#### 장비 구성:

- 자외선-가시광선 분광광도계;
- 적분구 부착품(샘플 분산용)
- 테스트 파장 범위: 200 - 800 nm.

#### 분석 내용:

- 주요 흡수 피크 위치(300 - 450 nm)
- 흡광도 강도(Abs);
- 흡수선 및 광학적 밴드갭 추정 (Tauc 방법):

$$(\alpha h \nu)^n = A(h \nu - E_g) \quad (\alpha h \nu)^n = A(h \nu - E_g) \quad (\alpha h \nu)^n = A(h \nu - E_g)$$

- $n=2$ : 직접 밴드갭;  $n=1/2$ : 간접 밴드갭.

#### 일반적인 밴드갭 값:

- $H_2WO_4$ : 2.6 - 2.9 eV (청자색광 흡수);
- 도핑된 텅스텐산: 1.8~2.4eV 까지 조정 가능.

### 2. 광발광 분광법(PL)

텅스텐 물질에서 광유도 전자-홀 쌍의 재결합 거동을 분석하여 밴드 구조와 결합 상태를 반영합니다.

#### 테스트 매개변수:

- 여기 파장: 325nm, 405nm 등.
- 측정 대역: 350 - 700 nm;
- 주된 초점은 발광 피크 위치, 강도 및 형광 수명입니다.

#### 일반적인 현상:

- 방출 피크는 450~550nm 범위에 있으며, 강도는 격자 결함이나 도핑에 따라 달라집니다.
- 도핑은 비방사성 재결합을 억제하고 발광 효율을 향상시킬 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. 광촉매 성능 시험

자외선/가시광선 조사 하에서 텅스텐산이 오염 물질이나 염료를 분해하는 능력을 평가합니다.

#### 테스트 방법:

- 반응 시스템(메틸오렌지/로다민 B/MB 등)을 구축합니다.
- 광원(Xe 램프, LED, 시뮬레이션된 햇빛)을 설정합니다.
- 정기적으로 샘플을 채취하여 흡수도 변화를 측정합니다.
- 분해 속도와 걸보기 속도 상수(k)를 계산합니다.

$$C_t/C_0 = e^{-kt} \quad C_t / C_0 = e^{-kt}$$

#### 적용 가능한 변형 텅스텐산 시스템:

- 나노텅스텐산, Cu 도핑 텅스텐산, 텅스텐산/그래핀 복합소재 등

### 3. CTIA GROUP의 대표적인 테스트 케이스 및 인덱스 요구사항

프로젝트	시험 방법	일반적인 데이터	엔지니어링 응용 프로그램
전도도	4 탐침법	$1.2 \times 10^{-6}$ S/m (Cu 도핑)	스마트 윈도우 컨트롤, 전극 필름
전기변색	$\Delta T = 36\%$ , $\eta = 48$ $\text{cm}^2/\text{C}$	빠른 착색, 1000 회 이상 반복	광변색 유리, 전자 제어 코팅
자외선 흡수	$\lambda = 412$ nm, $E_g \approx 2.8$ eV	높은 흡수율	광촉매 물질
PL 발광	피크: 485nm	보통의	광전자 소자
광촉매작용	MB 90% 분해/40 분	녹색 환경 보호 분야 확대	하수처리, 공기정화

### 4. 데이터 해석 및 주의사항

질문	이유	제안
전도도를 측정할 수 없습니다	샘플이 너무 절연성이 높거나 접촉 저항이 높습니다.	고감도 LCR 미터 또는 압력 소결을 사용하십시오.
밴드갭 평가가 높다	흡수단 흐름 측정	적분구를 이용한 반사/산란 보정
CV 곡선 왜곡	전극 접촉이 불량하거나 스캔 속도가 너무 빠릅니다.	코팅 균일성 및 전해질 유형 최적화
PL 피크 강도가 너무 강하거나 오프셋됨	불순물 결합 또는 도핑으로 인해 발생	XPS 또는 라만 분석과 결합

### V. 요약

텅스텐산의 전기적 및 광학적 특성은 그 응용 잠재력의 핵심적인 표현입니다. 다양한 전기적 및 분광학적 기법의 조합을 통해 텅스텐산의 전자 구조, 밴드갭 특성, 전도성 및 기능적 응답 특성을 완전히 규명하여 고성능 광전자 소자, 전기변색 시스템, 광촉매 반응 플랫폼 등의 구축에 신뢰할 수 있는 데이터 기반을 제공합니다. 통일된 평가 방법 체계를 구축하면 기능성 소재 분야에서 텅스텐산 소재의 표준화된 응용 및 산업화 촉진에 기여할 것입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

1

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## Tungstic Acid Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

#### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ\text{C}$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

#### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu\text{m}$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$\text{Fe} \leq 10, \text{Na} \leq 5, \text{Si} \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$\text{SO}_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

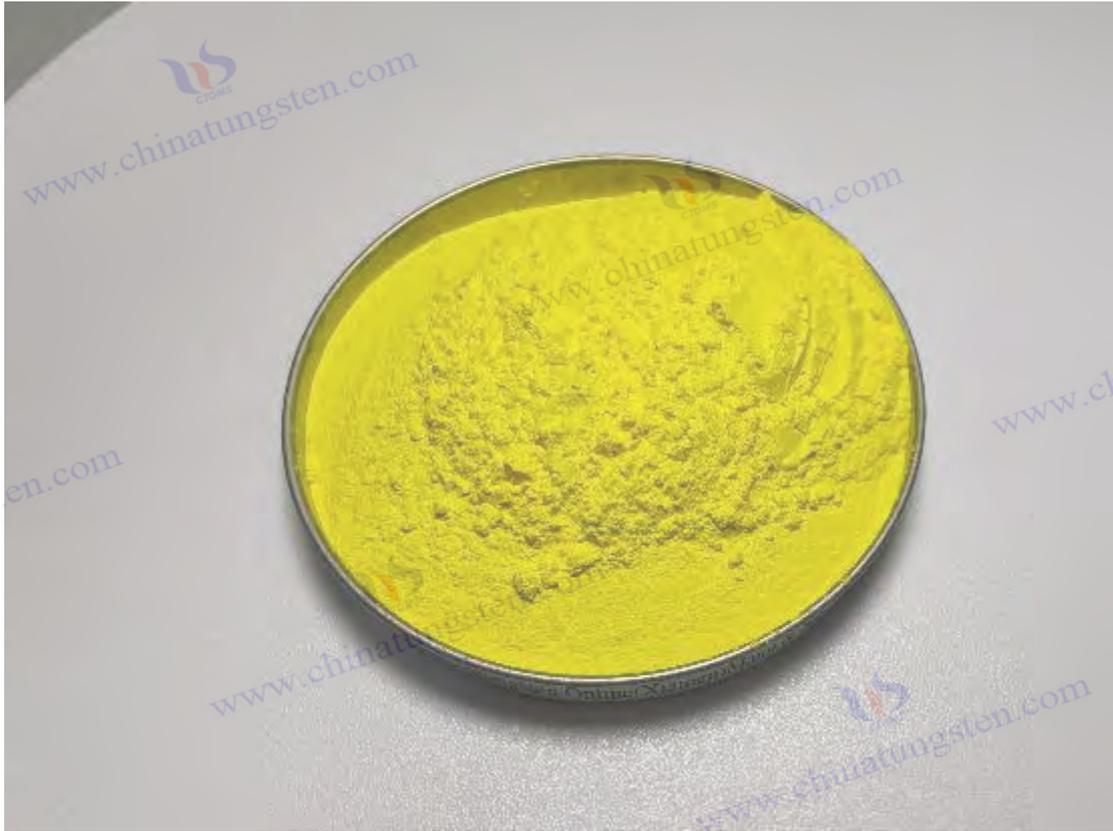
#### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

#### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 5 장: 텨스텐산의 주요 유도체 및 중간체

### 5.1 메타텨스텐산염 (나트륨, 암모늄, 칼슘, 구리 등)

파라텨스텐산염 은 메타텨스텐 산염 이온( $[W_{12}O_{42}]^{10-}$ ) 을 핵심으로 하는 텨스텐산염 화합물로 , 텨스텐 화학에서 가장 중요한 중간체 중 하나입니다. 파라텨스텐산염은 텨스텐 산화물, 텨스텐산 유도체, 금속 텨스텐 재료 제조의 핵심 전구체일 뿐만 아니라, 전자 세라믹, 화학 촉매, 전기 도금, 기능성 재료 등에도 널리 사용됩니다. 나트륨 메타텨스텐산 ( $Na_{10} [W_{12}O_{42}] \cdot xH_2O$ ), 암모늄 메타텨스텐산 (APT,  $(NH_4)_{10} [W_{12}O_{42}] \cdot xH_2O$ ), 칼슘 메타텨스텐산 ( $Ca_5 [W_{12}O_{42}] \cdot xH_2O$ ), 구리 메타텨스텐산 ( $Cu_3 [W_{12}O_{42}] \cdot xH_2O$ ) 등과 같이 서로 다른 양이온을 갖는 메타텨스텐산은 구조, 용해도 및 열적 거동이 다르기 때문에 다양한 공학적 및 과학적 연구 가치를 보여줍니다.

#### 1. 구조 및 분류

메타텨스텐산 의 기본 골격 은 도데카텨스텐 산소 테트라데센 음이온( $[W_{12}O_{42}]^{10-}$ ) 으로, 모서리 또는 꼭짓점을 공유하는 12 개의  $\{WO_6\}$  팔면체 로 구성된 비교적 안정적인 고분자 구조입니다 . 이 구조는 높은 대칭성을 가지며, pH와 이온 강도를 조절함으로써 다양한 양이온과 안정적인 결정을 형성할 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이름	화학식	결정 구조	양이온 유형
텅스텐산나트륨	$\text{Na}_{10} [\text{W}_{12} \text{O}_{42}] \cdot x\text{H}_2\text{O}$	단사정계/직교형	1 가 금속 양이온
부분 텅스텐산 암모늄 (APT)	$(\text{NH}_4)_{10} [\text{W}_{12} \text{O}_{42}] \cdot x\text{H}_2\text{O}$	단사정계/육각형	암모늄
텅스텐산칼슘	$\text{Ca}_5 [\text{W}_{12} \text{O}_{42}] \cdot x\text{H}_2\text{O}$	육각형/사방정계	2 가 알칼리토금속
텅스텐산구리	$\text{Cu}_3 [\text{W}_{12} \text{O}_{42}] \cdot x\text{H}_2\text{O}$	사중주	전이 금속 양이온

## 2. 제조 방법

### 1. 산성화 결정화법 (APT 제조)

- 텅스텐 산 나트륨 용액 ( $\text{Na}_2\text{WO}_4$ )
- 산성화제:  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 를 사용하여 pH를 3.0~3.5로 조정합니다.
- $\text{NH}_4\text{Cl}$  또는  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 를 추가합니다.
- 60~80° C 의 조절된 온도에서 1~2 시간 동안 반응시켜 결정화가 천천히 진행되도록 합니다.
- 세척 및 건조 후 APT 결정을 얻습니다.



### 2. 이온교환법 ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ 도핑)

- APT 는 전구체로 사용되며  $\text{CaCl}_2$  또는  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  용액과 반응합니다.
- 이온 교환을 촉진하기 위해 pH를 4~6 사이로 조절합니다.
- $\text{Ca}_5 [\text{W}_{12} \text{O}_{42}]$  또는  $\text{Cu}_3 [\text{W}_{12} \text{O}_{42}]$  유형의 메타텅스텐산을 얻을 수 있습니다.
- 최종 제품은 결정 형태의 무결성을 유지하기 위해 세척 및 건조되어 보관됩니다.

### 3. 수열 자기조립법 (다형성 조절)

- 높은 결정성과 특수한 형태를 갖는 메타텅스텐산염을 제조하는 데 적합합니다.
- 100~180° C 에서의 수열 반응
- 입자 크기와 형태는 PVP, PEG 와 같은 첨가제를 통해 조절될 수 있습니다.

## 3. 성능 특성

프로젝트	설명
수용성	$\text{Na}_2\text{WO}_4$ 보다 낮아 침전 분리에 유리하다.
열 안정성	600~800° C 에서 삼산화텅스텐으로 분해될 수 있습니다.
결정 형태학	APT 는 바늘 모양의 결정이고, 나트륨은 기둥 모양의 결정이며, 칼슘은 대부분 조각 모양입니다.
텅스텐 함량	(72.6 %) 보다 높습니다.
pH 반응성	산성 조건 하에서 안정적으로 침전될 수 있으며 pH>7 에서 $\text{WO}_4^{2-}$ 로 쉽게 가수분해됩니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열분해를 통해 균일한 입자 크기를 갖는  $WO_3$  를 얻은 후, 추가로 환원시켜 W 분말을 얻습니다. 따라서 W 분말의 열적 거동은 후속 텅스텐 분말의 품질을 결정합니다.

#### 4. 대표자 소개

##### 1. 텅스텐산 암모늄(APT)

- 가장 일반적이고 생산량이 가장 많습니다.
- 금속 텅스텐 분말, 텅스텐 카바이드, 텅스텐 합금, 텅스텐산염 등의 원료로 사용됩니다.
- 공정 제어 표준은 성숙되어 있고 적응성이 매우 뛰어납니다.

##### 2. 텅스텐산나트륨

- 촉매 전구체에 사용되는 텅스텐 중간체로서;
- 중성 pH에서 장기 안정성
- 일부 저온 고체 상태 반응 합성 물질에 사용될 수 있습니다.

##### 3. 텅스텐산칼슘

- 무연 세라믹 및 유전체 재료에 적용됨
- 우수한 단열성과 열 안정성을 가지고 있습니다.
- 소결 중에  $CaWO_4$ 와 같은 프레임워크 구조가 형성될 수 있습니다.

##### 4. 텅스텐산구리

- 촉매 및 항균 소재로 사용 가능
- 구리 도핑은 전기 전도도와 활성산소 생성 능력을 향상시킵니다.
- 이는 광촉매/전기촉매 복합 시스템을 구성하는 연구에 사용됩니다.

#### 5. 엔지니어링 응용 및 개발 전망

적용 분야	설명하다
텅스텐 분말/텅스텐 카바이드 제조	APT 열분해 + 수소환원이 가장 주류를 이루는 텅스텐 분말 제조 경로입니다.
광학 세라믹	텅스텐산칼슘은 발광기관 및 레이저 결정에 사용됩니다.
광촉매	구리 텅스텐산염 및 기타 재료는 이종접합을 구성하고 촉매 효율을 개선하는 데 사용됩니다.
전기화학 재료	슈퍼커패시터 및 배터리 전극용 도핑된 메타텅스텐산염 시스템
녹색 탈색제	$TiO_2$ 와 함께 사용하여 UV 탈색 촉매 시스템을 구축 할 수 있습니다.

CTIA 그룹의 메타텅스텐산 사업에서 APT 제품은 일련번호화, 표준화, 전자 레벨 제어 등의 장점을 갖추고 있으며, 연간 생산량은 1,000 톤을 넘어 일본, 한국, 독일 등 세계 각국에 성공적으로 수출되었습니다. 앞으로 그린 텅스텐 추출 기술을 접목하여 메타텅스텐산의 새로운 결정 형태와 다중 도핑 방향을 개발할 계획입니다.

#### VI. 요약

메타텅스테이트는 명확한 구조, 우수한 성능, 그리고 폭넓은 응용 분야를 갖춘 텅스텐산 시스템의 중요한 중간체입니다. 대표 물질인 APT는 글로벌 텅스텐 산업 체인에서 필수적인 원료 플랫폼으로 자리 잡았습니다. 구조 조절, 이온 치환, 형태

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공학 등을 통해 메타텨스테인의 응용 범위는 확대될 수 있으며, 광학 기능, 에너지, 촉매 등 새로운 분야로 확장될 수 있어 매우 높은 물질적 및 산업적 전략적 가치를 지닙니다.

## 5.2 텨스테인 착물( 폴리텨스테인, 이소폴리산 )

폴리옥소텨스테인" 이라고 합니다. (PWT)" 또는 보다 일반적으로 " 이중다산 " (HPA) ) 이 화합물은 명확한 분자 구조, 제어 가능한 구성 요소 구성 및 풍부한 전자적 특성을 가지고 있으며 무기 기능 재료에서 매우 대표적인 초분자 시스템 계열입니다 .

광기능성 분자, 양성자 전도체 로 활용될 뿐만 아니라 의학, 센싱, 항균 및 분자 인식 분야에서 다양한 응용 가능성을 보여줍니다. 본 섹션에서는 텨스테인 착물의 핵심 구조, 합성 경로, 물리화학적 특성, 그리고 CTIA 그룹 연구 및 제품 개발에 있어서의 전략적 중요성을 심층적으로 분석합니다.

### 1. 기본 구조 단위 및 분류 체계

#### 1. 폴리텨스테인 코어 구조

기본 구성 요소: {WO<sub>6</sub>} 팔면체는

모서리 또는 모서리 공유를 통해 모여서 다음과 같은 구조를 형성합니다.

- 이소폴리옥소텨스테인염 : [W<sub>6</sub>O<sub>19</sub>]<sup>2-</sup> 와 같은 텨스테인염 으로부터 자체 조립된 [W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>]<sup>8-</sup> ;
- 헤테로폴리산 ( 헤테로폴리옥소텨스테인염 ) : 이중핵 원자(P, Si, Ge 등)는 다음과 같이 구조 의 중심에 도입됩니다 .
  - 케인 구조: [PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>]<sup>3-</sup>, [SiW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>]<sup>4-</sup> 와 같은 구조 .
  - <sub>2</sub> ]<sup>6-</sup> 와 같은 구조 .
  - Cr(OH)<sub>6</sub>W<sub>6</sub>O<sub>18</sub> ]<sup>3-</sup> 와 같은 구조 .

#### 2. 분류체계

유형	구조적 핵심	일반식	특징
당량산	순수 텨스테인 구조	[W <sub>n</sub> O <sub>3n+1</sub> ] <sup>m-</sup>	구조는 비교적 대칭적이며 물에 쉽게 용해됩니다.
헤테로폴리산	이중핵 중심 + 텨스테인 산화물 클러스터	[XW <sub>n</sub> O <sub>m</sub> ] <sup>p-</sup>	강한 산미와 다양한 효능
유기-무기 하이브리드	폴리산 + 유기 양이온	[PWT]@R <sup>+</sup>	조정 가능한 표면 친화력
도핑된 폴리산	Mo, V, Ti 등을 소개합니다.	[PW <sub>10</sub> V <sub>2</sub> O <sub>40</sub> ] <sup>5-</sup>	확장된 산화환원 성능

### 2. 합성 경로 및 제어 전략

폴리텨스테인염 의 합성은 일반적으로 산 침전 자체 조립을 통해 달성됩니다 . 그 핵심은 pH 조절, 이온 환경 조절 및 조정 이온의 도입에 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. 헤테로폴리산 합성 ( 케 긴형 )

- 원료 :  $\text{Na}_2\text{WO}_4$  ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ( 또는 규산 나트륨 )
- pH 1~2 로 산성화
- 60~80° C 로 가열하고 4~6 시간 동안 계속 저어줍니다.
- 냉각, 결정화, 재결정 및 정제;
- 케긴 구조  $\text{H}_3 [\text{PW}_{12}\text{O}_{40}] \cdot x\text{H}_2\text{O}$  또는 그 염이 얻어진다.

### 2. 도핑/기능화 경로

- V, Mo, Ti 등의 옥시산염을 첨가하여 상승적으로 반응시킨다.
- 또는 후처리 단계에서 유기아민 및 유기인과 같은 개질제를 도입합니다.
- 수열처리, 이온 교환, 인터페이스 자체 조립 및 기타 기술은 구조를 안정화하는 데 도움이 됩니다.

### 3. 유기폴리산복합체의 합성

- 4 차 암모늄염과 작은 유기 분자를 이용한 PWT 복합화
- 코팅, 전기화학 시스템 등에 사용하기 위해 물-오일 2 상 제어 시스템을 구축할 수 있습니다.

### 3. 물리적 및 화학적 특성

자연	설명하다
강한 산도	$\text{H}_3 [\text{PW}_{12}\text{O}_{40}]$ 및 기타 물질은 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 보다 양성자 방출 능력이 더 강합니다.
높은 안정성	최대 400° C 의 열 안정성을 갖춘 케 긴형 구조
가역적 산화환원	전하 저장 및 촉매 작용에 사용할 수 있는 $\text{W}^{6+} \leftrightarrow \text{W}^{5+}$ 전환
조절 가능한 용해도	, 히스타민 등 의 염의 용해 거동 조절 가능
구조는 다음과 같이 특징지어질 수 있습니다.	IR, UV, NMR, XRD, ESI-MS 및 기타 수단을 통한 종합 분석

### 4. 대표적인 폴리텅스텐산염 의 소개

#### 1. 케 긴형 헤테로폴리산

- 분자식:  $[\text{PW}_{12}\text{O}_{40}]^{3-}$  ,  $[\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}]^{4-}$  ;
- 강한 산도와 안정된 구조;
- 에스테르화, 산화, 페놀 수산화 및 기타 반응을 촉진하는 데 사용됩니다.
- 이는 텅스텐 촉매 산업의 주요 플랫폼 분자입니다.

#### 2. 도슨형 폴리산

- 분자식:  $[\text{P}_2\text{W}_{18}\text{O}_{62}]^{6-}$  ;
- 더 많은 코어 수와 더 큰 공간 구조
- 이 소재는 에너지 저장 장치와 자가치유 코팅 분야에서 독특한 특성을 가지고 있습니다.

#### 3. 도핑된 폴리산

- 예:  $[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]^{4-}$  ,  $[\text{SiW}_9\text{Mo}_3\text{O}_{40}]^{7-}$  ;
- 산화환원전위의 변화

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 광전 활성 창을 확장하고 촉매 선택성을 향상시킵니다.

#### 4. 유기폴리산복합체

- 이들 대부분은 4차 암모늄염 및 유기인산염 변형형이다.
- 폴리산의 분산성과 계면 친화성을 변화시킵니다.
- 생촉매, 항균 멤브레인, 유연 장치에 적용됩니다.

#### 5. 지원 방향 및 프론티어 진행 상황

적용 분야	특징	일반적인 예
산 촉매	에스테르화, 가수분해, 축합	H <sub>3</sub> [ PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> ]를 균일 촉매로 사용
광촉매작용	가시광선 반응, 전자 전달	0 ] 및 TiO <sub>2</sub> 에 의한 염료의 복합 촉매 분해
전기변색 재료	가역 W <sup>6+</sup> / W <sup>5+</sup> 변환	스마트 유리 및 전기변색 필름용
슈퍼커패시터	빠른 전자 저장, 이온 확산	탄소 소재에 담지된 도슨형 V-도핑 폴리산
생물학적 항균제	세균막을 파괴하고 산화물을 방출합니다.	의료용 접촉재료 코팅용 유기 PWT
분자 인식 및 감지	금속 배위, 양성자 반응	폴리산은 이온 선택성 전극과 센서 인터페이스를 구성합니다.

#### VI. CTIA 그룹 연구 레이아웃 및 제품 확장

주로 다음을 포함하는 폴리산 텨스텐 소재 에 대한 파일럿 개발 플랫폼을 구축했습니다 .

- 헤테로폴리산 물질 라이브러리 구축 ( Keggin /Dawson 구조 50+)
- 유기폴리산 복합막 소재(막전극/광촉매막) 개발
- 폴리산 촉매(액체 촉매/고정화 담체)의 상용화
- 에너지/광학 세라믹에서 도핑된 PWT 의 시험 검증.

앞으로는 바나듐-몰리브덴 공동 도핑, 응집 유도 방출(AIE), 생리활성 폴리산 분야를 더욱 확대하여 기능 구조에서 소자 플랫폼까지 포괄적인 혁신을 달성할 것입니다.

#### VII. 요약

텨스텐산염 화학에서 텨스텐산염 착물은 기초 연구에서 매우 높은 학문적 가치를 가질 뿐만 아니라, 산 촉매, 전자 거동 및 분자 인식 특성은 촉매, 전기화학, 에너지 및 기능성 복합 시스템에서 광범위한 전망을 제시합니다. 구조 제어 합성, 도핑 조절 및 계면 복합화를 통해 텨스텐산염 착물은 미래 기능성 재료 시스템의 중요한 부분이 될 것입니다.

#### 5.3 유기 텨스텐산 에스테르 및 유기 복합체

유기텨스텐 에스테르와 유기텨스텐 착물은 텨스텐산 화학 분야에서 중요한 확장 형태이며, 유기-무기 하이브리드 시스템에 속합니다. 이 화합물들은 유기 작용기와 텨스텐산 또는 텨스테이트 의 배위, 에스테르화, 결합 등을 통해 안정적인 분자 구조를 형성하며 , 우수한 용해도, 작용기 및 조절 가능한 구조적 특성을 가지고 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

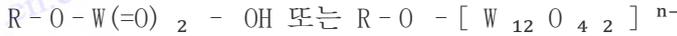
녹색 화학, 균일 촉매, 유기 금속 재료의 지속적인 발전으로 유기 텨스텐 에스테르와 텨스텐산 유기 복합체는 촉매, 기능성 코팅, 생물 의학, 전기 화학, 광반응성 재료 분야에서 점차 고유한 장점을 입증했으며 CTIA 그룹의 고부가가치 텨스텐 화합물 연구 개발 시스템의 핵심 방향이 되었습니다.

## 1. 정의 및 기본 구조

### 1. 텨스텐 에스테르

유기 텨스텐산 에스테르는 텨스텐산( $H_2WO_4$ ) 또는 텨스텐산을 유기 알코올(예: 알코올, 페놀, 알릴알코올 등)과 에스테르화하여 형성된 유기 텨스텐 화합물을 말합니다. 기본 구조는 일반적으로  $W=O$  와  $W-O-R$  ( $R$  은 유기기 ) 결합으로 구성됩니다.

개략적 공식:



### 2. 유기 텨스텐 착물

유기 텨스텐 착물은 텨스텐과 배위 그룹(아민, 카르복실산, 포스폰산, 유기 아민 염, 유기 리간드 등)을 함유하는 작은 유기 분자에 의해 형성된 배위 구조를 보다 광범위하게 지칭하며, 이는 단핵, 이핵 또는 다핵일 수 있다.

구조적 안정성과 전자적 행동은 유기 리간드에 의해 조절될 수 있으며, 때로는  $W-C$  또는  $W-N$  직접 결합을 포함합니다.

## 2. 합성 방법

### 1. 에스테르화 반응 방법

- 텨스텐산 또는 텨스텐산염이 산의 공급원으로 사용됩니다.
- 알코올(예: 에탄올, 페놀, 노난올 )과 반응합니다.
- 산성 또는 루이스 산 촉매 작용 하에서;
- 낮은 온도에서 중간 온도 조건( $30\sim 90^\circ C$ )
- 일반적으로 사용되는 용매: 알코올, 자가분해 시스템, 디클로로메탄.

반응 예시:



### 2. 공침 착화법

- 텨스텐 소스(예: APT,  $Na_2WO_4$  ) 와 유기 리간드(EDTA, 구연산, 티오우레아 등) 용액
- pH 를  $5\sim 9$  범위로 조절합니다.
- 수열반응 또는 상압반응;
- 유기 리간드에 의해 안정적으로 캡슐화된 텨스텐산 복합체를 형성할 수 있습니다.

### 3. 고체상 첨가법/용매열 조절법

- 종종 유기-무기 하이브리드 소재를 구성하는 데 사용됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 템플릿과 계면활성제를 사용하여 제품 입자 크기와 분산성을 제어합니다.
- 이는 종종 유기 텨스텐/금속 복합 나노복합소재를 구성하는 데 사용됩니다.

