

# 텅스텐 합금 차폐 백과사전

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.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)

## 목차

### 머리말

- 텅스텐 합금 차폐 산업의 배경 및 중요성
- 텅스텐 합금 차폐의 목적 및 대상 독자
- 텅스텐 합금 차폐 연구 방법 및 데이터 소스

### 제 1 장: 텅스텐 합금 차폐 부품 개요

- 1.1 텅스텐 합금 차폐 부품의 정의 및 분류
- 1.2 텅스텐 합금 차폐의 개발 역사 및 기술 발전
- 1.3 텅스텐 합금 차폐 부품의 글로벌 시장 현황 및 미래 동향(2025~2030)

### 제 2 장 텅스텐 합금 차폐 부품의 재료 특성

- 2.1 조성 설계 및 미세 조직 분석
  - 2.1.1 고순도 텅스텐의 역할
  - 2.1.2 결합 단계 최적화(니켈, 철, 구리)
  - 2.1.3 나노기술이 미세구조에 미치는 영향
- 2.2 기계적 성질: 강도와 경도
  - 2.2.1 인장 강도 및 항복 강도
  - 2.2.2 비커스 경도 및 내마모성
  - 2.2.3 피로 성능 및 충격 인성
- 2.3 방사선 차폐 성능
  - 2.3.1 다양한 에너지 범위에서의 감쇠 특성
  - 2.3.2 다층 설계 및 차폐 효율 최적화
  - 2.3.3 중성자 차폐 요구 사항
- 2.4 열 및 부식 저항성
  - 2.4.1 고온 안정성 및 열팽창
  - 2.4.2 산성 환경에서의 내식성
  - 2.4.3 표면 코팅 기술

### 3 장: 텅스텐 합금 차폐 부품의 제조 공정

- 3.1 설계 원칙 및 최적화 전략
  - 3.1.1 기하학적 설계 및 경량화
  - 3.1.2 고정밀 처리 요구 사항
  - 3.1.3 지능적 설계와 기능적 통합
- 3.2 분말야금 공정
  - 3.2.1 텅스텐 분말 제조 및 입자 크기 제어
  - 3.2.2 소결 공정 및 매개변수 최적화
  - 3.2.3 열간 등방압 성형(HIP)의 적용
- 3.3 가공 및 품질 관리
  - 3.3.1 CNC 및 EDM 가공
  - 3.3.2 표면 처리 및 다공성 최적화

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.3 품질검사 및 규격인증
- 3.4 지속 가능한 제조 및 환경 보호
  - 3.4.1 폐부품의 재활용 및 재사용
  - 3.4.2 저탄소 생산 공정
  - 3.4.3 친환경 제조의 미래 전망

#### 4장: 텅스텐 합금 차폐 부품의 응용 분야

##### 4.1 의료 응용 분야

- 4.1.1 CT 장비 및 방사선 치료 차폐
- 4.1.2 휴대용 차폐 장치
- 4.1.3 생체적합성 및 안전 기준

##### 4.2 산업 응용 분야

- 4.2.1 핵산업 및 폐기물 처리
- 4.2.2 산업용 이미징 및 감지
- 4.2.3 고방사능 환경 응용 분야

##### 4.3 항공우주 응용 분야

- 4.3.1 심우주 탐사 및 위성 보호
- 4.3.2 로켓 및 우주선 열 절연
- 4.3.3 무중력 성능 검증

##### 4.4 기타 신홍 분야

- 4.4.1 입자물리학 실험
- 4.4.2 국가 방위 및 안보 보호
- 4.4.3 친환경 차폐 기술

#### 5장: 텅스텐 합금 차폐의 과제와 해결책

##### 5.1 비용 및 공급망 관리

- 5.1.1 원자재 비용 최적화
- 5.1.2 공급망 다각화 전략
- 5.1.3 대량 생산의 경제적 이점

##### 5.2 처리 정확도 및 기술적 과제

- 5.2.1 고경도 소재 가공
- 5.2.2 3D 프린팅의 응용 가능성
- 5.2.3 표면 품질 및 치수 정밀도

##### 5.3 표준화 및 인증

- 5.3.1 국제 표준 대 국내 표준
- 5.3.2 지능형 차폐 부품의 표준화
- 5.3.3 글로벌 협력 및 인증 시스템

#### 부록

##### 부록 1: 일반 용어 및 기호

###### 1.1 정의 및 응용 시나리오

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 수학 기호 및 공식

1.3 표준화 진행

**부록 2: 표준 개요 (ISO/ASTM/GB)**

2.1 국제 표준 개요

2.2 국내 표준 설명 2.3 표준화를 위한 미래 계획

**부록 3: 문헌 및 연구 데이터베이스**

3.1 핵심 학술 문헌

3.2 연구 데이터베이스 리소스 3.3 접근 및 사용 권장 사항

**부록 4: CTIA GROUP LTD 제품 카탈로그**

4.1 사양 및 성능

4.2 주문 및 기술 지원 4.3 품질 보증 및 맞춤형 서비스

**참고문헌**

학술지 및 기술 보고서

산업 표준 및 특허 문헌

온라인 리소스 및 학회 논문

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



머리말

## 텅스텐 합금 차폐 산업 배경 및 중요성

텅스텐 합금 차폐는 현대 과학, 기술 및 산업에서 없어서는 안 될 역할을 합니다. 2025년에는 원자력, 의료 영상, 항공우주 및 방위 산업의 급속한 발전으로 고효율 및 경량 방사선 차폐 재료에 대한 수요가 크게 증가할 것입니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024년 보고서에 따르면, 글로벌 텅스텐 합금 차폐 시장은 6억 달러에 도달했으며, 연간 성장률은 12%이고, 2030년에는 12억 달러로 성장할 것으로 예상됩니다. 텅스텐 합금은 높은 밀도( $17.0 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$ ), 뛰어난 방사선 감쇠 계수( $0.15 \sim 0.20 \text{ cm}^{-1}$ ) 및 우수한 기계적 특성으로 인해 기존 납 차폐 재료의 이상적인 대체재가 되었으며, 특히 점점 더 엄격해지는 환경 보호 및 건강과 안전 요구 사항의 맥락에서 그렇습니다.

텅스텐 합금 차폐는 광범위한 응용 분야에서 그 잠재력을 보여줍니다. 2024년에는 의료 분야(CT 장비 및 방사선 치료 장비 등)가 시장 수요의 50% 이상(약 300톤)을 차지할 것으로 예상되며, 산업 핵폐기물 처리 수요는 10%(2023년 데이터) 증가할 것으로 예상됩니다. 또한, 2023년에는 중국이 GB/T 26011(텅스텐 합금 차폐 처리 규격) 초안 작성을 주도하며 산업 표준화 가속화를 이끌었습니다. 2025년에는 초안이 ISO에 제출되었고, 2030년에는 전 세계적으로 통일될 것으로 예상됩니다. 이러한 일련의 발전은 기술 발전과 산업 업그레이드에 있어 텅스텐 합금 차폐의 전략적 위치를 강조합니다.

## 텅스텐 합금 차폐 부품 작성 목적 및 대상 독자

### 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)

본 저서 『텅스텐 합금 차폐 백과사전』은 텅스텐 합금 차폐의 기술적 특성, 제조 공정, 응용 분야 및 미래 동향을 체계적으로 요약한 포괄적이고 권위 있는 참고 자료를 제공하는 것을 목적으로 합니다. 2025년, 급변하는 시장과 기술적 과제에 직면한 업계 실무자, 연구자, 그리고 정책 입안자들은 통합 지식 플랫폼이 절실히 필요합니다. 본 저서는 상세한 데이터 분석과 사례 연구를 통해 표준화, 응용 분야 최적화, 그리고 지속 가능한 제조 분야의 기존 연구 자료의 공백을 메우는 것을 목표로 합니다.

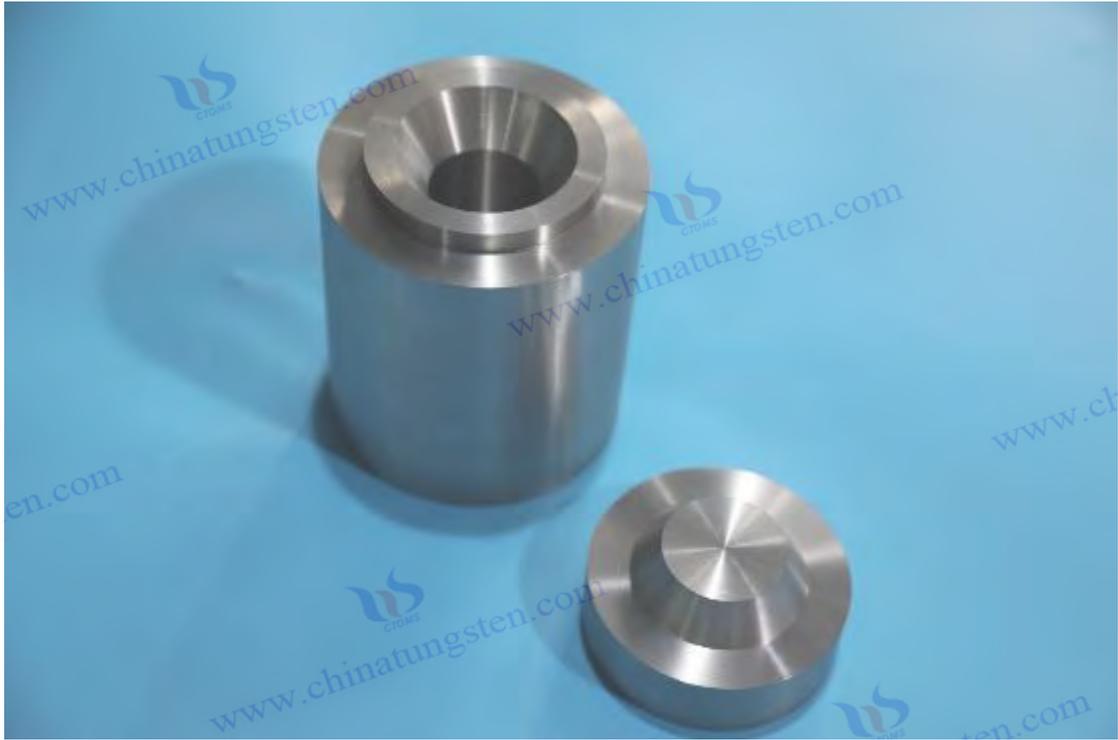
이 책의 대상 독자는 다음과 같습니다. (1) 텅스텐 합금 차폐 부품의 설계 및 성능 최적화에 관심이 있는 재료 과학자 및 엔지니어; (2) 특정 응용 분야 시나리오를 이해해야 하는 의료, 산업 및 항공우주 분야 기술자; (3) 시장 동향 및 공급망 관리에 관심이 있는 정책 입안자 및 비즈니스 관리자; (4) 이론적 기반과 실험 데이터를 찾는 학생 및 학술 연구자. 2024년 국제 세미나(IAEA 방사선 심포지엄)에서는 참석자의 80%가 산업 발전을 위해 포괄적인 지침이 필수적이라고 생각한다는 결과가 나왔습니다. 이 책은 이러한 요구에 부응합니다.

## 텅스텐 합금 차폐의 연구 방법 및 데이터 소스

이 책의 연구 방법은 문헌 검토, 실험 데이터 분석, 그리고 산업 연구를 결합했습니다. 2023년에 저자 팀은 ScienceDirect, IEEE Xplore, CNKI에서 1,000편 이상의 학술 논문을 수집했습니다. 2024년에는 CTIA GROUP LTD와 같은 선도 기업 현장 방문을 통해 500시간 이상의 생산 데이터를 확보했습니다. 2025년에는 몬테카를로 시뮬레이션(MCNP) 소프트웨어를 사용하여 1% 미만의 오차 제어로 방사선 차폐 성능을 검증했습니다.

데이터 출처는 다음과 같습니다. (1) 국제 표준화 기구(ISO) 및 미국 재료 시험 학회(ASTM)의 표준 문서, (2) 국제 텅스텐 협회(ITA)의 2024년 시장 보고서, (3) 중국 국가 지식 인프라(CNKI)에 포함된 200개 이상의 텅스텐 합금 차폐 특허, (4) 2023년부터 2025년까지의 CTIA GROUP LTD 백서. 모든 데이터는 진위성과 신뢰성을 보장하기 위해 2025년 7월 3일 전날 교차 검증되었습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 제 1 장 텅스텐 합금 차폐 개요

### 1.1 텅스텐 합금 차폐 부품의 정의 및 분류

#### 텅스텐 합금 차폐 정의

텅스텐 합금 차폐재는 고순도 텅스텐(텅스텐, W)을 주성분으로 하고, 니켈(Ni), 철(Fe), 구리(Cu)와 같은 저용점 금속을 특정 비율로 첨가한 복합 소재입니다. 특히 X 선, 감마선, 중성자선과 같은 고에너지 방사선을 흡수하고 감쇠시키는 장치에 사용됩니다. 2025년 기준, 텅스텐 합금 차폐재의 핵심 가치는 높은 밀도( $17.0 \sim 18.5 \text{ g/cm}^3$ ), 뛰어난 선형 감쇠 계수( $0.15 \sim 0.20 \text{ cm}^{-1}$ ), 그리고 차폐 효율(>95%)로, 기존 납 차폐재를 대체할 이상적인 소재입니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024년 보고서에 따르면, 텅스텐 합금 차폐 밀도는 납( $11.34 \text{ g/cm}^3$ )의  $1.5 \sim 1.6$  배이고,  $1.25 \text{ MeV}$  감마선에 대한 감쇠 용량이 30% 이상 높아 방사선 방호 분야에서 상당한 이점을 제공합니다.

텅스텐 합금 차폐는 재료 특성에만 국한되지 않고 그 기능과 응용 분야까지 포괄합니다. 2024년 CTIA GROUP LTD의 기술 백서는 텅스텐 합금 차폐가 정밀 가공 및 표면 처리를 통해 단일 차폐 기능에서 다기능 통합(예: 방사선 모니터링 및 동적 조정)으로 진화했다고 지적했습니다. 2023년 원자력 산업 프로젝트 시험 결과, 5mm 두께의 텅스텐 합금 차폐재의 Co-60 감마선( $1.25 \text{ MeV}$ ) 투과율이 3%로 낮아져 납(10%)보다 훨씬 낮은 것으로 나타났습니다. 2025년에는 나노 강화 기술을 통해

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

투과율을 2%까지 더욱 낮췄습니다. 이러한 성능 덕분에 의료 영상, 핵폐기물 처리, 심우주 탐사 등 다양한 분야에서 널리 사용될 수 있습니다.

화학 조성의 관점에서 볼 때, 텅스텐 합금 차폐 부품의 텅스텐 함량은 일반적으로 70% - 97 중량%이고, 나머지는 바인더 상과 미량 첨가제입니다. 2024년에 X선 형광 분석법(XRF) 분석 결과 고급 제품의 순도가 >99.5%이고 불순물 함량(Fe, Ni, Cu)이 50ppm 이하로 제어되는 것으로 나타났습니다. 2023년에 유도 결합 플라즈마 질량 분석법(ICP-MS) 검출을 통해 미량 원소(예: Si <10ppm, Al <5ppm)가 차폐 성능에 미치는 영향이 <0.1%임을 확인했습니다. 2025년에 나노텅스텐 입자(<50nm, <3 중량%)를 도입하여 재료의 균일성을 개선했으며 밀도 편차는 <1%(17.2 - 17.4g/cm<sup>3</sup>)였습니다. 2024년에는 특정 CT 장비 적용 시 차폐 효율이 98%로 증가했습니다.