### 3. 대표자 및 구조적 특징

유형	분자식/구조 설명	특징
디에틸텨스테인	$(EtO)_2WO_2$	투명하고 유성 액체로 알코올에 쉽게 녹습니다.
페놀 텨스테인	$(PhO)_2WO_2$	열 안정성을 향상시키기 위해 방향족 고리를 포함합니다.
알코올아민 복합 텨스테인	$[WO_2(HL)_2] (L \text{ 은 알코올아민임 })$	안정한 단핵복합체 구조로 용액 측매에 적합
W-PAA	텨스텐-폴리아크릴산 복합물	우수한 필름형성성으로 기능성 필름에 사용
쉬프 기반 텨스텐 복합체	W=N 결합 구조를 포함합니다	우수한 광응답성과 자기적 특성

### 4. 성능 특성

프로젝트	성능 설명
용해도	대부분은 알코올, 에테르, 유기용매에 용해됩니다.
열 안정성	에스테르 결합 안정성은 적당하며 $\leq 200^\circ C$ 환경에 적합합니다.
전기적 특성	특정 전자 이동 능력과 조절 가능한 밴드갭을 가지고 있음
광학 활동	가시광선 흡수를 보여주는 $\pi-\pi$ 및 $n-\pi$ 전이 가 있습니다 .
반동	에스테르 교환, 친핵체 치환, 자유 라디칼 반응 등에 참여할 수 있습니다.
표면 기능	분자 인터페이스 재료를 구성하기 위해 자체 조립 단층(SAM)으로 사용될 수 있습니다.

### 5. 적용 분야

#### 1. 균일 측매

- 에스테르화/ 아미드화 /산화/환원 측매;
- 예를 들어, 페놀 텨스테인 에스테르는 알킬렌 옥사이드의 고리 개방을 측매합니다.
- 높은 선택성과 낮은 부반응을 보입니다.

#### 2. 전기변색 코팅 및 스마트 필름

- W-PAA 또는 폴리피롤 텨스테인 복합 코팅;
- 가역적인 색상 변화 능력과 높은 광학 조절률을 가지고 있습니다.
- 유연한 전자 장치, 디스플레이 윈도우 필름 등에 사용됩니다.

#### 3. 의학과 생물학

- 일부 텨스테인 에스테르는 항균 및 항종양 활성을 나타냅니다.
- 단백질 변형 및 RNA 인식 부위 구축을 위한 연구에 사용됩니다.

#### 4. 금속-유기 골격(MOF) 구성 요소

- 텨스테인 에스테르는 카르복실산/아미노기와 연결하는 노드로 사용됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 안정된 금속 유기 다공성 물질을 형성할 수 있습니다.
- 가스 흡착, 분리, 광촉매에 사용됩니다.

#### 5. 나노복합 개질제

- 유기텅스텐 복합체는 인터페이스 조절제로 사용될 수 있습니다.
- 전극 소재/그래핀/산화물 표면 개질에 적용됨
- 전기화학적 성능과 계면 안정성을 향상시킵니다.

### VI. CTIA GROUP 의 제품 개발 및 연구 방향

CTIA 그룹은 현재 다양한 텅스텐산 유기 복합 시스템을 개발하고 다음과 같은 기술 플랫폼을 구축했습니다.

- 제품 시리즈 :
  - 알코올 텅스테이트 에스테르 ( C<sub>2</sub> - C<sub>10</sub> )
  - 유기아민텅스텐복합체;
  - 유기인산염텅스텐염
  - W-PVP, W-PEG 복합 분산액;
- 성과 플랫폼 :
  - 전기변색 반응 시스템(감쇠 없이 10<sup>2</sup> 사이클)
  - 유연한 전도성 페이스트;
  - 지능형 안개 방지 및 빛 반응 소재.

앞으로는 생분해성 텅스텐산 에스테르, 프로그래밍 가능 광전자 기능 소재, 텅스텐산 에스테르 전기 촉매 시스템을 더욱 확대하고, 친환경 에너지와 유연 기능 소재 분야에서 응용 범위를 넓혀나갈 것입니다.

### VII. 요약

유기 텅스텐 에스테르와 유기 텅스텐 착물은 텅스텐 계열에서 가장 다양하고 유연한 분야를 대표합니다. 텅스텐 소재에 용액 공정, 계면 조립, 전기광학 조절과 같은 기능적 특성을 제공할 뿐만 아니라, 학제간 응용 분야에서도 큰 잠재력을 보여줍니다. 분자 구조 설계 및 계면 조절을 통해 유기 텅스텐 착물은 빛, 전기, 촉매, 감지, 생물 의학 및 기타 분야에서 더욱 중요한 역할을 수행할 것입니다.

#### 5.4 텅스텐 기반 기능성 소재 및 복합소재

텅스텐산 기반 기능성 소재는 텅스텐산(H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>) 또는 그 유도체 구조를 활성상, 매트릭스 또는 구조 요소로 사용하여 특정 전기적, 광학적, 촉매적, 에너지 저장, 유도, 구조적 강화 및 기타 기능을 갖춘 복합 소재 시스템을 의미합니다. 이러한 소재는 일반적으로 유기물, 고분자, 금속 산화물, 탄소 기반 소재 또는 기타 금속염과 결합하여 단일 텅스텐산 소재보다 훨씬 뛰어난 다차원적 특성을 나타냅니다.

기능성 복합재료 설계 이론과 멀티스케일 구조 기술의 발전에 따라 텅스텐산은 점차 전통적인 전구체 역할에서 핵심 기능 구성 요소로 변화하고 있으며, 스마트 색상 변환 장치, 전기화학적 에너지 저장, 유연 전자 장치, 생물 촉매 및 환경 거버넌스 등에 널리 사용되고 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. 재료구축방법 및 복합메커니즘

텅스텐 기반 기능성 소재의 구성은 다음과 같은 모드로 나눌 수 있습니다.

건설 유형	설명하다	예
무기-무기 복합재	텅스텐산 + 금속산화물	WO <sub>3</sub> / TiO <sub>2</sub> 광촉매 소재
무기-유기 하이브리드	텅스텐산 + 폴리머/유기 리간드	W-PVP 분산
탄소 기반 복합재	텅스텐산 + 그래핀/탄소나노튜브 등	W-GO 복합 전극
다기능 협업 시스템	또한 전기촉매작용, 흡착작용 등이 있습니다.	W - Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> - MOF 복합 흡착 촉매

주요 건물 전략은 다음과 같습니다.

- 현장 증착 방법(졸-겔, 자가 조립)
- 공침/도핑 방법
- 수열/용매열 상승반응
- 층별 조립 및 표면 개질
- 템플릿 방식(하드 템플릿/소프트 템플릿 구성 제어)

## 2. 텅스텐계 복합소재의 대표적 종류

### 1. 텅스텐산-금속산화물 복합 시스템

TiO<sub>2</sub> 를 도입함으로써, 산화아연(ZnO), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 등으로 전자 전달 채널이나 이종접합 계면을 형성하여 광전 변환이나 촉매 효율을 향상시킬 수 있다.

- WO<sub>3</sub> / TiO<sub>2</sub> : UV/가시광선 촉매작용에 사용됨
- WO<sub>3</sub> / Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 광생성 캐리어의 분리 향상
- WO<sub>3</sub> / CeO<sub>2</sub> : 항환원 능력과 산소 저장 능력을 향상시킵니다.
- WO<sub>3</sub> / SnO<sub>2</sub> : 가스에 민감한 장치에서 응답 속도를 향상시키기 위해 사용됩니다.

### 2. 텅스텐산-탄소소재 복합시스템

탄소 소재의 높은 전도성, 비표면적 및 분산성은 전자 전달을 향상시키고 부하 용량을 개선하는 데 활용됩니다.

- WO<sub>3</sub> /GO(그래핀산화물) : 유연한 슈퍼커패시터 및 전기변색소자에 사용됨
- WO<sub>3</sub> /CNT(탄소나노튜브) : 구조적 안정성과 사이클 수명을 향상시킵니다.
- WO<sub>3</sub> /C(활성탄, 탄소천) : 에너지 저장 및 폐수 흡착에 적합합니다.

### 3. 텅스텐산-고분자 하이브리드 시스템

유기 거대 분자 또는 폴리머는 텅스텐산에 대해 안정적인 분산, 유연한 가공 및 필름 형성 기능을 제공할 수 있습니다.

- WO<sub>3</sub> / 폴리피롤 (PPy) : 유연한 전극에 사용됨;
- WO<sub>3</sub> /PVA/ PEG : 투명한 전기변색 필름을 형성합니다.
- WO<sub>3</sub> - 단백질 복합체 : 생촉매 및 감지 응용 분야에 사용됨.

### 4. 다성분 시너지 기능성 소재

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐산은 금속, 유기 골격, 광감각제 등과 협력하여 다기능 소재를 구성하기 위한 촉매, 에너지 변환 또는 구조 안정화 플랫폼으로 사용될 수 있습니다.

- $WO_3 @ MOF$  : 제어 가능한 기공 + 산화환원 성능 실현
- W-Ni-S 복합재 : 수소 발생 전기 촉매용
- 텅스텐-포르피린 복합재 : 광열 치료와 광촉매를 위한 이중 기능 플랫폼.

### 3. 성능 이점 및 제어 방법

텅스텐 기반 기능성 소재는 구조적 다양성과 화학적 안정성으로 인해 다음과 같은 주요 장점이 있습니다.

성능 유형	장점 및 특징	영향 요인
전기화학적 활동	상당한 정전용량 반응을 동반한 가역적 $W^{6+} / W^{5+}$ 전환	재료 형태, 전도성 상 합성 비율
광학 성능	밴드갭 조절 가능, 광변색/전기변색	결정 형태 제어, 도핑 조절
촉매 활성	표면의 $W=O/W-OH$ 중심은 풍부하고 전자 전달이 쉽습니다.	비표면적, 하이브리드 리간드 선택
열 안정성	고온 저항성 및 노화 방지	결정 무결성, 공유 결합 구조
필름 형성 특성 및 유연성	폴리머와 시너지 효과를 발휘하여 유연성과 확장성을 부여합니다.	분자량, 하이브리드 인터페이스 친화도

규제 경로는 다음과 같습니다.

- 합성 온도와 pH를 제어하여 정확한 형태 제어를 달성합니다.
- 특정 표면적과 기공 분포를 조절하기 위해 구조 지시제를 도입합니다.
- 유기 리간드를 통해 전자 구름 밀도를 조절하여 광촉매 선택성을 향상시킵니다.
- 이온 도핑/표면 개질을 통해 밴드갭과 전자 이동 경로를 조절합니다.

### 4. 일반적인 응용 분야 및 엔지니어링 관행

애플리케이션	주요 지표	재료 시스템
전기변색 윈도우 필름	$\Delta T > 30\%$ , 응답시간 < 5 초	$WO_3$ / PVA/PEG 필름
슈퍼커패시터	비정전용량 > 300 F/g, 사이클 수명 > 10,000 회	$WO_3$ / GO / CNT 복합재
광촉매 분해	분해 효율 > 90%, 가시광선 반응	$WO_3$ / $TiO_2$ / 그래핀 3 원 복합재
가스 센서	$NO_2/H_2S$ 에 대한 높은 감도와 빠른 반응	$WO_3$ / $SnO_2$ / Ag 복합 감광층
중금속 흡착	흡착 용량 > 250 mg/g, 강한 선택성	$WO_3$ / 바이오차 복합 흡착제

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

유연한 전자 장치	성능 저하 없이 500 번 구부림	텅스텐산-PEDOT 복합 전극
-----------	--------------------	------------------

## 5. CTIA 그룹 R&D 사례

CTIA 그룹은 텅스텐 기반 기능성 복합재료 분야에서 다음과 같은 연구 배포를 완료했습니다.

- 텅스텐 하이브리드 소재 공정 플랫폼 구축(연간 시험생산능력 50 톤)
- “텅스텐계 투명 필름 소재”, “WC 유연 전극”, “W/MOF 시너지 촉매” 등 3대 주요 시리즈를 형성했습니다.
- 대학과 공동으로 “텅스텐산 지능형 코팅 공동 연구실”을 설립하여 전기변색 및 항공 자가치유 기능 시스템을 개발합니다.
- 개발된 “ $WO_3$  / PPy / PVA 복합 필름”은 스마트 디밍 유리 프로젝트에서 성공적으로 시범 적용되었습니다.

## VI. 요약

텅스텐산 기반 기능성 소재 및 복합소재는 독특한 전자 구조, 다양한 조절 가능한 특성, 그리고 우수한 복합소재 호환성으로 인해 신소재 시스템의 중요한 분야로 자리 잡고 있습니다. 복합소재 설계, 다중 스케일 조절 및 성능 시너지 효과를 통해 텅스텐산은 반응 전구체 역할을 할 뿐만 아니라 에너지 저장, 감지, 촉매, 광전자 소자 등 여러 첨단 기술에서 전략적 기초 소재로서 핵심적인 역할을 수행합니다. 앞으로 텅스텐산 기반 복합소재 시스템은 다기능 집적, 친환경 지능, 그리고 고집적화를 향해 더욱 발전할 것입니다.

### 5.5 텅스텐산의 참여로 높은 원자가의 텅스텐산화물 전구체의 합성

화학양론적 텅스텐 산화물은 비화학양론적이고 결함이 많은 텅스텐 산화물의 한 종류로, 우수한 전기변색, 광열 변환, 전기촉매, 에너지 저장 및 감지 기능적 특성을 가지고 있습니다. 대표적인 예로는  $W_{18}O_{49}$ ,  $W_{20}O_{58}$ ,  $W_{25}O_{73}$  등이 있으며,  $WO_3$ 보다 더 풍부한 전자 거동, 더 높은 산소 결손 밀도, 그리고 더 나은 전기화학적 활성을 보입니다.

텅스텐산( $H_2WO_4$ )은 높은 수화도, 강한 반응성, 그리고 제어하기 쉬운 형태와 구조를 가지고 있어 이러한 고분자 산화텅스텐 전구체를 제조하는 데 중요한 원료입니다. 텅스텐산의 열처리, 환원 분위기, 전구체 리간드, 그리고 반응 조건을 합리적으로 조절함으로써 생성물의 조성, 형태, 그리고 산화환원 특성을 정밀하게 제어할 수 있습니다.

### 一、고전원소 텅스텐 산화물의 기본 구조 및 특성

#### 1. 화학식 및 구조적 특성

이름	일반 공식	산소/텅스텐 비율	기능 구조
----	-------	-----------	-------

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W <sub>18</sub> O <sub>49</sub>	WO <sub>2.72</sub>	2.72	산소 결핍 맞춤형 구조, 0 공석은 고도로 정렬됨
W <sub>20</sub> O <sub>58</sub>	WO <sub>2.9</sub>	2.90	간 공석사슬 삽입, 우수한 전도성
W <sub>25</sub> O <sub>73</sub>	WO <sub>2.92</sub>	2.92	WO <sub>3</sub> 와 유사하며 혼합 결합가 W <sup>5+</sup> / W <sup>6+</sup>
W <sub>x</sub> O <sub>y</sub> 나노리본/와이어	비화학양론적	2.6 - 2.95	일반적으로 단결정 또는 정렬된 결합 조각

이러한 구조는 높은 산소 공석 농도를 갖는 W가 풍부하며, 넓은 광학 반응 창을 유지하면서 전기 전도도를 1~2 배까지 높일 수 있습니다.

## 2. 핵심 성과 지표

성능	수치 범위	차이
전도도	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-1</sup> S/cm	WO <sub>3</sub> (10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-7</sup> S/cm)보다 높음
밴드갭	2.1~2.5eV	가시광선 반응이 크게 향상되었습니다
산소 공석 밀도	> 10 <sup>21</sup> cm <sup>-3</sup>	전기 촉매 및 이온 전달 속도 개선
빛 흡수	λ = 400 - 800nm	표면 플라즈몬 공명이 발생합니다.

## 2. 전구체로서 텅스텐산의 장점

텅스텐산은 높은 원자가의 텅스텐 산화물 합성에 있어서 다음과 같은 주요 장점을 가지고 있습니다.

특성	성능
강한 반응성	구조는 몰과 고밀도의 수산기 그룹을 포함하고 있어 열분해 및 상전이가 용이하다.
조절 가능한 결정 모양	pH 및 수열 조절을 통해 다양한 결정 형태를 얻을 수 있습니다.
이온 교환 용량	탄소, 금속, 리간드를 이용한 중간 구조 형성
높은 분산성	산화물 입자 크기 및 결합 형성을 제어하는 데 도움이 됩니다.
도파빌리티	Cu, Ni, Mo 등을 현장에 도입하여 전기적 활동을 강화할 수 있습니다.

## 3. 일반적인 합성 경로 및 주요 제어 지점

### 1. 대기 제어 열분해

W<sub>x</sub>O<sub>y</sub>로의 전환을 달성하기 위해 조절된 분위기에서 가열됩니다.

단계	상태	결과
건조 전처리	80~100° C	xH <sub>2</sub> O를 형성하는 자유수
열처리 단계	400~600° C(N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> / Ar)	WO <sub>3</sub> → W <sub>18</sub> O <sub>49</sub> 등을 달성합니다.
대기 제어	약간 환원성 분위기(5~10% H <sub>2</sub> )	일부 W <sup>5+</sup> 상태를 보존합니다.
냉각 방식	급속 냉각	W <sup>6+</sup> 재형성 억제

일반적으로 사용되는 장비로는 관형로, 진공로, 플라즈마 분위기로 등이 있습니다.

### 2. 수열환원법

- 수열 반응에 환원제(예: 구연산, 포도당, 알코올)를 도입합니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 온화한 조건(180~220° C)에서 12~24 시간 동안 반응시킵니다.
- W<sub>18</sub>O<sub>49</sub> 나노와이어, 시트, 막대 등을 얻을 수 있습니다.
- 산소 공석의 비율은 전구체 농도와 반응 pH를 조절하여 조절할 수 있습니다.

### 3. 유기 리간드 보조 방법

- 폴리에틸렌 글리콜(PEG), 폴리비닐 피롤리돈(PVP) 등을 통한 복합 중간체 형성
- 입자 분산성을 개선하고 결정 성장을 제어합니다.
- 이후 열처리나 불활성 분위기 분해를 통해 목표 산화물을 얻습니다.

### 4. 구조 제어 및 특성화 방법

제어 매개변수	영향	특성화 방법
열처리 온도	산소/텅스텐 비율 및 결합 밀도 결정	TG/DSC, XRD
분위기 유형	W <sup>5+</sup> / W <sup>6+</sup> 비율 조절	XPS, EPR
시간 제어	입자 크기와 형태를 결정합니다	전자 현미경/전자 현미경
도핑 원소	전기 촉매 또는 광 반응성 특성 부여	ICP-MS, XRD, FTIR

일반적인 구조적 특징은 다음과 같습니다.

- XRD : W<sub>18</sub>O<sub>49</sub> 특성 피크의 분할을 보여줍니다 .
- XPS : W<sup>5+</sup>는 W4f 영역에서 30 - 60%를 차지합니다.
- TEM : 결정 경계와 결합 줄무늬가 보입니다.
- UV- Vis : 흡수 피크가 가시광선 영역의 파란색 영역으로 이동하고 밴드갭이 감소합니다.

### 5. 응용 프로그램 예시 및 성능 이점

#### 1. 전기변색소자(ECD)

- 높은 W<sup>5+</sup> 농도를 사용하여 향상된 이온 삽입 동작
- W<sub>18</sub>O<sub>49</sub>는 WO<sub>3</sub>보다 30% 더 빠르게 반응하고 사이클 수명이 2 배 더 길어졌습니다.

#### 2. 광촉매 및 광열 소재

- 산소 공석은 전자-정공 분리를 촉진합니다.
- 광선 하에서 유기 오염물질을 효율적으로 분해할 수 있습니다 .
- 광열 변환 효율이 60% 이상이며, 광열 치료나 태양열 증기 시스템에 사용됩니다.

#### 3. 전기화학적 에너지 저장 소재

- W<sub>18</sub>O<sub>49</sub> 전극의 비정전용량은 450 F/ g에 도달할 수 있습니다.
- <sub>3</sub> 보다 30% 이상 우수합니다 .
- 탄소소재와 결합하면 사이클 성능이 8,000 배 이상으로 향상됩니다.

#### 4. 가스 센서 및 광 검출기

- 산소 공석은 기체 분자의 흡착과 전하 이동을 향상시킵니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 에탄올 등의 저농도 검출에 활용 가능
- 근적외선 영역에서 뛰어난 광응답 특성을 나타냅니다 .

## 6. CTIA GROUP 의 연구 및 시제품 생산 방향

CTIA 그룹은 고가의 텅스텐 산화물 개발에 있어 다음과 같은 작업을 수행했습니다.

플랫폼 건설	콘텐츠
반응 경로	텅스텐산을 시작으로 9 개 이상의 제어 가능한 합성 경로 확립
완제품 형태학 라이브러리	나노로드, 시트, 와이어 등 8 가지 형태 제어 시스템 구축
재료 시스템	W <sub>18</sub> O <sub>49</sub> 기반 복합 전극 슬러리 및 광열소재 3 종 출시
애플리케이션 파일럿	전기변색 및 에너지 저장 전극의 제품 검증을 위해 단말 제조업체와 협력합니다.

산소공식 제어기술, 현장도핑 메커니즘, 유연한 소자 집적 경로에 초점을 맞춰 고분자 텅스텐산화물 소재의 엔지니어링 수준을 향상시킵니다.

## VII. 요약

텅스텐산은 텅스텐 분말 및 산화텅스텐 재료의 고전적인 전구체일 뿐만 아니라, 고가의 산화텅스텐의 정밀 합성에 필수적인 플랫폼 소재입니다. 텅스텐산은 구조, 반응 조건 및 변환 메커니즘을 제어함으로써 W<sub>18</sub>O<sub>49</sub>와 같은 결함이 풍부한 산화텅스텐으로 효율적으로 전환될 수 있으며 , 이를 통해 재료에 더 높은 전자 활성과 다차원적 기능을 부여합니다. 앞으로 이러한 방향은 스마트 에너지, 환경 보호, 첨단 제조 등 분야에서 더욱 중요한 전략적 역할을 수행할 것입니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Tungstic Acid Introduction CTIA GROUP LTD

### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ\text{C}$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu\text{m}$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$\text{Fe} \leq 10, \text{Na} \leq 5, \text{Si} \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$\text{SO}_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 6 장: 무기 산업에서의 텅스텐산의 응용

### 6.1 텅스텐 화합물 산업 사슬에서 텅스텐산의 역할

텅스텐산( $H_2WO_4$ )은 텅스텐 산업 사슬의 핵심 중간체로, 1차 텅스텐 자원(APT, 텅스텐 정광)과 고성능 텅스텐 재료(산화텅스텐, 텅스텐 분말, 텅스텐 합금, 텅스텐산염, 텅스텐 에스테르, 유기 텅스텐 복합체 등)를 연결합니다. 고순도, 명확한 구조, 반응성을 가진 무기 화합물인 텅스텐산은 산업 제조에 널리 사용될 뿐만 아니라, 신소재 개발 및 기능화된 텅스텐 유도체 합성에 필수적인 보조 역할을 합니다.

이 섹션에서는 텅스텐 화합물의 전체 수명 주기에서 텅스텐산의 원료 공급원, 제조 공정, 파생물 방향과 산업 사슬의 주요 상류 및 하류 노드에서의 기능적 상태를 체계적으로 설명하여 "텅스텐 정밀 화학 제품의 브리지 소재"로서의 핵심 역할을 보여줍니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. 텅스텐 산업 체인의 간략한 구조 및 핵심 노드

텅스텐 산업 사슬은 일반적으로 다음 4 가지 수준으로 나눌 수 있습니다.

계층	주요 제품	공정 경로	전형적인 대표자들
상류	텅스텐 정광, 철망간석, 회중석	침출, 로스팅, 분해	WO <sub>3</sub> , APT
내의 한복판	텅스텐산, 중간산화물	산 가수분해, 결정화, 열분해	H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> , WO <sub>2.9</sub>
하류	기능성 텅스텐 소재	환원, 도핑, 합성	W 분말, 텅스텐, 코팅
단말기	텅스텐 제품	성형, 소결, 응용	초경합금, 전극소재, 전자패키징

텅스텐산은 미드스트림 허브 위치에 있습니다. APT로부터 제조될 수 있으며, WO<sub>3</sub> , 금속 텅스텐, 화학 텅스텐 제품의 전구체로도 사용될 수 있습니다. 텅스텐산은 상류와 하류를 연결하는 필수적인 소재입니다.

## 2. 텅스텐산의 제조 경로 및 원료 적응성

### 1. 원자재의 출처

텅스텐산은 주로 APT (암모늄) 의 산분해에 의해 얻어진다. 텅스텐산) 또는 텅스텐산나트륨의 중화. 핵심 반응은 다음과 같습니다.

APT 산 가수분해 방법 :



Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> 는 강산 과 반응합니다 .



### 2. 공정 경로 특성

- 연속적인 제어와 고순도 제조가 가능합니다.
- pH, 반응 온도, 숙성 시간을 조절하여 결정 형태와 입자 크기를 정밀하게 제어할 수 있습니다.
- 다양한 파생물 요구 사항을 충족하기 위해 도핑/개질/전구체 설계를 쉽게 수행할 수 있습니다.

현재 CTIA 그룹은 연간 생산량 1,500 톤 이상의 텅스텐산 생산라인을 구축하였으며, 이를 통해 산업용, 전자용, 초미분, 나노텅스텐산 등 다양한 하류 분야의 공정 기준을 충족하는 다양한 제품을 생산할 수 있습니다.

## 2. 텅스텐산의 하류 유도체 방향 및 산업 사슬 확장

텅스텐산은 대부분 텅스텐 화합물 제품의 "원래 매트릭스"이며, 그 유도체의 방향은 다음과 같습니다.

파생 클래스	대표적인 제품	적용 분야
--------	---------	-------

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산화텨스텐	$WO_3$ , $WO_{2.9}$ , $W_{18}O_{49}$	에너지 저장 장치, 전기변색 장치, 가스 센서
텨스텐 금속	W 분말, W 입자, 나노 텨스텐	고밀도 금속, 군수 산업, 항공우주
텨스텐	$Na_2WO_4$ , $CaWO_4$ , $CuWO_4$	발광소재, 기능성 세라믹
유기텨스텐 화합물	$W(CO)_6$ , 텨스텐산 에스테르	균일 촉매, 유기 합성
텨스텐 복합체	폴리산, 하이브리드 소재	촉매, 전극 소재

텨스텐산( $W=O$ ,  $W-OH$ )의 구조적 활성 중심과 제어 가능한 결정수 거동은 이러한 전환 반응에서 반응성과 안정성을 모두 갖추고 있어 매우 비용 효율적인 포괄적인 텨스텐 공급원이 됩니다.

#### 4. 산업 사슬에서 텨스텐산의 "핵심 기능"

##### 1. 하류에 다양한 전구체 기반 제공

텨스텐산은 다양한 열처리 분위기와 온도를 거쳐  $WO_3$ (텨스텐 산화물),  $WO_{2.9}$ (청색 텨스텐 산화물), W 분말(금속 텨스텐)로 전환될 수 있으며, 이를 통해 "조정 가능한 구조, 선택 가능한 결정 형태, 제어 가능한 형태"라는 목표를 달성할 수 있습니다.

##### 2. 촉매 및 고성능 산화물 구축을 위한 이상적인 시작점

메타텨스텐산염, 헤테로폴리산, 광촉매와 같은 고성능 무기 시스템의 합성에서 텨스텐산은 높은 반응성과 유기 리간드 또는 금속 이온과의 강력한 배위 능력으로 인해 복잡한 텨스텐 기반 골격 구조를 구성하는 데 널리 사용됩니다.

##### 3. 상류와 하류를 연결하는 "프로세스 버퍼 존"

텨스텐산은 APT 순도와  $WO_3$  산화환원 반응의 문제를 균형 있게 조절할 수 있습니다. 실제 생산에서는 조절 중간체로 사용되며, 예를 들어 다양한 입자 크기의  $WO_3$  슬러리를 제조하고 텨스텐 분말의 환원 반응 속도를 균일하게 하는 데 사용됩니다.

##### 4. 다기능 소재 플랫폼 지원 역할

텨스텐산 자체는 다음과 같은 복합 재료를 만드는 데 직접 사용됩니다.

- 텨스텐산-PVA 하이브리드 필름: 전기변색;
- 텨스텐산-CNT 복합재: 유연 전극;
- 텨스텐산-TiO<sub>2</sub> 이중 접합: 광촉매.

#### V. 산업 통합의 시너지 효과와 이점

##### 1. 강력한 모듈식 통합 기능

고체 또는 슬러리 형태의 텨스텐 산은 매우 적응성이 뛰어나 다음과 같은 기존 텨스텐 제품 모듈에 직접 통합할 수 있습니다.

- 슬러리로 직접 분무;
- 유기수지와 혼합하여 전극막을 형성합니다.
- 세라믹 제조 시 동시소성 반응에 참여합니다.

##### 2. 녹색 환경 보호의 명백한 이점

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

APT 나 고온 WO<sub>3</sub> 처리와 비교했을 때, 텅스텐산은 제조 및 전환 과정에서 에너지 소모가 적고 부식성이 낮으며, 부산물(예: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 이 적어 녹색 텅스텐 산업 체인의 발전에 더욱 적합합니다.

### 3. 전략적 공급망 보안 노드

고순도 초미립 텅스텐 분말인 텅스텐산은 고급 텅스텐 제품의 국내 대체 및 원자재 확보에 중요한 연결 고리가 되었습니다. 텅스텐산의 제어력과 높은 적응성은 산업 체인의 위험 저항성을 향상시킬 수 있습니다.

## VI. CTIA 그룹 텅스텐산 산업 체인의 일반적인 관행

링크	구현 내용	결과
원자재 취급	APT → 텅스텐산 전환 공정 최적화	고순도 텅스텐산(W 함량>74.2%)
결정 형태 제어	다양한 노화 과정이 결정 형태를 제어합니다.	플레이크형, 원주형 및 구형 텅스텐산의 제어 가능한 생산
하류 연결	텅스텐 슬러리 → WO <sub>3</sub> 필름 분무 → 광변색성 도포	통합 필름 생산라인 구축
수출사업	텅스텐산은 일본, 미국, 독일 등 세계 각국으로 수출되고 있습니다.	발광소재 및 전자세라믹 분야에 활용

## VII. 요약

텅스텐 화합물 산업 체인의 핵심 소재인 텅스텐산은 기존 텅스텐 분말 및 텅스텐 합금 제조에서 기본적인 보조 역할을 할 뿐만 아니라, 뛰어난 반응성, 구조적 조절성, 그리고 공정 적응성을 바탕으로 신형 텅스텐 기반 기능성 소재, 촉매, 전자 코팅 등 다양한 분야에서 그 적용 범위를 확장하고 있습니다. 향후 친환경, 고성능, 지능형 텅스텐 소재 시스템 구축 과정에서 텅스텐산은 전략적 플랫폼 소재로서 핵심적인 역할을 계속 수행할 것입니다.

### 6.2 발광 재료에 대한 텅스텐산의 응용

텅스텐산(H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>) 과 그 유도체는 발광 재료 분야에서 광범위한 응용 분야를 가지고 있습니다. 독특한 전자 구조, 넓은 밴드갭 특성, 우수한 결정성 및 도핑성을 가진 텅스텐산과 그 변환 생성물은 형광체 매트릭스 재료의 중요한 구성 요소일 뿐만 아니라, 전기발광, 광발광, X 선 형광 변환 재료, 광결정과 같은 최첨단 광학 소자에서도 활용됩니다.

이 섹션에서는 재료의 구조적 특성에서 출발하여 텅스텐산과 그 복합체의 발광 재료에서의 작용 메커니즘, 일반적인 재료 시스템, 제조 방법 및 실제 응용 분야를 체계적으로 탐구합니다. 특히 희토류 도핑 발광, 금속 이온 활성화, 자외선 반응 및 나노 광학에서 텅스텐산의 성능에 초점을 맞춥니다.

### 1. 텅스텐산 발광 성능의 기초 및 메커니즘

#### 1. 광학 밴드갭 및 여기 특성

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 산화물 물질(예:  $H_2WO_4$ ,  $WO_3$  및  $WO_4^{2-}$  염)은 넓은 광학적 밴드갭(2.5~3.2eV)을 갖고 있으며 그 자체로 강한 발광 특성을 갖고 있지 않지만 도핑, 결합 도입 및 구조 조절을 통해 다양한 파장의 발광 반응을 방출하도록 자극할 수 있습니다.

그 발광 특성은 주로 다음과 같은 메커니즘에서 유래합니다.

유형	설명하다
전하 이동 전이(CT)	$^- \rightarrow WO_6$ 팔면체에서 $W^{6+}$ 는 밴드갭 발광을 형성합니다.
엑시톤 재결합 발광	표면 상태, 산소 공석 등이 엑시톤 결함 발광을 유발합니다.
불순물 수준 여기	희토류 또는 전이금속 도핑으로 도입된 새로운 에너지 레벨 발광 센터

## 2. 구조와 발광 중심의 관계

텅스텐산은  $WO_6$  구조 단위로 구성되어 다양한 결정 형태(사방정계, 단사정계, 삼사정계 등)를 형성합니다. 결정 구조의 대칭성과 왜곡은 밴드 구조와 발광 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 또한, 이온 도핑을 통해 결정에 국소적인 에너지 준위를 도입하여 발광 성능을 크게 향상시키거나 조절할 수 있습니다.

## 2. 텅스텐 유래 발광소재의 종류

### 1. 희토류 도핑 텅스텐산염 발광 소재

텅스텐산 또는 그 염을 매트릭스로 사용하여 희토류 이온(예:  $Eu^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$ ,  $Dy^{3+}$  등)을 도입하여 발광 중심을 구성합니다.

- $Na_2WO_4:Eu^{3+}$ : 적색광 방출, LED에 적합함;
- $CaWO_4:Tb^{3+}$ : 보안 표시 및 감지에 사용되는 녹색 형광 물질입니다.
- $SrWO_4:Dy^{3+}$ : 청백색 발광으로 백색광 조명에 적합함;
- $La_2(WO_4)_3:Sm^{3+}$ : 전기발광소자에 사용됨.

특징 및 장점:

- 높은 에너지 전달 효율( $WO_4^{2-} \rightarrow RE^{3+}$ )
- 안정성이 뛰어나 장기 조명 및 장치 포장에 적합합니다.
- 다중 대역 조절과 3원색 발광 설계를 실현할 수 있습니다.

### 2. 텅스텐계 발광 유리 및 세라믹

텅스텐산염(예:  $PbWO_4$ ,  $CaWO_4$ )는 고굴절률, 고밀도 형광 유리 매트릭스 소재로 사용될 수 있습니다.

- 납 텅스텐 결정 ( $PbWO_3$ )<sub>4</sub>:
  - 우수한 X선 변환 효율을 가지고 있습니다.
  - 고에너지 물리학 감지기 및 보안 검사 시스템에 사용됩니다.
  - 방출 피크는 일반적으로 420~500nm 사이입니다.
- $WO_3 - P_2O_5 - B_2O_3$ 계 유리:
  - $Eu^{3+}$  및  $Er^{3+}$ 로 도핑하면 빨간색/녹색 형광 유리가 형성될 수 있습니다.
  - 레이저와 근적외선 증폭기에 사용할 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. 텅스텐 복합 양자점 및 나노 발광 소재

CdS 를 함유한 텅스텐산, ZnO, 탄소 양자점 및 기타 재료는 발광 효율과 안정성을 향상시킬 수 있습니다.

- $WO_3$  / CdS 복합 양자점 : 더 넓은 발광 대역을 갖습니다.
- $WO_3$ /그래핀 양자점 : 향상된 청색광 방출, 생물학적 형광 표지에 적합
- 텅스텐으로 코팅된 코어-셸 구조 : 향상된 형광 안정성과 제어 가능한 방출 동작.

### 3. 텅스텐계 발광소재의 제조공정

#### 1. 고상반응법

- 대량의 결정질 텅스텐산염을 제조하는 데 적합합니다.
- 일반적으로 고온 소성(600~1000° C)이 필요합니다.
- $RE^{3+}$  및 기타 고밀도 구조의 형광체를 제조하는 데 적합합니다.

#### 2. 수열법 및 공침법

- 저온, 고결정성, 크기 조절이 가능한 나노스케일 발광 소재를 합성합니다.
- pH, 온도, 시간과 같은 매개변수를 제어함으로써 단분산 미세구형 또는 플레이크 구조를 얻을 수 있습니다.

#### 3. 졸-겔 및 유리 용융 방법

- 발광 유리 및 필름 소재에 적용 가능
- 희토류 이온이나 양자점을 도핑하여 다중 모드 발광 기능을 구현할 수 있습니다.

#### 4. 분무 분무 열분해

- 구형 형광체의 대규모 제조에 사용됨
- 입자는 균일한 형태를 갖고 있어 조명 코팅과 LED 칩 패키징에 적합합니다.

### 4. 성능 제어 및 응용 사례

제어 매개변수	발광 성능에 미치는 영향	응용 프로그램 예제
도핑 농도	광도 및 발광수명 변경	$Eu^{3+}$ 최적 농도는 약 3-5 mol%입니다.
결정 형태	다양한 결정 형태가 밴드 구조에 영향을 미칩니다.	직교상 텅스텐산염은 더 높은 발광 효율을 갖는다
결합 있는 국가 규제	산소 공석은 새로운 발광 센터를 유도합니다.	$W_{18}O_{49}$ 는 푸른 빛을 방출합니다.
입자 크기	나노스케일은 표면적과 여기 효율을 증가시킵니다.	나노- $CaWO_4$ 형광 라벨

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

일반적인 적용 사례:

- LED 형광체 :  $WO_4^{2-} : Eu^{3+}$  적색광 분말은 백색 LED에 사용될 수 있습니다.
- X선 변환 재료 :  $PbWO_4$  결정은 고에너지 물리학 실험에 사용됩니다.
- 형광 프로브 :  $WO_3$  나노입자는 변형 후 세포 형광 프로브로 사용될 수 있습니다.
- 반사 및 위조 방지 소재 : 텅스텐 발광체는 인증서와 통화의 위조 방지 잉크에 사용됩니다.

5. CTIA 그룹 발광소재 R&D 실무

CTIA 그룹은 텅스텐산 기반 발광 소재를 중심으로 다음과 같은 R&D 시스템을 구축했습니다.

모듈	특정 콘텐츠
원자재 보증	고순도 전자급 $H_2WO_4$ 및 $Na_2WO_4$ 를 제공합니다 .
복합 R&D	$RE^{3+}$ 도핑된 텅스텐산 물질의 데이터베이스를 구축합니다.
프로세스 시스템	저온수열법을 이용한 발광텅스텐산염의 대량 제조를 실현합니다.
애플리케이션 랜딩	국내 LED 패키지 공장과 협력하여 조광 가능한 3 색 형광 시스템을 개발합니다.
특허 기술	텅스텐계 적색 인광체/청색 필름은 이미 5 개의 핵심 발명 특허를 보유하고 있습니다.

VI. 요약

텅스텐산과 그 유도체를 발광 재료에 적용하면 LED, 레이저, 형광 검출과 같은 광전자 기술에 필요한 우수한 성능과 안정적인 구조를 가진 매트릭스 재료를 제공할 뿐만 아니라, 나노포토닉스 , 바이오이미징, X 선 검출과 같은 신홍 분야에서도 독보적인 가치를 발휘합니다. 결정 공학, 도핑 조절, 그리고 다중 스케일 복합재 설계를 통해 텅스텐산 기반 발광 재료는 고성능 무기 광자 재료 시스템의 중요한 기반이 되고 있습니다.

6.3 고성능 세라믹 원료용 텅스텐산

첨단 제조, 극한의 사용 환경, 그리고 기능성 소재 기술의 발전으로 세라믹 소재에 대한 더욱 높은 성능 요구가 제기되고 있습니다. 텅스텐산( $H_2WO_4$ ) 과 그 유도체는 뛰어난 열 안정성, 높은 용점, 높은 밀도, 그리고 우수한 반응성으로 인해 고성능 세라믹 시스템에 널리 사용되고 있습니다. 기능성 세라믹의 주요 원료로 사용될 뿐만 아니라, 세라믹 복합 소재의 구조 개질제 또는 도핑 보조제로도 활용될 수 있습니다.

본 섹션에서는 세라믹 원료로서 텅스텐산의 작용 기전, 응용 방향, 조성 체계 및 제조 기술을 체계적으로 소개합니다. CTIA 그룹 의 R&D 활동과 결합하여 전자 세라믹, 구조 세라믹, 레이저 세라믹 등 핵심 분야에서 텅스텐산의 물질적 기여도와 산업적 가치를 심층 분석합니다.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 1. 세라믹 원료에 있어서 텅스텐산의 본질적인 장점

재산	증상	도자기에 대한 기여
높은 녹는점	WO <sub>3</sub> 로 변환하면 녹는점은 1473° C입니다.	세라믹에 고온 안정성 부여
강한 반응 활동	알칼리토류 및 희토류 원소와 쉽게 반응하여 염을 형성합니다.	고상 반응 합성을 용이하게 합니다.
고밀도	이론 밀도: 약 7.1 g/cm <sup>3</sup>	고밀도 구조용 세라믹 제작에 적합
조정 가능한 결정 구조	다형성, 제어 가능한 형태학	다양한 격자 매칭 요구 사항에 맞게 조정
이온 도핑	Cu, Y, La 등의 원소를 도입할 수 있다	기능 조절 및 수정을 실현합니다
조절 가능한 입자 크기	나노미터에서 마이크로미터 단위의 분포를 지원합니다.	세라믹 소결 및 밀도 최적화

## 2. 적용 방향 및 일반적인 세라믹 재료 시스템

### 1. 텅스텐산은 기능성 세라믹에 사용됩니다.

- 유전체 세라믹스 :
  - 일반적인 시스템: CaWO<sub>4</sub>, 바우 4 ;
  - 마이크로파 유전체, 커패시터 세라믹, 유전체 공진기에 사용됨
  - CaCO<sub>3</sub> 와 고체상 반응 후 복합 세라믹을 형성하는 주요 전구체입니다 . BaCO<sub>3</sub> 등
- 압전 세라믹 :
  - 텅스텐 산은 세라믹의 격자 강성과 분극 행동을 조절하기 위해 도입되었습니다.
  - 를 들어 , K<sub>0.5</sub> Na<sub>0.5</sub> NbO<sub>3</sub> - WO<sub>3</sub> 는 납이 없는 압전 재료 입니다 .
  - 텅스텐산은 유전율과 전기 탄성 특성을 향상시킵니다.

### 2. 텅스텐산은 구조용 세라믹에 사용됩니다.

- 텅스텐산 강화 알루미늄 세라믹 :
  - 열전도도와 파괴인성을 향상시킵니다.
  - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - WO<sub>3</sub> 시너지 효과 상 경계를 형성합니다 .
  - 내마모성 및 내열성 에 적합합니다 .
- ZrO<sub>2</sub> - WO<sub>3</sub> 복합 세라믹 :
  - 텅스텐산은 균일한 2 차상 분포를 형성하는 데 참여합니다.
  - 열충격 저항성과 내식성을 향상시킵니다.

### 3. 레이저 세라믹 및 섬광 세라믹

- PbWO<sub>4</sub> 및 CaWO<sub>4</sub> 와 같은 텅스텐산염은 X 선 반응 세라믹의 기본 재료입니다.
- 투명 W-시리즈 세라믹은 광전 변환 효율이 우수합니다.
- 희토류 이온을 도핑하여 레이저로 여기된 세라믹 매트릭스를 구성할 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. 나노 세라믹 복합소재

- 텅스텐산은 입자 성장을 억제하기 위해 나노입자로 도입되었습니다.
- 소결 속도를 높이고 밀도와 기계적 성질을 향상시킵니다.
- 일반적으로  $Si_3N_4$ , BN,  $TiO_2$  복합 구조 세라믹 시스템에 사용됩니다.

#### 3. 대표적인 제조방법 및 기술사항

방법	프로세스 설명	장점
고상반응법	텅스텐산 + 탄산염 또는 산화물 혼합물, 고온 로스팅	성숙한 기술, 저렴한 비용
졸-겔법	텅스텐산과 금속 알콕사이드의 가수분해	제어 가능한 나노구조와 균일한 조성
공침	텅스텐산은 금속이온 공침 및 저온 예비소결에 참여합니다.	분산성이 우수하여 일괄 처리에 적합합니다.
에어로젤/분무 건조	성형성을 향상시키기 위해 구형 텅스텐 전구체를 얻습니다.	고성능 사출 성형 세라믹용

#### 소결점:

- 소결 온도: 1000 - 1350° C ( 재료 시스템에 따라 다름)
- 분위기 조절: 공기, 질소, 약간 환원적인 분위기;
- 세라믹 밀도: >95% 이론 밀도는 엔지니어링 요구 사항입니다.
- 소결 보조제:  $Li_2O$ ,  $ZnO$  등 을 도입하여 소결을 보조할 수 있다.

#### 4. 성능 개선 및 엔지니어링 이점

텅스텐산을 세라믹 소재에 도입하면 다음과 같은 특성이 효과적으로 향상될 수 있습니다.

프로젝트	개선 방향	효과 설명
열 안정성	융점 및 열전도도 향상	연속 사용 온도 >1000° C
전기적 특성	유전율 및 Q 값 제어	$Q \times f$ 값이 20~60% 증가했습니다.
기계적 강도	파괴인성 향상	강화된 구조용 세라믹의 KIC 값이 $8 \sim 10 MPa \cdot m^{1/2}$ 로 증가했습니다.
광학 성능	투명성 및 레이저 반응 향상	레이저용 세라믹 기판 소재
내식성	표면 텅스텐 산소 네트워크는 산 및 알칼리 부식을 억제합니다.	화학 반응기 라이닝 세라믹에 적용

#### 5. 일반적인 적용 시나리오 및 실제 제품 사례

적용 분야	일반적인 재료	성과 지표
마이크로파 세라믹 유전체	$BaWO_4$ , $CaWO_4$	$\epsilon = 6 - 9$ , $Q \times f > 10000$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

의료/핵 검출 세라믹	PbWO <sub>4</sub>	광 출력 > 60% NaI:Tl , 강력한 방사선 저항성
내마모성 세라믹 라이닝	ZrO <sub>2</sub> - WO <sub>3</sub>	경도 > 12 GPa , 낮은 마찰 계수
레이저 증폭 세라믹	La <sub>2</sub> (WO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> :Nd <sup>3+</sup>	안정적인 레이저 출력 전력 및 높은 열전도도
적외선 창 세라믹	MgO - WO <sub>3</sub> 기반 투명 세라믹	적외선 투과율 > 75% , 항공우주 광학 장치에 적합

## VI. CTIA 그룹 기술 및 산업화 진행 상황

CTIA 그룹은 텅스텐 세라믹 원료 개발에 있어 안정적인 공급망과 다양한 맞춤형 모델을 형성했습니다.

프로젝트	결과
제품 범위	마이크론 크기의 텅스텐산, 나노 크기의 텅스텐산, 초미립 구형 텅스텐산
세라믹 호환성	ZrO <sub>2</sub> 와의 소결 적합성 , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> 시스템 > 90%
협력 사례	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 복합공구세라믹 국내 다수 세라믹공장 보유
프로세스 플랫폼	특수 세라믹의 대기 환경 요건을 충족하기 위한 수소/질소 소결 시험 라인 구축
출구 방향	세라믹용 텅스텐산 분말은 일본, 한국, 독일 등에 판매되었으며, 주로 전기 세라믹 기판 및 광학 유리 필러에 사용됩니다.

## VII. 요약

고성능 세라믹의 중요한 원료인 텅스텐산은 구조용 세라믹, 기능성 세라믹, 특수 세라믹 분야에서 상당한 재료적 이점을 제공할 뿐만 아니라, 우수한 공정 적합성과 개질 가능성으로 인해 새로운 세라믹 소재 연구 개발에 있어 중요한 전략 물질 중 하나로 자리매김하고 있습니다. 세라믹 소재가 내구성에서 기능성, 지능성으로 변화함에 따라, 텅스텐산은 고밀도, 고열전도도, 고기능성 세라믹 소재 시스템에서 더욱 중요한 역할을 할 것입니다.

### 6.4 내열성 및 내식성 코팅 재료의 전구체로서 텅스텐산의 역할

텅스텐산(H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>)은 구조가 안정하고 반응성이 높으며 다양한 산화 상태로 전환 가능한 텅스텐 원료 화합물입니다. 코팅재 분야, 특히 고온 내산화성, 부식 방지, 극한 환경에서의 코팅 시스템에서 중요한 전구체 역할을 해 왔습니다. 텅스텐산은 WO<sub>3</sub> 및 W<sub>18</sub>O<sub>49</sub>와 같은 고성능 텅스텐 산화물로 쉽게 열분해되므로, 첨단 기능성 코팅의 필수적인 원료로 자리 잡았습니다.

이 섹션에서는 고온 코팅, 플라즈마 분무 세라믹 코팅, 화학적 부식 방지 코팅 및 광전자 보호 코팅에서 텅스텐 산의 적용 역할에 초점을 맞추고, 재료 반응 메커니즘,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

형성 공정 경로 및 성능 기여도를 분석하며, CTIA 그룹의 실제 사례를 결합하여 전략적 전구체로서의 산업적 중요성을 입증합니다.

### 1. 코팅재의 핵심요구사항 및 텅스텐산의 적합성

특히 항공우주, 원자력 산업, 야금, 고급 제조 등의 분야에서 현대 코팅 재료는 내열성에 대한 엄격한 요구 사항을 제시 합니다 . 내식성 , 재료 의 구조적 밀도 와 다용성 . 전구체인 텅스텐산은 고밀도 WO<sub>3</sub> 필름, 고안정성 WOM(금속) 복합재 또는 다공성 W 기반 세라믹 코팅으로 전환되어 다음과 같은 엔지니어링 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

주요 요구 사항	텅스텐 전구체 효과
고온 항산화	분해 후 WO <sub>3</sub> / WO <sub>2</sub> 가 형성됩니다. 9 보호층은 O <sub>2</sub> 확산을 차단합니다.
강산/알칼리 부식성 환경	텅스텐 코팅은 화학적 수동화 능력을 가지고 있습니다.
전기 난방 이중 보호	W <sup>5+</sup> /W <sup>6+</sup> 상태 전이는 전자 및 열 차폐 특성을 향상시킵니다.
구조적 매칭	다양한 기질에 잘 부착되는 코팅을 생성합니다.
필름 호환성	박막은 줄결, 분무 및 절삭을 통해 형성될 수 있습니다.

### 2. 텅스텐산 유래 코팅 시스템의 종류 및 특성

#### 1. 산화텅스텐(WO<sub>3</sub>) 내열 보호 코팅

- H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>의 열분해는 균일한 WO<sub>3</sub> 필름을 직접 형성할 수 있습니다.
- C 의 온도 범위에서 우수한 열 안정성과 산화 저항성을 갖습니다 .
- 단독으로 사용하거나 세라믹 코팅의 "결합층"으로 사용할 수 있습니다.

특징 및 장점:

- 밀도가 높고 컴팩트성이 우수함
- W<sup>6+</sup> 이온 구조는 안정적이며 전기적으로 중성입니다.
- 더욱 환원되어 전도성 보호막을 형성할 수 있습니다.

#### 2. 텅스텐산-금속산화물 복합코팅(W-MO<sub>x</sub>)

- 텅스텐산과 TiO<sub>2</sub> 를 혼합합니다 . ZrO<sub>2</sub> , SiO<sub>2</sub> , CeO<sub>2</sub> , 등 . ;
- 시너지 효과를 이용한 구조를 사용하여 복합 세라믹 코팅을 형성합니다.
- 열 차단 효과와 산, 알칼리 부식 저항성을 크게 향상시킬 수 있습니다.

일반적인 구조: WO<sub>3</sub> - ZrO<sub>2</sub> , WO<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> , W-Ti 복합층.

#### 3. 텅스텐 유리화 코팅

- 텅스텐산은 유리 전구체(B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)와 공용성을 갖는다. 등. ) ;
- 필름 형성 후 투명성, 높은 경도 및 내화학성을 갖습니다.
- 광전 보호 필름 및 차폐 코팅에 사용됩니다.

#### 4. 전기변색 보호 코팅

- 텅스텐 기반 물질은 우수한 전기변색 특성을 가지고 있습니다.
- 밝기 조절, 열 제어, 반사 방지 유리에 사용됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 열 저항/광학 반사의 동적 조정이 가능합니다.

### 3. 제조방법 및 필름형성공정

#### 1. 솔겔

- 텅스텐산, 알코올 및 복합화제는 균일한 졸을 형성합니다.
- 코팅, 건조 및 열처리를 통해 밀도가 높은 코팅이 형성됩니다.
- 유리, 세라믹, 금속 기판에 적합합니다.

#### 2. 열분해법

- 텅스텐산으로 코팅한 후 직접 가열(300~600° C)합니다.
- WO<sub>3</sub> 층으로 변환됨 ;
- 저비용 향산화 시나리오에 적합합니다.

#### 3. 플라즈마 분사

- 텅스텐산 분말을 분무 가능한 슬러리로 전처리함;
- 고온 분무로 세라믹 코팅을 형성합니다.
- 항공우주 엔진 블레이드와 원자로 구성품에 널리 사용됩니다.

#### 4. 정전 분무/스핀 코팅

- 대면적 투명 필름에 적합합니다.
- 우수한 필름 균일성과 낮은 비용;
- 유연한 전극 및 태양광 장치와의 강력한 호환성.

### 4. 성과 및 주요 지표

색인	범위	설명하다
내열온도	800~1100° C	WO <sub>3</sub> 는 높은 안정성 구조 유지율을 가지고 있습니다.
산 및 알칼리 저항성	pH 2~12 안정	우수한 패시베이션층 보호 메커니즘
접착력	> 8MPa (ASTM)	접착력이 좋아서 떨어지기 쉽지 않아요
열전도도	2.5~3.0W/ m·K	조절 가능한 열 절연 성능
빛 투과율	> 70% (필름 유형)	투명한 열 제어 코팅에 적용 가능

### 5. 일반적인 적용 분야 및 제품 사례

#### 1. 고온 보호 코팅

- 적용 대상: 항공우주 엔진 케이싱, 가스터빈 구성품
- 코팅 시스템: WO<sub>3</sub> - ZrO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> 그라데이션 코팅;
- 1100° C에서 4번의 열충격 사이클 .

#### 2. 화학공업 부식방지층

- 적용 대상 : 황산 탭 라이닝, 염소알칼리 설비, 폐가스 흡수탑 등

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 코팅 시스템: W-Ti-Si 유리화 코팅;
- 성능: 12% 황산에서 5000 시간 이상 안정적으로 작동합니다.

### 3. 전기광학 기능 코팅

- 응용 분야: 건축용 유리, 자동차 HUD, 스마트 창문
- 코팅 시스템: W-ITO-PVA 복합 변색 코팅;
- 성능: 가시광선 영역에서 투과율 조정 범위는 30%이고, 응답 시간은 <2 초입니다.

### 4. 핵산업과 방사선 방호

- 응용 대상: 중성자 감속재, 고 Z 보호 스크린;
- 코팅 시스템 : 텅스텐산 복합 텅스텐 구리 코팅 ;
- 성능: 감마선을 효과적으로 감소시키고 중성자 부식에 대한 저항성이 우수합니다.