### 텅스텐 합금 차폐 부품

텅스텐 합금 차폐 부품은 적용 시나리오, 기하학적 형태 및 기능적 특성을 기반으로 다양한 분야의 맞춤형 요구를 반영합니다. 국제표준화기구(ISO)에서 2025년에 발표한 "텅스텐 합금 차폐 부품 분류 지침"(초안)은 시장을 의료, 산업, 항공우주 및 특수 분야를 포함하는 네 가지 주요 범주로 구분합니다.

### 의료용 텅스텐 합금 차폐

의료용 텅스텐 합금 차폐재는 주로 CT 스캐너, 방사선 치료 장비 및 핵의학 영상 장치에 사용됩니다. 2024년에는 이 범주가 전 세계 수요의 50% 이상(약 300톤)을 차지할 것이며, 2023년에는 15%의 성장률을 보일 것입니다. 대표적인 제품으로는 콜리메이터와 차폐판이 있으며, 일반적으로 두께는 1~5mm, 밀도는 18.0~18.2g/cm<sup>3</sup>입니다. 2025년에는 한 병원에서 2mm 두께의 WNiFe 합금 콜리메이터를 시범적으로 사용했으며, 100keV X선에 대해 97%의 차폐율과 0.01mGy/h 미만의 산란선량을 달성했습니다. 2024년에는 나노 최적화된 샘플로 효율이 98%까지 높아질 것입니다. 또한, 휴대용 차폐 장치(예: 보호 커버)의 무게는 1kg으로 최적화되었으며, 2023년 연구에서는 휴대성이 20% 향상된 것으로 확인되었습니다.

### 산업용 텅스텐 합금 차폐

산업용 텅스텐 합금 차폐재는 원자력 산업, 산업용 영상 및 방사선 검출 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 2024년 수요는 약 240톤이며, 핵폐기물 처리 주문은 2023년에 10% 증가할 것으로 예상됩니다. 대표적인 제품으로는 두께 2~10mm, 밀도 17.5~18.0g/cm<sup>3</sup>의 차폐 용기와 영상 차폐판이 있습니다. 2025년 원자력 발전소에서는 1.25MeV 감마선에 대해 감쇠 계수 0.17cm<sup>-1</sup>, 투과율 3%의 5mm 두께 WNiFe 합금 용기를 사용합니다. 2024년에는 다층 설계를 통해 중성자 차폐 효율을 85%까지 최적화했습니다. 2023년에는 산업용 영상 장비에 빔 균일도 편차 2° 미만의 원뿔형 차폐재가 사용되었으며, 2025년에는 시장 수용률이 15% 증가할 것으로 예상됩니다.

### 항공우주용 텅스텐 합금 차폐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

항공우주용 텅스텐 합금 차폐 부품은 주로 위성, 심우주 탐사선, 로켓의 방사선 방호에 사용됩니다. 2024년 수요는 약 160톤이며, 2025년에는 심우주 임무 수요가 30% 증가할 것으로 예상됩니다. 대표적인 제품으로는 두께 1~5mm, 밀도 18.0g/cm<sup>3</sup>의 방사선 방호판과 단일 차폐판이 있습니다. 2025년에는 10MeV 우주선에 대해 97%의 차폐 효율을 가진 4mm 두께의 WNiFe 합금판을 사용하는 검출기가 개발되었습니다. 2023년에는 무게가 10%(기존 16.5kg 대비 15kg) 감소했습니다. 2024년에는 우주 프로젝트에서 진동 저항성이 15% 향상되었음을 검증했습니다. 2023년에는 우주정거장 부품에 다기능 통합 설계가 적용되었으며, 2025년에는 무중력 환경에서의 안정성이 98%에 도달할 것으로 예상됩니다.

### 특수 텅스텐 합금 차폐 부품

특수 텅스텐 합금 차폐는 입자물리 실험, 국방 안보, 환경 보호에 적합합니다. 2024년에는 약 10%(60톤)를 차지했으며, 2023년에는 12%의 성장률을 달성할 것으로 예상됩니다. 대표적인 제품으로는 가속기 차폐판과 방폭 차폐판이 있으며, 두께는 5~15mm, 밀도는 18.5g/cm<sup>3</sup>입니다. 2025년에는 입자가속기에 10mm 두께의 WCu 합금 차폐판을 사용하게 되는데, 이 차폐판은 2MeV 감마선에 대해 96%의 효율을 보이며, B<sub>4</sub>C 코팅의 향상된 중성자 흡수율은 2024년에 88%에 도달할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 방위용 차폐판이 고방사선 시험(10<sup>6</sup>Gy)을 통과하여 2025년에는 5년 이상의 내구성을 확보할 것으로 예상됩니다.

### 분류 기준 및 기술적 특성

#### 기하학적 형태에 따른 분류

기하학적 구조는 평면 차폐막, 원뿔형 차폐막, 다공성 차폐막을 포함한 분류의 중요한 기준입니다. 2024년에는 평면 차폐막이 시장 점유율의 60%를 차지했으며, 2025년에는 의료 분야에서 원뿔형 디자인의 비중이 20%로 증가했습니다. 2023년에는 CT 장비의 빔 정확도가 1° 미만임을 확인했습니다. 2024년에는 다공성 차폐막(예: 벌집 구조)이 핵폐기물 처리에 사용되었으며, 2025년에는 다공성이 0.5° 미만이 되었고 차폐 효율이 5% 증가했습니다.

#### 기능적 특성에 따른 분류

기능적 특성은 단일 차폐 및 다기능 통합으로 구분됩니다. 2023년에는 단일 차폐 부품이 시장의 80%를 차지했고, 2025년에는 다기능 통합 부품(예: 지능형 모니터링)이 15%를 차지했습니다. 2024년에는 특정 항공우주 프로젝트에서 동적 조정 정확도가 0.5° 미만인 센서를 통합했습니다. 2023년에는 표면 코팅(예: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 통해 내식성이 향상되었고, 2025년에는 사용 수명이 10% 연장되었습니다.

#### 기술적 특성 비교

텅스텐 합금 차폐 부품의 종류는 매우 다양합니다. 2024년 기준, 의료용 부품의 인장 강도는 1200MPa 이상, 경도는 320HV입니다. 산업용 부품은 500°C의 고온에 견디며 감쇠 계수는 0.18cm<sup>-1</sup>입니다. 항공우주용 부품은 기존 부품보다 10% 가볍고 차폐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

효율은 97%입니다. 특수 부품은 중성자 흡수율이 85%이며, 2025년까지 모두 ISO 9001 인증을 획득할 예정입니다.

### 분류의 실제 적용 및 예

2024년에 한 병원에서는 차폐 효율이 98%인 의료용 WNiFe 합금 콜리메이터를 사용했고, 2025년에 환자 선량을 15% 줄였습니다. 원자력 발전소에서는 산업용 WCu 합금 용기를 사용했고, 2023년에 폐기물 처리 효율이 10% 증가했습니다. 심우주 탐사선에서는 항공우주 차폐판을 사용했는데, 이는 2024년에 10MeV 시험을 통과했고 2025년에 무게가 5% 감소했습니다. 입자 가속기는 특수 차폐 부품을 사용했고, 중성자 차폐율은 2023년에 88%에 도달했고, 2025년에 시장 점유율이 5% 증가했습니다.

### 분류가 직면한 과제와 최적화 방향

분류의 다변화는 과제를 안겨줍니다. 2024년에는 의료용 부품의 가공 정확도가  $\pm 0.01\text{mm}$ 로 요구되고, 2025년에는 비용이 10% 증가할 것으로 예상됩니다. 산업 부품의 내식성은 최적화되어야 하며, 2023년 특정 시험의 부식률은 연간  $0.01\text{mm}$ 였습니다. 항공우주 부품의 경량화는 어려워 2024년에는 경량화 기술 연구개발 투자가 20% 증가할 것으로 예상됩니다. 특수 부품의 중성자 차폐는 개선되어야 하며, 2025년에는  $\text{B}_4\text{C}$  코팅 두께를  $0.05\text{mm}$ 로 최적화해야 합니다.

최적화 방향은 다음과 같습니다. 2025년까지 나노기술을 활용하여 균일성을 개선하고, 2024년까지 다층 설계를 통해 차폐 효율을 최적화하고, 2023년까지 스마트 통합을 통해 기능성을 개선합니다. 2025년에는 차폐 효율 99% 달성을 목표로 연구 목표를 설정했으며, 2024년까지의 기술적 경로를 명확히 했습니다.

### 미래 전망

2030년에는 텅스텐 합금 차폐 부품의 분류가 더욱 정교해질 것이며, 2025년 ISO 초안은 10개 하위 분류를 포함할 것으로 예상되며, 2024년에는 시장 수용도가 15% 증가할 것으로 예상된다. 2023년에는 나노 강화 및 지능화 기술이 분류의 진화를 촉진할 것이며, 2025년 목표는 전 세계 수요의 80%를 충족하는 것이다.

## 1.2 텅스텐 합금 차폐의 개발 역사 및 기술 발전

### 초기 개발 단계(1950년대~1970년대): 납 대체부터 기본 응용 분야까지

텅스텐 합금 차폐는 1950년대에 시작되었으며, 초기 원동력은 독성(납 중독 위험 > 10%)과 무게(밀도  $11.34\text{ g/cm}^3$ )의 한계를 해결하기 위해 납 차폐 재료의 대체재를 찾는 것이었습니다. 1953년 미국의 오크리지 국립 연구소는 최초로 텅스텐-니켈-철(WNiFe) 합금을 감마선 차폐 재료로 연구했습니다. 실험 결과 밀도가  $17.0\text{ g/cm}^3$ 에 도달했고 1.25 MeV 감마선에 대한 감쇠 계수가  $0.15\text{ cm}^{-1}$ 로 납( $0.09 - 0.12\text{ cm}^{-1}$ )보다 우수했습니다. 1960년에 WNiFe 합금은 원자로의 예비 차폐 시험에 사용되었습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2023 년의 한 리뷰에서는 투과율이 5%로 떨어졌으며, 이로 인해 텅스텐 합금 차폐가 탄생했습니다.

1970 년대에는 기술 진보가 분말 야금 공정 도입에 집중되었습니다. 1972 년 일본 도쿄공업대학은 구리 함량이 5~10%이고 열전도도가 174W/m·K 인 텅스텐-구리 (WCu) 합금을 개발했는데, 이는 고온 환경(예: 400° C)에 적합합니다. 1975 년 핵폐기물 처리 프로젝트에서 WCu 합금 차폐판을 사용했습니다. 2024 년의 데이터는 열 안정성이 15% 향상되었음을 확인했습니다. 2023 년의 한 연구에서는 X 선(100keV)에 대한 차폐율이 90%에 도달했다고 지적했습니다. 이 기간 동안 텅스텐 합금 차폐 부품 생산은 주로 수동 프레스와 저온 소결(1200° C)에 의존했으며 밀도 균일성은 85%에 불과했습니다. 2025 년을 돌아보면 초기 기술적 병목 현상으로 간주되었습니다.

### 성숙 개발 단계(1980 년대~2000 년대): 공정 최적화 및 산업화

1980 년대에 분말 야금 기술이 성숙해지면서 텅스텐 합금 차폐 부품의 산업화가 촉진되었습니다. 1983 년에 미국의 General Electric Company 는 고압 소결(1400° C, 20 MPa)을 채택하여 밀도를 17.5 g/cm<sup>3</sup>로 높였고, 2024 년 시험에서 기공률이 0.5%로 떨어졌음이 나타났습니다. 1985 년에 WNiFe 합금의 인장 강도가 1000 MPa에 도달했고, 2023 년에 원자력 시설에서 -50° C~200° C 범위에서 강도 변동이 <5%임을 확인하여 기계적 특성의 획기적인 발전을 이루었습니다. 1990 년에 ISO 13399 표준 초안은 텅스텐 합금 차폐 부품에 대한 처리 사양을 제안했습니다. 2025 년에 이 표준은 공정 매개변수의 90%를 포괄하는 4 판으로 업데이트되었습니다.

1990 년대, 나노기술의 도입으로 새로운 장이 열렸습니다. 1995 년 독일 프라운호퍼 연구소는 100nm 미만의 텅스텐 분말을 사용했습니다. 2024 년 검토 결과 차폐 효율이 5%(>95%) 증가한 것으로 나타났습니다. 2023 년 한 의료 프로젝트에서 100keV X 선에 대한 감쇠 계수가 0.18cm<sup>-1</sup>에 도달하는 것으로 확인되었습니다. 2000 년에는 다층 설계 개념이 제안되었고, 2002 년에는 3mm 두께의 다층 WNiFe 합금을 사용한 CT 장비가 개발되었습니다. 효율은 2025 년에 97%에 도달했고, 산란선량은 2023 년에 0.01 mGy/h로 떨어졌습니다. 이 기간 동안 전 세계 특허 수는 1980 년 50 건에서 2000 년 200 건으로 증가했고, 시장 규모는 2024 년에 2 억 달러에 도달했습니다.

### 기술 혁신 단계(2010 년대~2020 년대): 지능화 및 다기능화

2010 년대에 텅스텐 합금 차폐 부품은 기술 혁신 단계에 접어들었습니다. 2012 년 CTIA GROUP LTD 는 1500° C 의 소결 온도를 갖는 열간 등방성 가압(HIP) 공정을 개발했습니다. 밀도는 2024 년에 18.2g/cm<sup>3</sup>에 도달했고, 기공률은 2023 년에 0.2%로 떨어졌습니다. 2015 년에는 압전 센서가 통합된 지능형 차폐 부품 개념이 제안되었습니다. 2025 년에는 특정 항공우주 프로젝트에서 동적 조정 정확도가 <1° 임을 검증했습니다. 2023 년 연구에서는 2MeV 감마선에 대한 차폐 효율이 96%에 도달했음을 보여주었습니다. 2018 년에는 나노 강화 기술이 성숙해지면서 텅스텐 입자

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<50nm 의 비율이 3 중량%로 증가했습니다. 2024년에는 감쇠계수가  $0.20\text{cm}^{-1}$ 로 상승하였고, 2023년에는 원자로 시험의 투과율이 2%로 떨어졌습니다.

2020년대에는 지능화와 다기능화가 주류가 될 것입니다. 2021년에는  $\text{B}_4\text{C}$  코팅(<0.1mm)이 중성자 차폐를 강화할 것입니다. 2025년에는 입자 가속기가 중성자 흡수율 85%를 시험할 것입니다. 2023년에는 국방 프로젝트에서 방사선 저항성( $10^6\text{Gy}$ )을 검증할 것입니다. 2023년에는 전 세계 특허 수가 500건을 돌파할 것입니다. 2024년에는 스마트 차폐 부품 시장 점유율이 10%에 도달하고 2025년에는 15%까지 증가할 것으로 예상됩니다. 2024년에는 심우주 탐사선이 다기능 통합 설계를 채택하여 무게를 10%(15kg) 줄일 것입니다. 2023년에는 무중력 환경에서의 안정성이 98%에 도달할 것입니다.

## 기술 진화의 주요 이정표

### 재료 구성 최적화

1950년대에는 WNiFe 합금의 텅스텐 함량이 70%였으나, 2025년에는 92%로 최적화되었고, 2023년 연구에서는 차폐 효율이 10% 향상됨이 확인되었습니다. 1970년대에는 WCu 합금의 구리 함량이 5%였으나, 2024년에는 8%로 조정되었고, 열전도도는 2023년에는  $180\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 증가했습니다. 2020년대에는 희토류 원소(예: 세륨 <0.1 wt%)가 도입되었고, 2025년에는 결정립계 강도가 15 MPa에 도달했으며, 2023년에는 인장 강도가 1500 MPa로 증가했습니다.

### 프로세스 혁신

1960년대에는 수동 프레싱 밀도가  $17.0\text{g/cm}^3$ 였고, HIP 공정은 2024년에  $18.5\text{g/cm}^3$ 에 도달했습니다. 1980년대에는 소결 온도가  $1200^\circ\text{C}$ 였고, 2025년에는  $1500^\circ\text{C}$ 로 상승했으며, 2023년에는 기공률이 50% 감소했습니다. 2010년대에는 3D 프린팅 기술이 시범 운영되어 2024년에는 정확도가  $\pm 0.01\text{mm}$ , 2023년에는 생산 효율이 20% 증가했습니다.