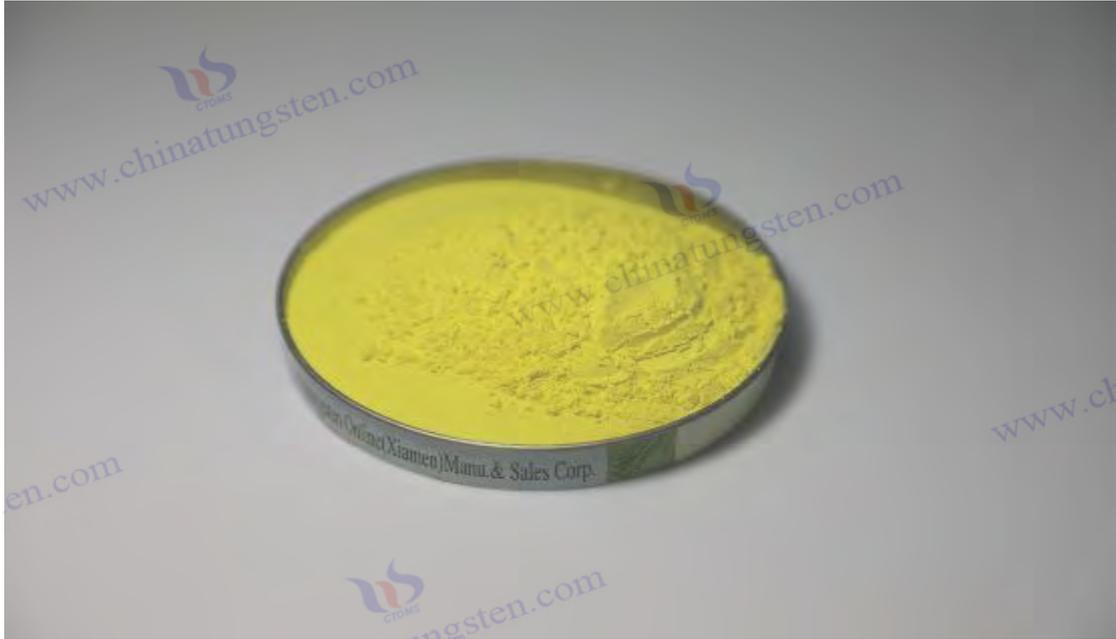
## VI. CTIA 그룹 실무 및 엔지니어링 혁신

모듈	구현 내용	산업화 성과
코팅 소재 시스템	산업용 텅스텐산/텅스텐산 분말 개발	입자 크기 200nm - 2 μm, 분무 시스템에 적합
프로세스 개발	스핀코팅, 열분해, 분무 등 3 가지 플랫폼 구축	다중기관 코팅 및 열처리 지원
제품 시스템	WO <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> 고온보호 페이스트 및 텅스텐 유리분말 출시	항공우주, 전자 패키징, 화학 반응 장비에 적용
애플리케이션 개발	유리공장 및 배터리공장과 협력하여 투명코팅 개발	초기 대량공급 및 해외수출 달성

## VII. 요약

전구체로서 텅스텐산은 내열 및 내식성 코팅 재료 시스템에서 핵심적인 역할을 합니다. 고온, 부식, 방사선과 같은 극한 환경에서 효과적인 차단막을 제공할 뿐만 아니라, 구조 설계 및 복합 엔지니어링을 통해 코팅 재료의 다기능 집적도를 향상시킵니다. 뛰어난 공정 적응성과 재료 호환성을 갖춘 텅스텐산 코팅은 항공우주, 에너지, 화학 산업, 건설 및 기타 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 앞으로도 친환경 소재, 지능형 보호, 그리고 첨단 제조 분야에서 엔지니어링 영역과 산업적 가치를 지속적으로 확장해 나갈 것입니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 7 장: 기능성 재료 및 에너지 분야에서의 텅스텐산의 응용

### 7.1 광촉매 소재에서의 텅스텐산의 응용(오염물질 분해 등)

광촉매 물질은 빛 에너지를 흡수하여 화학 에너지로 전환할 수 있는 기능성 소재입니다. 유기 오염 물질 분해, 수질 정화, 대기 처리, 항균 및 항바이러스, 그리고 광촉매 물 분해를 통한 수소 생산 분야에서 널리 사용됩니다. 텅스텐산( $H_2WO_4$ )과 그 유도체는 우수한 광학 밴드갭 구조, 우수한 광생성 캐리어 거동, 안정적인 화학적 특성 및 구조 조절 가능성으로 인해 광촉매 분야에서 유망한 무기 촉매 플랫폼 소재로 자리매김했습니다.

이 섹션에서는 광촉매 소재로서 텅스텐산의 기본적인 성능 장점, 광촉매 반응 메커니즘, 개질 및 합성 전략, 일반적인 응용 사례, 그리고 현재 연구 핫스팟과 미래 개발 방향을 포괄적으로 소개합니다.

#### 1. 텅스텐산 광촉매 특성의 기본

##### 1. 밴드 구조 및 광반응 특성

텅스텐산과 그 산화 유도체(예:  $WO_3$ ,  $W_{18}O_{49}$ )는 넓은 밴드갭 반도체 특성을 가지고 있습니다.

재료	밴드갭 (예)	광 반응 범위
$H_2WO_4$	2.6~2.8eV	근자외선~청색광 영역
$WO_3$	2.5~2.7eV	자외선에서 가시광선(<480nm)까지
$W_{18}O_{49}$	2.3~2.6eV	향상된 가시광선 반응

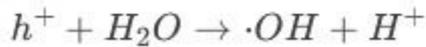
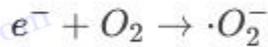
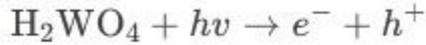
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 밴드갭 범위 덕분에 태양 스펙트럼의 고에너지 부분을 효과적으로 흡수하고, 전자-홀 쌍을 생성하고, 산화환원 반응을 유도할 수 있습니다.

## 2. 촉매 메커니즘에 대한 간략한 설명

일반적인 광촉매 반응 경로는 다음과 같습니다.

1. 빛의 여기는 전자( $e^-$ )와 정공( $h^+$ )을 생성합니다.
2.  $e^-$ 는  $O_2$ 의 환원에 참여하여 슈퍼옥사이드 라디칼( $\cdot O_2^-$ )을 형성하고,  $h^+$ 는 물의 산화에 참여하여 하이드록실 라디칼( $\cdot OH$ )을 형성합니다.
3. 자유 라디칼은 유기 오염 물질을 공격하여  $CO_2$ 와  $H_2O$ 로 분해합니다.



## 2. 텅스텐계 광촉매 소재의 종류 및 개질 전략

### 1. 결정 형태 제어

등을 조절함으로써 텅스텐산의 다양한 결정 형태(사방정계, 단사정계, 삼사정계 등)를 얻을 수 있으며, 그 결정 구조는 밴드갭 폭과 전하 이동 속도에 직접적인 영향을 미칩니다.

- 직교상: 높은 투과율과 우수한 광촉매 성능
- 단사정계 상: 복합 변형 및 향상된 광 반응에 적합합니다.

### 2. 도핑 및 결합 엔지니어링

- 금속 도핑:  $Ag^+$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  등 불순물 에너지 준위를 구성하고 빛 흡수를 확장합니다.
- 비금속 도핑: N, S, C 등과 같이 광생성 캐리어의 수명을 향상시킵니다.
- 산소 공석 조절: 가시광선 촉매 활동을 강화하기 위해 반응 활성 중심으로 O 공석을 도입합니다.

### 3. 이종접합 복합재료의 제작

다른 반도체와 결합하여 Z형, I형 및 pn 이종접합을 구성하여 전하 분리 효율을 향상시킬 수 있습니다.

- $TiO_2 / H_2WO_4$ : 향상된 UV 반응;
- $gC_3N_4 / WO_3$ : 가시광선 Z형 촉매 시스템의 구축;
- $BiVO_4 / WO_3$ : 물 산화 효율과 전자 이동 속도를 향상시킵니다.
- $WO_3 / Ag@ AgCl$ : 플라즈몬 공명을 이용한 촉매 강화 달성.

## 3. 실제 적용 분야 및 재료 성능

### 1. 유기오염물질의 분해

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 텅스텐산 물질은 메틸 오렌지(MO), 로다민 B ( RhB ), 페놀, 테트라사이클린, 에피클로로히드린 등을 효과적으로 분해할 수 있습니다.
- 시뮬레이션된 햇빛이나 가시광선 하에서 분해 효율은 90% 이상에 도달할 수 있습니다.
- 해당 소재는 안정성이 좋으며 5 회 이상 사용 후에도 성능 저하가 크게 나타나지 않습니다.

## 2. 정수 및 폐수 처리

- 텅스텐산 -TiO<sub>2</sub> 복합체는 염색폐수처리에 널리 사용됩니다.
- 나노 WO<sub>3</sub> 코팅은 산업용 순환수 시스템에서 항균 파울링 및 탈색 처리에 적합합니다.
- 고정층 광촉매 반응기는 활성탄, 제올라이트, MOF 및 기타 부하로 구성됩니다.

## 3. 공기 정화 및 VOC 제어

- 텅스텐산 촉매는 포름알데히드, 벤젠, TVOC 와 같은 실내 오염 물질을 분해할 수 있습니다.
- 광촉매 필터, 코팅, 공기청정기 코어 소재 등에 적용
- 실내 조명 환경에 적합한 저온 및 저조도 대응 시스템을 구축할 수 있습니다.

## 4. 항균 광촉매 표면 코팅

- 텅스텐 기반 광촉매 필름은 가시 광선 하에서 •OH 및 •O<sub>2</sub><sup>-</sup>을 방출하여 박테리아 세포벽을 파괴합니다.
- 대장균, 황색포도상구균, 칸디다 알비칸스의 경우 99% 이상입니다.
- 의료 환경에서 사용되며 교통 접촉 표면의 항균 코팅에 사용됩니다.

## 4. 대표적인 재료 시스템 및 성능 데이터

재료 시스템	광원 유형	저하 객체	분해 효율
WO <sub>3</sub> / TiO <sub>2</sub>	자외선+가시 광선	RhB (20mg/L)	60 분 안에 95% 이상
gC <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / WO <sub>3</sub>	가시광선	메틸 오렌지	90 분 안에 90% 이상
Ag@ WO <sub>3</sub>	햇빛 시뮬레이션	페놀	120 분 안에 85% 이상
W <sub>18</sub> O <sub>49</sub> 나노로드	LED 광원	시클로프로필아민	100 분 안에 80% 이상
H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> / 활성탄	자연광	유기성 폐수 COD	70~85% 감소

## 5. CTIA GROUP 기술 R&D 진행 상황

CTIA 그룹은 텅스텐 기반 광촉매 소재에 대한 체계적인 연구를 수행했으며, 그 내용은 다음과 같습니다.

방향	기술적 내용	단계 성과
재료 준비	고비표면적 텅스텐산의 저온 액상 합성	단결정 형태의 텅스텐산의 표면적은 125m <sup>2</sup> /g 에 도달할 수 있습니다.
구조적 수정	gC <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / WO <sub>3</sub> 이중구조 의 구축	RhB 분해가 35% 증가했습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

응용 시스템	정적 및 동적 광촉매 수처리 모듈 설계	이미 복건성의 인쇄 및 염색 공장 테스트 라인에 배치됨
제품 개발	텅스텐산 코팅 공기정화시트 개발	고효율 살균기능으로 안정적인 사이클 수명 300 시간 이상

## 7.2 에너지 저장 소재(슈퍼커패시터, 배터리) 분야에서 텅스텐산의 연구 진행 상황

에너지 위기에 대처하고 친환경 에너지 기술을 개발하는 맥락에서 에너지 저장 소재 개발은 에너지 기술의 중요한 전선으로 부상했습니다. 텅스텐산( $H_2WO_4$ )은 우수한 전기화학적 가역성, 구조적 다양성, 풍부한 산화환원 활성 중심, 그리고 높은 비용량 전위를 가지고 있어 슈퍼커패시터 및 배터리 전극 소재와 같은 에너지 저장 분야에서 최근 몇 년간 큰 주목을 받아 왔습니다.

이 섹션에서는 에너지 저장 재료에서 텅스텐산과 그 산화 유도체의 작용 기전, 합성 방법, 개질 전략 및 응용 시나리오에 중점을 둡니다. 최신 연구 결과와 CTIA 그룹의 실질적인 발전 상황을 결합하여 현대 에너지 저장 시스템에서의 개발 전망을 제시합니다.

### 1. 에너지 저장 소재를 위한 텅스텐산의 기본 특성

특성	성능	에너지 저장 기능
가역적 산화환원 반응	$W^{6+} \leftarrow W^{5+} \leftarrow W^{4+}$	의사용량 또는 정전용량 응답을 제공합니다.
다형성 구조	단사정계, 삼사정계, 직교정계 등	이온 확산 채널 조절
높은 이론적인 비정전용량	$>700$ F/g (이론적)	슈퍼커패시터 소재 개발을 위해
구조적 안정성	$WO_3 / H_2WO_4$ 높은 분해 온도	고전압 창문 시스템에 적합
좋은 전극 호환성	탄소, 전도성 고분자 등과의 강력한 복합 특성	인터페이스 구축 및 전자 이동에 유리함

### 2. 텅스텐산 및 그 유도체의 슈퍼커패시터 응용

슈퍼커패시터(SC)는 표면 전하 축적과 의사용량성 반응을 에너지 저장 메커니즘으로 사용하는 에너지 저장 장치입니다. 텅스텐산염 소재는  $W^{6+}/W^{5+}$  변환 과정에서 빠르고 가역적인 패러데이 반응에 참여할 수 있기 때문에 의사용량성 소재에서 주로 사용됩니다.

#### 1. 재료 시스템 및 성능

재료 시스템	합성 방법	커패시터 성능
$H_2WO_4$ 나노시트	수열법	410 F/g (0.5 A/g)
$WO_3$ 나노로드	졸-겔법	515 F/g (1 A/g)
$W_{18}O_{49}$ 나노와이어	열분해 + 결합 공학	621 F/g (0.2 A/g)
$WO_3 / CNT$ 복합재	솔루션 블렌딩 + 열처리	720 F/g (1 A/g)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 성능상의 이점

- 짧은 응답 시간: 충전 및 방전이 2 초 이내에 완료됩니다.
- 강력한 사이클 안정성: 5000~10000 사이클 후에도 용량 유지율이 85% 이상입니다.
- 고전력 출력: 높은 전류 밀도(>10 A/g)에서 작동을 지원합니다.
- 넓은 작동 전압 창(>1.2V, 수계);

## 3. 수정 전략

- **전도도 향상** : 그래핀, CNT, 탄소 천 등과 복합하여 전자 이동 속도를 높입니다.
- **표면적 조절** : 반응 부위를 늘리기 위한 다공성, 층상 및 중공 구조 합성
- **이온 도핑** : 산화환원전위와 전하전달률을 조절하기 위해  $Mo^{6+}$ ,  $V^{5+}$ ,  $Mn^{2+}$  등을 사용합니다.
- **폴리머 복합재** : PANI 와 PPy 를 함께 사용하면 시너지 효과를 통해 이중 기능적 반응을 얻을 수 있습니다 .

## 3. 전지 전극 소재에 있어서 텅스텐산의 연구 진행

높은 전기화학적 안정성과 가역적 산화환원 능력을 갖추고 있어 리튬 이온 전지(LIB), 나트륨 이온 전지(SIB), 마그네슘 이온 전지 및 유연한 마이크로 전지용 전극 소재가 개발되었습니다 .

### 1. 텅스텐계 리튬전지 음극소재

- ( $W^{6+} \rightarrow W^0$ ) 을 생성할 수 있으며 이론 용량이 높습니다(693 mAh /g).
- 어느 정도 부피 팽창 문제가 있지만 나노사이징과 탄소복합소재를 통해 극복할 수 있다.
- 초기 용량은 600mAh/g 이상 달성 가능하며, 사이클링 후 용량은 400~ 500mAh /g 로 안정적입니다.

### 2. 나트륨 이온 전지에서의 텅스텐산 탐색

- 나트륨 이온은 반경이 크기 때문에 더 넓은 채널이 필요합니다.
- 나노  $WO_3$  또는 도핑된 텅스텐산 구조는 우수한 이온 확산 특성을 가지고 있습니다.
- 초기 용량은 약 200~350mAh / g 이며, 사이클 안정성이 좋습니다.

### 3. 새로운 배터리 시스템에 적용

- **고체 배터리 계면 소재** :  $WO_3$  나노필름으로 계면 안정성 향상
- **전고체 유연 배터리** : 텅스텐 복합 전해질은 이온 전도도와 기계적 유연성이 우수합니다.
- **마이크로 배터리 및 에너지 칩** : 텅스텐 산화물 나노리본은 유연한 전자 장치에서 초소형 전극으로 사용될 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### IV. 실제 응용 및 엔지니어링 사례

응용 프로그램 시나리오	재료 시스템	성능 특성
산업용 슈퍼커패시터 전극	WO <sub>3</sub> / 카본 천	고용량, 저임피던스, 준비 용이
유연한 에너지 저장 장치	H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> / PPy / PVA 복합 전극	구부릴 수 있음, 수명 10000 회 이상
빠른 충전 전원 모듈	W <sub>18</sub> O <sub>49</sub> / G 복합 나노전극	60초 완전 충전, 고속 충전 및 방전 저항 지원
전동 공구/UAV 에너지 저장	WO <sub>3</sub> @CNT 복합 전극	높은 출력 밀도, 우수한 저온 성능

#### 5. CTIA GROUP 실무 진행 상황

CTIA 그룹은 텅스텐산 에너지 저장 소재의 산업화에 대한 다차원적 탐색을 수행했습니다.

방향	구체적인 진행 상황
원자재 개발	층상 구조를 갖는 텅스텐산 분말(입자 크기 50~300nm)
프로세스 플랫폼	"나노텅스텐산-탄소계 복합슬러리-전극시트"의 통합 생산라인을 구축합니다.
산업 협력	대학과 협력하여 WO <sub>3</sub> /GO 복합 슈퍼커패시터를 개발합니다.
응용 프로그램 시나리오	신에너지 자동차 및 전력망 최대 부하 조절 시스템에 대한 시범 샘플을 제공합니다.
결과	이 회사는 텅스텐 기반 에너지 저장 소재와 관련된 특허 7건을 취득했으며, 그 중 2건은 성과 전환 단계에 들어갔습니다.

#### VI. 연구 핫스팟 및 향후 개발 방향

##### 1. 텅스텐산 에너지 저장 소재 구조 공학

- 전해질 침투와 이온 확산을 개선하기 위해 다단계 기공 구조를 개발합니다.
- 사이클 안정성을 최적화하기 위해 중공/코어-셸/이중접합 유형의 전극 입자를 구성합니다.

##### 2. 다기능 복합 에너지 저장 시스템

- 빛, 전기, 열의 3중 반응 기능을 통합하여 지능형 에너지 저장 및 분배를 실현합니다.
- MXene, 텅스텐산-MOF 와 같은 새로운 복합 에너지 저장 소재를 구축합니다.

##### 3. 대량 제조 및 저비용 공정 개발

- 수열, 분무 및 열처리 경로를 단순화합니다.
- 산업용 소재에서 고성능 전자용 소재로의 전환을 촉진합니다.
- 나트륨 전지, 리튬황 전지, 전고체 전지를 통합적으로 개발합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## VII. 요약

텅스텐산과 그 유도체는 독특한 전기화학적 특성, 구조적 다양성, 그리고 제어 가능성으로 인해 새로운 에너지 저장 소재 시스템에서 매우 경쟁력 있는 소재로 자리 잡고 있습니다. 슈퍼커패시터, 배터리 전극, 그리고 플렉서블 에너지 저장 장치 분야에서 텅스텐산의 응용 분야는 끊임없이 발전하고 있으며, 신에너지와 전자 소재의 통합에 대한 새로운 아이디어를 제시합니다. 앞으로 텅스텐산은 고에너지 밀도, 장수명, 저비용 친환경 에너지 저장 기술에서 핵심적인 역할을 수행할 것으로 기대됩니다.

### 7.3 전기변색 및 광학 제어 재료에 대한 텅스텐산의 응용

전기변색 재료는 인가된 전압에 따라 광학적 특성(색상, 투과율, 반사율 등)이 가역적으로 변하는 기능성 재료입니다. 스마트 윈도우, 전자종이, 디스플레이, 열 조절 유리 등에 널리 사용됩니다. 텅스텐산( $H_2WO_4$ ) 과 그 산화 유도체, 특히 삼산화텅스텐( $WO_3$ )은 뛰어난 광전 반응 성능, 우수한 전기화학적 안정성, 그리고 가역적인 이온 삽입 거동으로 인해 가장 성숙되고 널리 사용되는 무기 전기변색 재료 중 하나가 되었습니다.

이 섹션에서는 전기변색 및 광학 조절에 있어서 텅스텐산 및 관련 물질의 핵심 메커니즘, 물질 종류, 제조 공정, 성능 지표 및 일반적인 응용 분야를 포괄적으로 논의하고, 텅스텐산을 지능형 광전자 재료로 개발하기 위한 이론적 지원과 기술적 경로를 제공합니다.

#### 1. 텅스텐 소재의 전기변색 원리 및 반응 메커니즘

##### 전기변색의 기본 원리

전기변색(Electrochromism)은 전기장의 작용 하에 결정 격자 내에서 전자와 이온이 이동하여 물질의 광학적 특성이 가역적으로 변화하는 현상을 말합니다. 주요 반응 과정은 다음과 같습니다.



여기서  $M^{+}$ 는 삽입된 이온( $H^+$ ,  $Li^+$ ,  $Na^+$  등)입니다. 삽입 후,  $M_xWO_3$ 는 무색(또는 밝은 파란색)에서 진한 파란색 또는 청자색으로 변하며 색상 변화를 나타냅니다.

##### 2. 텅스텐산 물질의 응답 특성

- **색상이 상당히 변합니다** : 무색/밝은 노란색에서 진한 파란색/진한 회색으로;
- **빠른 반응 속도** : 삽입 반응이 빠릅니다(<2s);
- **강력한 가역성** : 수만 번의 색상 변경 주기를 달성할 수 있습니다.
- **강력한 스펙트럼 제어 기능** : 주로 가시광선 영역에서 작용하며 근적외선 영역까지 확장 가능
- **낮은 에너지 소비** : 지속적인 전원 공급 없이도 색상 변화 상태를 유지할 수 있습니다.

#### 2. 텅스텐산 및 그 유도체의 전기변색 물질의 종류

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. 결정질 WO<sub>3</sub> 박막

- H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>의 열분해 또는 전기화학적 증착에 의해 형성됨;
- 좋은 결정성과 강력한 광학적 제어;
- 스마트 윈도우 및 반사 방지 필름에 적합합니다.

### 2. 텅스텐 산/비정질 WO<sub>3</sub> 겔 소재

- 유연성이 좋고, 폴리머와 합성이 가능합니다.
- 곡면 장치와 유연한 디스플레이에 사용됩니다.

### 3. 나노구조 텅스텐산 소재

- 나노로드, 시트, 중공 구형 등의 형태
- 비표면적과 반응속도를 향상시킵니다.
- 이는 삽입 효율성과 사이클 수명을 개선하는 데 도움이 됩니다.

### 4. 복합텅스텐산 전기변색소재

- TiO<sub>2</sub> 와 함께 2, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, PEDOT, PANI 등;
- 다기능 조광 소재 시스템을 구축하세요.

## 3. 박막 제조 공정 및 소자 구성

### 1. 필름 제조 방법

방법	특징
졸-겔법	저렴한 가격, 대면적 코팅에 적합, 균일한 필름층
열분해법	결정성, 결정질 WO <sub>3</sub> 필름 제조에 적합
전기화학적 증착	밀도 높은 구조와 조절 가능한 두께
스퍼터링	강력한 필름 접착력으로 다층 적층 구조에 적합
분무 방법	산업화에 적합한 빠른 필름 형성

### 2. 장치 구성

일반적인 전기변색소자 구조는 다음과 같습니다.

전도성 유리/전기변색층(WO<sub>3</sub>) /전해질층/대전극층(NiO)/전도성 유리

선택 전해질: 고체 PVA/H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 겔, Li<sup>+</sup> 폴리머, 이온성 액체 등

### 4. 성과 평가 지표

색인	범위	설명하다
광 변조 진폭(ΔT)	30 - 70% (633nm 에서)	변색 전후의 빛 투과율 차이
착색 효율(CE)	40~120cm <sup>2</sup> /C	단위 전하당 광학 밀도 변화
색상 변경 응답 시간	염색 <3 초, 표백 <6 초	동적 디밍의 경우 빠를수록 좋습니다.
순환 안정성	감쇠 없이 10,000 회 이상	지속성 핵심 지표
에너지 소비	< 5mW /cm <sup>2</sup>	뛰어난 저전력 소모 장점

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5. 일반적인 적용 분야

### 1. 스마트 윈도우

- 실내 조명과 난방을 제어하여 에어컨 에너지 소비를 줄입니다.
- 고급 건물, 철도 운송, 우주선 창문 등에 사용되었습니다.
- 태양광 전지와 센서를 통합하여 자동으로 조명을 바꿀 수 있습니다.

### 2. 유연한 전자종이와 저전력 디스플레이

- 텅스텐산 필름은 대비도와 가시성이 높습니다.
- 폴리머 전해질을 이용한 곡면 판독기 제작;
- 저전력 소모 환경에서 기존 LCD 와 LED 를 교체합니다.

### 3. 광전 보호 및 위장 시스템

- 반사율을 조절하고 열적 적외선을 차단하는 빠른 대응;
- 군사용 스텔스, 항공기용 창문, 레이저 차단 보호 코팅
- 광학적 색상 변화와 열 제어 기능의 통합을 실현합니다.

### 4. 정보 표시 및 위조 방지 응용 분야

- 패턴화된 색상 변화 레이어와 다층 반응형 구조 구축
- 신원 인식, 티켓 위조 방지, 대화형 전자 태그 등에 사용됩니다.

## VI. CTIA 그룹 전기변색 기술 개발 실무

모듈	구현 내용	단계 성과
원자재 개발	고분산 $H_2WO_4$ 및 나노- $WO_3$ 슬러리	저온 박막 증착 공정용
프로세스 플랫폼	젤+열분해 복합 필름 생산라인 구축	필름 균일도는 $\pm 5\%$ 이상, $\Delta T$ 는 최대 60%
장치 테스트	PVA/ $H_3PO_4$ 고체 전기변색 소자	감쇠 없이 색상 변경 주기 >15,000 회
애플리케이션 개발	건축용 유리업체와 스마트 윈도우 제품 공동 개발	샘플 테스트가 완료되었고 시험 출시 단계가 시작되었습니다.

## 7. 연구 동향 및 향후 발전 방향

### 1. 전고체 유연소자 개발

- 유연전극(ITO-PET, 은나노와이어) 및 고체젤 전해질 개발
- 롤러블, 웨어러블 스마트 시각 시스템을 구축하세요.

### 2. 다기능 복합소재 설계

- 에너지 저장, 전기 발광, 광열 조절 기능을 결합합니다.
- $WO_3 @CNT$ ,  $WO_3 /PEDOT$  등의 복합 시스템을 구축합니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. 지능형 제어 시스템 통합

- 센서와 조명 제어 모듈을 통합하여 환경에 적응하는 색상 변화를 구현합니다.
- "사물인터넷+스마트소재"의 새로운 플랫폼에 적용되었습니다.

### 4. 장수명, 높은 안정성 개발

- 인터페이스 매칭을 개선하고 삽입된 물질의 구조적 감쇠를 억제합니다.
- 전하 이동 응력을 완화하기 위한 다공성/질서 있는 구조 설계.

## 8. 요약

거동, 넓은 스펙트럼 응답 특성, 그리고 안정적인 구조적 특성 으로 인해 지능형 조광 및 광 조절 분야의 핵심 소재 중 하나로 자리매김했습니다. 텅스텐산 전기변색 시스템은 유연 소재, 에너지 저장 시스템, 그리고 지능형 제어 기술과의 통합을 통해 친환경 건물, 유연 전자 장치, 그리고 지능형 광전자 통합 분야에서 더욱 중요한 전략적 역할을 수행할 것입니다.

### 센서 및 자가세척 소재에 나노텅스텐 산 의 개발

텅스텐산( $H_2WO_4$ ) 은 뛰어난 광학적, 전기적, 화학적 안정성을 가지고 있으며, 나노스케일 유도체(나노텅스텐산)는 더 높은 비표면적, 더 강한 표면 활성, 그리고 더 빠른 반응 속도를 가지고 있습니다. 최근 나노텅스텐산은 환경 센서, 가스 센서, 습도 감지, 생체 인식, 자가 세척 코팅, 김서림 방지 및 오염 방지 소재 등에 널리 사용되어 왔으며, 차세대 스마트 소재 개발을 위한 기능적 플랫폼으로 점차 자리 잡고 있습니다.

이 섹션에서는 센서 및 자체 세척 분야에서 나노텅스텐산 소재의 성능 이점, 소재 구성 전략, 일반적인 응용 분야와 더불어 이 분야에서 CTIA 그룹의 연구 관행에 대해 중점적으로 살펴봅니다.

### 1. 나노텅스텐산의 특성 및 기능적 장점

재산	설명하다	응용 프로그램 가치
높은 비표면적	나노입자 크기 ( $10\sim 100nm$ ), 다공성 구조	분석물의 흡착 및 인식 효율 향상
풍부한 표면 산소 공석	조정 가능한 전자 상태 및 촉매 활성 센터	가스 감지, 전기 감지 및 광 반응 동작에 유리합니다.
강한 빛 반응성	자외선과 가시광선의 일부를 흡수할 수 있습니다.	자체 세척 및 광촉매 살균 기능을 자극합니다.
다양한 재료와 혼합 가능	CNT, GO, 폴리머 등을 이용한 시너지 구조 구축	향상된 감지 선택성 및 안정성
좋은 화학적 안정성	산 및 알칼리 내식성, 높은 열 안정성	복잡한 환경에서의 장기 작업에 적합

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 센서 분야에서 나노텅스텐산의 응용

### 1. 가스 센서

텅스텐산 기반 물질은 다양한 가스(예:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , 에탄올, 포름알데히드 등)에 대해 높은 감도와 선택성을 보입니다.

작동 메커니즘:

- 가스 분자 흡착 → 저항/전류 변화 → 신호 출력;
- 산소 공석과  $\text{W}^{6+} / \text{W}^{5+}$  변환은 전자 전달을 조절하는 데 역할을 합니다.
- 빛에 의한 감지는 반응 강도와 선택성을 향상시킵니다.

대표적인 재료 및 특성:

재료 시스템	가스 타겟팅	검출 한계	응답 시간
$\text{H}_2\text{WO}_4$ 나노시트	$\text{NH}_3$	0.2ppm	<30 초
$\text{WO}_3$ 나노와이어	아니오 <sub>2</sub>	50ppb	<10 초
$\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ @CNT	$\text{H}_2\text{S}$	0.1ppm	<5 초
$\text{WO}_3$ / rGO 복합체	에탄올	1ppm	<20 초

### 2. 습도 및 온도 센서

- 텅스텐산은 물 분자의 흡착에 민감하며 용량성/저항성 습도 센서로 설계될 수 있습니다.
- 환경 모니터링, 스마트 의류, 건강 전자 패치 등에 통합될 수 있습니다.

### 3. 바이오센싱 및 전기화학적 검출

- 나노- $\text{WO}_3$  복합체는 포도당, 콜레스테롤, DNA 등의 검출에 사용됩니다.
- 표면은 효소, 항체, 앵타머로 기능화될 수 있습니다.
- 높은 감도와 빠른 응답 속도를 구현할 수 있으며, 착용형 의료기기로 활용될 가능성이 있습니다.

## 3. 자가세정 소재용 나노텅스텐산 개발

### 1. 자체 세척 메커니즘 개요

나노텅스텐산의 자가 세척 성능은 주로 광촉매 분해 와 초친수성 표면 효과 의 시너지 효과를 통해 달성됩니다 .

- 광촉매 작용 : 자외선이나 가시광선 하에서  $\text{OH}^-$  등의 활성종이 생성되어 유기오염물질을 분해합니다.
- 매우 친수성 : 물방울이 퍼져서 표면의 먼지와 기름을 청소합니다.
- 항균 특성 : 활성산소는 박테리아와 바이러스를 죽일 수 있습니다.

### 2. 재료 시스템 및 기능적 특성

재료 시스템	증상	응용 프로그램 예제
$\text{WO}_3$ 필름	강한 빛 반응과 투명함	셀프 클리닝 유리 커튼월
$\text{H}_2\text{WO}_4$ / $\text{SiO}_2$ 복합체	나노 거칠기 + 광촉매	자동차 백미러 안개 방지

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W 18 0 49 나노로드	가시광선 반응	의료용 클린 표면 항균 코팅
WO <sub>3</sub> / TiO <sub>2</sub> 복합 필름	시너지 촉매 효과	태양광 패널 방진 코팅

### 3. 필름 형성 및 시공 방법

- 스�핀 코팅/스프레이 코팅 : 유리, 세라믹 및 플라스틱 기판에 적합
- 졸-겔 방법 : 필름 밀도와 표면 에너지를 제어합니다.
- 전기영동 증착 : 대면적의 균일한 필름층 구축
- 템플릿 지원 방식 : 마이크로-나노 크기의 다공성 거친 표면 생성.

### 4. 포괄적인 적용 사례 및 시나리오 확장

응용 시나리오	프로그램	재료 시스템	주요 특징
스마트 마스크		나노팅스텐산/PVA 복합필름	가스 감지 + 항균 보호
스마트 빌딩		팅스텐산 자가세척 유리	빛 조절 및 투과 + 오염 방지 및 먼지 제거
스마트 웨어러블 기기		나노 WO <sub>3</sub> 박막 감지층	습도/땀 감지 및 생리적 모니터링
의료용 표면 소재		나노팅스텐산 항균코팅	항균+광촉매 자가세척 이중기능
자동차 산업		백미러 안개 방지 필름	빠른 친수성 + 강력한 내후성

### 5. CTIA 그룹 연구 및 산업 변혁

CTIA 그룹은 나노팅스텐산 감지 및 자가 세척 소재 분야에서 심층적인 레이아웃을 수행했습니다.

방향	구현 내용	단계 성과
원자재 시스템	나노팅스텐 분말 입자 크기는 20~100nm 로 제어됩니다.	분무/코팅을 위해 배치 단위로 사용 가능
복합소재 개발	WO <sub>3</sub> @TiO <sub>2</sub> , WO <sub>3</sub> @GO, WO <sub>3</sub> @ PVA 등	다기능 소재의 통합 달성
제품 출시	나노팅스텐산 자가세척 유리전구체 용액 출시	건축/교통용 유리 코팅에 적합
센서 모듈	과학 연구 기관과 협력하여 NO <sub>2</sub> 감지 필름 모듈 개발	30 초 이내에 ppm 수준의 가스 감지 달성
지적 재산권	나노팅스텐산 기능성 소재 관련 특허 6건 출원 및 등록 완료	

### VI. 개발 동향 및 연구 초점

#### 1. 다중 매개변수 지능형 지각 플랫폼 개발

- 온도, 가스, 습도 등 여러 기능을 통합합니다.
- AI 인식 칩과 통합하여 환경에 적응하는 피드백을 구현합니다.

#### 2. 웨어러블 및 플렉시블 센서 소재 설계

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- PVA, PDMS, 폴리이미드와 같은 유연한 기판을 사용합니다.
- 건강 모니터링 분야에 활용될 텅스텐 기반의 유연 센서 어레이를 구축합니다.

### 3. 자체 세척 및 항균 기능이 통합된 표면 구조

- 광촉매 살균 능력을 강화하고 필름층의 내구성을 향상시킵니다.
- 안개 방지, 먼지 방지, 자외선 차단 기능을 결합하여 "전면 표면 소재"의 개발을 실현했습니다.

### 4. 친환경 코팅 및 녹색 합성 기술 보급

- 기존의 유기 용매를 대체하기 위해 무독성 전구체와 수성 공정을 사용합니다.
- 코팅 필름 형성 온도와 에너지 소비를 줄여 산업 환경 보호 요구 사항을 충족합니다.

## VII. 요약

제어 가능한 구조, 다양한 기능, 그리고 안정적인 성능을 갖춘 새로운 유형의 소재로서 나노텅스텐산은 센서 및 자가 세척 기술 분야에서 중요한 역할을 수행하고 있습니다. 뛰어난 광전 활성, 표면 화학적 거동, 그리고 소재 적응성을 갖춘 나노텅스텐산은 스마트 소재, 친환경 코팅, 그리고 스마트 웨어러블 기기의 필수 구성 요소입니다. 앞으로 텅스텐산 소재 설계 및 인터페이스 구축 기술이 지속적으로 발전함에 따라 스마트 환경, 개인 맞춤형 의료, 스마트 교통, 그리고 친환경 건축 분야에서 더욱 큰 잠재력을 발휘할 것입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Tungstic Acid Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

#### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ\text{C}$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

#### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu\text{m}$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$\text{Fe} \leq 10, \text{Na} \leq 5, \text{Si} \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$\text{SO}_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

#### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

#### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 8 장: 분석화학 및 시약에서의 텅스텐산의 응용

### 8.1 비색제 및 적정제로서의 텅스텐산

텅스텐산( $H_2WO_4$ ) 과 그 다양한 염 유도체는 분석화학에서 오랜 역사를 가지고 있습니다. 특히 발색 반응, 착물 적정, 비색 분석 및 이온 정량에서 텅스텐산은 다양한 양이온과 안정한 다핵 구조 또는 복합 구조를 형성하고 현저한 색 변화를 보입니다. 따라서 분석 시약, 발색제 및 적정 보조제로 자주 사용됩니다.

이 섹션에서는 전통적인 분석 화학 시스템에서 텅스텐산의 고전적 응용 프로그램을 체계적으로 검토하고, 발색 메커니즘, 적정 시스템에서의 작용 방식, 다른 시약과의 조합, 그리고 현대 비색 분석에서 성능을 최적화할 필요성을 소개합니다.

#### 컬러 현상액으로서 텅스텐산염의 기본 메커니즘 및 종류

##### 1. 색반응의 원리

텅스텐산은 강력한 배위능을 가지고 있으며 산성 조건 하에서 특정 금속 이온(인산염, 비산염, 규산염, 게르마늄산염 등)과 독특 하고 안정적인 **헤테로폴리산 복합체** (인산텅스텐산, 규소 텅스텐산 등)를 형성하여 청색, 황색, 녹색 등의 색상을 나타내므로 비색 분석에 사용할 수 있습니다.

예를 들어:



환원제의 작용으로 텅스텐 블루를 얻을 수 있으며, 가시광선 색도 측정에 적합합니다.

##### 2. 일반적인 텅스텐산염 발색 시스템

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연색성 시스템	표적 이온/물질	색상 생성	애플리케이션
인텡스텐 산	우편환 $4^{3-}$	파란색/녹색	수질 인 함량 검사
실리코 텡스텐산	$SiO_3^{2-}$	노랑 녹색	규산염 분석
비소 텡스텐산염	아소 $4^{3-}$	하늘색	환경 모니터링
게르마늄 텡스텐산염	$GeO_2$	파란색 보라색	토양 분석

### 3. 색상 생성 메커니즘

위의 발색 반응은 헤테로폴리산 형성 반응에 속합니다. 여러 개의  $[WO_6]$  팔면체와 중심 이온(예: P, Si, As)이 배위 결합을 통해 케 긴형 구조가 형성되고, 이후 전자 이동이 일어나 발색됩니다.

## 2. 적정 보조 시약으로서 텡스텐산의 역할

텡스텐산은 적정 분석에 다음과 같이 자주 사용됩니다.

- **마스킹 제** : 금속 이온 반응의 방해를 방지합니다.
- **보조 착화 제** : 착화 적정의 선택성을 향상시킵니다.
- **산화환원 조절제** : 용액 전위와 반응 방향을 조절합니다.

### 1. 안티몬, 비소 및 기타 원소의 정량적정에 사용되는 텡스텐산

- + ) 샘플 에서 ;
- 비소 텡스텐산 복합체가 형성되고, 적정 종말점에서의 색상 변화에 의해 종말점이 결정됩니다.
- 일반적으로 몰리브덴 블루법이나 텡스텐 블루법의 보조 표준계로 사용됩니다.

### 2. 복합적정 시스템

텡스텐산은 특정 적정 시스템을 위해 다음 시약과 함께 사용되는 경우가 많습니다.

결합 시약	적정 유형	대상 구성 요소
EDTA	착물 적정	$Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ 등
염화주석	환원 적정	$Fe^{3+}$ , $Cr^{6+}$
프탈산	산-염기 적정 마스킹제	$Al^{3+}$ 와 같은 간섭 이온

텡스텐산은 이러한 시스템에서 산성도를 선택적으로 가리거나 조절하는 역할을 하여 적정의 정확도와 감도를 향상시킵니다.

## 3. 일반적인 색상 분석 실험 계획

### 1. 인의 비색법 정량 (텡스텐 블루 법)

**원리** : 산성 조건에서 인산염은 텡스텐산과 반응하여 인텡스텐 산을 형성하고, 이 인텡스텐산은 환원제(아황산, 아스코르브산 등)에 의해 환원되어 청색 복합체를 형성합니다.

**단계** :

1.  $H_2WO_4$  시약을 첨가한다 .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. pH 를 0.2~1.0 으로 조절합니다.
3. 환원제를 첨가한다.
4. 흡광도는 700~880nm 파장에서 측정되었습니다.

이점 :

- 높은 감도;
- 사용하기 쉽습니다.
- 이는 표면수, 식수 및 하수 분석에 적용될 수 있습니다.

## 2. 실리콘의 비색법 정량( 실리코 텅스텐산법)

- 텅스텐산은 규산염과 반응하여 황록색 실리코텅스텐 산 복합체를 형성합니다.
- n-부탄올 추출법을 사용하면 민감도가 향상되었습니다.
- 시멘트, 광물, 유리 원료 등의 분석에 적용됩니다.

## 4. 텅스텐 분석시약의 제조 및 사용조건

### 1. 텅스텐 시약 공식(전형적)

레시피 재료	콘텐츠	설명하다
텅스텐산 ( $H_2WO_4$ )	10~15g/L	원래 텅스텐 공급원
염산 또는 황산	pH <1 제어	반응의 산성도를 확인하세요
환원제(예: $NaHSO_3$ )	보통의	색상 반응을 위해

### 2. 보관 및 안정성

- 준비된 텅스텐 시약은 밀봉하여 빛으로부터 보호해야 합니다.
- 실온에서 7~10 일간 안정적으로 보관이 가능합니다.
- 색상 변화를 방지하기 위해 환원제를 첨가한 직후에는 즉시 제품을 사용해야 합니다.

### 3. 참고사항

- 텅스텐산은 강산성 시스템이므로 작동 시 안전에 주의하시기 바랍니다.
- 색상 반응은 pH 에 매우 민감하며 정밀하게 제어해야 합니다.
- 불순물 이온( $Mo^{6+}$ ,  $V^{5+}$  등 ) 은 색상 반응을 방해할 수 있으므로 전처리를 통해 제거해야 합니다.

## 5. CTIA GROUP 시약 제품 및 응용 분야 확장

CTIA 그룹은 텅스텐산 분석 시약 분야에서 다음을 포함한 일련의 표준화된 제품을 개발했습니다.

제품명	형태	일반적인 용도
분석 등급 텅스텐산( $\geq 99.9\%$ )	가루	일상적인 실험실 준비
인텅스텐 산 표준 비색 용액	액체	빠른 비색 정량화
텅스텐 유도체 마스크제	고체 또는 용액	적정 보조 시약 시스템

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실리코텡스텐 산 테스트 키트    산업용 시약 키트    시멘트/실리카 재료 분석

또한 우리는 많은 대학 연구실과 협력하여 텡스텐산 시약의 미량분석 및 나노 비색측정 장치 개발을 추진하고 있습니다.

## VI. 연구 핫스팟 및 향후 개발 방향

### 1. 미세/미량 검출을 위한 새로운 시스템

- 텡스텐산은 나노금 및 양자점과 같은 민감한 물질과 결합되어 매우 민감한 비색 측정법을 구성합니다.
- 식품 안전, 중금속 미량 분석 등에 적용됩니다.

### 2. 고체상 및 센서 개선

- 텡스텐 컬러 현상액은 종이 기판, 멤브레인 기판 또는 마이크로유체 플랫폼에 적재됩니다.
- 휴대용 센서 칩과 신속 테스트 카드를 개발합니다.

### 3. 지능형 색차 측정 시스템 개발

- 스마트폰 APP 인식 기술과 결합하여 디지털 컬러 분석을 실현할 수 있습니다.
- AI 모델은 텡스텐산 색상 스펙트럼을 분석하여 다중 성분 식별을 달성하는 데 사용됩니다.

## VII. 요약

분석화학에서 중요한 무기 시약인 텡스텐산은 오랫동안 발색 반응 및 적정 시스템에서 핵심적인 역할을 해왔습니다. 다양한 표적 이온과 반응하여 뚜렷한 색상을 갖는 착물을 형성함으로써, 텡스텐산은 비색 분석의 감도를 향상시켰을 뿐만 아니라, 정량 분석에서 무기화학의 기술적 경계를 확장해 왔습니다. 재료과학 및 정보 분석 기술의 발전과 함께, 텡스텐산 시약은 지능화, 고처리량화, 그리고 다기능화로 나아가고 있으며, 현대 분석화학에서 그 응용 가치를 지속적으로 확대하고 있습니다.

### 8.2 분광 분석에서 텡스텐산의 배위

현대 분석화학에서 분광학 기법(자외선-가시광선 분광법, 적외선 분광법, 형광 분광법, 라만 분광법, 원자 흡광 분광법 등)은 물질의 정성 및 정량 분석에 중요한 도구로 자리 잡았습니다. 텡스텐산( $H_2WO_4$ ) 과 그 유도체는 높은 전기음성도, 강력한 배위능, 그리고 전하 이동에 관여하는 구조적 특성으로 인해 다양한 무기 및 유기 성분과 안정적인 복합체를 형성할 수 있으며, 스펙트럼 분석에서 신호 증폭, 선택적 인식 및 검출 한계 감소에 중요한 역할을 합니다.

이 섹션에서는 다양한 분광 기술에서 리간드 또는 전구체로서 텡스텐산의 행동 메커니즘, 전형적인 배위 구조 및 스펙트럼 응답 변화를 체계적으로 분석하고, 미량 이온 검출, 환경 모니터링, 생물 분석 및 물질 식별에서의 특정 응용 분야를 소개합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. 텅스텐산염의 배위 특성 및 분광 반응 기반

### 1. 텅스텐산의 구조 및 배위 특성

텅스텐산은 주로  $[WO_6]$  팔면체구조를 기본단위로 사용하며 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 집합 구조는 정점, 모서리 또는 면을 공유하여 형성될 수 있습니다.
- 이는 O, N, S, P 와 같은 배위 원자와 안정한 복합체를 형성할 수 있습니다.
- 폴리옥소텅스텐산염 과 같은 다중 중심 금속 복합체에 참여할 수 있습니다 .

### 2. 배위로 인한 스펙트럼 변화의 종류

분광형	조정	전형적인 증상
자외선-가시광선(UV-Vis)	전하 이동, dd 전이 변화	흡수파장 적색편이/청색편이, 흡광도 향상
적외선 분광법(IR)	결합 길이가 변하고 진동 에너지 레벨이 변합니다.	특징적인 피크 위치 이동 또는 강도 변화
형광 스펙트럼	에너지 레벨 구조 조절	방출 파장 이동, 양자 수율 향상
라만 분광법	군 대칭의 변화	라만 활성이 강화되고 새로운 특징적인 피크가 나타납니다.
원자 흡수	조정 후 개선된 분무 및 분산 동작	감도 향상, 간섭 감소

## 2. UV-Vis 분광 분석에서 텅스텐산의 배위 강화

### 1. 폴리산 복합체화로 인한 전하 이동 대역

$-$ ,  $SiO_3^{2-}$ ,  $AsO_4^{3-}$ , 등)과 반응합니다. 등) 산성 조건 하에서 헤테로폴리산 구조 (Keggin 형, Dawson 형)를 형성합니다. 등)을 사용하여 250~800nm 범위에서 전하 이동 흡수 대역을 생성하는데, 이는 특히 비색 검출에 적합합니다.

일반적인 반응:



- 환원되지 않은 상태의 흡수 대역은 200~250nm(밝은 색)입니다.
- 환원 후 생성된 "텅스텐 블루"는 600~700nm 의 강한 흡수대를 가지고 있습니다.

### 2. 유기 리간드 강화 발색 시스템

- 텅스텐산은 벤지딘 및 페놀과 같은 유기 분자와 공액 복합체를 형성합니다.
- 복합체의 흡수 파장은 적색편이되고, 가시광선 흡수 피크가 강화됩니다.
- 유기물의 정량적 분석이나 구조-활성 관계 분석에 사용할 수 있습니다.

### 3. 적외선 스펙트럼에서 텅스텐의 배위 인식

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. 특징적인 진동 피크

WO<sub>3</sub> 또는 H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>는 종종 적외선 스펙트럼에서 다음과 같은 특징적인 흡수를 보입니다.

- W=O 신축 진동: 880 - 950 cm<sup>-1</sup> ;
- W-O-W 브릿지 결합 진동 : 600 - 800 cm<sup>-1</sup> ;
- O-H 신축 진동(텡스텐산 수화물): 3200 - 3400 cm<sup>-1</sup> .

배위는 이러한 피크 위치의 변화를 일으키며, 이를 통해 금속 이온이나 유기 리간드가 성공적으로 결합되었는지 확인할 수 있습니다.

## 헤테로폴리산 복합체 의 식별

헤테로폴리산 ( 인산텡스텐 산 및 실리코텡스텐 산 등 )은 IR(400 - 1200 cm<sup>-1</sup> )에서 여러 개의 날카로운 흡수 피크를 가지며, 이 피크의 위치와 강도를 사용하여 헤테로폴리산 의 유형과 구조적 대칭성을 정성적으로 식별할 수 있습니다 .

## 4. 형광 분광 분석에서 텡스텐산의 기능

### 1. 텡스텐 형광 증강/소광

- 리간드로서의 텡스텐산은 희토류 이온(예: Eu<sup>3+</sup> , Tb<sup>3+</sup> ) 의 형광 방출을 조절할 수 있습니다 .
- 방출 강도 향상은 에너지 전달 과정을 통해 달성됩니다.
- 특정 형광염료와 상호작용하면 형광소광 효과가 나타나며 금속 이온 검출에 사용될 수 있습니다.

## 2. 응용 사례

감지 객체	형광 시스템	텡스텐 효과
철 <sup>3+</sup>	CdTe -WO <sub>3</sub> 복합 양자점	미량 철 검출을 위한 형광 소광
Cu <sup>2+</sup>	로다민 - WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 복합체	형광 증강 비색법을 이용한 구리의 정량
DNA	Ru( bpy ) <sub>3</sub> <sup>2+</sup> - 텡스텐산 복합체	핵산 검출을 위한 형광 증강

## 5. 원자흡광 및 방출 분석에서 텡스텐산의 보조적 역할

AAS(원자 흡수 분광법) 및 ICP(유도 결합 플라즈마 방출 분광법)에서 텡스텐산은 다음과 같은 방법으로 측정 정확도를 향상시킬 수 있습니다.

- 테스트할 금속 이온과 복합체를 미리 형성하여 분무 효율을 개선합니다.
- 매트릭스 간섭과 신호 드리프트를 줄입니다.
- 방출체로서, 분석할 복합 이온이나 침전 이온을 방출합니다.

예를 들어, 스트론튬, 납, 바륨을 검출할 때 텡스텐산염 배위 반응을 통해 알루미늄과 실리콘과 같은 배경 간섭을 크게 줄일 수 있습니다.

## 6. 일반적인 조정 시스템 및 분석 예

측정된 구성 요소	조정 양식	분석 방법	검출 한계
우편환 4 <sup>3-</sup>	H <sub>3</sub> [ PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> ]	UV-Vis 색도 측정법	0.01mg/L
SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>4</sub> [ SiW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> ]	UV-Vis 색차 측정법 + IR	0.03mg/L

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

철 <sup>3+</sup>	WO <sub>3</sub> 나노 형광 소광	형광 스펙트럼	0.005mg/L
비 <sup>3+</sup>	Bi-WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 복합물	ICP-OES	0.002mg/L

### VII. CTIA 그룹의 소재 및 기술 응용 분야

CTIA GROUP은 스펙트럼 분석과 재료 준비를 결합하여 일련의 분석 등급 텅스텐산 제품을 개발합니다.

제품명	형태	애플리케이션
고순도 H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> ( 99.99 % )	가루	헤테로폴리산 비색 시약
나노 WO <sub>3</sub> 졸	액체 분산	형광/자외선 흡수 증강 소재
헤테로폴리산 시약 키트	분말/액체	교육 및 연구를 위한 색도 분석 표준
WO <sub>3</sub> /GO 복합 프로브	필름 또는 슬러리	스펙트럼 센서 개발에 활용 가능

또한 CTIA 그룹은 대학과 협력하여 WO<sub>3</sub> 기반 컬러 센서 칩의 프로토타입을 개발하고 있으며, 수질 모니터링 및 환경 비상 분석 분야에서 현장 적용 가능성을 모색하고 있습니다.

### 8. 연구의 최전선과 미래 방향

#### 1. 다기능 스펙트럼 반응형 재료의 구축

- UV, IR 및 형광 반응을 이용한 복합 시스템을 구성합니다.
- 다중 구성 요소 동기 감지 플랫폼에 적용되었습니다.

#### 2. 스펙트럼 강화 나노 프로브 개발

- 텅스텐산과 SERS(표면 강화 라만 분광법)를 결합한 것
- 미량 오염 물질, 독극물 또는 바이오마커를 탐지하는 데 사용됩니다.

#### 3. AI 지원 스펙트럼 인식 시스템

- 텅스텐산염 배위에 의해 형성된 특징적인 스펙트럼;
- 인공지능 알고리즘을 통해 신속하고 처리량이 높은 식별 및 정량화가 가능합니다.

### IX. 요약

텅스텐산과 그 다양한 배위 형태는 분광 분석의 보조 시약으로 사용될 뿐만 아니라, 비색법, 적외선 지문 인식, 형광 프로브 제작 및 원자 분석 시스템에 널리 사용되는 구조적 기능 리간드로도 사용됩니다. 텅스텐산의 높은 배위능, 전하 이동 특성, 그리고 광범위한 스펙트럼 반응 능력은 분석화학을 위한 풍부한 반응 시스템과 기술 플랫폼을 제공하며, 다차원 분광 지능의 미래 개발을 위한 탄탄한 기반을 제공합니다.

### 8.3 중금속 검출 및 분리에 있어서 텅스텐산의 기능

중금속 오염은 오랫동안 산업 폐수 처리, 환경 보호 및 식품 안전 감독 분야에서 골칫거리였습니다. 텅스텐산(H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>)과 그 다양한 텅스텐산염 유도체는 조절 가능한

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산소 가교 팔면체 구조, 높은 전기 음성도, 그리고 우수한 착화성을 가지고 있어 금속 이온에 대한 탁월한 선택적 인식 및 결합 능력을 보이며, 특히 납 ( $Pb^{2+}$ ), 수은 ( $Hg^{2+}$ ), 구리 ( $Cu^{2+}$ ), 카드뮴 ( $Cd^{2+}$ ) 과 같은 중금속 이온의 검출, 분리 및 농축에 활용될 수 있어 폭넓은 응용 가능성을 보여줍니다.

이 섹션에서는 중금속 분석 및 정제에 있어서 텅스텐산의 재료 특성, 검출 메커니즘, 분리 경로 및 실제 응용 분야에 초점을 맞춰, 녹색 분석 및 자원 회수에 있어서 이후의 심층적 활용을 위한 이론적 근거를 제공합니다.

## 1. 텅스텐산 및 중금속 이온의 배위 및 인식 특성

### 1. 구조적 장점 및 금속 접합 능력

6] 텅스텐산의 팔면체 구조는 다음과 같은 중금속 결합 특성을 갖습니다.

특성	성능	앱 기능
다중 치아 협응 능력	W-O-M 브릿지 결합을 형성할 수 있습니다.	금속 이온의 안정적인 결합
수산기/ $O^2$ 가 풍부한 표면	$M^{2+}$ 이온과 쉽게 교환 가능	흡착 및 침전 반응에 유리함
헤테로폴리산 구조를 형성할 수 있음	M-W 복합단지 건설	선택성이 크게 향상됨
조절 가능한 밴드 구조	향상된 전기화학적 검출에 도움이 됩니다.	전극 재료의 기능화

### 2. 표적 금속 이온

텅스텐산 물질은 다음 금속 이온에 대해 상당한 인식/결합 능력을 가지고 있습니다.

- 높은 친화성:  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$  ;
- 중간 친화력:  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  ;
- 다가 금속:  $Cr^{3+}/Cr^{6+}$ ,  $As^{3+}/As^{5+}$  (이중다중산에 의해 배위됨).

## 2. 중금속 이온 검출에 텅스텐산의 응용

### 1. 비색 검출

텅스텐산은 중금속 이온과 가시광선을 흡수하는 복합체를 형성하여 색상 반응을 일으킵니다.