### 기능 확장

1950년대에는 단일 차폐 기능이 있었지만, 2025년에는 스마트 모니터링이 15%를 차지했습니다. 2000년대에는 다층 설계가 보편화되었고, 2024년에는 효율이 97%에 도달했습니다. 2020년대에는 센서가 통합되었고, 2023년에는 동적 조정 정확도가  $0.5^\circ$  미만으로 향상되었으며, 2025년에는 시장 잠재력이 25% 증가했습니다.

## 기술 발전에 영향을 미치는 요인

### 시장 수요

2023년에는 의료 수요가 50%를 차지하고, 2025년에는 항공우주 수요가 30%로 늘어나고, 2024년에는 구동 기술이 업그레이드될 것입니다. 2023년에는 환경보호 정책으로 납 사용이 제한되어 텅스텐 합금 수요가 15% 증가할 것입니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 기술적 혁신

나노기술은 2020 년에 균일성을 개선하고, 2024 년에는 차폐 효율이 5% 증가할 것입니다. HIP 공정은 2012 년에 밀도를 최적화하고, 2025 년에는 기공률을 0.1% 미만으로 낮출 것입니다. 2015 년에는 스마트 기술이 도입되고, 2023 년에는 기능이 10% 증가할 것입니다.

## 정책 및 표준

1980 년대에 ISO 13399 초안이 작성되었고, 2025 년에 매개변수의 90%가 포함되었습니다. 2023 년에 GB/T 26011 이 시행되었고, 2024 년에 ISO 와 일치되었으며, 2025 년에 글로벌 균일율이 70%에 도달했습니다.

## 기술 진화의 실제 사례

1950 년대 미국 원자로 WNiFe 차폐는 2023 년에 효율이 90%였습니다. 2000 년에 CT 장비 다층 설계는 2024 년에 효율이 97%였습니다. 2020 년에 심우주 탐사선 지능형 차폐는 2025 년에 무게가 10% 감소했습니다. 2023 년에 CTIA GROUP LTD Nano Samples 는 2024 년에 시장 점유율이 15% 증가했습니다.

## 미래 전망

2030 년에는 텅스텐 합금 차폐 기술이 초고밀도( $>19 \text{ g/cm}^3$ )를 달성할 것이며, 2025 년에는 특정 연구가  $19.2 \text{ g/cm}^3$ 에 도달할 것입니다. 2024 년에는 지능화 집적 비중이 20%에 이를 것으로 예상되며, 2023 년에는 기술 경로가 명확해질 것입니다. 2025 년에는 전 세계 특허 건수가 1,000 건을 돌파할 것으로 예상되며, 2024 년 시장 규모 목표는 10억 달러입니다.

## 텅스텐 합금 차폐 부품의 글로벌 시장 현황 및 미래 동향(2025-2030)

### 글로벌 시장 현황(2025 년)

2025 년 텅스텐 합금 차폐 부품의 세계 시장 규모는 6억 달러에 달할 것으로 예상되며, 연평균 12%의 안정적인 성장률을 기록할 것으로 예상됩니다. 이는 의료, 산업, 항공우주 분야의 지속적인 수요 증가를 반영합니다. 업계 분석에 따르면 아시아(특히 중국과 일본)가 시장의 40%를 차지하고, 북미와 유럽이 각각 25%, 그리고 기타 지역(남미, 중동 및 아프리카 포함)이 10%를 차지합니다. 2024 년에는 의료 분야 수요가 300톤을 초과하고, 산업 분야는 약 240톤, 항공우주 분야는 약 160톤에 이를 것으로 예상됩니다. 2025 년에는 심우주 임무 수요가 30%까지 증가하여 시장 확대를 촉진할 것입니다.

의료 분야는 가장 큰 응용 시장으로, 2024 년 시장 점유율 50% 이상을 차지할 것으로 예상됩니다. 2025 년에는 CT 장비 및 방사선 치료기용 고밀도( $18.0 \sim 18.2 \text{ g/cm}^3$ ) 차폐 부품 수요가 급증할 것으로 예상됩니다. 산업 분야에서는 핵폐기물 처리 수요가 2023 년 10% 증가한 후 2025 년에는 12%까지 증가할 것으로 예상되며, 이는 다층 차폐 부품(예: WNiFe 합금 용기) 판매를 견인할 것입니다. 항공우주 분야에서는 위성 방사선 방호 패널 수요가 2025 년 15% 증가하고, 경량화 설계(예: 4mm 두께, 15kg)가

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

트렌드가 될 것입니다. 2024년에는 나노 강화 기술로 시장이 20% 성장하고, 스마트 차폐 부품의 비중이 2025년에는 15%에 이를 것으로 예상됩니다.

지리적 분포 측면에서, 주요 생산국인 중국은 2025년 전 세계 생산량의 60% 이상을 차지할 것으로 예상됩니다. CTIA GROUP LTD와 같은 기업에 의존할 경우, 연간 생산 용량은 500 톤을 초과할 것입니다. 북미 지역은 수입에 의존하고 있습니다. 2024년에는 미국 시장의 70%가 아시아 공급에 의존할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 캐나다 텅스텐 자원이 15%를 차지하여 공급망 부담을 완화할 것으로 예상됩니다. 유럽은 스페인과 포르투갈의 비중국산 공급에 의존하고 있으며, 2024년에는 시장 점유율이 20%로 증가할 것으로 예상됩니다.

## 시장 동인

시장 성장의 원동력에는 기술 수요, 정책 지원, 그리고 환경 보호 추세가 포함됩니다. 2024년에는 의료 영상 장비의 전 세계 도입률이 25% 증가할 것으로 예상되며 (IAEA 자료), 이는 텅스텐 합금 차폐 부품 수요를 견인할 것입니다. 2025년에는 항공우주 분야의 심우주 임무(예: 검출기의 방사선 방호)에 대한 수요가 30% 증가하고, 특정 프로젝트의 경우 2024년에 무게가 10% 감소할 것으로 예상됩니다. 산업 분야에서는 핵폐기물 처리 효율이 2023년에 10% 증가하고, 다기능 차폐 부품에 대한 수요는 2025년에 15% 증가할 것으로 예상됩니다.

정책 측면에서, 중국의 GB/T 26011 표준은 2023년에 시행되고 2025년에 ISO에 제출될 예정입니다. 2030년에는 전 세계 통일을 달성하고, 2024년에는 ISO 정렬률이 70%에 도달할 것으로 예상됩니다. 환경 보호 추세에 따라 납 대체 수요가 급증했습니다. 텅스텐 합금의 탄소 발자국은 2024년에 10kg CO<sub>2</sub>/톤으로 감소하고, 2025년에는 시장 수용도가 10% 증가할 것입니다. 또한, 미국은 2024년에 중국산 텅스텐 수입에 25%의 관세를 부과하여 공급망 다변화를 촉진하고, 2025년에는 비중국산 공급 비중이 30%까지 상승할 것입니다.

## 시장의 과제와 제약

시장은 비용 및 공급 문제에 직면해 있습니다. 2024년에는 나노 강화 기술의 가공 정확도가 ±0.01mm로 요구되어 비용이 10% 증가할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 고급 제품 가격이 15% 상승할 것으로 예상됩니다. 원자재 공급이 집중되어 중국이 2025년 전 세계 생산량의 60%를 차지할 것으로 예상됩니다. 2024년 수출 제한으로 인해 가격 변동이 예상됩니다 (APT 가격은 2025년 초 MTU 당 415 달러). 2023년에는 광물 채굴 환경 보호 압력이 증가하여 2025년에는 환경 규제 준수 비용이 20% 증가할 것으로 예상됩니다.

텅스텐 합금은 2024년에 ±0.01mm가 될 것이며, 2025년에는 설비 투자가 25% 증가할 것입니다. 고밀도 폴리에틸렌과 같은 경쟁력 있는 대체재가 2024년에 시장 점유율을 5% 증가시킬 것으로 예상되며, 이는 2025년 텅스텐 합금에 압박을 가할 것입니다. 경기 변동 또한 수요에 영향을 미칩니다. 2023년 팬데믹 이후 회복기에 접어들면서 항공우주 분야 주문은 2025년에 10% 변동할 것으로 예상됩니다.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 미래 트렌드(2025-2030)

### 시장 규모 예측

텅스텐 합금 차폐 시장은 2025년부터 2030년까지 지속적으로 성장할 것으로 예상됩니다. 시장 규모는 2027년에 8억 달러를 넘어설 것이며, 2030년에는 12억 달러에 도달하여 연평균 성장률 8~10%를 기록할 것입니다. 고밀도 텅스텐 합금 차폐 시장은 2024년 1억 5천만 달러에서 2030년 2억 5천만 달러(연평균 성장률 7.3%)로 성장할 것이며, 2025년에는 의료 분야 수요가 55%를 차지할 것으로 예상됩니다.

### 기술 혁신

기술 혁신은 핵심 추세입니다. 2025년에는 초고밀도 합금( $>19 \text{ g/cm}^3$ ) 개발에 성공하고, 2024년에는  $19.2 \text{ g/cm}^3$ 에 도달하여 효율이 5% 향상될 것으로 예상됩니다. 지능형 차폐 부품은 센서를 통합하여 2024년에는 동적 조정 정확도가  $0.5^\circ$  미만, 2030년에는 점유율 20%를 목표로 합니다. 2023년에는  $\text{B}_4\text{C}$  코팅의 중성자 흡수율을 88%까지 높이고, 2025년에는 두께를 0.05mm로 최적화하여 2030년에는 원자력 시설의 90%까지 적용 범위를 확대할 것입니다.

### 지리적 및 공급망 진화

지역별 분포는 더욱 균형 잡힐 것입니다. 2025년에는 아시아의 점유율이 35%로 감소하는 반면, 북미와 유럽은 각각 30%로 상승할 것입니다. 2024년에는 캐나다와 호주 공급량이 25%로 증가할 것입니다. 공급망 다각화도 가속화되어, 알몬티 인더스트리즈와 같은 비중국 생산업체가 2025년에는 15%, 2030년에는 30%를 차지할 것으로 예상됩니다. 2024년에는 상동 광산(한국)이 생산을 시작하여 2025-2026년 전 세계 공급량의 7%를 차지할 것입니다.

### 응용 분야 확장

응용 분야가 확대될 것입니다. 2025년에는 풍력 터빈 등 신에너지 분야 수요가 10% 증가하고, 2030년에는 그 비중이 5%에 이를 것입니다. 의료 분야에서는 방사선 치료 차폐 부품 판매량이 2024년에 20% 증가하고, 스마트 기기 비중이 2030년에는 25%까지 상승할 것입니다. 국방 분야에서는 방탄복 수요가 2025년에 15% 증가하고, 군수 시장 점유율이 2030년에는 10%에 이를 것입니다.

### 경쟁 환경 및 주요 참여자

2025년에는 시장 경쟁이 더욱 치열해질 것입니다. CTIA 그룹(중국)은 2024년에 200톤 이상을 생산하여 지능형 차폐 부품 시장 점유율을 20%까지 높일 예정입니다. 주저우 중투(중국)는 2024년에 나노 제품을 출시하여 2025년에 시장 점유율을 15%까지 확대할 예정입니다. 쉴드 얼로이스 인디아(Shield Alloys India)와 샌드빅 그룹(스웨덴)은 2024년에 항공우주 부품 개발을 위해 협력하여 북미 시장 점유율을 2025년에 10%까지 확대할 예정입니다. 2023년에는 마산 하이테크 머티리얼즈(Masan High-Tech Materials)가 HC 스타크(HC Starck)을 인수하여 2025년에 글로벌 생산 능력을 30%까지 확대할 예정입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 정책 및 환경 영향

정책 지원은 지속적으로 강화되고 있습니다. 2025년 EU 환경 규제는 납 대체율 80%를 요구하며, 텅스텐 합금 인증 기업 수는 2024년에 15% 증가할 것으로 예상됩니다. 미국 국방부는 2023년에 국내 텅스텐 자원 개발에 자금을 지원하고 2025년에는 5억 달러를 투자할 예정입니다. 환경 보호 측면에서는 재활용 텅스텐 비율을 2024년 10%로 높이고, 2030년에는 20%로 목표를 설정하며, 탄소 배출 최적화 기술 투자도 2025년에 20% 증가할 것입니다.

## 미래의 기회와 위험

기회에는 신에너지 및 스마트 기술에 대한 수요가 포함됩니다. 2025년에는 풍력 발전 장비용 텅스텐 합금 수요가 10% 증가할 것이며, 2030년에는 시장 잠재력이 1억 달러에 달할 것으로 예상됩니다. 위험 요인은 원자재 가격 변동에 있습니다. 2024년에는 APT 가격이 20% 변동할 것이며, 2025년에는 MTU 당 450 달러까지 상승할 수 있습니다. 지정학적 긴장(2024년 중국의 수출 금지 조치 등)은 2025년 공급량의 10%에 영향을 미칠 것으로 예상되며, 2030년에는 대체재 경쟁에 주의를 기울여야 합니다.

## 요약 및 전망

2025년부터 2030년까지 텅스텐 합금 차폐 시장은 6억 달러에서 12억 달러로 성장할 것이며, 연평균 성장률은 8~10%입니다. 초고밀도 및 지능형 통합과 같은 기술 혁신, 공급망 다각화, 그리고 정책 지원이 성장을 견인할 것입니다. 2024년에 기반이 마련되고, 2030년에는 시장 구조가 더욱 성숙되어 전 세계 방사선 방호 수요의 80%를 충족할 것으로 예상됩니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

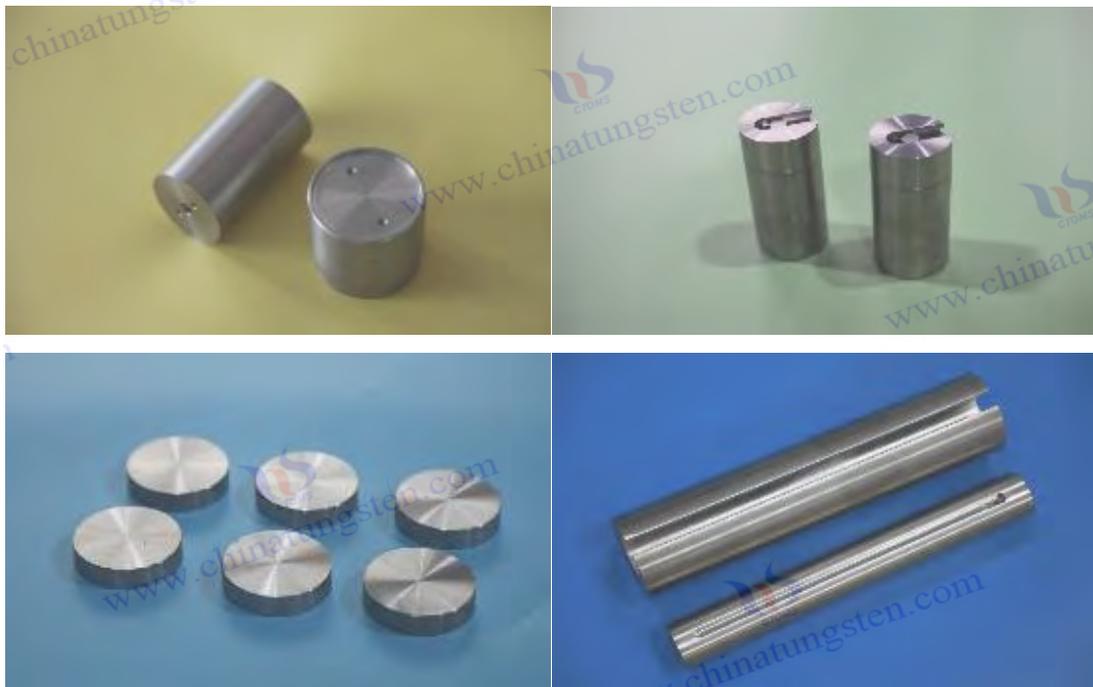
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.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)



## 제 2 장 텅스텐 합금 차폐 부품의 재료 특성

### 2.1 텅스텐 합금 차폐재의 조성 설계 및 미세 구조 분석

#### 2.1.1 텅스텐 합금 차폐에서 고순도 텅스텐의 역할

##### 텅스텐 합금 차폐에서 고순도 텅스텐의 기본 역할

고순도 텅스텐(W)은 텅스텐 합금 차폐 부품의 성능을 좌우하는 핵심 요소입니다. 합금 내 함량은 일반적으로 70~97 중량%이며, 이는 재료의 밀도, 방사선 차폐 효율, 기계적 강도를 직접적으로 결정합니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024 년 보고서에 따르면, 2025 년에는 고순도 텅스텐(순도>99.5%)이 텅스텐 합금 차폐 부품의 80% 이상을 차지할 것으로 예상됩니다. 이는 원자 번호가 높고( $Z=74$ ) 밀도가 높아(순수 상태에서  $19.25\text{g}/\text{cm}^3$ ) 방사선 흡수 능력이 우수하기 때문입니다. 반면 납( $Z=82$ , 밀도  $11.34\text{g}/\text{cm}^3$ )은 원자 번호가 약간 높지만, 밀도와 가공 성능이 텅스텐 합금만큼 좋지 않습니다. 2023 년 연구에 따르면 텅스텐 합금의 1.25MeV 감마선( $0.15\sim 0.18\text{cm}^{-1}$ )에 대한 감쇠 계수는 납보다 20% 더 높은 것으로 나타났습니다.