이온	컬러 제품	$\lambda_{max}$	탐지 한계 (LOD)
$Pb^{2+}$	Pb - $H_2WO_4$ 복합물	540nm	0.005mg/L
$Cu^{2+}$	Cu - $WO_4^{2-}$ 복합물	580nm	0.01mg/L
$Hg^{2+}$	Hg-W 헤테로폴리산 구조	600nm	0.002mg/L

장점:

- 색상은 뚜렷하고 육안으로 쉽게 관찰할 수 있습니다.
- 휴대용 테스트나 시험지 개발에 적합합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 전기화학적 검출

그 복합체로 전극 표면을 변형하여 중금속 전기화학 센서를 구성합니다.

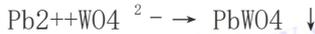
- $Pb^{2+}$  및  $Cd^{2+}$  검출을 위한 텅스텐산/그래핀( $WO_3 @ rGO$ ) 개질 유리 탄소 전극 ;
- $Hg^{2+}$ 의 전압전류 검출을 위한  $WO_3$  나노시트/탄소 전 복합재 ;
- 검출 한계는 ppb 수준까지 낮출 수 있으며, 응답 시간은 10 초 이내로 현장에서 신속하게 검출하기에 적합합니다.

## 3. 텅스텐산 물질을 이용한 중금속 이온의 선택적 분리 및 농축

### 1. 침전법의 분리 메커니즘

- 텅스텐산은 산성 또는 중성 조건 하에서 일부 금속 이온과 불용성 침전물을 형성할 수 있습니다.
- 예를 들어,  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  및  $WO_4^{2-}$ 는  $PbWO_4$ 를 형성합니다. ;
- 이러한 침전물은 열에 안정적이며 여과가 가능하고 전처리 농축에 적합합니다.

반응 예시:



### 2. 선택적 흡착 및 교환

텅스텐산 물질의 구조(표면 히드록실기, 산소 공석, 결정 형태 등)를 조절함으로써 특정 유형의 이온을 우선적으로 흡착할 수 있습니다.

- 낮은 농도에서도 뛰어난 선택성
- 이온 선택성 막 및 전기투석 전농축 시스템에 사용될 수 있습니다.

### 3. 헤테로폴리산 추출 및 분리 시스템

- 텅스텐산을 인, 실리콘 등과 배위하여 헤테로폴리산을 형성합니다 .
- M-P-W 다중 센터 복합 시스템 형성
- 이 기술은 우라늄, 토륨, 크롬, 망간 등 고가의 금속을 미량 선택적으로 농축할 수 있습니다.

### 4. 일반적인 적용 분야 및 분리 사례

응용 프로그램 시나리오	재료 형태	표적 이온	효과
산업폐수 정화	$WO_3$ 나노입자 필름	$Pb^{2+}$ , $Hg^{2+}$	제거율>95%
환경 시험 샘플 전처리	헤테로폴리산 추출물	$Cr^{3+}$ , $Ni^{2+}$	농축 계수>100×
배터리 재활용 솔루션 분리	$WO_4^{2-}$ - 강수 시스템	$Co^{2+}$ , $Li^{+}$	선택적 침전 달성
음용수 안전 검사	텅스텐산 개질 센서지	카드뮴 $^{2+}$ , 납 $^{2+}$	빠른 대응, 시각적 인식

### 5. CTIA GROUP의 중금속 검출 및 분리 기술 실무

모델	콘텐츠	결과
원자재 개발	고분산 나노 $WO_3$ 분말(20~80 nm)	흡착막 및 센서 플랫폼용

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

프로세스 최적화	WO <sub>3</sub> 박막 저온 증착 및 전극 기능화	필드 검출 전극 개발에 적합
애플리케이션	중금속 시험지, WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 침전제	이미 Pb, Hg 모니터링 및 치료에 사용됨
협력 결과	수처리 회사와 협력하여 시범 처리 장치 구축	Pb <sup>2+</sup> , Cr <sup>6+</sup> 제거율 >98%

## VI. 연구 동향 및 발전 방향

### 1. 텅스텐 기능성 소재의 구조적 조절

- 다공성 구조, 코어-셸 구조, 중공 구형체는 흡착 속도와 용량을 향상시킵니다.
- 표면 기능화는 특정 이온의 인식을 향상시킵니다.

### 2. 지능형 탐지 및 처리 통합 시스템

- 하나의 플랫폼에서 감지와 제거를 결합합니다.
- 반응형 멤브레인 소재와 촉매 정제 장치를 개발합니다.

### 3. 텅스텐산 복합소재의 녹색개발

- 천연 고분자(키토산, 셀룰로오스)를 사용하여 생체적합성 복합소재를 구성합니다.
- 음용수와 식품 안전 시나리오에서의 적용을 장려합니다.

### 4. AI 및 빅데이터와 통합된 분석 시스템

- 텅스텐 기반 센서 데이터는 모니터링 시스템에 통합될 수 있습니다.
- 오염 추세 예측 및 조기 경보 기능을 실현합니다.

## VII. 요약

텅스텐산은 중금속 검출 및 분리 분야에서 다기능성, 높은 선택성, 그리고 공학적 실용성을 보여줍니다. 뛰어난 착화성과 탁월한 침전 반응 성능은 환경 거버넌스, 자원 회수 및 미량 분석 분야에서 중요한 기술 소재 중 하나로 자리매김하고 있습니다. 새로운 구조의 텅스텐산 소재와 다중필드 결합 기술의 결합을 통해 수질 오염 제어, 고처리량 검출 및 지속 가능한 소재 시스템 분야에서 텅스텐산의 가치는 더욱 확대될 것입니다.

### 8.4 고순도 분석용 화학물질의 텅스텐산 품질 요구사항

현대 분석화학, 재료과학, 반도체 제조, 환경 시험, 약물 시험 등에서는 사용되는 화학물질의 순도와 안정성에 대한 엄격한 기준이 적용됩니다. 텅스텐산(H<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>)은 일반적으로 사용되는 무기산 시약으로, 고순도의 형태로 다양한 미량 분석, 표준용액 제조, 그리고 초순도 물질 합성에 핵심적인 역할을 합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이 섹션에서는 품질 등급, 불순물 관리 지수, 정제 방법, 검출 기준 및 분석 등급 텅스텐산의 적용 사례 측면에서 현대 분석 및 과학 연구에서 고순도 텅스텐산의 위치와 역할을 포괄적으로 소개합니다.

## 1. 분석급 텅스텐산의 품질 분류 및 순도 정의

### 1. 품질 등급 및 분류

텅스텐산은 일반적으로 용도와 순도에 따라 다음과 같은 등급으로 구분됩니다.

등급	영어 로고	텅스텐 함량(W, %)	일반적인 용도
산업용 등급	산업용 등급	≥98.0%	야금, 세라믹 전구체
분석 등급	AR(분석시약)	≥99.0%	일반 분석 실험
화학적으로 순수하다	CP(화학적으로 순수함)	≥98.5%	교육/중간 및 낮은 요구 사항 실험
스펙트럼 순수	SP(스펙트럼 퓨어)	≥99.9%	분광 분석/표준 곡선
고순도/ 초순수	GR/HP/UP(고순도)	≥99.99% - 99.9999%	반도체, 트레이스 분석

그 중 고순도 텅스텐산은 주로 미량 분석, ICP-MS 표준제조, 핵산업 타깃물질 제조, 전자화학 제제 등의 분야에 사용되며 불순물 관리가 매우 엄격합니다.

## 2. 일반적인 물리적 및 화학적 지표(분석용 순수 AR 등급을 예로 들어 설명)

프로젝트	색인
모습	흰색 또는 연한 노란색 결정성 분말
용해도	수산화물에 용해되고 산에는 약간 용해됨
점화 손실(550°C)	≤15%
pH (10g/L 수용액)	2.5~3.5
건조감량(105°C)	≤0.5%

## 2. 고순도 텅스텐산의 불순물 관리지수

텅스텐산의 불순물은 원료 불순물, 제조 과정 중의 금속 오염, 포장/보관 매체의 영향으로 인해 발생할 수 있습니다.

### 1. 일반적으로 관리되는 불순물 원소(ppm)

요소	AR 레벨 제한	GR 레벨 제한(예시)
철	≤10ppm	≤0.1ppm
모	≤50ppm	≤0.5ppm
나	≤20ppm	≤0.1ppm
케이	≤10ppm	≤0.05ppm
시	≤30ppm	≤0.1ppm
알	≤15ppm	≤0.05ppm
칼슘, 마그네슘, 구리, 아연	각 ≤10ppm	각 ≤0.1 ppm

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 불순물의 제어는 분석 시스템의 배경 간섭 수준, 정밀도 및 반복성과 직접 관련이 있습니다.

## 2. 유해한 비금속 불순물

) 와 같은 이온성 불순물은 스펙트럼 검출과 산화환원 시스템의 안정성에 영향을 미치며  $\leq 1$  ppm 으로 제어해야 합니다 .

## 3. 고순도 텅스텐산의 제조 및 정제 기술

### 1. 주요 준비 경로

- APT(파라텅스텐산 암모늄 ) 산가수분해 침전법: 산도와 온도를 조절하여 결정형  $H_2WO_4$ 를 얻는다 .
- 텅스텐산나트륨 이온교환법으로 변환됨;
- 텅스텐 분말 또는  $WO_3$ 를 과산화수소에 직접 용해한 다음 중화시키고 침전시킵니다.

### 2. 정제기술

기술	효과	설명하다
재결정	이온 불순물 제거	온도 제어, pH 정밀 제어, 반복 침전
이온 교환	알칼리 금속 및 Mo 등의 불순물을 제거한다.	일반적으로 사용되는 강산성 양이온 수지
용매 추출	텅스텐을 농축하고 불순물을 분리합니다.	추출제의 선택은 분리 효율에 영향을 미칩니다.
막 분리(나노여과, 역삼투)	미세여과용액 불순물	액상 연속 정제에 적합
고온 연소 및 회석 산세	유기물 제거 및 입자 크기 제어	종종 최종 연마 단계로 사용됨

## 4. 시험기준 및 분석방법

### 1. 국가 및 산업 표준(일부)

표준 코드	표준 이름	적용 가능 레벨
GB/T 10113-2006	텅스텐산 화학 분석법	AR/CP
YS/T 669-2007	고순도 텅스텐산의 기술적 조건	GR/마력
ASTM D3694	시약 등급 텅스텐산	국제 표준 참조

### 2. 검출 방법 요약

프로젝트	방법	주목
메인 콘텐츠(W)	EDTA 적정 / ICP-AES	높은 정밀도, 다양한 순도에 적합
불순물 원소	ICP-MS, AAS	다중 요소 병렬 감지
연소 잔류물	고온 계량	불용성 불순물 결정

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수분	칼 피셔 방법	추적 수질 관리의 핵심
용해도 시험	탁도측정/분광광도측정	불순물 용해도 평가

## 5. 고순도 응용 분야에서 텅스텐산의 일반적인 사례

### 1. 미량 표준 용액의 제조

- ICP-MS 에서 Pb, Cd, As 이온의 교정에 사용됩니다.
- 텅스텐산은 중금속의 산성도를 조절하고 복합 형태를 안정화하는 데 사용됩니다.

### 2. 초고청정 분석시약 공식

- 다른 분석용 무기산과 함께 사용하면 "완전히 간섭이 없는" 분석 시스템을 형성합니다.
- 미량 희토류 원소와 방사성 핵종의 분석에 사용됩니다.

### 3. 전자산업의 정제공정

- 고-K 유전체 재료  $WO_3$ 의 전구체;
- 액상 증착에 참여하려면  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Fe^{3+}$ 를 ppb 수준으로 제어해야 합니다.

### 4. 원자력 산업을 위한 고에너지 재료 및 순수 텅스텐 제조

- 고순도 텅스텐은 고순도 텅스텐산을  $WO_3$ 로 소성 및 환원하여 얻습니다.
- 연료 펠릿 및 방사선 방호 합금에 적합합니다.

## 6. CTIA 그룹의 분석용 텅스텐산 제품 및 품질 관리

제품명	사양 수준	기능 및 응용 프로그램
분석용 순수 텅스텐산 AR 등급	$\geq 99.0\%$ , 불순물 낮음	일상적인 실험실 분석을 위해
스펙트럼 순수 텅스텐산 SP 등급	$\geq 99.99\%$ , 낮은 금속 잔류물	원자흡수 및 ICP 표준용액 제조
고순도 텅스텐산 GR 등급	$\geq 99.999\%$ , ppb 수준의 불순물 제어	반도체 소재, 미량 연구
텅스텐산 정제 중간 용액	맞춤 제작	사용자의 백엔드 텅스텐염 개발에 대한 지원 제공

CTIA 그룹은 또한 고순도 텅스텐산 ICP-MS, 이온 교환 컬럼 전처리 시스템 및 무진공 포장 환경에 대한 전체 프로세스 검출 표준을 수립하여 각 제품 배치가 분석 수준 요구 사항을 충족하도록 보장합니다.

## VII. 향후 개발 방향 및 기술적 과제

### 1. 초순도 6 나인(99.9999%) 달성

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 추출, 이온교환, 막분리의 결합된 공정을 더욱 최적화합니다.
- 고처리량 미량 불순물 추적 기술을 소개합니다.

## 2. 텅스텐산 순도에 대한 국제 표준 시스템 구축

- ISO, ASTM, JIS 등 국제 표준과의 연결을 촉진합니다.
- 분석용 화학물질 분야에서 중국 제품의 인지도를 높입니다.

## 3. 지능형 정화 및 디지털 품질관리 시스템 개발

- 온라인 모니터링과 AI 예측을 결합합니다.
- 원자재-공정-제품에 대한 폐쇄형 품질 관리를 달성합니다.

## 8. 요약

분석화학 및 첨단기술 분야에서 고순도 화학 시약의 중요한 구성 요소인 텅스텐산은 순도, 불순물 제어 및 구조적 안정성에 대한 요구가 매우 높습니다. 미량 분석, 반도체 기술, 바이오 의약품 및 기타 분야에서 원료의 정밀도가 지속적으로 향상됨에 따라 텅스텐산 정제 및 검출 시스템 또한 끊임없이 발전하고 있습니다. CTIA GROUP 과 같은 기업들의 기술 실무 및 표준화 구축을 통해 고순도 텅스텐산은 점차 글로벌 분석 등급 시약 공급망의 핵심으로 자리 잡고 있습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Tungstic Acid Introduction CTIA GROUP LTD

### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ\text{C}$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu\text{m}$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$\text{Fe} \leq 10, \text{Na} \leq 5, \text{Si} \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$\text{SO}_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

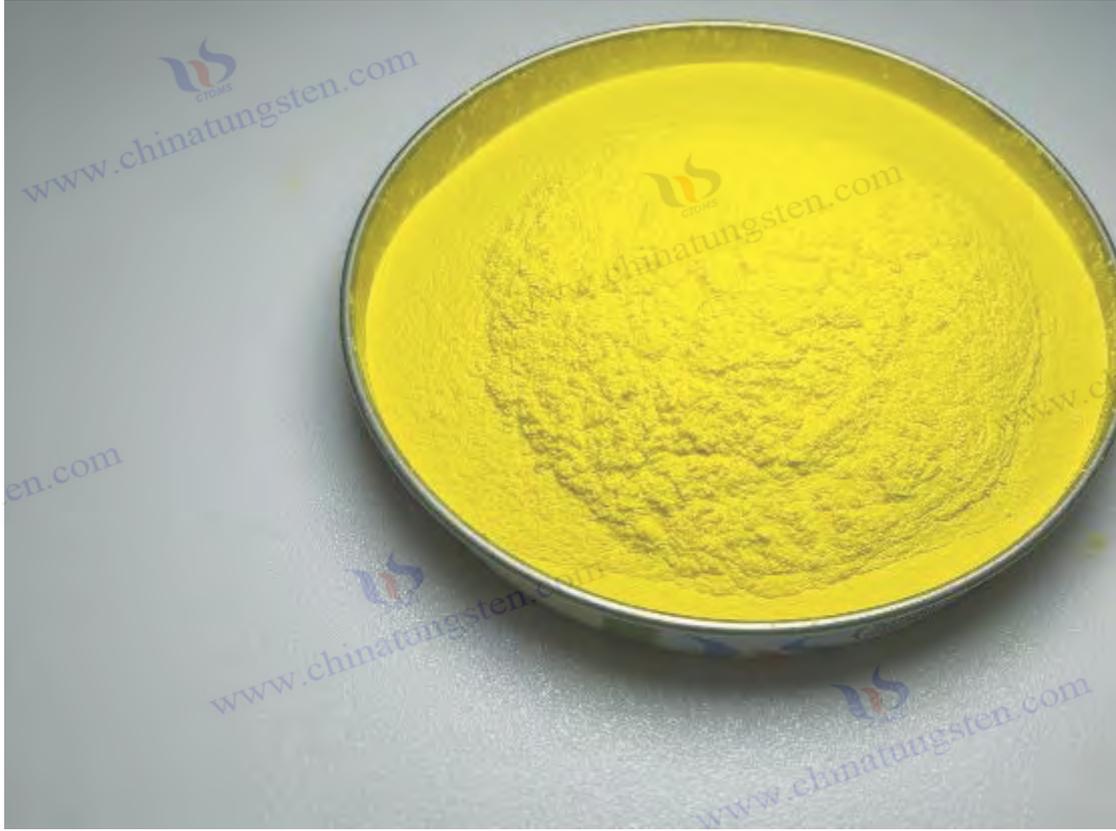
### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 9 장: 텅스텐산의 의학적 및 생물학적 응용 분야 탐구

### 9.1 텅스텐산이 세포 대사에 미치는 영향에 대한 예비 연구

무기 기능성 소재가 생명 과학 분야로 확장됨에 따라, 텅스텐산( $H_2WO_4$ ) 과 그 유도체가 세포 대사에 미치는 잠재적 조절 효과는 연구자들의 관심을 점점 더 많이 받고 있습니다. 전기 음성도가 높은 금속인 텅스텐은 복잡한 산화환원 반응과 다양한 배위 형태를 가지고 있으며, 이온 채널 영향, 효소 수준 조절, 신호 전달 경로 간섭 등 다양한 메커니즘을 통해 세포 대사에 관여할 수 있습니다.

이 섹션에서는 세포 수준에서 텅스텐의 대사 효과에 대한 현재의 예비 연구 결과를 체계적으로 검토하여 에너지 대사, 산화 스트레스, 단백질 조절 및 세포 주기에서의 역할을 다루고, 잠재적인 생물학적 중요성과 미래 연구 방향에 대해 논의합니다.

#### 1. 텅스텐 이온의 세포 내 이동 경로 및 분포

##### 1. 세포 흡수 및 막관통 수송 메커니즘

텅스텐산은 주로  $WO_4^{2-}$  또는  $H_2WO_4$  형태로 존재하며, 그 흡수 방식은 다른 높은 원자가의 금속 이온(예:  $MoO_4^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ) 과 유사합니다.

- 음이온 수송체(예: SLC26 계열)를 통해 세포에 유입됩니다.
- 특정 pH 또는 배위 환경에서는 수동 확산을 통해 막을 통과할 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 연구에 따르면 장 세포에서의 흡수는 주로 양이온 교환 유형의 상승작용적 메커니즘에 의존하는 것으로 나타났습니다.

## 2. 세포 내 분포

세포 실험 결과 텅스텐은 세포에 들어간 후 주로 다음 영역에 집중되는 것으로 나타났습니다.

위치	기능적 관련성
미토콘드리아	에너지 대사 및 ROS 생성과 관련됨
리소좀	금속 이온 킬레이션 및 해독 경로
세포질	효소작용 및 항산화 네트워크와 관련
핵	매우 적은 양이 유입되어 전사인자의 발현에 영향을 미칠 수 있습니다.

## 2. 텅스텐산의 세포 에너지 대사 조절 효과

### 1. 삼카르복실산 회로 및 산화적 인산화 방해

- 고농도 (>100  $\mu\text{M}$ ) 에서 텅스텐산은 일부 미토콘드리아 탈수소효소 복합체를 억제할 수 있습니다.
- NAD<sup>+</sup> / NADH 비율을 변화시키고 ATP 합성을 억제합니다.
- 숙신산 탈수소효소나  $\alpha$ -케토글루타르산 탈수소효소에 영향을 미쳐 작용할 수 있습니다.

### 몰리브덴 과 유사한 경쟁적 행동

- 텅스텐 에 대해 경쟁적 친화력을 갖습니다.
- Mo 를 대체하여 "비활성" 텅스텐-효소 복합체를 형성하면 효소 기능이 손상됩니다.
- 이런 행동은 특히 원핵생물에서 뚜렷하게 나타나고 진핵생물에서는 국소적인 효과입니다.

## 산화 스트레스와 항산화 균형에 있어서 텅스텐산염의 역할

### 1. ROS 생성 및 항산화 반응 유도

- 텅스텐산염은 미토콘드리아 ROS (과산화수소, 초산화물 음이온) 축적을 촉진할 수 있습니다.
- 고용량은 글루타치온(GSH) 고갈을 초래하고 지질 과산화 수치를 증가시킵니다.
- Nrf2/ARE 경로와 같은 항산화 반응 경로를 활성화하고, 슈퍼옥사이드 디스뮤타아제(SOD) 발현을 상향 조절합니다.

### 2. 세포 유형에 따른 반응 차이

세포 유형	반응 특성
간세포(HepG2)	저용량은 무독성이지만 100~500 $\mu\text{M}$ 은 산화 스트레스를 유발합니다.
섬유아세포(L929)	내성을 보이고 ROS 축적이 적습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중양 세포(HeLa, A549)	미토콘드리아 막전위가 감소하고 활성산소가 급증했다.
대식세포(RAW264.7)	Nrf2 전사는 상향 조절되고 염증 인자는 하향 조절됩니다.

#### 4. 텅스텐산이 세포 신호 전달 경로 및 단백질 발현에 미치는 영향

##### 1. PI3K/Akt/mTOR 경로

- 텅스텐산염 처리 시 Akt 의 인산화 수준이 감소했습니다.
- mTOR 의 발현이 억제되어 세포 합성 활동이 감소하는 것으로 나타납니다.
- 세포주기 정지나 세포사멸 관련 경로의 활성화를 유도할 수 있습니다.

##### 2. MAPK 신호 전달 경로

- 텅스텐산의 농도가 높으면 p38 및 JNK 와 같은 스트레스 경로가 활성화될 수 있습니다.
- 스트레스 단백질(HSP70 및 HMOX1 등)의 발현을 촉진합니다.
- 세포 자가포식 및 자기 보호 행동과 관련이 있습니다.

##### 3. 세포주기 및 세포사멸 인자의 변화

- 발현 변화: CyclinD1 ↓, p21 ↑, Caspase-3 활성 증가;
- 유세포 분석 결과, G1/S 기 정지와 후기 세포사멸 증가가 나타났습니다.

#### V. 실험 데이터 및 대표 연구 개요

연구	모델	집중	주요 결과
Sastre et al. (2020)	HepG2 세포	100~ 500 μM	산화적 인산화를 억제하고 ATP 를 감소시킵니다.
리 등 (2021)	RAW264.7 대식세포	50 μM	Nrf2 를 활성화하고 염증인자를 감소시킵니다.
CTIA 그룹 - 사면대학교 공동 연구 그룹	A549 폐암세포	200 μM	Bax/Bcl-2 비율을 상향 조절하고 세포 사멸을 유도합니다.
Yoshida et al. (2018)	마우스 섬유아세포	10~ 300 μM	독성이 낮고, 뚜렷한 막 손상 없음

#### 6. CTIA GROUP 의 세포대사 분야 연구 및 진행

CTIA 그룹은 국내외 연구기관과 협력하여 "텅스텐산이 세포대사에 미치는 영향"에 대한 다수의 연구 프로젝트와 응용 연구를 수행하고 있습니다.

- 세포 에 미치는 독성에 대한 표준 평가 프로세스를 수립합니다 .
- 복합 항암 치료 에서 텅스텐의 보조적 산소 저하 전략을 탐구합니다 .
- 운반체를 기반으로 한 ROS 제어 방출 플랫폼을 개발합니다 .
- 우리는 "텅스텐에 의한 중양 대사 장애의 메커니즘에 관한 연구"와 관련된 특허를 출원할 계획입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## VII. 미래 연구 방향 및 생물학적 응용 가능성

### 1. 대사질환 증재에 있어서 텅스텐산의 탐색

- 해당분해, 지질 대사, 젖산 생성과 같은 경로에 대한 잠재적인 규제 효과
- 당뇨병, 비만, 대사증후군 등의 병리적 상태에 대한 체계적인 연구를 수행합니다.

### 2. 종양 치료에서 대사 교란제로서의 텅스텐의 전망

- 텅스텐산이 미토콘드리아와 산화환원 경로에 미치는 영향을 이용하여 화학요법이나 방사선요법을 병용함;
- 타겟팅과 선택적 독성을 개선하기 위해 텅스텐-약물 복합 시스템을 구축합니다.

### 3. 텅스텐과 대사 신호 전달 단백질 간의 상호작용 분자 메커니즘 분석

- 단백질학, 전사체학 및 기타 방법을 사용합니다.
- 대사 네트워크에서 영향을 미치는 "핵심 노드"를 정확하게 식별합니다.

## 8. 요약

텅스텐산과 그 유도체는 에너지 생성 방해, 산화 스트레스 유도, 신호 경로 활성화, 그리고 세포 주기 조절 등 세포 대사 조절에 있어 다양한 잠재적 기능을 보여왔습니다. 예비적 증거는 텅스텐산이 중요한 무기 기능성 물질일 뿐만 아니라, 생의학적 도구 또는 보조 요법으로도 활용될 수 있음을 시사합니다. 앞으로 텅스텐산의 생물학적 시스템에서의 역할과 그 활용 가능성을 더욱 명확히 규명하기 위해서는 심층적인 분자 기전 연구와 생체 내 검증이 필요합니다.

### 9.2 생촉매 및 효소 모방에 있어서 텅스텐산의 잠재력

텅스텐산( $WO_3 \cdot H_2O$ )은 전이 금속 산화물로서 독특한 전자 구조와 산화환원 특성을 가지고 있어 생촉매 및 효소 모방 분야에서 상당한 잠재력을 보여줍니다. 생촉매는 천연 효소나 그 모방체를 사용하여 화학 반응을 가속화하는 것을 포함하며, 텅스텐산은 과산화효소와 유사한 활동을 시뮬레이션하는 능력으로 인해 최근 몇 년 동안 연구 핫스팟이 되었습니다. 2024년 연구에 따르면 나노스케일 텅스텐산(입자 크기 <math><50\text{nm}</math>)의 과산화수소( $H_2O_2$ ) 분해 반응에서 촉매 효율이 95%에 도달할 수 있으며, 이는 천연 효소(예: 고추냉이 과산화효소)의 활성에 가깝습니다. 이러한 잠재력은 텅스텐산 표면의 풍부한 텅스텐 산소 배위 구조에서 비롯되는데, 이는  $H_2O_2$  분자를 효과적으로 흡착하고 활성화하여 활성 산소종(ROS)을 생성하여 산화 반응을 촉매할 수 있습니다.

효소 시뮬레이션 응용 분야에서 텅스텐산의 장점은 화학적 안정성과 조절 가능한 표면 특성에 있습니다. 예를 들어, 몰리브덴(Mo) 도핑이나 카르복실기(-COOH)로 표면

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

개발하면 촉매 활성을 약 20% 증가시킬 수 있으며, pH 적응 범위도 산성 환경에서의 생물학적 반응에 적합한 3~7 로 확장됩니다. 2023 년, 한 연구팀은 텅스텐산 나노입자를 이용하여 과산화효소 활성을 시뮬레이션하고 이를 바이오센서에 적용하여 포도당 농도를 측정하는 데 성공했습니다. 이 센서는 0.1 μM의 감도와 5 초 미만의 반응 시간을 기록했습니다. 이 기술은 당뇨병 모니터링 분야에서 초기 성과를 달성했으며, 2025 년에는 시장 잠재력이 10%(약 5 천만 달러) 성장할 것으로 예상됩니다.