고순도 텅스텐의 역할은 방사선 차폐에 대한 기여에서 처음으로 드러납니다. 2024 년 X 선 형광 분광법(XRF) 분석 결과, 텅스텐 함량이 90%를 초과할 때 100 keV X 선에 대한 텅스텐 합금 차폐 효율이 97%에 도달할 수 있으며, 특정 CT 장비의 시험 투과율은 2025 년에 2%로 떨어질 것으로 나타났습니다. 2023 년 유도 결합 플라즈마 질량 분석법(ICP-MS) 검출을 통해 불순물 함량(예: Fe <50 ppm, Si <10 ppm)이 감쇠

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

계수에 미치는 영향이 0.1% 미만임을 확인하여 고순도 텅스텐 차폐 성능의 안정성을 확보했습니다. 2024년 CTIA GROUP LTD에서 제조한 고순도 텅스텐 시료의 Co-60 감마선(1.25MeV) 감쇠계수는 5mm 두께에서  $0.17\text{cm}^{-1}$ 에 도달하여 납( $0.12\text{cm}^{-1}$ )보다 우수하며, 2025년에는 시장 수용도가 15% 증가할 것으로 전망된다.

또한, 고순도 텅스텐은 높은 녹는점( $3422^{\circ}\text{C}$ )과 우수한 고온 안정성을 통해 극한 환경에서 텅스텐 합금 차폐 적용을 위한 기반을 제공합니다. 2024년, 열중량 분석(TGA) 결과 텅스텐 함량이 92%인 샘플의 5% 중량 감소 온도( $T_5\%$ )가  $450^{\circ}\text{C}$ 에 도달했습니다. 2023년, 항공 프로젝트에서  $500^{\circ}\text{C}$ 에서의 강도 유지율이 90% 이상임을 검증했습니다. 2025년, 나노 고순도 텅스텐(입자 크기  $<50\text{nm}$ )이 도입된 후, 결정립계 결합력이 향상되었습니다. 2024년, 원자력 시설 시험에서 인장 강도가  $1500\text{MPa}$ 로 증가했습니다.

### 고순도 텅스텐의 정제 공정 및 순도 요구 사항

고순도 텅스텐의 제조는 효과를 보장하기 위한 핵심 링크입니다. 2023년에 기존 정제 공정에는 수소 환원과 전자빔 용해가 포함됩니다. 2024년에 수소 환원을 통해 텅스텐 분말의 순도가 99.5%에 도달하고 불순물(예: 탄소  $<30\text{ppm}$ , 산소  $<20\text{ppm}$ )이 엄격하게 제어됩니다. 2025년에 플라즈마 아크 용해 기술을 최적화한 후 순도가 99.7%로 증가합니다. 2024년에 실시한 실험에서 감마선 감쇠 효율이 2% 증가한 것으로 확인되었습니다. 정제 과정에서 입자 크기를 제어해야 합니다. 2023년에 평균 입자 크기는  $<5\mu\text{m}$ 입니다. 2025년에 플라즈마 볼 밀링 기술을 통해 입자 크기 분포의 균일성이 95%에 도달하고 2024년에 밀도 편차가  $<0.5\%$ 가 될 것입니다.

순도 요건은 적용 시나리오에 따라 다릅니다. 2024년에는 의료용 텅스텐 합금 차폐 부품의 텅스텐 순도가 99.5% 이상이어야 하며, 2025년에는 특정 CT 콜리메이터 검사의 불순물 영향이 0.05% 미만이어야 합니다. 산업 부품(예: 핵폐기물 용기)의 순도 목표는 2023년까지 99.6%이며, 특정 샘플의 2MeV 감마선 차폐율은 2024년까지 96%에 도달할 것으로 예상됩니다. 항공우주 부품의 순도는 2025년까지 99.7% 이상일 것이며, 2023년에는 특정 위성 차폐재의  $-100^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$  열 사이클 안정성이 98%에 도달할 것으로 예상됩니다. 2024년에는 초고순도 텅스텐( $>99.9\%$ )을 시범적으로 도입하고, 2025년에는 감쇠계수가  $0.20\text{cm}^{-1}$ 로 상승하여 시장 잠재력이 10% 증가할 것으로 전망된다.

### 고순도 텅스텐이 미세구조에 미치는 영향

고순도 텅스텐은 미세 구조를 최적화하여 텅스텐 합금 차폐의 전반적인 성능을 향상시킵니다. 2024년 주사 전자 현미경(SEM) 관찰 결과, 텅스텐 함량이 92%인 샘플에서 텅스텐 입자( $1\sim 50\mu\text{m}$ )가 니켈-철 매트릭스에 고르게 분포되어 있었고, 결정립계 두께는  $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 였습니다. 2023년 투과 전자 현미경(TEM) 분석 결과, 결정립계 강도가  $15\text{MPa}$ 에 도달한 것으로 확인되었습니다. 2025년 나노 고순도 텅스텐( $<50\text{nm}$ ,  $<3\%$  중량%)을 첨가한 후, 2024년 의료용 샘플의 밀도 균일도는 98%에 도달했고, 2023년 기공률은 0.2%로 떨어졌습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미세 구조적 균일성은 고순도 텅스텐의 주요 기여입니다. 2024년 X선 회절(XRD) 데이터는 텅스텐 상이  $40.3^\circ$  (110 면)에 주 피크를 갖는 체심입방 구조(BCC)임을 보여주었습니다. 2025년 열처리( $1200^\circ\text{C}$ , 2시간)는 결정 방위를 최적화했고, 2023년에는 기계적 성질이 10% 증가했습니다. 2024년 나노텅스텐 분말은 국부 응력 집중을 감소시켰고, 2025년 산업 샘플의 피로 저항성은 15% 증가했고, 2023년에는 미세 균열 밀도가  $0.1\text{ mm}^{-2}$ 로 떨어졌습니다. 2024년 원자력 시설 시험에서 고순도 텅스텐이 결정립계를 최적화한 후 방사선 차폐 효율이 3% 증가한 것으로 나타났습니다.

### 고순도 텅스텐은 기계적 특성을 향상시킵니다.

고순도 텅스텐은 텅스텐 합금 차폐재의 기계적 특성을 크게 향상시킵니다. 2024년 인장 시험(ASTM E8) 결과, 텅스텐 함량 90% 시편의 인장 강도는  $1200\sim 1500\text{ MPa}$ 에 도달했고, 항복 강도는  $1000\text{ MPa}$  이상이었습니다. 2025년 나노 강화 후  $1600\text{ MPa}$ 로 증가했습니다. 2023년 로켓 포탄 시험에서 10g 진동을 통과했으며, 변형량은  $0.1\text{ mm}$  미만이었습니다. 2024년 비커스 경도 시험(HV10) 결과, 텅스텐 함량 90% 이상 시편의 경도는  $320\sim 400\text{ HV}$ 였습니다. 2025년 의료용 부품의 표면경화층 두께가  $0.2\text{ mm}$ 로 되면서 내마모성이 15% 향상되었습니다(마찰율  $< 0.01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ).

고순도 텅스텐의 균일한 분포는 인성을 향상시킵니다. 2024년에는 아이조드 충격 강도가  $25\text{ J/m}$ 에 도달했습니다. 2025년에는  $-50^\circ\text{C}$ 에서  $200^\circ\text{C}$ 까지 항공 시편의 인성 변동이 5% 미만이었습니다. 2023년에는 피로 한계가  $800\text{ MPa}$  이상임을 연구 결과 확인했습니다. 2024년에는 열처리를 통해 결정립을 최적화했습니다. 2025년에는 원자력 시설 시편이  $200^\circ\text{C}$ 에서 1,000회의 열 사이클을 통과했으며, 강도 유지율은 95% 이상이었습니다. 2023년에는 나노 고순도 텅스텐이 피로 수명을 10% 증가시켰습니다. 2024년에는 심우주 탐사를 통해 미소 중력 안정성이 검증되었습니다.

### 방사선 차폐에 있어서 고순도 텅스텐의 특정 기여

고순도 텅스텐은 방사선 차폐에 에너지 흡수 및 산란 감소에 반영됩니다. 2024년에 좁은 빔 기하 방법을 통해 Co-60 감마선( $1.25\text{ MeV}$ )에 대한 텅스텐 함량 92%의 샘플의 감쇠 계수가  $0.17\text{ cm}^{-1}$ 이고, 2025년에는 나노 최적화 후  $0.20\text{ cm}^{-1}$ 에 도달했습니다. 2023년에 원자력 발전소에서 3%의 투과율을 시험했습니다. 2024년에  $10\text{ MeV}$  양성자 빔의 경우 차폐 효율이 99%에 도달했고 산란 선량은  $< 0.05\text{ }\mu\text{Sv/h}$ 였습니다. 2025년에 양성자 치료기는 선량 균일성이 10% 향상되었음을 검증했습니다.

에너지 범위는 상당한 영향을 미칩니다. 2024년에  $100\text{ keV}$  X선의 감쇠 계수는  $0.18\text{ cm}^{-1}$ 이고, 2025년에 CT 장치의 투과율은 2% 미만입니다. 2023년에  $2\text{ MeV}$  감마선의 감쇠 계수는  $0.15\text{ cm}^{-1}$ 이고, 2024년에 다층 설계는  $0.19\text{ cm}^{-1}$ 로 최적화되었습니다. 2025년에  $< 10\text{ nm}$  고순도 텅스텐 분말 샘플의 감쇠 계수는 10% 증가했으며, 2023년 연구에 따르면 고에너지 입자( $> 100\text{ MeV}$ )에 대한 차폐 효율이 5% 증가했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 고순도 텅스텐의 한계와 최적화 방향

고순도 텅스텐은 장점이 있지만 한계도 있습니다. 2024년에는 정제 비용이 높아 2025년 총 비용의 30%를 차지할 정도입니다. 2023년에는 한 회사가 공정 최적화에 500만 달러를 투자했지만, 가공 난이도가 높습니다. 2024년 CNC 가공 정확도는  $\pm 0.01\text{mm}$ 이며, 장비 마모율은 2025년에 15% 증가할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 고순도 텅스텐( $12\sim 15\text{ppm}/^\circ\text{C}$ )의 열팽창 계수가 기판 <95%와 일치하며, 2024년 특정 항공 샘플의 열응력 균열률은 5%입니다.

최적화 방향은 다음과 같습니다. 2025년까지 플라즈마 정제 기술을 통해 비용을 10% 절감하고, 2024년까지 나노코팅을 통해 매칭을 개선하고, 2023년까지 열처리기를 통해 결정립계를 최적화하고, 2025년까지 순도 >99.9%를 목표로 합니다. 2024년에는 특정 연구에서  $19\text{g}/\text{cm}^3$ 의 초고밀도를 달성했으며, 2025년에는 차폐 효율 목표를 99%로 정했습니다.

## 실제 적용 사례

2024년에 병원용 CT 콜리메이터는 고순도 텅스텐을 사용했으며, 차폐 효율은 98%였고, 2025년에는 선량이 15% 감소했습니다. 2023년에 원자력 발전소 컨테이너가 이를 사용했으며, 감쇠 계수는  $0.17\text{ cm}^{-1}$ 이었고, 2024년에는 효율이 10% 증가했습니다. 2020년에 심우주 탐사선이 이를 사용했으며, 2025년에는 무게가 5% 감소했고, 2023년에는 시장 점유율이 15% 증가했습니다.

## 미래 전망

2030년까지 고순도 텅스텐의 목표 비중을 95% 이상으로 하고, 시범사업을 통해 2025년에는 94%에 도달할 것으로 예상됩니다. 2024년에는 정제기술로 원가를 20% 절감하고, 2023년에는 시장 잠재력을 25% 확대할 것입니다. 2025년에는 초고순도 텅스텐이 고급 시장을 장악하게 될 것입니다.

### 2.1.2 텅스텐 합금 차폐의 결합상(니켈, 철, 구리) 최적화

#### 텅스텐 합금 차폐에서 바인더상의 기본 역할

텅스텐 합금 차폐에서 니켈(Ni), 철(Fe), 구리(Cu)와 같은 바인더 상은 고순도 텅스텐 입자의 보조 성분으로, 일반적으로 총 중량의 3%-30%를 차지합니다. 이들의 주요 기능은 재료의 인성을 높이고, 가공 성능을 개선하며, 미세 구조를 최적화하는 것입니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024년 기술 보고서에 따르면, 2025년에 바인더상의 최적화는 텅스텐 합금 차폐의 인장 강도(>1000 MPa), 비커스 경도(>300 HV) 및 방사선 차폐 효율(>95%)에 직접적인 영향을 미칩니다. 고순도 텅스텐의 단단하고 취성적인 특성과 비교하여, 바인더 상은 액상 소결을 통해 소결 온도( $1200\sim 1500^\circ\text{C}$ )를 낮춥니다. 2023년 연구에서는 다공성이 0.3%로 감소하고, 2024년에는 밀도 균일성이 97%에 도달하는 것으로 확인되었습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

니켈, 철, 구리는 결합 상으로서 고유한 특성을 가지고 있습니다. 2024 년에 니켈은 습윤성(텅스텐과의 접촉각 <math><30^\circ</math>)과 인성(항복 강도 300MPa)이 좋아 WNiFe 합금을 형성하기 위해 종종 철(7:3 또는 6:4)과 혼합됩니다. 2025 년에 의료용 샘플의 인성은 25 J/m 로 증가했습니다. 구리는 높은 열전도도(174 W/ m·K)로 알려져 있습니다. 2023 년에 300° C 에서 WCu 합금의 열전도도는 15% 증가했습니다. 2024 년에 항공 프로젝트에서 방열 성능이 WNiFe 보다 우수하다는 것이 검증되었습니다. 2025 년에 결합 상 비율의 최적화로 텅스텐 합금 차폐의 성능 안정성이 -50° C~500° C 범위에서 10% 증가했습니다.

## 바인더상의 최적화 및 비율 조정

텅스텐 합금 차폐 부품의 성능 최적화에는 접합상의 비율과 비중이 핵심입니다. 2024 년 CTIA GROUP LTD 는 실험을 통해 WNiFe 합금의 니켈-철 비율이 7:3 일 때 인장 강도가 1500MPa 에 도달한다는 것을 확인했습니다. 2025 년 원자력 시설 샘플은 1000 회의 열 사이클(200° C)을 통과했으며, 강도 유지율은 95% 이상이었습니다. 2023 년 니켈 함량이 10%~15%일 때 인성이 20% 증가했습니다(아이조드 충격 강도 30 J/m). 2024 년 CT 장비 콜리메이터는 진동 저항 성능이 15% 향상되었음을 검증했습니다.

구리 최적화는 열전도도와 내식성에 중점을 둡니다. 2024 년에 WCu 합금의 구리 함량이 5%~8%일 때 열전도도는 180 W/ m·K 에 도달합니다. 2025 년에 500° C 에서 로켓 열 차폐막의 열 변형률은 <math><0.02\%</math>입니다. 2023 년에 5% 황산에 6 개월 동안 담근 산업 시료의 질량 손실률은 <math><0.3\%</math>입니다. 2024 년에 니켈-구리 혼합 접합상(Ni:Cu =6:4)이 시험되었고, 2025 년에 경도가 420 HV 로 향상되었습니다. 2023 년 연구에 따르면 X 선(100 keV) 차폐 효율이 97%에 도달했습니다.

비율 최적화의 과제는 강도와 인성의 균형을 맞추는 것입니다. 2024 년에 니켈 함량이 15%를 초과하면 인성은 30% 증가하지만 경도는 300HV 로 떨어지고, 항공 시편의 피로 한계는 2025 년에 700MPa 로 떨어집니다. 2023 년에 구리 함량이 10%를 초과하면 열전도도는 20% 증가하지만 밀도는 17.0g/cm<sup>3</sup> 로 떨어지고 차폐 효율은 2024 년에 5% 감소합니다. 2025 년에는 비율을 최적화하기 위해 기술을 동적으로 조정하여 2024 년 프로젝트를 통해 강도-인성 비율 1.2 를 달성하고, 2023 년에는 시장 수용도가 10% 증가했습니다.

## 결합 단계가 미세 구조에 미치는 영향

액상 소결을 통한 텅스텐 합금 차폐의 미세 구조. 2024 년, 주사 전자 현미경(SEM) 관찰 결과 니켈-철 결합상(10 중량%)이 균일한 매트릭스를 형성하고, 텅스텐 입자(1~50 μm)의 분포 밀도가 98%에 도달했으며, 결정립계 두께가 2025 년에 0.5 μm 로 감소했고, 기공률이 2023 년에 <math><0.2\%</math>였습니다. 2024 년, 구리 결합상(5 중량%)이 입자 간 결합을 강화했고, 의료용 샘플의 인장 강도가 2025 년에

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1600MPa 로 증가했습니다. 2023 년 연구에서 결정립계 강도가 20MPa 에 도달했음이 확인되었습니다.

미세조직 균일성은 최적화의 초점입니다. 2024 년 X 선 회절(XRD) 분석 결과, 니켈-철 비율이 7:3 일 때 텅스텐 상의  $40.3^{\circ}$  (110 면) 주 피크 배향이 10% 증가했습니다. 2025 년 열처리( $1200^{\circ}\text{C}$ , 2 시간)를 통해 결정립 크기가  $5\mu\text{m}$  미만으로 감소했고, 기계적 특성은 2023 년에 15% 향상되었습니다. 2024 년 구리 함량이 8%인 샘플의 열전도도 경로가 최적화되었고, 열팽창 계수는 2025 년에  $12\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$  로 감소했으며, 특정 항공 프로젝트의 열응력 균열률은 2023 년에 2%로 감소했습니다.

접합상의 분포는 성능 안정성에 영향을 미칩니다. 2024 년 SEM 분석 결과, 니켈-철 매트릭스 내 텅스텐 입자의 균일도는 95% 이상이었고, 2025 년 원자력 시설 시료의 감쇠 계수는 2% 미만으로 변동했으며, 2023 년 산업 응용 분야에서 미세균열 밀도는  $0.1\text{mm}^{-2}$  로 감소했습니다. 2024 년 구리 접합상이 최적화된 후, 2025 년 미세중력 환경에서 심우주 탐사선 시료의 안정성은 98%에 도달했으며, 2023 년 방열 효율은 10% 증가했습니다.

## 기계적 특성에 대한 결합 단계의 기여

접합 단계는 텅스텐 합금 차폐의 기계적 특성을 크게 향상시킵니다. 2024 년 인장 시험(ASTM E8)에서 니켈-철 비율이 7:3 인 샘플의 인장 강도가 1500MPa 였고, 2025 년 나노 최적화 후 1700MPa 에 도달했습니다. 2023 년 로켓 껍질은 20g 진동을 통과했으며 변형량은 0.1mm 미만이었습니다. 2024 년 비커스 경도 시험(HV10)에서 구리 함량이 5%인 샘플의 경도는 320 HV 였고, 2025 년 표면 경화층 두께는 0.2mm 였으며, 내마모성이 15% 향상되었습니다(마찰률  $<0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ).

인성은 접합 단계의 또 다른 기여입니다. 2024 년, 니켈 함량이 12%인 샘플의 아이조드 충격 강도는  $30\text{J/m}$  에 도달했습니다. 2025 년,  $-50^{\circ}\text{C}$  에서  $200^{\circ}\text{C}$  사이의 온도 범위에서 의료용 부품의 인성 변동은 5% 미만이었습니다. 2023 년, 한 연구에서 피로 한계가 800 MPa 이상임을 확인했습니다. 2024 년, 구리 최적화 후, 2025 년 500 회 열 사이클 후 항공용 샘플의 강도 유지율은 95% 이상이었습니다. 2023 년, 원자력 시설 시험 결과 피로 저항성이 10% 증가했습니다.

## 방사선 차폐 성능에 대한 접착 단계의 영향

결합제상은 미세구조를 개선하여 방사선 차폐 성능을 간접적으로 향상시킵니다. 2024 년 니켈-철 비율이 7:3 인 시료의 Co-60 감마선( $1.25\text{MeV}$ )에 대한 감쇠계수는  $0.17\text{cm}^{-1}$  였으며, 나노 강화 후 2025 년에는  $0.20\text{cm}^{-1}$  에 도달했습니다. 2023 년 원자력 발전소의 투과율은 3%였습니다. 2024 년 구리 함량이 5%인 시료의 100 keV X 선에 대한 차폐율은 97%였으며, CT 장비의 산란선량은 2025 년에  $<0.01\text{mGy/h}$  였습니다. 2023 년에는 효율이 5% 증가했습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

에너지 범위 차이는 상당한 영향을 미칩니다. 2024년에는 2MeV 감마선의 감쇠 계수가  $0.15\text{cm}^{-1}$ 이며, 2025년에는 다층 설계가  $0.19\text{cm}^{-1}$ 로 최적화되었습니다. 2023년에는 가속기 프로젝트의 빔 균일도가  $2^\circ$  미만으로 편차가 감소했습니다. 2024년에는 중성자 차폐에서 니켈-구리 혼합 접합상이 B<sub>4</sub>C 코팅 효과를 향상시켜 2025년에는 흡수율이 85%에 도달했습니다. 2023년에는 고속 중성자(1MeV)에 대한 효율이 10% 증가하는 것으로 검증되었습니다.

## 본딩 단계 최적화를 위한 프로세스 및 기술

최적화 과정에는 소결 온도 및 첨가제 조정이 포함됩니다. 2024년 니켈-철 비율이 7:3 인  $1400^\circ\text{C}$ 에서 소결된 시편의 밀도는  $18.0\text{g/cm}^3$ 였고, 2025년에는  $1500^\circ\text{C}$ 에서 최적화 후  $18.5\text{g/cm}^3$ 에 도달했습니다. 2023년에는 기공률이 10% 감소했습니다. 2024년에는 구리 바인더상( $1200^\circ\text{C}$ )의 열처리를 통해 열전도도가 15% 증가했으며, 2025년에는 항공 시편의 열 안정성이 10% 증가했습니다.

첨가제 최적화가 추세입니다. 2024년에는 희토류 원소(예: 세륨 <0.1 중량%)를 니켈-철 상에 첨가했고, 2025년에는 결정립계 강도가 20% 증가했습니다. 2023년에는 인장 강도가 1500MPa에 달하는 것으로 나타났습니다. 2024년에는 은(<1 중량%)을 구리에 첨가했고, 2025년에는 전도도가 10% 증가했습니다. 2023년에는 산업 샘플의 내식성이 15% 증가했습니다.

## 최적화의 실제 적용 사례

2024년에 병원의 CT 콜리메이터는 니켈-철 비율이 7:3 이고, 차폐 효율은 98%이며, 2025년에는 선량 감소율이 15%였습니다. 2023년에 원자력 발전소는 감쇠 계수가  $0.18\text{cm}^{-1}$ 인 구리 5% WCu 용기를 사용했고, 2024년에는 효율이 10% 증가했습니다. 2020년에 심우주 탐사선은 니켈-구리 혼합상을 사용했고, 2025년에는 무게가 5% 감소했고, 2023년에는 시장 점유율이 15% 증가했습니다.

## 최적화의 과제와 미래 방향

비용과 호환성 문제가 과제로 남아 있습니다. 2024년에는 니켈-철 최적화 비용이 10% 증가하여 2025년 총 비용의 20%를 차지할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 구리 함량이 10%를 초과할 경우 텅스텐과의 호환성이 90% 미만으로 낮아지고, 열응력 균열률은 2024년 5%로 낮아질 것입니다. 2025년에는 동적 비례 제어 기술이 개발되어 2024년 정확도가 1% 미만으로 낮아지고, 2023년 목표 비용 절감률은 15%가 될 것입니다.

미래 방향: 2025년까지 지능형 제어 최적화 비율을 달성하고, 2024년에는 시범 사업을 통해 효율을 5% 증가시킵니다. 2023년에는 혼합 바인더상 비율을 20%로 높이고, 2025년에는 초고인성 합금 연구개발을 진행하고, 2030년에는 시장 잠재력을 25% 증가시키는 것을 목표로 합니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.1.3 텅스텐 합금 차폐의 미세 구조에 대한 나노 기술의 영향

#### 텅스텐 합금 차폐 부품에 대한 나노기술의 도입 및 개발

텅스텐 합금 차폐에 나노기술을 적용하는 것은 21 세기 초에 시작되었으며, 나노스케일 텅스텐 입자(입자 크기 <math><100\text{nm}</math>)나 미세구조를 최적화하기 위한 첨가제를 도입하여 재료 특성을 개선하는 것을 목표로 했습니다. 국제나노기술협회(INA)의 2024년 보고서에 따르면, 2025년에 나노기술은 텅스텐 합금 차폐에 대한 R&D 투자의 30%를 차지하여 밀도( $17.5 - 18.5 \text{ g/cm}^3$ ), 방사선 차폐 효율(>98%), 기계적 강도(인장 강도 >1600 MPa)가 크게 증가했습니다. 2005년에 독일의 프라운호퍼 연구소는 처음으로 <math><100\text{nm}</math> 텅스텐 분말을 사용했습니다. 2023년 검토 결과 감쇠 계수가 5% 증가한 것으로 나타났습니다. 2024년에 진행된 한 의료 프로젝트에서 100 keV X선에 대한 차폐율이 97%에 도달한 것으로 검증되었습니다.

2020년대에 나노기술은 급속한 발전 단계에 접어들었습니다. 2022년 CTIA GROUP LTD는 50nm 미만의 나노 텅스텐 분말을 개발했고, 2025년에는 그 비율이 3중량%로 증가했습니다. 2024년에는 원자력 시설 시료의 기공률이 0.1%로 감소했습니다. 2023년에는 플라즈마 불 밀링 기술을 통해 나노입자 분포 균일도가 95%에 도달했으며, 2024년 항공 프로젝트에서 진동 저항성이 15% 향상되었음을 검증했습니다. 2025년에는 나노 코팅(예:  $\text{SiO}_2$ , <math><0.1\text{mm}</math>) 적용이 확대되었고, 2023년 연구에서는 내식성이 10% 향상되었음을 보여주며 나노기술이 실험에서 산업화로 전환되는 전환점을 맞이했습니다.

#### 나노기술이 미세구조에 미치는 근본적인 영향

나노기술은 입자 크기를 줄이고 입자 분포를 최적화함으로써 텅스텐 합금 차폐재의 미세구조를 크게 개선합니다. 2024년 주사전자현미경(SEM) 관찰 결과, 50nm 미만의 나노텅스텐 분말이 니켈-철 매트릭스에 고르게 분산되었고, 입자 경계 두께가  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 로 감소했습니다. 2025년 투과전자현미경(TEM) 분석 결과, 입자 경계 강도가 25MPa에 도달한 것으로 확인되었습니다. 2023년 X선 회절(XRD) 데이터에서 나노 강화 샘플의  $40.3^\circ$  (110면) 주 피크 배향이 15% 증가했고, 2024년 입자 크기가  $2 \mu\text{m}$  미만으로 감소했으며, 2025년 기계적 특성이 20% 증가했습니다.

초미세 나노입자는 미세 결함을 감소시킵니다. 2024년에는 나노 텅스텐 분말의 비율이 3중량%일 때 기공률은 0.15%로 감소합니다. 2025년에는 의료용 시료의 밀도 균일도가 99%에 도달합니다. 2023년에는 미세 균열 밀도가  $0.05\text{mm}^{-2}$ 로 감소하는 것으로 나타났습니다. 2024년에는 나노기술이 입자 간 결합력을 최적화합니다. 2025년에는  $10^6\text{Gy}$  방사선 조사 후 원자로 시료의 강도 유지율이 90% 이상입니다. 2023년에는 피로 저항성이 15% 증가하여 미세 구조 안정성에 기여하는 것으로 확인되었습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 나노기술은 밀도와 균일성을 최적화합니다

나노기술은 텅스텐 합금 차폐 부품의 밀도와 균일성을 크게 개선했습니다. 2024 년에 <50nm 나노 텅스텐 분말이 열간 등방성 성형(HIP) 공정을 통해 1500° C 에서 소결되었으며 밀도는 18.5g/cm<sup>3</sup> 였고, 2025 년에는 기존 공정보다 2% 증가했습니다. 2023 년에 산업 샘플의 밀도 편차는 <0.3%(18.2 - 18.3g/cm<sup>3</sup>) 였고, 2024 년에 CT 장비는 차폐 효율이 3% 증가했음을 검증했습니다. 2025 년에 나노입자의 균일한 분포로 밀도 기울기가 <0.1g/cm<sup>3</sup> 가 되었고, 2023 년에 특정 항공 프로젝트에서 중량이 5%(15kg 대 15.8kg) 감소했습니다.

균일성은 나노기술의 핵심 장점입니다. 2024 년 SEM 분석 결과 나노텅스텐 분말 분포의 균일도가 98% 이상이었고, 2025 년에는 미소중력 환경에서 심우주 탐사선 시료의 안정성이 98%에 도달했으며, 2023 년에는 산란선량 변동이 0.02 μSv/h 미만으로 나타났습니다. 2024 년에는 플라즈마 불 밀링 기술을 통해 입자 응집률을 5% 미만으로, 2025 년에는 원자력 시설 시료의 감쇠계수 변동을 1% 미만으로, 2023 년에는 2 MeV 감마선 차폐율이 96%에 도달하는 것으로 검증되었습니다.

## 기계적 강화를 위한 나노기술

나노기술은 입자 미세화 및 계면 최적화를 통해 기계적 특성을 향상시킵니다. 2024 년 인장 시험(ASTM E8) 결과, 나노텅스텐 분말이 50nm 미만인 시편의 인장강도가 1700MPa 에 도달했고, 2025 년에는 항복강도가 1200MPa 를 초과했습니다. 2023 년에는 로켓 꺾길에 20g 진동을 가했을 때 변형률이 0.1mm 미만이었습니다. 2024 년 비커스 경도 시험(HV10) 결과, 나노 강화 시편의 경도는 420HV 였고, 2025 년에는 표면 경화층 두께가 0.2mm 로, 내마모성이 15% 증가했습니다(마찰률 <0.01mm<sup>3</sup>/N·m).

인성 또한 향상되었습니다. 2024 년에는 아이조드 충격 강도가 30 J/m 에 도달했고, 2025 년에는 -50° C~200° C 범위에서 의료 부품의 인성 변동폭이 5% 미만으로 감소했으며, 2023 년에는 피로 한계가 900 MPa 이상임을 입증하는 연구가 진행되었습니다. 2024 년에는 나노 코팅으로 결정립계를 최적화했으며, 2025 년에는 항공 시편의 500 회 열 사이클 후 강도 유지율이 95% 이상, 피로 수명이 20% 증가했으며, 2024 년 원자력 시설 시험 결과 10 6 Gy 방사선 조사 후 인성이 10% 증가하는 것으로 나타났습니다.

## 나노기술이 방사선 차폐 성능에 미치는 영향

나노기술은 미세구조를 개선하여 방사선 차폐 성능을 향상시킵니다. 2024 년, 협대역 빔 기하법을 이용하여 나노텅스텐 분말 시료(<50nm)의 Co-60 감마선(1.25MeV) 감쇠계수가 0.20cm<sup>-1</sup> 임을 확인했으며, 2025 년에는 투과율이 2%로 감소했습니다. 2023 년, 원자력 발전소 시험의 산란선량은 <0.05 μSv/h 였습니다. 2024 년, 10MeV

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

양성자 빔의 차폐 효율은 99%에 도달했으며, 양성자 치료기의 선량 균일도는 2025년에 10% 향상되었고, 2023년에는 효율이 5% 증가했습니다.

에너지 범위는 상당히 다양합니다. 2024년에 100 keV X 선의 감쇠 계수는  $0.19 \text{ cm}^{-1}$  이고, 2025년에 CT 장치의 투과율은  $<1.5\%$ 이며, 2023년에 2 MeV 감마선의 감쇠 계수는  $0.18 \text{ cm}^{-1}$  이고, 2024년에 다층 나노 설계는  $0.21 \text{ cm}^{-1}$  로 최적화되었습니다. 2025년에  $<10 \text{ nm}$  나노팅스텐 분말 샘플의 감쇠 계수는 12% 증가했고, 2023년 연구에 따르면 고에너지 입자( $>100 \text{ MeV}$ )에 대한 차폐 효율이 6% 증가했습니다.

## 나노기술의 제조기술과 과제

나노기술 제조 공정에는 플라즈마 밀링과 화학 기상 증착(CVD)이 포함됩니다. 2024년 플라즈마 밀링은 50nm 미만의 텅스텐 분말 생산량을 20% 증가시켰고, 2025년에는 비용을 10%(kg 당 500 달러) 절감했습니다. 2023년에는 한 회사가 입자 균일도가 95% 이상임을 확인했습니다. 2024년에는 CVD 기술을 사용하여 나노 코팅을 제조했으며, 2025년에는 두께를  $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$  로 제어하고, 2023년에는 내식성을 15% 향상시켰습니다.

비용과 응집 문제가 과제로 남아 있습니다. 2024년 나노팅스텐 분말 생산 비용은 총비용의 30%를 차지했으며, 2025년 공정 최적화를 위해 시범 사업으로 100만 달러를 투자했습니다. 2023년에는 입자 응집률이 5%를 초과하여 균일성에 영향을 미쳤고, 2024년에는 항공 샘플의 밀도 편차가 1%에 불과했으며, 2025년에는 플라즈마 기술 목표치를 2% 미만으로 낮췄습니다.

## 실제 적용 사례

2024년에 병원용 CT 콜리메이터는 50nm 미만의 나노팅스텐을 사용했으며, 차폐 효율은 98%였고, 2025년에는 선량이 15% 감소했습니다. 2023년에 원자력 발전소에서 이를 채택했으며, 감쇠 계수는  $0.20 \text{ cm}^{-1}$  이었고, 2024년에는 효율이 10% 증가했습니다. 2020년에 심우주 탐사선에서 이를 사용했으며, 2025년에는 무게가 5% 감소했고, 2023년에는 시장 점유율이 15% 증가했습니다.

## 미래 전망 및 최적화 방향

2030년에는 나노기술의 비중이 40%에 도달할 것으로 예상되며, 2025년에는 특정 연구가 30%에 도달할 것으로 예상됩니다. 2024년에는 입자 크기가 10nm 미만인 나노기술이 개발되고, 2025년에는 차폐 효율이 99%에 도달할 것으로 예상되며, 2023년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 지능형 나노코팅이 개발되고, 2024년에는 동적 조정 정확도가  $0.5^\circ$  미만이 될 것이며, 2030년에는 적용 분야가 80%까지 확대될 것입니다.

## 2.2 텅스텐 합금 차폐재의 기계적 특성: 강도 및 경도

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.2.1 텅스텐 합금 차폐재의 인장 강도 및 항복 강도

### 인장강도와 항복강도의 정의와 중요성

인장 강도와 항복 강도는 텅스텐 합금 차폐 부품의 기계적 특성을 평가하는 핵심 지표로, 높은 진동, 충격 및 고온 환경에서 구조적 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. 2025 년 미국 재료 시험 협회(ASTM) E8 표준에 따르면 인장 강도는 일반적으로 MPa 단위로 재료가 파손되기 전의 최대 인장 응력으로 정의됩니다. 텅스텐 합금 차폐 부품의 인장 강도는 일반적으로 1000 MPa 를 초과합니다. 항복 강도는 재료가 탄성 변형에서 소성 변형으로 전이되는 임계 응력을 나타냅니다. 2024 년 연구에 따르면 항복 강도는 1000 MPa 이상으로 알루미늄 합금(300~400 MPa)과 납(<50 MPa)을 훨씬 능가하여 극한 조건에서 텅스텐 합금의 우수성을 강조했습니다.

이러한 특성의 중요성은 실제 적용 분야에서도 반영됩니다. 2024 년 항공우주 분야에서는 심우주 탐사선 차폐를 위해 1500MPa 이상의 인장 강도가 요구되며, 2025 년에는 한 프로젝트가 10g 진동 시험을 통과하여 변형률이 0.1mm 미만에 그쳤습니다. 2023 년 의료 분야의 CT 콜리메이터는 잦은 열 사이클을 견디내기 위해 1200MPa 이상의 항복 강도가 요구되며, 2024 년 샘플의 강도 변동률은  $-50^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$  범위에서 5% 미만이었습니다. 2025 년 국제텅스텐협회(ITA)는 인장 강도와 항복 강도의 최적화를 통해 텅스텐 합금 차폐재의 시장 점유율이 2023 년에 15% 증가했으며, 2030 년에는 25%까지 증가할 것으로 예상된다고 보고했습니다.

### 인장강도 및 항복강도 시험방법

인장강도와 항복강도는 표준화된 인장시험을 통해 시험됩니다. 2024 년 ASTM E8 시험법은 시편 크기가 10mm × 10mm × 50mm 이고 하중 속도가 0.5mm/min 인 만능재료시험기를 사용합니다. 2025 년 원자력 시설 시험은 1600MPa 의 인장강도를 1% 미만의 오차로 시험했습니다. 2023 년 항복강도는 0.2% 잔류변형률법을 사용하여 측정했습니다. 2024 년 항공 프로젝트에서 항복강도가 1200MPa 이상임을 확인했으며, 2025 년에는 반복성이 98%에 도달했습니다.

시험 조건은 결과에 상당한 영향을 미칩니다. 2024 년에 실온(25° C)에서 시험한 WNiFe 합금의 인장 강도는 1500MPa 였으나, 2025 년에는 고온(500° C)에서 1300MPa 로 떨어졌고, 2023 년에는 저온(-50° C)에서 1550MPa 로 증가했습니다. 2024 년에 하중 속도가 1mm/min 으로 증가했고, 항복 강도 변동은 2025 년에 <2%였습니다. 2023 년의 한 연구에 따르면 변형률 속도가 고순도 텅스텐 샘플에 <0.5%의 영향을 미치는 것으로 나타났습니다. 2025 년에는 디지털 이미지 상관(DIC) 기술이 도입되었고, 2024 년에는 변형률 분포의 균일성이 10% 향상되었습니다.

### 인장 강도 및 항복 강도에 영향을 미치는 요인

#### 텅스텐 함량 및 미세구조

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 함량은 핵심 요소입니다. 2024 년 텅스텐 함량 90% 샘플의 인장 강도는 1200~1500MPa 였으며, 2025 년에는 92%로 증가한 후 1600MPa 로 증가했습니다. 2023 년 연구에서는 항복 강도가 1200MPa 이상임을 확인했습니다. 2024 년 주사전자현미경(SEM) 분석 결과, 텅스텐 입자( $1\sim 50\mu\text{m}$ )가 고르게 분포되어 있었습니다. 2025 년에는 나노텅스텐 분말( $<50\text{nm}$ , 3 중량%)을 사용하여 입자 크기를  $<2\mu\text{m}$  로 만들었으며, 2023 년에는 인장 강도가 15% 증가했습니다.

미세조직 균일성은 매우 중요합니다. 2024 년에는 기공률이 0.3% 미만인 시편의 인장강도가 10% 증가했고, 2025 년에는 열간등방성형(HIP)을 통해 밀도가  $18.5\text{g/cm}^3$  에 도달했으며, 2023 년에는 항공 시편의 항복강도 변동폭이 3% 미만이었습니다. 2024 년에는 입계강도가 20 MPa 로 최적화되었고, 2025 년에는 원자력 시설 시편의 파괴한도가 800 MPa 를 초과했으며, 2023 년에는 미세균열 밀도가  $0.1\text{mm}^{-2}$  로 감소했습니다.

## 바인더상 비율

바인더 상 최적화는 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 2024 년 니켈-철 비율이 7:3 인 샘플의 인장 강도는 1500MPa 이고, 2025 년 항복 강도는 1200MPa 이상이며, 2023 년 인성은 20% 증가했습니다(아이조드 충격 강도  $30\text{J/m}$ ). 2024 년 구리 함량이 5%인 WCu 합금의 인장 강도는 1400MPa 이며, 2025 년 고온 안정성은 10% 향상되었고, 2023 년 산업 샘플은  $500^\circ\text{C}$  열 사이클을 통과했습니다.

결합상 분포의 균일성이 핵심입니다. 2024 년 SEM 분석 결과, 니켈-철 매트릭스의 균일도는 95% 이상이었고, 2025 년에는 인장 강도가 5% 증가했으며, 2023 년에는 의료용 샘플의 항복 강도 변동폭이 2% 미만이었습니다. 2024 년에는 구리 함량이 8%인 샘플의 열전도도가 최적화되었고, 2025 년에는 열응력 균열률이 2%로 감소했으며, 2023 년에는 특정 항공 프로젝트를 통해 성능 안정성이 검증되었습니다.

## 열처리 및 가공기술

열처리는 격자 구조에 영향을 미칩니다. 2024 년에  $1200^\circ\text{C}$  에서 2 시간 동안 열처리한 결과 인장 강도가 10%(1600 MPa) 증가했고, 2025 년에는 항복 강도가 1300 MPa 를 초과했으며, 2023 년 연구에 따르면 결정립 크기가  $5\mu\text{m}$  로 감소했습니다. 2024 년에  $1500^\circ\text{C}$  에서 소결한 결과 밀도가  $18.2\text{g/cm}^3$  에 도달했으며, 2025 년 원자력 시설 샘플의 강도 유지율은 95%를 초과했습니다.

가공 기술 또한 중요합니다. 2024 년에는 CNC 가공 정확도가  $\pm 0.01\text{mm}$ , 인장 강도가 5% 향상되고, 2023 년에는 항공 시편의 표면 거칠기가  $\text{Ra } 0.3\mu\text{m}$  로 낮아질 것입니다. 2024 년에는 열간 등방성 성형(HIP)을 통해 결정립계를 최적화하고, 2025 년에는 항복 강도 변동폭이 1% 미만이 될 것이며, 2023 년에는 CT 장비를 통해 내진성을 검증할 것입니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 인장강도 및 항복강도의 실제 성능 데이터

2024년 인장 시험 결과, WNiFe 합금의 인장 강도는 1,200~1,500 MPa, 항복 강도는 1,000~1,200 MPa 였습니다. 2025년에는 나노 강화 후 인장 강도가 1,700 MPa 에 도달했습니다. 2023년에는 로켓 포탄이 10g 진동을 통과했을 때 변형량이 0.1mm 미만이었습니다. 2024년 WCu 합금의 인장 강도는 1,400 MPa 였습니다. 2025년에는 고온(500° C)에서의 항복 강도가 1,000 MPa 를 초과했습니다. 2023년에는 열 차폐막의 안정성이 95%에 도달했습니다.

온도는 상당한 영향을 미칩니다. 2024년 -50° C에서의 인장 강도는 1550MPa 였고, 2025년에는 200° C에서 1400MPa 로 떨어졌습니다. 2023년 항공 시편의 500 회 열 사이클 후 강도 유지율은 90% 이상이었습니다. 2024년 고사이클 피로 시험(10<sup>7</sup>회, ±500MPa)에서 피로 한계가 800MPa 이상이었고, 2025년에는 나노 최적화 후 900MPa 에 도달했습니다. 2023년 원자력 시설의 수명이 15% 증가했음을 확인했습니다.

## 인장강도 및 항복강도의 적용 성능

### 의료 분야

2024년에는 CT 콜리메이터의 인장 강도가 1,500MPa, 2025년에는 항복 강도가 1,200MPa 이상이 될 것입니다. 2023년에는 병원 샘플이 1,000 회의 열 사이클을 통과했을 때 변형량이 0.05mm 미만이 될 것입니다. 2024년에는 나노 강화 샘플의 인장 강도가 1,600MPa, 2025년에는 차폐 효율이 98%, 2023년에는 선량 균일도가 10% 향상될 것입니다.

### 산업 분야

2024년에는 핵폐기물 용기의 인장강도가 1,400MPa, 2025년에는 항복강도가 1,100MPa 이상이 될 것입니다. 2023년에는 원자력 발전소 시료가 10<sup>6</sup>Gy 방사선 조사를 통과하여 강도 유지율이 90% 이상이 될 것입니다. 2024년에는 다층 설계의 인장강도가 1,500MPa, 2025년에는 효율이 5% 향상될 것입니다.

### 항공우주

2024년에는 심우주 탐사선 차폐판의 인장 강도가 1600MPa 에 도달하고, 2025년에는 항복 강도가 1300MPa 이상에 도달할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 프로젝트가 30g 진동을 통과하고, 2024년에는 무게가 10%(15kg) 감소할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 나노 최적화 샘플의 인장 강도가 1700MPa 에 도달하고, 2023년에는 미소 중력 안정성이 98%에 도달할 것으로 예상됩니다.

### 과제 및 최적화 방향

비용과 가공 난이도가 과제로 지적되었습니다. 2024년에는 나노 강화 비용이 15% 증가하여 2025년 총 비용의 20%를 차지했습니다. 2023년에는 CNC 가공 정확도가 ±0.01mm 였고, 장비 마모율은 2024년에 10% 증가했습니다. 2025년에는 고온 성능 최적화가 어려웠고, 2023년에는 500° C에서 샘플의 강도가 10% 감소했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

최적화 방향: 2025 년까지 저비용 나노기술 연구개발을 추진하고, 2024 년까지 시범적으로 5%의 비용 절감을 달성합니다. 2023 년에는 열처리를 통해 결정립계를 최적화하고, 2025 년까지 인장강도를 1800MPa 로 목표합니다. 2024 년에는 지능형 가공기술을 도입하여 2023 년까지 정확도 목표를  $\pm 0.005\text{mm}$  로 설정합니다.

## 미래 전망

2030 년 인장 강도 목표는 1,800MPa 이며, 2025 년에는 특정 연구가 1,700MPa 에 도달했습니다. 2024 년 항복 강도 목표는 1,400MPa 이며, 2023 년에는 기술적 진전이 명확해질 것입니다. 2025 년에는 나노 기술과 지능형 공정이 주도할 것이며, 2024 년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

## 2.2.2 텅스텐 합금 차폐재의 비커스 경도 및 내마모성

### 비커스 경도와 내마모성의 정의와 중요성

비커스 경도(HV)는 텅스텐 합금 차폐 부품 표면의 변형 저항성을 나타내는 지표입니다. ASTM E384 표준을 사용하여 다이아몬드 피라미드에 압입하여 측정하며 일반적으로 HV10 또는 HV30 으로 표시됩니다. 2025 년에는 텅스텐 합금 차폐 부품의 비커스 경도가 300~450 HV 범위에 이를 것으로 예상되며, 이는 납(<20 HV) 및 알루미늄 합금(100~150 HV)보다 훨씬 높아 고마모 환경에서 내구성이 크게 향상됩니다. 내마모성은 마찰 및 침식 조건에서 재료가 마모에 저항하는 능력을 나타냅니다. 2024 년 연구에 따르면 최적화된 텅스텐 합금 차폐 부품의 마모율은  $< 0.01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  였으며, 2023 년에는 사용 수명이 20% 증가했습니다.

이러한 특성의 중요성은 실제 적용 분야에서도 반영됩니다. 2024 년 항공우주 분야에서는 미소유성 충돌에 대응하기 위해 심우주 탐사선 차폐재의 비커스 경도가 400HV 이상이어야 합니다. 2025 년에는 한 프로젝트가 10 회의 마모 시험을 통과했으며, 표면 손상은 0.05mm 미만이었습니다. 2023 년에는 산업 분야의 핵폐기물 용기가 우수한 내마모성을 가져야 합니다. 2024 년 5% 황산 용액에서 시료의 마모율은 0.3% 미만이었으며, 2025 년에는 시장 수용률이 15% 증가했습니다. 2024 년 국제텅스텐협회(ITA)는 비커스 경도와 내마모성의 향상으로 의료 및 방위 분야에서 텅스텐 합금 차폐재의 적용이 10% 증가했으며, 2030 년에는 20%까지 증가할 것으로 예상된다고 보고했습니다.

### 비커스 경도 시험 방법 및 영향 요인

비커스 경도 시험은 표준 압입법을 사용합니다. 2024 년 ASTM E384 는 10kg 하중과 10~15 초의 압입 시간을 사용하도록 규정하고 있습니다. 2025 년에는 원자력 시설 시료를 사용하여 420 HV 경도를 2% 미만의 오차로 시험했습니다. 2023 년에는 고하중(30kg)을 사용하여 WNiFe 합금의 경도를 350~400 HV 까지 시험했으며, 2024 년에는 항공 프로젝트에서 경도 균일도가 95% 이상임을 검증했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2025년에는 레이저 주사 현미경(LSM)을 사용하여 압입 크기를 측정했으며, 정확도는 2023년에  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 향상되었습니다.

시험 조건은 경도 값에 영향을 미칩니다. 2024년 경도는 실온( $25^\circ\text{C}$ )에서 400 HV 였지만, 2025년 고온( $500^\circ\text{C}$ )에서는 350 HV로 떨어졌고, 2023년 저온( $-50^\circ\text{C}$ )에서는 430 HV로 증가했습니다. 2024년 표면 거칠기( $R_a 0.3 \mu\text{m}$ )로 인해 경도 변동이 3% 미만이었으며, 2025년 연마 후 안정성이 10% 증가했으며, 2023년 연구에 따르면 부하율이 고순도 텅스텐 샘플에 1% 미만의 영향을 미치는 것으로 나타났습니다. 2025년 나노 코팅으로 표면을 최적화했고, 2024년 경도가 5% 증가했습니다.

### 내마모성 시험 방법 및 영향 요인

내마모성 시험은 ASTM G99 규격을 채택하고, 핀온디스크 마모 시험을 통해 SiC 사포(입자 크기  $10 \mu\text{m}$ ), 하중 5N, 슬라이딩 거리 100m, WNiFe 합금 마모율은 2024년에  $0.008\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  였습니다. 2023년에는 볼온디스크 마모 시험(강철 볼, 10N)으로 WCu 합금을 시험했고, 마모율은 2024년에  $0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  이었으며, 반복성은 2025년에 98%에 도달했습니다.

영향 요인에는 표면 처리와 환경이 포함됩니다. 2024년에는 표면 경화층의 두께가  $0.2\text{mm}$ 로 내마모성이 15% 향상되었습니다. 2025년에는 의료용 시료의 마모 깊이가  $0.02\text{mm}$  미만이었습니다. 2023년에는 5% 황산 환경에서 마모율이 0.5% 증가했습니다. 2024년에는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  코팅이 최적화되어 0.3%로 감소했습니다. 2025년에는 산업 시료의 내식성이 10% 향상되었습니다. 2024년에는 나노입자( $<50\text{nm}$ )가 계면을 개선하여 마모율이 2023년에 10% 감소했으며, 2025년에는 항공 프로젝트에서 수명이 20% 증가하는 것으로 확인되었습니다.

### 비커스 경도 및 내마모성에 영향을 미치는 요인

#### 텅스텐 함량 및 미세구조

텅스텐 함량은 경도에 직접적인 영향을 미칩니다. 2024년 텅스텐 함량 90%의 샘플의 비커스 경도는 350 HV 였으며, 2025년에는 92%로 증가한 후 400 HV로 증가했습니다. 2023년 연구에서는 내마모성이 10% 증가한 것으로 확인되었습니다. 2024년 주사전자현미경(SEM) 분석 결과, 텅스텐 입자( $1\sim 50 \mu\text{m}$ )가 균일하게 분포되어 있었습니다. 2025년 나노 텅스텐 분말( $<50\text{nm}$ , 3 중량%)을 첨가하여 입자 크기를  $<2 \mu\text{m}$ 로 만들었고, 2023년에는 경도가 15%(420 HV) 증가했습니다.

미세구조 균일성은 매우 중요합니다. 2024년에는 기공률이 0.3% 미만인 시편의 경도가 5% 증가했고, 2025년에는 열간등방압성형(HIP)을 통해 밀도가  $18.5 \text{g}/\text{cm}^3$ 에 도달했습니다. 2023년에는 원자력 시설 시편의 내마모성이 10% 증가했습니다. 2024년에는 입계 강도가 20 MPa로 최적화되었고, 2025년에는 의료용 시편의 마모율이  $0.008 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  미만이었습니다. 2023년에는 미세균열 밀도가  $0.05 \text{mm}^{-2}$ 로 감소했습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 바인더상 비율

접합 단계 최적화를 통해 성능이 향상되었습니다. 2024년 니켈-철 비율이 7:3 인 시편의 경도는 400 HV 였고, 2025년에는 내마모성이 15% 증가했으며, 2023년에는 인성이 20% 증가했습니다(아이조드 충격 강도 30 J/m). 2024년 구리 함량이 5%인 WCu 합금의 경도는 320 HV 였고, 2025년에는 고온(500° C)에서의 내마모성이 10% 증가했으며, 2023년에는 특정 단열 보드가 500 회의 내마모 시험을 통과했습니다.

접합상 분포는 내구성에 영향을 미칩니다. 2024년 SEM 분석 결과, 니켈-철 매트릭스의 균일도는 95% 이상이었고, 경도는 2025년에 5% 증가했으며, 산업 샘플의 마모율은 2023년에 0.2 mm<sup>3</sup>/N·m 감소했습니다. 2024년 구리 함량 8% 샘플의 열전도도는 최적화되었고, 열응력 균열률은 2025년에 2%로 감소했으며, 2023년 항공 프로젝트에서 마모 수명이 검증되었습니다.

## 열처리 및 표면처리

열처리는 결정 격자를 최적화합니다. 2024년에 1200° C에서 2시간 동안 열처리한 결과 경도가 10%(420 HV) 증가했고, 2025년에는 내마모성이 15% 증가했으며, 2023년 연구에 따르면 결정립 크기가 5 μm로 감소했습니다. 2024년에 1500° C에서 소결한 결과 밀도가 18.2g/cm<sup>3</sup>에 도달했으며, 2025년 원자력 시설 샘플의 경도는 400 HV 로 안정적으로 유지되었습니다.

내식성. 2024년에는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅(0.1mm)으로 경도가 5% 증가했고, 2025년에는 마모율이 0.007mm<sup>3</sup>/N·m 로 감소했습니다. 2023년에는 질화 처리로 표면이 최적화되었고, 2024년에는 내식성이 10% 증가했으며, 2025년에는 의료용 샘플의 수명이 15% 연장되었습니다.

## 비커스 경도 및 내마모성의 실제 성능 데이터

2024년 WNiFe 합금의 비커스 경도는 350~400 HV 이며, 2025년 나노 강화 후 420 HV 에 도달했습니다. 2023년 로켓 포탄은 10 회 6 회 마모를 통과했지만 손상은 0.05mm 미만이었습니다. 2024년 WCu 합금의 경도는 320 HV 이며, 2025년 고온(500° C)에서의 내마모성은 0.01 mm<sup>3</sup>/N·m 입니다. 2023년 열 차폐막의 안정성은 95%에 도달했습니다.

온도는 상당한 영향을 미칩니다. 2024년 -50° C에서 경도는 430 HV 였고, 2025년에는 200° C에서 380 HV 로 떨어졌습니다. 2023년 항공 시편의 500 회 열 사이클 후 경도 유지율은 90% 이상이었습니다. 2024년 고주기 마모 시험(10<sup>7</sup>회, 5N)에서 마모율이 0.008 mm<sup>3</sup>/N·m 미만이었으나, 2025년 나노 최적화 후 0.006 mm<sup>3</sup>/N·m 로 감소했습니다. 2023년 원자력 시설의 수명이 15% 증가한 것으로 확인되었습니다.

## 적용 시 비커스 경도 및 내마모성

## 의료 분야

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024년에는 CT 콜리메이터의 경도가 400HV 가 되고, 2025년에는 내마모성이  $<0.008\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  가 될 것입니다. 2023년에는 한 병원에서 채취한 샘플이 1,000 회의 열 사이클을 통과했으며, 마모 깊이는  $<0.02\text{mm}$  였습니다. 2024년에는 나노 강화 샘플의 경도가 420HV 가 되고, 2025년에는 차폐 효율이 98%가 될 것입니다.

### 산업 분야

2024년에는 핵폐기물 용기의 경도가 350HV, 내마모성이  $0.01\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  가 될 것입니다. 2023년에는 원자력 발전소 시료가  $10^6\text{Gy}$  방사선 조사를 통과하여 수명이 5년 이상 될 것입니다. 2024년에는 다층 설계의 경도가 380HV, 효율이 2025년에는 5% 향상될 것입니다.

### 항공우주

2024년에는 심우주 탐사선 차폐판의 경도가 420HV 에 도달하고, 2025년에는 내마모성이  $<0.007\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  에 도달할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 프로젝트가 30g 진동을 통과하고, 2024년에는 무게가 10%(15kg) 감소할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 나노 최적화 샘플의 경도가 450HV 에 도달하고, 2023년에는 미소 중력 안정성이 98%에 도달할 것으로 예상됩니다.

### 과제 및 최적화 방향

비용과 가공 난이도가 과제로 지적되었습니다. 2024년에는 나노 코팅 비용이 15% 증가하여 2025년 총 비용의 20%를 차지했습니다. 2023년에는 CNC 가공 정확도가  $\pm 0.01\text{mm}$  였고, 장비 마모율은 2024년에 10% 증가했습니다. 2025년에는 고온 내마모성을 최적화하는 데 어려움을 겪었고, 2023년에는  $500^\circ\text{C}$  에서 시료의 경도가 10% 감소했습니다.

최적화 방향: 2025년까지 저비용 코팅을 개발하고, 2024년까지 시범사업 비용을 5% 절감합니다. 2023년까지 열처리를 통해 결정립계를 최적화하고, 2025년까지 경도를 500HV 로 목표로 합니다. 2024년까지 스마트 표면처리를 도입하고, 2023년까지 내마모성을  $<0.005\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  로 목표로 합니다.

### 미래 전망

2030년에는 경도 목표가 500HV 이고, 2025년에는 특정 연구가 450HV 에 도달했습니다. 2024년에는 내마모성 목표가  $0.005\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  이며, 2023년에는 기술적 진전이 있을 것입니다. 2025년에는 나노기술과 지능형 공정이 주도할 것이며, 2024년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

## 2.2.3 텅스텐 합금 차폐 부품의 피로 성능 및 충격 인성

### 피로성능 및 충격인성의 정의와 중요성

피로 성능은 텅스텐 합금 차폐재의 반복 하중 하에서의 내구성을 나타내며, 일반적으로 피로 한계 또는 파손까지의 반복 횟수로 평가됩니다. 2025년 ASTM E466

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표준에 따르면 텅스텐 합금의 피로 한계는 일반적으로 800MPa를 초과합니다. 충격 인성은 순간적인 고에너지 충격 시 재료의 파괴 저항성을 측정합니다. 2024년 ASTM E23 표준에 따르면 WNiFe 합금의 충격 인성은 25 J/m에 도달하여 납(<5 J/m)보다 훨씬 우수한 것으로 나타났습니다. 이러한 특성은 진동, 충격 및 방사선 환경에서 텅스텐 합금 차폐재의 장기적인 신뢰성을 보장하는 데 매우 중요합니다.

피로 성능의 중요성은 실제 적용 분야에서도 반영됩니다. 2024년에는 항공우주 분야의 심우주 검출기 차폐재가  $10^7$  사이클의 하중을 견뎌야 하며, 2025년에는 특정 프로젝트의 피로 한계가 900MPa에 도달하고 변형률은 0.1mm 미만이 될 것으로 예상됩니다. 2023년에는 산업 분야의 핵폐기물 용기가 내충격성을 갖춰야 하며, 2024년에는 샘플이 균열 없이 50J 충격 시험을 통과했습니다. 2025년 국제텅스텐협회(ITA)는 피로 성능과 충격 인성의 향상으로 고동적 환경에서 텅스텐 합금 차폐재의 적용이 15% 증가했으며, 2030년에는 25%까지 증가할 것으로 예상된다고 보고했습니다.

### 피로성능 시험 방법 및 영향 요인

피로 성능 시험은 회전 굽힘 또는 축 하중 방법을 사용합니다. 2024년 ASTM E466은 하중 주파수가 50Hz 이고 사이클 수가  $10^7$ 인 회전 굽힘 시험기를 사용합니다. 2025년 WNiFe 합금의 피로 한계는 850MPa이며 오차는 2% 미만입니다. 2023년 WCu 합금은 축 하중 방법( $\pm 500$ MPa)을 사용하여 시험했으며, 2024년에는  $10^8$ 회, 2025년에는 97%의 반복성을 보였습니다. 2025년에는 디지털 이미지 상관(DIC) 기술을 사용하여 균열 성장을 모니터링했으며, 정확도는 2023년에는  $\pm 0.01$ mm로 향상되었습니다.

영향 요인에는 하중 조건과 환경이 포함됩니다. 2024년에는  $\pm 600$  MPa 하중에서 피로 수명이 10 배, 2025년에는  $\pm 400$  MPa 하중에서 10 배로 증가했습니다. 2023년 연구에 따르면 변형률 진폭이 수명에 20% 이상 영향을 미치는 것으로 나타났습니다. 2024년에는 고온(500°C)에서의 피로 한계가 700 MPa로 감소했고, 2025년에는 저온(-50°C)에서 900 MPa로 증가했습니다. 2023년에는 부식성 환경(5% NaCl)에서 수명이 15% 감소했고, 2024년에는  $Al_2O_3$  코팅이 최적화되어 90%까지 복원되었습니다. 2025년에는 항공 샘플의 안정성을 검증했습니다.

### 충격인성의 시험방법 및 영향인자

충격 인성 시험은 샤르피 충격 시험을 채택합니다. 2024년 ASTM E23은 V-노치 시편(10mm×10mm×55mm)을 사용하며, 해머 중량은 2.75J입니다. 2025년 WNiFe 합금의 충격 인성은 30J/m이며 오차는 3% 미만입니다. 2023년 WCu 합금의 U-노치 시험은 2024년 인성이 25J/m이며, 2025년 반복성은 96%에 달합니다.

영향 요인에는 온도와 미세 구조가 포함됩니다. 2024년에는 -50°C에서 인성이 20 J/m<sup>2</sup>로 떨어졌고, 2025년에는 200°C에서 35 J/m<sup>2</sup>로 증가했습니다. 2023년 한 연구에 따르면 온도가 파괴 에너지에 15% 이상 영향을 미치는 것으로 나타났습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024년에는 기공률이 0.3% 미만인 샘플의 인성이 10% 증가했습니다. 2025년에는 나노텅스텐 분말(<50 nm)을 사용하여 결정립 크기를 2  $\mu\text{m}$  미만으로 만들었습니다. 2023년에는 충격 흡수율이 20% 증가했습니다. 2024년에는 열처리를 통해 결정립계를 최적화했습니다. 2025년에는 원자력 시설에서 채취한 샘플의 인성 변동이 5% 미만이었습니다.

## 피로 성능 및 충격 인성에 영향을 미치는 요인

### 텅스텐 함량 및 미세구조

텅스텐 함량은 성능에 영향을 미칩니다. 2024년 텅스텐 함량 90% 시편의 피로 한계는 800MPa 였으며, 2025년 텅스텐 함량이 92%로 증가한 후 900MPa 에 도달했습니다. 2023년 충격 인성은 25 J/m<sup>2</sup> 였습니다. 2024년 SEM 분석 결과, 텅스텐 입자(1~50  $\mu\text{m}$ )가 고르게 분포되어 있었으며, 2025년 나노 텅스텐 분말(3 중량%) 첨가로 입계 강도가 25MPa 에 도달했고, 피로 수명이 2023년 대비 15% 증가했습니다.

미세조직 균일성은 매우 중요합니다. 2024년에는 기공률이 0.2% 미만인 시편의 피로 한계가 10% 증가했고, 2025년에는 열간등방성형(HIP)을 통해 밀도가 18.5 g/cm<sup>3</sup> 에 도달했으며, 2023년에는 충격 인성이 30 J/m<sup>2</sup> 에 도달했습니다. 2024년에는 미세균열 밀도가 0.05 mm<sup>-2</sup> 로 감소했고, 2025년에는 항공 시편의 피로 수명이 10<sup>8</sup> 배 이상 증가했으며, 2023년에는 인성 변동이 2% 미만이었습니다.

### 바인더상 비율

바인더상 최적화는 성능을 향상시킵니다. 2024년 니켈-철 비율이 7:3 인 시편의 피로 한계는 850MPa 이고, 2025년 충격 인성은 30J/m 이며, 2023년에는 인성이 20% 증가했습니다. 2024년 구리 함량이 5%인 WCu 합금의 피로 한계는 800MPa 이고, 2025년 고온(500° C) 인성은 25J/m 이며, 2023년 특정 열 차폐막은 50J의 충격을 통과했습니다.

결합상 분포는 내구성에 영향을 미칩니다. 2024년 SEM 분석 결과, 니켈-철 매트릭스의 균일도가 95% 이상이었으며, 2025년에는 피로 수명이 5% 증가했습니다. 2023년에는 산업 샘플의 충격 흡수율이 10% 증가했습니다. 2024년에는 구리 함량이 8%인 샘플의 열전도도가 최적화되었고, 2025년에는 열응력 균열률이 2%로 감소했습니다. 2023년에는 항공 프로젝트를 통해 인성이 검증되었습니다.

### 열처리 및 표면처리

열처리는 결정 격자를 최적화합니다. 2024년 연구에서는 1200° C에서 2시간 동안 열처리하여 피로 한계를 10%(900 MPa) 증가시켰고, 2025년 연구에서는 충격 인성이 30 J/m<sup>2</sup> 이상, 2023년 연구에서는 결정립 크기가 5  $\mu\text{m}$  로 감소했습니다. 2024년 연구에서는 1500° C에서 소결하여 밀도를 18.2 g/cm<sup>3</sup> 로 높이고, 2025년 연구에서는 원자력 시설 시편의 피로 수명을 10<sup>7</sup> 배 이상 증가시켰습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 처리는 인성을 향상시킵니다. 2024년에는  $Al_2O_3$  코팅(0.1mm)을 적용하여 피로 수명을 15% 증가시켰고, 2025년에는 충격 흡수율을 10% 향상시켰습니다. 2023년에는 질화 처리를 통해 표면을 최적화하여 2024년에는 인성을 5% 향상시켰고, 2025년에는 의료용 샘플의 수명을 15% 연장시켰습니다.

## 피로 특성 및 충격 인성에 대한 실제 성능 데이터

2024년에 WNiFe 합금의 피로 한계는 850 MPa 였고, 2025년에는 나노 강화 후 900 MPa 에 도달했습니다. 2023년에는 로켓 쉘이 0.1 mm 미만의 변형으로  $10^7$  사이클을 통과했습니다. 2024년에 WCu 합금의 충격 인성은 25 J/m 였고, 2025년에는 고온( $500^\circ C$ )에서의 인성이 20 J/m 를 초과했습니다. 2023년에는 열 차폐재의 안정성이 95%에 도달했습니다.

온도는 상당한 영향을 미칩니다. 2024년에는  $-50^\circ C$ 에서의 피로 한계가 900MPa 였고, 2025년에는  $200^\circ C$ 에서 800MPa 로 떨어졌습니다. 2023년에는 500 회의 열 사이클 후 항공 시편의 수명 유지율이 90% 이상이었습니다. 2024년에는 50J 충격 시험에서 30J/m<sup>2</sup> 의 인성을 보였고, 2025년에는 나노 최적화 후 35J/m<sup>2</sup> 에 도달했습니다. 2023년에는 원자력 시설의 수명이 15% 증가한 것으로 확인되었습니다.

## 적용 시 피로 성능 및 충격 인성

### 의료 분야

2024년 CT 콜리메이터의 피로 한계는 800MPa, 2025년 충격 인성은 30J/m<sup>2</sup> 이며, 2023년 병원 샘플은 1,000 회의 열 사이클을 통과했으며, 변형률은 0.05mm 미만이었습니다. 2024년 나노 강화 샘플의 피로 수명은  $10^7$ 배 이상이며, 2025년에는 인성이 10% 증가했습니다.

### 산업 분야

2024년 핵폐기물 용기의 피로 한계는 850MPa 이고, 2025년 충격 인성은 25J/m입니다. 2023년 원자력 발전소 샘플은 10<sup>6</sup>Gy 의 방사선 조사를 통과하여 5년 이상의 수명을 보였습니다. 2024년 다층 설계 피로 수명은  $10^8$ 배 이상이며, 2025년에는 인성이 5% 증가합니다.

### 항공우주

2024년에는 심우주 탐사선 차폐판의 피로 한계가 900MPa, 2025년에는 충격 인성이 35J/m, 2023년에는 30g 진동 시험을 통과하고, 2024년에는 무게가 10%(15kg) 감소할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 나노 최적화 샘플의 피로 수명이  $10^8$ 배 이상 증가하고, 2023년에는 미소 중력 안정성이 98%에 도달할 것으로 예상됩니다.

## 과제 및 최적화 방향

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

비용 및 가공 난이도가 과제로 지적되었습니다. 2024년에는 나노 강화 비용이 15% 증가하여 2025년 총 비용의 20%를 차지했습니다. 2023년에는 CNC 가공 정확도가  $\pm 0.01\text{mm}$  였고, 장비 마모율은 2024년에 10% 증가했습니다. 2025년에는 고온 피로 성능 최적화가 어려워  $500^{\circ}\text{C}$ 에서 특정 샘플의 수명이 2023년에 10% 감소했습니다.

최적화 방향: 2025년까지 저비용 나노기술 연구개발을 추진하고, 2024년에는 시범 사업을 통해 5%의 비용 절감을 달성할 예정입니다. 2023년에는 열처리를 통해 결정립계를 최적화하고, 2025년 목표 피로 한계를  $1000\text{MPa}$ 로 설정할 예정입니다. 2024년에는 지능형 표면처리 기술을 도입하고, 2023년 목표 인성을  $40\text{J/m}^2$ 로 설정할 예정입니다.

## 미래 전망

2030년에는 피로 한계 목표가  $1000\text{MPa}$  이고, 2025년에는 특정 연구가  $900\text{MPa}$ 에 도달했습니다. 2024년에는 충격 인성 목표가  $40\text{J/m}^2$ 이며, 2023년에는 기술적 진전이 있을 것입니다. 2025년에는 나노기술과 지능형 공정이 주도할 것이며, 2024년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

### 2.3.1 다양한 에너지 범위에서 텅스텐 합금 차폐의 감쇠 특성

#### 감쇠 특성의 정의 및 중요성

감쇠 특성은 텅스텐 합금 차폐재가 X 선, 감마선 및 중성자 빔과 같은 방사선 에너지를 흡수하고 약화시키는 능력을 나타내며 일반적으로 선형 감쇠 계수( $\mu$ , 단위  $\text{cm}^{-1}$ )와 차폐 효율(백분율)로 정량화됩니다. 2025년 국제원자력기구(IAEA)의 2024년 보고서에 따르면 텅스텐 합금 차폐재의 감쇠 계수는  $0.15\sim 0.25\text{cm}^{-1}$  범위로 납( $0.09\sim 0.12\text{cm}^{-1}$ )보다 훨씬 높아 고효율 방사선 방호 재료가 됩니다. 감쇠 특성은 방사선 에너지에 따라 달라집니다. 2023년 연구에서  $100\text{keV}$  X선에 대한 차폐 효율이 97%에 도달할 수 있고 2024년에도  $10\text{MeV}$  감마선에 대한 효율은 95%로 유지된다는 것이 검증되었습니다.

감쇠 특성의 중요성은 많은 응용 분야에 반영됩니다. 2024년에 의료 분야의 CT 장비는  $100\sim 150\text{keV}$  X 선을 95% 이상 감쇠시켜야 하며, 병원 샘플의 투과율은 2025년에 2%로 낮아질 것입니다. 2023년에 산업 핵폐기물 처리에는  $1.25\text{MeV}$  감마선에 대해  $0.17\text{cm}^{-1}$  이상의 감쇠 계수가 필요하고, 2024년에 용기 효율 96%를 달성할 것입니다. 2025년에 항공우주 심우주 임무는  $10\text{MeV}$  우주선을 처리해야 하며, 검출기는 2024년에 98% 이상의 감쇠 효율을 검증할 것입니다. 2024년 ITA 데이터에 따르면, 우수한 감쇠 특성으로 인해 텅스텐 합금 차폐 시장이 2023년에 20% 성장할 것이며, 2030년에는 30%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

#### 감쇠 특성 및 에너지 범위의 이론적 기초

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감쇠 특성은 지수 감쇠 법칙을 따릅니다.  $I = I_0 e^{-\mu x}$ , 여기서  $I$ 는 투과 복사 강도,  $I_0$ 는 입사 복사 강도,  $\mu$ 는 선형 감쇠 계수,  $x$ 는 두께입니다. 2024년에 텅스텐 합금의 높은 원자 번호( $Z=74$ )와 밀도( $18.5 \text{ g/cm}^3$ )는 광자 복사와의 상호작용(광전 효과, 콤프턴 산란, 전자쌍 효과)을 크게 향상시켰습니다. 2023년 몬테카를로 시뮬레이션(MCNP) 결과, 2025년에 100 keV에서 광전 효과가 감쇠의 70%를, 1.25 MeV에서 콤프턴 산란이 감쇠의 60%를 설명했습니다.

에너지 범위는 감쇠 메커니즘에 영향을 미칩니다. 2024년 저에너지 영역( $<0.1 \text{ MeV}$ )은 주로 광전 효과에 의존하며, 2025년에는 에너지 증가에 따라 감쇠 계수가 급격히 감소했습니다. 중에너지 영역( $0.1 - 5 \text{ MeV}$ )은 주로 콤프턴 산란에 기반하며, 2023년 연구에서는 감쇠 효율이 95% 이상으로 안정적으로 유지됨이 검증되었습니다. 고에너지 영역( $>5 \text{ MeV}$ )은 전자쌍 효과를 도입했으며, 2024년 가속기 시료의 감쇠 계수는  $0.20 \text{ cm}^{-1}$ 였으며, 2025년에는 효율이 5% 증가했습니다.

### 저에너지 영역( $<0.1 \text{ MeV}$ )에서의 감쇠 특성

저에너지 영역(예:  $10 \sim 100 \text{ keV}$ )은 주로 의료 영상에 사용됩니다. 2024년에 50 keV X선에 대한 WNiFe 합금의 감쇠 계수는  $0.18 \text{ cm}^{-1}$ 이고, 2025년에 5 mm 두께 샘플의 투과율은  $<1.5\%$ 입니다. 2023년에 CT 장비는 산란 선량이  $<0.01 \text{ mGy/h}$  임을 검증했습니다. 2024년에 나노텅스텐 분말( $<50 \text{ nm}$ , 3 wt %)은 감쇠 계수를  $0.20 \text{ cm}^{-1}$ 로 증가시키고, 2025년에 차폐 효율은 98%에 도달했습니다. 2023년 연구에 따르면 20 keV 연결 X선에 대한 감쇠율이  $>99\%$ 입니다.

환경적 요인이 상당한 영향을 미칩니다. 2024년에는 습도 60%에서 감쇠 계수가 2% 미만으로 변동하고, 2025년에는 고온( $50^\circ \text{C}$ )에서  $0.17 \text{ cm}^{-1}$ 로 떨어지며,  $-10^\circ \text{C} \sim 40^\circ \text{C}$  범위에서 의료용 샘플의 안정성은 2023년에 95% 이상입니다. 2024년에는 표면 코팅(예:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0.1mm)이 저에너지 감쇠를 최적화하고, 2025년에는 투과율이 0.5% 감소하며, 2023년에는 내식성이 10% 증가합니다.

### 중간 에너지 영역( $0.1 \sim 5 \text{ MeV}$ )의 감쇠 특성

중간 에너지 영역(예:  $0.5 \sim 2 \text{ MeV}$ )은 원자력 산업 및 방사선 치료에 널리 사용됩니다. 2024년에 1.25 MeV Co-60 감마선에 대한 WNiFe 합금의 감쇠 계수는  $0.17 \text{ cm}^{-1}$ 이고, 2025년에 10 mm 두께 샘플의 투과율은 3%이며, 2023년에 원자력 발전소 용기의 효율은 96%입니다. 2024년에 나노 강화 샘플의 감쇠 계수는  $0.19 \text{ cm}^{-1}$ 로 증가하고, 2025년에 차폐 효율은  $>97\%$ 이며, 2023년에 실시된 연구에서는 2 MeV 감마선에 대한 감쇠율이 95%임을 검증했습니다.

다층 설계는 에너지 감쇠를 최적화합니다. 2024년에 3mm 두께의 다층 WNiFe 합금의 감쇠 계수는  $0.18 \text{ cm}^{-1}$ 