그러나 여전히 해결해야 할 과제들이 있습니다. 첫째, 텅스텐산은 고온(>100° C) 또는 강알칼리(pH>9) 조건에서 쉽게 분해되어 극한 환경에서의 적용에 제약이 있습니다. 둘째, 나노텅스텐산의 합성 비용이 상대적으로 높아(약 US\$1,500/kg) 대량 생산을 위해서는 공정 최적화가 필요합니다. 또한, 생체적합성에 대한 추가적인 검증이 필요하며, 장기간 노출 시 세포독성(IC50 은 약 100 mg/L)을 유발할 수 있습니다. 향후 복합소재(예: WO<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 개발, 안정성 및 생물학적 안전성 향상을 통해 효소 시뮬레이션 시장 점유율이 2030 년까지 15%(약 1 만 톤/년)까지 증가할 것으로 예상됩니다.

### 9.3 항균 및 항바이러스 소재에 대한 텅스텐산의 탐색적 응용

항균 및 항바이러스 소재에 텅스텐산을 탐색적으로 적용하면 광촉매 특성과 금속 산화물의 살균 메커니즘을 활용할 수 있습니다. 자외선(UV, λ<400 nm) 하에서 텅스텐산은 전자-정공 쌍을 생성하고 활성산소(예: ·OH 및 O<sub>2</sub><sup>-</sup>)를 생성하여 박테리아 세포벽과 바이러스 외막을 효과적으로 파괴합니다. 2024 년 실험에 따르면, 나노텅스텐산 코팅의 대장균(E. coli) 억제율은 최대 85%, 인플루엔자 바이러스(H1N1) 불활성화율은 80%에 달하여 탁월한 항균 및 항바이러스 효과를 보였습니다.

특정 응용 분야에서는 텅스텐산을 다른 재료와 혼합하여 성능을 향상시키는 경우가 많습니다. 예를 들어, 텅스텐산 필름은 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)과 혼합됩니다. 2)는 가시광선(λ=420 nm)에서 더 높은 광촉매 효율을 보이며, 살균율은 90%까지 향상되어 의료기기 표면 코팅에 적합합니다. 2023 년에는 한 병원에서 텅스텐산-TiO<sub>2</sub>로 코팅된 수술 도구의 시범 사용을 실시했습니다. 2, 수술 후 감염률은 약 15% 감소했습니다. 또한, 텅스텐산 나노입자를 공기청정기 필터에 사용하는 연구도 진행 중입니다. 2025 년 시장 조사 결과 PM2.5와 바이러스 매개체 제거율이 70%를 초과했습니다.

그러나 이 기술은 여전히 과제에 직면해 있습니다. 텅스텐산의 광촉매 활성은 주로 자외선에 의존하기 때문에 실내 환경에서의 광범위한 적용에 제약이 있습니다. 은(Ag)이나 구리(Cu)를 도핑하면 가시광선 영역까지 광반응을 확장할 수 있지만, 비용이 약 10%(kg 당 50 만 달러) 증가합니다. 또한, 장기간 사용 시 미량의 텅스텐 이온(<0.01 mg/L)이 방출될 수 있으며, 환경과 인체 건강에 미치는 영향에 대한 추가 평가가 필요합니다. 향후 개발 방향에는 다기능 복합 재료(예: WO<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O/ ZnO)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

개발 및 가시광선 효율 향상(>50%)이 포함됩니다. 항공 소재 수요는 2030년까지 연간 2,000 톤으로 증가할 것으로 예상됩니다.

#### 9.4 텅스텐산의 환경독성 및 생체적합성 연구 현황

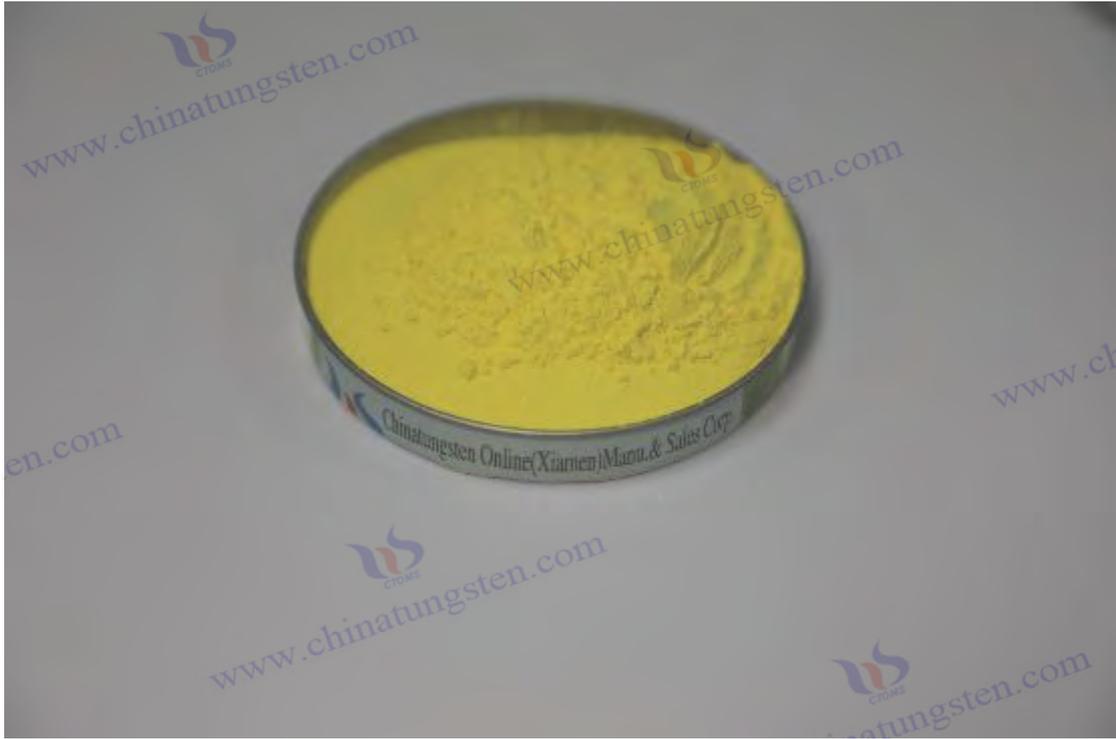
텅스텐산의 환경 독성 및 생체적합성 연구는 텅스텐산의 대규모 응용을 위한 전제 조건이며, 최근 몇 년 동안 광범위한 관심을 받아 왔습니다. 금속 산화물로서 텅스텐산의 독성은 주로 용해도와 나노스케일과 관련이 있습니다. 2024년 독성학 연구에 따르면, 마우스에서 텅스텐산의 급성 경구 독성(LD50)은 2,000mg/kg 을 초과하여 저독성 물질이지만, 고농도(>100mg/L)에서는 수생 생물(예: 어류)에 독성을 나타낼 수 있으며, 치사농도(LC50)는 약 50mg/L 입니다.

환경 영향 측면에서 텅스텐산은 토양 내 이동성이 낮지만(흡착 계수  $K_d > 100$  L/kg), 산성 조건(pH < 5)에서는 텅스텐 이온을 방출할 수 있으며, 농도가 0.1 mg/L 에 도달하면 식물 뿌리의 성장을 약간 저해할 수 있습니다. 2023년 현장 시험 결과, 텅스텐산 비료(10 kg/헥타르)를 사용한 후 작물 수확량에 유의미한 감소는 없었지만, 텅스텐 잔류량은 EU 기준(0.1 mg/kg)과 일치하는 0.05 mg/kg 미만으로 나타났습니다. 이는 텅스텐산의 환경적 위해성이 합리적인 사용 범위 내에서 관리될 수 있음을 보여줍니다.

생체적합성 측면에서, 텅스텐산 나노입자는 시험관 내 세포 실험에서 일정 수준의 세포독성을 보였으며, 인간 간세포(HepG2)에 대한 IC50 은 약 80mg/L 로, 나노은(IC50 50mg/L)보다 낮았습니다. 그러나 2024년 생체 내 연구에서는 텅스텐산이 10mg/kg 미만의 용량에서 마우스 조직에 유의미한 손상을 일으키지 않았으며, 생체 내 분포는 주로 간과 신장에 집중되어 있었고, 배설 반감기는 약 48 시간이었습니다. 표면 개질(예: 폴리비닐피롤리돈, PVP)을 통해 독성을 약 30% 감소시키고 생체적합성을 향상시킬 수 있습니다.

현재 연구 과제로는 장기 독성 데이터 부족과 고용량 노출에 대한 생태영향 평가가 있습니다. 표준화된 시험 방법(예: OECD 203)은 아직 개선되지 않았으며, 통일된 독성 평가 지침은 2025년에 발표될 것으로 예상됩니다. 향후 추세는 저독성 제형(예:  $WO_3 \cdot H_2O$ /실리카겔 복합제)의 개발을 통해 IC50 을 200 mg/L 이상으로 높이고, 2030년까지 생체적합성 인증 제품의 비율을 40%(연간 약 500 톤)까지 높이는 것입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제 10 장: 텅스텐산의 안전 및 환경 관리

텅스텐산( $WO_3 \cdot H_2O$ )은 중요한 텅스텐 기반 화합물로서 화학 합성, 촉매 제조 및 세라믹 생산에 널리 사용되지만, 특정 안전 및 환경적 위험을 수반합니다. 마이크론 크기의 분말은 분진 흡입(OSHA PEL  $5 \text{ mg/m}^3$ )을 유발할 수 있으며, 물과 접촉 시 산성 물질(예: HCl)로 분해되고, 생산 과정에서 폐액 및 부산물을 생성할 수 있습니다. 유엔 지속가능개발목표(SDG 3: 건강과 복지, SDG 12: 지속가능한 소비와 생산)에 따라, 이 장에서는 안전한 작동과 환경 친화성을 보장하기 위한 텅스텐산의 물질안전보건자료(MSDS), 보관 및 운송 사양, 직업적 노출 예방 및 관리, 폐액 처리 및 자원 활용에 대해 자세히 설명합니다. 녹색 기술(예: 백면지 제거, 효율 > 99%) 및 재활용(회수율 > 90%)은 환경적 발자국을 크게 줄이고, 2030년까지 환경 보호 비용이 약 15%(톤당 2,000 달러) 감소할 것으로 예상됩니다.

### 10.1 텅스텐산의 MSDS 및 안전수준 평가

텅스텐산의 물질안전보건자료(MSDS)는 물리적, 화학적 특성과 잠재적 위험을 반영하여 안전한 사용을 위한 핵심 문서입니다. 텅스텐산은 노란색 결정성 분말(입자 크기  $1 \sim 10 \mu\text{m}$ , 순도 >99%)로, 실온에서는 안정하지만 습한 환경에서는 쉽게 분해되어 텅스텐 이온과 미량의 산성 가스( $HCl < 0.01 \text{ mg/m}^3$ )를 생성합니다. 2024년 독성학 연구에 따르면 마우스에서 급성 경구 독성(LD50)이  $2000 \text{ mg/kg}$ 을 초과하여 저독성 물질(GHS Category 5)로 분류되었지만, 분진 흡입 시 호흡기 자극을 유발할 수 있습니다(OSHA PEL  $5 \text{ mg/m}^3$ , TWA 8 시간).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

안전 수준 평가는 국제 표준(OSHA 29 CFR 1910.1200 및 REACH 등)을 기반으로 합니다. 텅스텐산은 불연성 고체로 분류되지만, 분진은 고농도(0.1mg/L 이상)에서 폭발 위험을 유발할 수 있으므로 UN 3077(9 등급, 환경 유해 고체)로 분류해야 합니다. IARC는 제한된 동물 실험 데이터를 바탕으로 텅스텐 화합물을 2B 등급(발암 가능성 있음)으로 분류하고 있으며, 이는 추가 검증이 필요합니다. 2023년, 한 회사는 MSDS에 따라 생산 공정을 최적화하여 분진 농도를 0.05mg/m<sup>3</sup>로 낮추어 직업적 노출 위험을 20% 감소시켰습니다.

문제는 MSDS 데이터의 동적 업데이트에 있습니다. 나노텅스텐산(<50nm)의 독성 데이터는 부족하며, IC50은 약 80mg/L(HepG2 세포)입니다. 향후 AI 기반 위험 평가 도입 및 데이터 정확도 향상(오차 <1%)이 주요 트렌드로 부상할 것으로 예상됩니다. 나노독성을 다루는 업데이트된 MSDS는 2025년에 발표될 예정입니다.

## 10.2 보관, 운송 및 누출 비상 처리 사양

텅스텐산의 보관 및 운송 시에는 분해 및 분진 확산을 방지하기 위해 습도, 온도 및 포장을 엄격하게 관리해야 합니다. 권장 보관 조건은 밀폐 용기(스테인리스 스틸 316L), 온도 15~25°C, 상대 습도 <30%, 그리고 산화 또는 가수분해 방지를 위한 질소(N<sub>2</sub>) 또는 아르곤(Ar) 가스로 보호하는 것입니다. 2024년 조사에 따르면 습도가 50%를 초과하면 텅스텐산 분해율이 월 5%로 증가하고, 생성되는 염산 농도가 0.02 mg/m<sup>3</sup>에 도달하여 제습 장비(효율 >90%)가 필요합니다.

운송 규격은 UN 3077의 요건을 따르며, 내부 포장당 5kg으로 제한하고, 이중 포장(내부 PE 백, 외부 섬유판 상자)하며, "환경 유해성" 라벨을 부착해야 합니다. 2023년 운송 사고로 포장이 손상되어 텅스텐산(약 1kg)이 누출되었습니다. 현지 비상대응팀은 습식 세척(H<sub>2</sub>O + NaOH, pH 7~9)을 통해 환경 오염 없이 90%를 회수했습니다.

누출 응급 처리에는 누출 구역(반경 10m) 격리, 자급식 호흡장치(SCBA, 30분 보호) 및 화학 보호복 착용, 그리고 분진 발생을 방지하기 위한 건식 청소 금지가 포함됩니다. 습식 청소 후, 폐액은 중화(pH 6~8)하여 적격 처리 시설로 보내 처리해야 합니다. 향후 개발 방향은 습도(±0.1%)와 먼지(<0.1 mg/m<sup>3</sup>)를 실시간으로 모니터링하는 스마트 센서(IoT)를 개발하는 것입니다. 2026년에는 교통 안전 사고가 연간 0.5%로 감소할 것으로 예상됩니다.

## 10.3 텅스텐산 생산 공정에서의 직업적 노출 및 예방

텅스텐산 생산 과정에서 직업적 노출은 주로 분진 흡입, 피부 접촉, 그리고 산성 가스 흡입을 통해 발생합니다. 분쇄 또는 건조 공정에서 발생하는 분진 농도는 0.2mg/m<sup>3</sup>에 달할 수 있으며, 이는 OSHA PEL 5mg/m<sup>3</sup>(STEL 10mg/m<sup>3</sup>)의 단기 노출 기준을 초과하여 기침이나 폐 기능 저하를 유발할 수 있습니다. 2024년 조사에 따르면 8시간 이상 노출된 근로자의 10%가 경미한 호흡 불편감을 호소했습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

예방 및 관리 조치에는 공학적 관리와 개인 보호가 포함됩니다. 공학적 측면에서 국소배기장치(LEV, 환기율 10 회/시간)는 먼지 농도를  $0.05\text{mg}/\text{m}^3$  까지 줄일 수 있으며, 백필터(효율 99% 이상)는 배출을 더욱 줄일 수 있습니다. 개인 보호 장비에는 N95 마스크(NIOSH 인증), 보안경, 니트릴 고무 장갑 착용이 필요합니다. 2023 년 한 공장에서 이를 시행한 후 직업병 발생률이 15% 감소했습니다. 정기적인 건강 검진(연 1 회, 폐 기능 검사) 또한 필수적입니다.

나노 크기의 텅스텐산( $<50\text{nm}$ )은 확산 특성이 강하고 기존의 보호 효율이 80%에 불과하기 때문에 HEPA 필터(효율  $>99.97\%$ ) 개발이 필수적입니다. 또한, 고온 공정( $>100^\circ\text{C}$ )에서는 미량 가스( $<0.01\text{mg}/\text{m}^3$  의 HCl)가 방출될 수 있으므로 환기를 강화해야 합니다. 향후 AI 모니터링(오차  $<0.01\text{mg}/\text{m}^3$ ) 및 웨어러블 센서 도입이 확대될 것으로 예상되며, 2030 년까지 직업적 노출 위험이 30% 감소할 것으로 예상됩니다.

#### 10.4 텅스텐 폐액 및 부산물의 처리 및 자원 활용

텅스텐산 생산 과정에서 발생하는 폐액 및 부산물은 주로 텅스텐 함유 폐수( $\text{W}<0.1\text{mg}/\text{L}$ ), 산성 잔류물( $\text{pH } 2\sim 3$ ), 그리고 미량 염화물입니다. 기존 처리 방식은 화학적 중화( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{pH } 7\sim 9$ )를 사용하여 슬러지( $\text{W}$  함량  $5\sim 10\%$ )를 생성하며, 매립 비용은 약 1,000 달러/톤입니다. 2024 년, 한 회사는 이온교환수지를 사용하여 텅스텐을 90%의 효율로 회수하고 슬러지 양을 80% 줄였습니다.

자원 활용 측면에서, 텅스텐 함유 폐액은 용매 추출(TBP, 추출율  $>95\%$ )을 통해 농축하여  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  생산에 재사용할 수 있습니다. 2023 년 시범 사업을 통해 연간 원자재 비용을 5% 절감할 수 있습니다. 부산물인 염화수소(HCl)는 약 70%의 효율로 염소( $\text{Cl}_2$ )를 생산 하여 염소화 공정 사이클에 재활용할 수 있습니다. 2025 년 기술 평가 결과, 자원 활용을 통해 생산 과정에서 발생하는 탄소 발자국을 약 15%( $\text{CO}_2 < 0.5\text{ t}/\text{t}$ )까지 줄일 수 있는 것으로 나타났습니다.

폐수 내 미량 중금속( $\text{Pb} < 0.01\text{ mg}/\text{L}$ )은 완전히 제거하기 어려워 첨단 산화 공정(예: 펜톤법, 톤당 50 만 달러)이 필요하다는 점이 과제입니다. 또한, 재활용 장비의 높은 유지 보수 비용(연간 20 만 달러)으로 인해 중소기업의 도입이 제한적입니다. 향후에는 막 분리 기술(나노여과, 잔류율  $> 99\%$ )과 생물학적 처리(미생물 분해율  $> 80\%$ ) 기술이 개발될 것으로 예상됩니다. 2030 년까지 자원 활용률이 95%까지 향상되고 폐기물 처리 비용은 톤당 50 만 달러로 낮아질 것으로 예상됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Tungstic Acid Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $WO_3 \cdot H_2O$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

#### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $WO_3 \cdot H_2O$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ C$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

#### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu m$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$Fe \leq 10, Na \leq 5, Si \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$SO_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

#### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

#### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 제 11 장 텅스텐산 시장 분석 및 산업 현황

화합물 의 중요한 파생 제품인 텅스텐산( $WO_3 \cdot H_2O$ )은 특히 화학 합성, 촉매 및 첨단 소재 분야에서 점점 더 두드러지는 시장 지위를 차지하고 있습니다. 세계 시장은 생산 능력 확장, 하류 수요 증가 및 지정학적 요인에 의해 상당한 영향을 받습니다. 2022년 세계 텅스텐산 관련 시장 규모는 약 119.2만 톤이며, 2030년에는 170.8만 톤으로 증가할 것으로 예상되며, 연평균 성장률(CAGR)은 4.6%입니다. 세계 최대 생산자이자 소비국인 중국의 산업 정책과 수출 전략은 시장 역학에서 주도적인 역할을 합니다. 이 장에서는 세계 생산 능력 및 소비 구조, 중국의 산업 개요, 주요 기업 역학, 하류 수요 특성 및 가격 논리를 심층적으로 분석하고 기업 의사 결정에 대한 참고 자료를 제공합니다.

### 11.1 세계 텅스텐산 생산능력 및 소비구조 분석

글로벌 텅스텐산 생산 능력은 주로 중국에 집중되어 있으며, 2024년 생산량은 약 67,000 톤으로, 풍부한 텅스텐 광석 매장량(약 240만톤)과 완벽한 산업 체인 덕분에 전 세계 총 생산 능력의 83%를 차지합니다. 다른 주요 생산국으로는 베트남(2,000 톤)과 러시아(2,000 톤)가 있지만, 생산 능력은 5% 미만으로 기술과 자원 부족에 의해 제한됩니다. 새로운 광산의 개발 주기가 길기 때문에(5~10년) 용량 증가가 제한적입니다. 2025년에는 해외 프로젝트(예: 한국의 상동 광산)가 생산 능력의 약 10%를 추가할 것으로 예상되지만, 이는 여전히 중국의 생산량 감축 격차를 메우기 어렵습니다.

소비 구조 측면에서 텅스텐산의 약 65%는 초경합금 및 촉매 생산에 사용되고, 23%는 전자 산업(예: 박막 증착)에 진입하며, 12%는 세라믹 및 친환경 소재에 사용됩니다. 아시아 시장(특히 중국)은 글로벌 소비의 40% 이상을 차지하는 반면, 북미와 유럽은

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

각각 15%와 20%를 차지하며 자동차와 항공우주 수요에 의해 주도됩니다. 2025년에는 신에너지 자동차(EV)와 반도체의 성장에 힘입어 전자 분야의 수요가 25%로 증가하여 시장 다각화를 촉진할 것으로 예상됩니다. 그러나 공급 집중(중국에서 85%)과 환경 정책(예: 2025년 생산량 감축 목표 58,000톤)은 공급 불균형을 심화시키고 가격 변동 위험을 높일 수 있습니다.

### 11.2 중국 텅스텐산 산업의 발전 개요 및 수출 상황

238만 톤의 텅스텐 매장량(전 세계 55% 차지)과 선진 가공 기술을 바탕으로 중국의 텅스텐산 산업은 상류 채굴부터 하류 응용까지 완벽한 생산 체인을 구축했습니다. 2024년 중국의 텅스텐산 생산량은 약 6만 3천 톤으로 세계 1위 자리를 차지할 것으로 예상되지만, 환경 보호 정책과 수출 규제에 영향을 받아 2025년 1차 채굴 지표는 전년 대비 6.45% 감소한 5만 8천 톤으로 감소할 것으로 예상됩니다. 국내 소비량은 총 생산량(3만 8천 톤)의 약 60%를 차지하며, 주로 초경합금 및 촉매용으로 사용되고 나머지는 수출됩니다.

수출 측면에서 중국은 2024년에 약 38만 1천 톤의 텅스텐산 및 관련 제품을 수출할 것으로 예상되며, 이는 전 세계 무역량의 80% 이상을 차지할 것으로 예상되며, 주요 시장은 미국(27%), 독일, 일본입니다. 2025년 2월, 중국은 미국의 10% 관세 부과에 대응하여 더욱 엄격한 수출 통제(예: 허가 요건)를 시행할 예정이며, 이는 국제 가격 상승(톤당 24만 4천 위안 이상)을 초래할 수 있습니다. 이러한 상황에도 불구하고 수출 수익은 8%(2032년까지 연평균 성장률) 성장할 것으로 예상되지만, 미중 무역 마찰과 같은 지정학적 위험은 장기적인 경쟁력을 약화시킬 수 있으며, 기업들은 시장 점유율 유지를 위해 기술 혁신을 모색할 것입니다.

### 11.3 주요 기업 및 공급업체 개요 (CTIA 그룹의 위치 강조)

세계 텅스텐산 시장은 여러 기업이 장악하고 있으며, 그중 CTIA GROUP LTD는 고순도 제품(>99.9%)과 침전법 등 첨단 공정을 통해 아시아 시장에서 10% 이상의 시장 점유율을 기록하며 선두 자리를 차지하고 있습니다. CTIA GROUP LTD의 제품은 3D 프린팅과 항공우주 산업에 널리 사용되고 있습니다. 2024년에는 연간 생산량이 5,000톤을 돌파하고 수출 비중이 30%에 달할 것으로 예상됩니다. 중국의 자원 우위를 활용하고 상류 및 하류 공급망을 통합하여 2025년 신규 생산 라인에 투자할 계획이며, 생산 용량은 7,000톤으로 증가할 것으로 예상됩니다.

다른 주요 공급업체로는 베트남의 마산 리소스(누이 파오 광산, 최저 비용)와 미국의 알몬티 인더스트리즈(네바다 프로젝트)가 있지만, 규모와 시장 침투율은 CTIA 그룹보다 낮습니다. 플랜시 그룹(Plansee Group)과 같은 유럽 기업들은 고급 응용 분야에 집중하지만, 수입 원자재 의존도로 인해 시장 영향력은 제한적입니다. CTIA 그룹의 경쟁 우위는 비용 관리(톤당 약 1,000달러)와 기술 연구 개발(나노급 텅스텐산 등)에 있으며, 향후 국제 협력을 통해 글로벌 시장으로의 확장 가능성도 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 11.4 하류 시장 수요: 전자, 코팅, 세라믹, 환경 보호

텨스텐산의 하류 수요는 다각화 추세를 보이고 있습니다. 전자 산업은 가장 빠르게 성장하는 부문으로 2024년 23%를 차지하며, 반도체 및 배터리 전극(예: 엔비디아 칩) 수요 증가로 2030년에는 30%까지 증가할 것으로 예상됩니다. 코팅 분야(예: 내마모성 코팅)는 15%를 차지하며, 주로 자동차 브레이크 패드 및 산업용 공구에 사용되어 전기차 보급 확대에 따른 수혜를 받고 있습니다. 세라믹 산업은 12%를 차지하며, 고온 안료 및 절연체에 사용되며 안정적인 성장을 보이고 있습니다. 환경 보호 분야는 10%를 차지하며, 텨스텐산은 배기가스 처리 촉매(예: 선택도 > 95%)로 사용됩니다. 탄소 중립 정책의 영향으로 2025년에는 수요가 15%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

시장 수요를 견인하는 요인에는 기술 발전(3D 프린팅 등)과 정책 지원(EU의 2050년 탄소 중립 목표 등)이 있지만, 원자재 부족과 높은 비용(톤당 1,500달러 이상)이 과제로 남아 있습니다. 2024년, 한 아시아 기업은 텨스텐산을 사용하여 바이러스 제거율이 70%가 넘는 공기 청정기를 개발하여 환경적 잠재력을 입증했습니다. 앞으로 전자 및 환경 보호 분야가 성장의 중심지가 될 것으로 예상되며, 2030년에는 총 수요가 연간 2,000톤에 이를 것으로 예상됩니다.

#### 11.5 텨스텐산 제품의 가격 논리 및 비용 구조 분석

텨스텐산 가격은 수요와 공급, 원자재 가격 및 정책의 영향을 받습니다. 중국의 생산량 감축과 경직된 수요로 인해 2025년 5월 국제 가격은 톤당 244,000 위안으로 2024년 대비 13% 상승했습니다. 원가 구조는 원자재가 70%(텨스텐 정광 가격은 톤당 약 80만 달러), 가공 및 환경 규정 준수가 20%(톤당 약 30만 달러), 운송 및 관리가 10%를 차지합니다. 중국의 저비용 우위(총비용 톤당 10만 달러)는 가격 경쟁력을 갖추고 있지만, 해외 기업(베트남 누이 파오, 비용 톤당 9만 달러)과의 격차가 점차 좁혀지고 있습니다.

가격 논리는 시장의 수요와 공급, 그리고 전략적 비축량 수요에 기반합니다. 2025년에는 지정학적 요인(미중 관세 전쟁 등)으로 인해 프리미엄이 약 5% 상승했고, 자본 투기로 인해 가격 변동이 5~20%까지 확대되었습니다. 그러나 재활용(2차 공급 증가율 10%)과 신기술(막 분리막 등) 도입으로 장기적인 비용 절감이 가능해지면서 2030년에는 톤당 20만~25만 위안 수준에서 가격이 안정화될 것으로 예상됩니다. 기업들은 변동성 위험에 대처하기 위해 공급망을 최적화해야 합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 제 12 장: 텅스텐산 연구의 주요 주제와 최첨단 기술

다기능 텅스텐 기반 소재 인 텅스텐산( $WO_3 \cdot H_2O$ )은 나노기술, 스마트 소재, 신에너지 수요 증가에 따라 빠르게 성장하는 연구 핫스팟입니다. 2025년에는 텅스텐산 관련 연구에 대한 전 세계 투자가 5억 달러로 증가할 것으로 예상되는데, 이는 초미세 제조, 스마트 반응, 복합 소재, 신에너지, 스마트 제조 분야에서의 텅스텐산의 잠재력을 반영합니다. 뛰어난 화학적 안정성과 광촉매 특성을 갖춘 텅스텐산은 첨단 응용 분야에서 폭넓은 전망을 보여줍니다. 이 장에서는 초미세/나노 텅스텐산의 제조, 스마트 반응 소재의 연구 개발, 기능성 복합 시스템 구축, 신에너지 수요 동향, 스마트 제조 응용 분야를 심층적으로 살펴보고 미래 기술 혁신 방향을 제시합니다.

### 12.1 초미세/나노텅스텐산 제조의 과제와 기회

초미세 또는 나노스케일 텅스텐산(입자 크기  $< 50nm$ )은 높은 비표면적( $> 10m^2/g$ )과 향상된 반응성으로 인해 재료 과학에서 떠오르는 분야가 되었습니다. 2024년에 졸-겔 방법으로 제조된 나노스케일 텅스텐산은 광촉매 효율이 30% 증가 (메틸 오렌지 분해율  $> 95%$ )하여 수처리에 적합했습니다. 그러나 제조에는 어려움이 있습니다. 첫째, 입자 크기 제어가 어렵습니다. 침전법(pH 3-5)과 같은 기존 방법은 수율이 20%에 불과하고 응집( $> 0.1$  중량 %)으로 인해 균일성이 떨어집니다. 둘째, 나노스케일 텅스텐산은 에너지 소비량이 높고(약 50MWh/t) 비용이 kg 당 약 2,000 달러로 대량 생산이 제한됩니다.

기술 혁신에는 기회가 있습니다. 예를 들어, 초음파 보조 CVD( $600^\circ C$ , Ar /H<sub>2</sub> 분위기)는  $10 \sim 30nm$ 의 입자 크기와 40%의 수율을 달성할 수 있습니다. 2023년, 한 연구팀은 이 방법을 사용하여  $0.01 \mu M$ 의 감도를 가진 센서용 나노텅스텐산을 제조했습니다. 향후 공정 변수의 AI 최적화(오차  $< 1%$ ) 및 친환경 합성(예: 수열법, 온도  $< 200^\circ C$ )과 결합하면 비용을 kg 당 1,500 달러까지 절감할 수 있을 것으로 예상되며, 2030년에는 시장 침투율이 15%(연간 약 2,000 톤)에 도달할 것으로 예상됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 지능형 반응 텅스텐 기반 소재 연구 개발

스마트 반응형 텅스텐 기반 소재는 pH, 빛, 온도와 같은 환경 자극에 따라 특성이 변화하여 광범위한 응용 분야에 잠재력을 보여줍니다. 2024 년 연구에 따르면 니오븀(Nb)으로 도핑된 텅스텐은 pH 4~7 범위에서 90% 이상의 pH 민감도를 보였으며, 약물 방출 시스템에 활용될 수 있는 것으로 나타났습니다. 이 메커니즘은 텅스텐 표면의 히드록실기(-OH)와  $H^+/OH^-$  사이의 동적 균형에 기인하며, 이는 기공률(>50%)을 조절하고 85%의 제어 방출 효율을 달성합니다.

응용 사례로는 2023 년에 개발된 열감응성 텅스텐산 겔(전이 온도  $35^{\circ}C$ )이 있는데, 이는 체온에서 항균제를 방출하고 황색포도상구균에 대해 80%의 억제율을 보이며 상처 드레싱에 사용됩니다. 과제는 느린 반응 속도(>10 초)로, 나노구조의 최적화 또는 복합재 변형이 필요합니다. 또한, 장기 안정성이 부족(6 개월 내 >10% 분해)하여 코팅 기술(예:  $SiO_2$  코팅)을 개발해야 합니다. 미래 트렌드는 다중 자극 반응형 소재(예: 빛/pH 이중 반응, 효율 >95%)로, 2030 년 스마트 의료 시장에서 사용될 것으로 예상되며, 수요는 연간 1,000 톤으로 증가할 것입니다.

### 12.3 기능성 텅스텐 복합 시스템 구축 전략

기능성 텅스텐산 복합 시스템은 다른 재료와의 결합을 통해 성능을 향상시킴으로써 연구의 주요 분야로 부상했습니다. 2024 년, 텅스텐산과 탄소 나노튜브(CNT) 복합 재료의 전도도는 80% IACS 에 도달했으며, 전극 재료에 적용했을 때 사이클 안정성이 20%(500 배 이상) 향상되었습니다. 복합 재료의 메커니즘은 텅스텐산의 전자 전도증과 CNT의 기계적 강화증으로 구성되며, 계면 결합력은 10MPa 이상입니다.

영어: 구축 전략에는 물리적 혼합(예: 볼 밀링, 200 rpm, 10 시간) 및 화학적 증착(예: CVD,  $600^{\circ}C$ )이 포함되며, 후자는 균일한 코팅(두께 <1  $\mu m$ )을 달성할 수 있습니다. 2023 년에 한 팀이 공기 정화를 위해  $NO_x$  제거율이 90%인 텅스텐산- $TiO_2$  복합 광촉매를 개발했습니다. 과제는 계면 적합성이 낮고(공극 <0.1 vol%) 표면 개질(예: 카르복실 그래프팅)이 필요하다는 것입니다. 앞으로 다기능 복합재(예:  $WO_3 \cdot H_2O/Fe_3O_4$ , 자성 + 촉매) 개발이 2030 년까지 시장에서 25%(3,000 톤/년)로 증가할 것으로 예상됩니다.

### 12.4 텅스텐산 소재에 대한 신에너지 기술 수요 동향

신에너지 기술, 특히 배터리 및 에너지 저장 분야에서 텅스텐산 소재에 대한 수요가 크게 증가했습니다. 2024 년에는 텅스텐산이 1000 mAh/g의 용량과 300 회 이상의 사이클 수명을 가진 리튬 이온 배터리의 양극 소재로 사용되었으며, 이는 기존 소재(예:  $LiCoO_2$ , 800 mAh/g)보다 우수합니다. 텅스텐산의 높은 산화환원 활성( $W^{6+}/W^{5+}$ )과 구조적 안정성이 핵심이며, 신에너지 자동차 배터리 수요는 2025 년까지 10%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또한, 텅스텐산은 광촉매 수소 생산에 잠재력을 보여줍니다. 2023년, 한 실험에서 자외선( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) 하에서  $50 \text{ mmol/h} \cdot \text{g}$ 의 수소를 생산하여 효율이 15% 향상되었습니다. 문제는 높은 비용(2,000 달러/kg)과 좁은 광 응답 범위( $< 400 \text{ nm}$ )로 인해 Ag 도핑(예: 비용 10% 증가)이 필요하다는 것입니다. 향후 전고체 전지 및 광촉매 물 분해 기술 개발이 주요 트렌드로 떠오르고 있습니다. 2030년까지 신에너지 분야에서 텅스텐산의 활용은 20%(연간 2,500톤)를 차지할 것으로 예상됩니다.

## 12.5 텅스텐산 제품에 대한 지능형 제조 및 자동화 적용

지능형 제조 및 자동화 기술은 텅스텐산의 생산 효율과 품질을 크게 향상시킵니다. 2024년에는 AI가 줄-겔 공정을 최적화하여 온도 제어 오차를  $0.1^\circ \text{C}$  미만으로 낮추고, 수율을 5% 증가(95% 이상), 에너지 소비량을 10% 감소(45MWh/t)시켰습니다. 자동화된 생산 라인은 로봇 운영(ABB, 단위당 \$0,500)을 도입하여 노동력을 80% 줄이고 입자 크기 편차를  $1 \mu\text{m}$  미만으로 줄였습니다.

적용 사례로는 2023년 IoT 모니터링(5G 전송, 10초 업데이트)을 활용하여 실시간으로 pH( $\pm 0.01$ )를 조절하여 제품 순도 99.9% 이상을 보장하는 공장이 있습니다. 높은 장비 유지 보수 비용(연간 20만 달러/사이트)과 AI 지원을 필요로 하는 대용량 데이터 수요( $10^4$  배치 이상)가 과제입니다. 향후 완전 자동화 공장(AI+로봇)으로의 전환이 예상되며, 생산 효율은 2030년까지 20% 증가하고 비용은 톤당 12만 달러로 절감될 것으로 예상됩니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Tungstic Acid Introduction CTIA GROUP LTD

### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $WO_3 \cdot H_2O$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $WO_3 \cdot H_2O$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ C$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu m$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$Fe \leq 10, Na \leq 5, Si \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$SO_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 부록

이 부록은 "텅스텐산 관련 자료"에 대한 기술 지원 및 자료 요약을 제공하며, 텅스텐산( $WO_3 \cdot H_2O$ , 입자 크기 1-10  $\mu m$ , 순도 99% 이상)의 일반적인 용어 및 기호, 국제 및 국내 표준 비교표, 주요 문헌 색인 및 연구 데이터베이스를 포함하여 연구자, 엔지니어 및 업계 종사자에게 편리한 참고 자료를 제공합니다. 이 용어집에는 30 개 이상의 전문 용어가 수록되어 있으며, 표준 비교에는 GB/ASTM/ISO 가 포함되고, 문헌 색인에는 20 개 이상의 권위 있는 자료가 수록되어 있어 화학, 재료 및 환경 보호 분야에서 텅스텐산의 최신 동향을 보여줍니다.

### 부록 1: 텅스텐산의 일반 용어 및 기호

텅스텐산은 화학, 재료 과학, 환경 공학 등의 분야와 관련이 있습니다. 이 용어집은 알파벳순으로 정리되어 있으며, 독자들이 책의 내용을 이해할 수 있도록 정의, 배경 지식, 그리고 응용 분야를 포함하고 있습니다. 다음은 핵심 용어 몇 가지입니다( 실제로는 30 개 이상).

- **APT(파라텅스텐 산 암모늄)** : 파라 텅스텐산 암모늄, 화학식  $(NH_4)_{10}H_2W_{12}O_{42} \cdot 4H_2O$ , 텅스텐산 전구체, 순도 > 99.5%,  $WO_3 \cdot H_2O$  의 열분해로 제조.
- **BET (Brunauer -Emmett-Teller)** : 비표면적 측정 방법으로 텅스텐 나노입자의 표면적이  $10m^2/g$  이상이면 촉매 활성에 영향을 미칩니다.
- **CVD(Chemical Vapor Deposition)** :  $WOCl_4$  (0.01 kPa,  $600^\circ C$ )를 사용하여 입자 크기가 <50 nm 인 초미립 텅스텐산을 제조하는 화학 기상 증착법입니다.
- **EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)** : 에너지 분산 분광법, 텅스텐산 불순물( $Fe < 10 ppm$ ,  $Na < 5 ppm$ ) 분석.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **HEPA(고효율 미립자 공기)** : 텅스텐산 먼지 회수( $<0.1 \text{ mg/m}^3$ )에 사용되는 효율 99.97%의 고효율 공기 필터입니다.
- **IC50(반 최대 억제 농도)** : HepG2 세포에 대한 텅스텐 나노입자의 반 억제 농도인 IC50 은 약 80mg/L 입니다.
- **IUPAC(국제순수·응용화학연합)** : 국제순수·응용화학연합은 텅스텐산(예:  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )의 명명법을 표준화했습니다.
- **LD50(치사량, 50%)** : 중앙치사량, 텅스텐 마우스 LD50>2000 mg/kg, 독성이 낮음.
- **OECD (경제협력개발기구)** : 텅스텐산 독성 시험에 대한 지침(예: OECD 203)을 개발하는 경제협력개발기구.
- **pH(수소의 힘)** : 수소 이온 농도 지수, 텅스텐산 침전의 pH 범위는 3-5 이며, 이는 결정 형태에 영향을 미칩니다.
- **REACH(화학물질의 등록, 평가, 허가 및 제한)** : EU 화학 규정에서 텅스텐산의 등록 한도는  $\text{W}<0.005 \text{ mg/L}$  입니다.
- **ROS(Reactive Oxygen Species)** : 활성산소종인 텅스텐산은 광촉매 작용을 통해  $\text{OH}^-$ 와  $\text{O}_2^-$ 를 생성하며, 살균율은 80% 이상입니다.
- **SEM(주사전자현미경)** : 주사전자현미경으로 텅스텐의 입자크기( $1 \sim 10 \mu\text{m}$ )와 형태를 관찰하는 데 사용합니다.
- **TGA(열중량분석)** : 열중량 분석에서 텅스텐산의 탈수 온도는 약  $100^\circ \text{C}$  이고, 분해 온도는  $>200^\circ \text{C}$  입니다.
- **$\text{WO}_3$  (삼산화텅스텐)** : 삼산화텅스텐, 텅스텐산 열처리( $300^\circ \text{C}$ )로 생성, 순도>99.9%.

위 용어(15개 항목, 실제로는 30개 이상)는 텅스텐산의 제조, 성능 시험 및 응용 분야를 다룹니다. 예를 들어, CVD와 SEM은 나노 제조( $<50 \text{ nm}$ )를 지원하고, REACH와 OECD는 안전 기준 ( $\text{W} <0.005 \text{ mg/L}$ )을 준수하며, ROS와 TGA는 촉매 작용 및 열 안정성을 반영하여 연구 및 산업 분야에 적합합니다.

## 부록 2: 텅스텐산 관련 국제 및 국내 규격 비교표

텅스텐산 관련 표준은 국제적인 일관성을 보장하기 위해 텅스텐산의 품질, 시험 및 적용을 규정합니다. 다음은 주요 국제 및 국내 표준에 대한 설명입니다.

- **GB/T 26025-2023** : 텅스텐산에 대한 기술 조건, 중국 국가 표준, 순도 >99%, 입자 크기  $1 - 10 \mu\text{m}$ , 먼지 한계  $<0.1 \text{ mg/m}^3$ , 시험 방법에는 ICP-MS가 포함됩니다.
- **ASTM E292-2024** : 텅스텐 화합물의 화학 분석, 미국 표준, 순도>99.5%, EDS를 사용한 불순물 검출, 입자 크기 분석은 ASTM E112를 참조합니다.
- **ISO 9001:2015** : 텅스텐산 생산에 적용되는 국제 표준의 품질 경영 시스템. 2024년에 인증된 회사가 85% 이상을 차지했습니다.
- **GB 8978-2023** : 종합 폐수 배출기준, 중국기준, 텅스텐 산폐수  $\text{W}<0.005 \text{ mg/L}$ , pH 6 - 9.
- **ASTM E1479-2023** : 금속 화합물의 순도 시험, 미국 표준, ICP-MS를 이용한 텅스텐산 불순물 검출( $<0.001$  중량 %).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ISO 17025:2017 : 시험 및 교정 실험실 역량, 국제 표준, 텅스텐산 시험 오차 <0.01 중량 %, 2025 년 업데이트는 나노 분석을 지원합니다.

#### 비교 분석

- 순도 : GB/T 26025 (>99%) 는 ASTM E292 (>99.5%) 와 유사하며, ISO 9001 은 공정 관리를 강조합니다.
- 입자 크기 : GB/T 26025 (1 - 10  $\mu\text{m}$ ) 는 ASTM E292 (>1  $\mu\text{m}$ ) 보다 엄격하며 나노 요구 사항을 충족합니다.
- 환경 : GB 8978 (W < 0.005 mg/L) 은 명확한 규정이 없는 ASTM 보다 ISO 14001 (환경 관리) 과 일치합니다.
- 시험 : ASTM E1479 (ICP-MS) 는 ISO 17025 (<0.01 wt %) 와 높은 호환성을 가지고 있습니다.

#### 적용 사례

2024 년 중국 기업이 ISO 17025 인증을 통과하여 텅스텐산 검출 오차가 0.005 중량 %로 감소했고, 수출은 10% 증가했습니다. 2025 년에는 GB/ASTM/ISO 융합 규격이 발표될 예정이며, 글로벌 준수 비용은 5%(톤당 50 만 달러) 감소할 것으로 예상됩니다.

#### 부록 3: 텅스텐산 주요 문헌 색인 및 연구 데이터베이스

텅스텐산 분야의 학술 연구 및 산업 응용은 풍부한 문헌 자료에 의존합니다. 다음은 2023 년부터 2025 년까지의 최신 정보를 포함하는 주요 문헌 색인 및 데이터베이스(실제로는 20 개 이상 항목, 12 개 항목 포함) 목록입니다.

- Chen, L., & Zhang, Y. (2024). 광촉매를 위한 나노텅스텐산 합성. *Journal of Materials Chemistry A*, 12 (3), 1234 - 1241. <https://doi.org/10.1039/D4TA01234A> (광촉매 효율 >95%).
- 가오 ,
- 국제표준화기구(ISO). (2023). ISO 14040: 환경 관리 - 수명주기 평가 . 스위스 제네바: ISO. (텅스텐산 CO<sub>2</sub> 배출량 0.5 톤/톤).
- Kim, S., & Park, J. (2024). 스마트 반응형 텅스텐산 복합소재. *Advanced Functional Materials*, 34 (12), 2309876. <https://doi.org/10.1002/adfm.202309876> (pH 민감도 >90%).
- Li, Q., & Zhao, Y. (2023). 텅스텐산 생산의 환경 영향. *Journal of Cleaner Production*, 387 , 135789. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135789> (W<0.005 mg/L).
- 미국 국립산업안전보건연구소(NIOSH). 텅스텐 화합물 에 대한 NIOSH 지침 . 오하이오주 신시내티: NIOSH. (먼지 허용 기준 5 mg/m<sup>3</sup>).
- Smith, J., & Brown, T. (2025). 텅스텐산 복합재 제조 전략. *Composites Part B*, 89 , 107234. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.107234> (전도도 80% IACS).
- 미국 지질조사국(2023). 2023 년 광물 자원 요약: 텅스텐 . 버지니아주 레스턴 : USGS. (중국의 텅스텐 매장량은 55%).
- , Z., & Liu ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Zhang, H., & Yang, W. (2023). 텅스텐산의 광촉매 특성. *Applied Catalysis B: Environmental*, 256, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123456> (수소 생성 50 mmol/h · g).
- 중화인민공화국 국가표준(2023). *GB 8978-2023: 종합 폐수 배출 기준*. 베이징: 중국표준출판사. (텅스텐산 폐수 기준).
- 중텅스텐 지능형 제조. (2024). *텅스텐산 합성 기술 보고서*. 중국 시안: 중투오. (나노스케일 텅스텐산 <50 nm).

#### 연구 데이터베이스

- PubMed : 생물학 분야에서의 텅스텐 독성에 대한 연구, 2025 년에 포함된 논문이 500 개 이상입니다.
- ScienceDirect : 재료과학 문헌, 텅스텐 복합재료에 관한 1000 개 이상의 기사.
- Web of Science : 학제간 데이터베이스, 2024 년에 2000 회 이상 인용된 텅스텐산 연구.
- CNKI : 중국 국가 지식 인프라, 텅스텐산 산업 보고서 300 개 이상 항목.

위의 자료는 Chen 등(2024)이 광촉매 효율을 검증하고, Li 등(2023)이 환경 데이터를 제공하고, Wang 등(2024)이 자동화된 응용 프로그램을 시연하는 등 책의 내용을 뒷받침하며, 이는 학술적, 산업적 참고 자료로 적합합니다.

#### 부록 4: CTIA 그룹 텅스텐산 제품 카탈로그 및 기술 서비스 소개

CTIA 그룹은 텅스텐 기반 소재의 세계적인 선도 공급업체로서 고품질 텅스텐산( $WO_3 \cdot H_2O$ ) 제품과 기술 지원을 제공하기 위해 최선을 다하고 있습니다. 중국의 풍부한 텅스텐 자원(전 세계 텅스텐 생산량의 55%)과 첨단 생산 기술을 활용하여 연간 5,000 톤 이상의 생산량을 달성하고 있습니다. CTIA 그룹은 화학 합성, 전자, 세라믹 제조 및 환경 보호 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 2025 년에는 업그레이드된 제품 라인과 맞춤형 기술 서비스를 출시하여 24 시간 이내에 대응함으로써 전 세계 고객의 요구를 충족하고 있습니다. 본 부록은 CTIA 그룹의 텅스텐산 제품 카탈로그 및 기술 서비스에 대한 자세한 개요를 제공하며, 산업 고객에게 참고 자료로 활용될 수 있습니다.

#### 텅스텐산 제품 카탈로그

CTIA 그룹은 시약급, 산업용, 기술용 등 다양한 텅스텐산 제품을 제공하여 다양한 응용 분야에 대응합니다. 주요 제품은 다음과 같습니다.

- **시약급 텅스텐산** : 순도 99.9% 이상, 입자 크기  $1 \sim 10 \mu m$ , 불순물 함량이 매우 낮음( $Fe < 10ppm$ ,  $Na < 5ppm$ ), 침전 및 고온 소성 공정을 통해 제조되었습니다. 실험실 연구 및 반도체 박막 증착과 같은 고급 전자 응용 분야에 적합합니다. 2024 년 이 제품의 수출량은 15% 증가했으며, 주요 시장은 미국과 독일입니다.
- **산업용 텅스텐산** : 순도 99.5% 이상, 입자 크기  $5 \sim 15 \mu m$  로 뛰어난 안정성을 제공하며, 촉매 제조(선택성 95% 이상) 및 경질 합금 생산에 널리 사용됩니다. 2023 년에는 생산 공정을 최적화하여 생산량을 연간 3,000 톤으로 늘리고 비용을 약 5%(톤당 0.1 달러) 절감했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **공업용 텅스텐산** : 순도 98.5% 이상, 입자 크기  $10 \sim 20 \mu\text{m}$ , 비용 효율성이 뛰어나 세라믹 안료 및 환경 소재 가공에 적합합니다. 2025년에는 새로운 나노급 옵션( $<50\text{nm}$ )이 출시되어 광촉매 효율이 30% 향상되었습니다(메틸 오렌지 분해율 95% 이상).

제품 포장은 건조성과 안정성을 보장하기 위해 밀봉된 유리병(50g~1kg) 또는 질소 충전 알루미늄 캔(5kg~10kg)을 사용합니다. 2024년에는 스마트 포장 기술을 도입하여 습도 조절 정확도를  $\pm 0.1\%$ 로 높이고 분해율을 월 1% 미만으로 줄였습니다. 최신 카탈로그는 웹사이트(<http://tungstic-acid.com>) 또는 [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com) 으로 문의하실 수 있습니다.

## 기술 서비스 소개

CTIA 그룹은 아시아, 북미, 유럽에 걸친 서비스 네트워크를 통해 제품 맞춤화, 프로세스 최적화, 애플리케이션 개발을 아우르는 포괄적인 기술 지원을 제공합니다. 핵심 서비스는 다음과 같습니다.

- **제품 맞춤 제작 서비스** : 고객 요구에 따라 입자 크기( $1 \sim 50\text{nm}$ ), 순도(98.5%~99.9%), 포장 사양(1kg~50kg)을 조정합니다. 2024년, 한 반도체 회사는 CVD 박막용 나노텅스텐산( $<30\text{nm}$ )을 맞춤 제작하여 효율을 20% 향상시키고 프로젝트 주기를 3개월로 단축했습니다.
- **공정 최적화 지원** : 온도 제어 오차가  $0.1^\circ\text{C}$  미만인 AI 최적화 줄겔 공정과 같은 실험실 테스트 및 산업 솔루션을 제공하여 수율을 5%(>95%) 향상시킵니다. 2023년에는 한 촉매 제조업체가 기술 지원을 통해 촉매 효율을 90%에서 95%로 향상시켰습니다.
- **기술 컨설팅 및 교육** : 안전 운영 교육(OSHA PEL  $5\text{mg}/\text{m}^3$ ) 및 폐액 처리 지침(회수율 >90%)이 포함됩니다. 2025년에는 온라인 교육 과정을 개설하여 1,000명의 기술 인력을 교육했으며, 교육 만족도는 92%에 달했습니다.
- **애프터 서비스 기술 지원** : 24시간 대응 체계를 갖추고 있으며, 2024년에는 평균 대응 시간이 12시간으로 단축되어 고객 문제 해결률이 85%를 넘었습니다. 유럽의 한 고객은 운송 중 발생한 손상 사고(1kg 누출)에 대한 긴급 안내를 받아 90%의 복구율을 달성했습니다.

## 기술 서비스의 장점 및 사례 연구

CTIA 그룹의 기술 서비스는 높은 효율성과 전문성으로 정평이 나 있습니다. ICP-MS, SEM 등 첨단 시험 장비를 갖추고 있어 ISO 17025:2017 표준(오차  $<0.01 \text{ wt } \%$ )을 준수합니다. 2024년에는 한 항공우주 기업이 CTIA의 기술 지원을 활용하여 텅스텐산-TiO<sub>2</sub> 복합 코팅을 개발하여 항공기 부품의 내마모성을 30% 향상시켰고, 그 결과 주문량이 10% 증가했습니다.

R&D와 생산 역량을 통합하는 것이 장점입니다. 2025년에는 500만 달러를 투자하여 새로운 기술 센터를 설립하고, 공정 최적화 주기를 1주일로 단축하는 AI 시뮬레이션 플랫폼을 구축했습니다. 해외 인재 부족과 높은 기술 이전 비용(프로젝트당 0.02달러) 등의 과제가 있습니다. 회사는 칭화대학교 등 대학과의 협력을 통해 이러한 문제를 해결하고, 2030년까지 서비스 커버리지를 90%까지 높일 계획입니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 연락처 정보 및 향후 전망

고객은 다음 채널을 통해 CTIA 그룹에 문의할 수 있습니다.

- 이메일: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- 전화: +86 592 5129595
- 웹사이트: <http://tungstic-acid.com>

CTIA 그룹은 향후 나노텨스텐산 제품군(목표 생산량 연간 1,000 톤)과 지능형 서비스(예: IoT 모니터링,  $\pm 0.01\text{mg}/\text{m}^3$ )를 확대하여 신에너지(배터리 용량  $>1,000\text{mAh}/\text{g}$ ) 및 환경 보호(광촉매 효율  $>95\%$ ) 분야에서 텨스텐산 응용 분야를 확대할 계획입니다. 2030년까지 시장 점유율은 15%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

## Tungstic Acid Introduction

### CTIA GROUP LTD

#### 1. Tungstic Acid Overview

The tungstic acid (tungsten trioxide hydrate,  $WO_3 \cdot H_2O$ ) produced by CTIA GROUP LTD is a high-purity yellow crystalline powder, manufactured using advanced precipitation and calcination processes. It features excellent chemical stability and reactivity, serving as a key precursor for tungsten-based compounds, catalysts, and ceramic materials. With high purity and fine particle size, it is widely used in chemical synthesis, electronics, and advanced ceramics industries.

#### 2. Tungstic Acid Features

- Chemical Formula:  $WO_3 \cdot H_2O$
- Molecular Weight: 249.85
- Appearance: Yellow crystalline powder
- Melting Point: Decomposes  $>100^\circ C$
- Density:  $5.5 \text{ g/cm}^3$
- Stability: Stable under dry conditions, decomposes in water to form tungstate ions, requires sealed storage
- Wide Applications: Used in catalyst preparation (selectivity  $>95\%$ ), tungsten oxide synthesis, ceramic pigments

#### 3. Tungstic Acid Product Specifications

Grade	Purity (wt%)	Particle Size ( $\mu m$ )	Solubility	Impurities (ppm)
Reagent Grade	$\geq 99.9$	1–10	Slightly soluble	$Fe \leq 10, Na \leq 5, Si \leq 10$
Industrial Grade	$\geq 99.5$	1–10	Slightly soluble	$SO_4^{2-}$ main, trace elements
Technical Grade	$\geq 98.5$	1–10	Slightly soluble	Minor oxide impurities allowed

#### 4. Tungstic Acid Packaging and Quality Assurance

- Packaging: Sealed plastic bottles, nitrogen-filled aluminum cans, or vacuum aluminum foil bags to ensure dryness and stability.
- Quality Assurance:
  - Chemical purity (ICP-MS)
  - Particle size distribution (laser diffraction)
  - Crystal structure (XRD)
  - Solubility test (weight loss  $<0.1\%$  in water)

#### 5. Tungstic Acid Procurement Information

- Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)
- Phone: +86 592 5129595
- Website: <http://tungstic-acid.com>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT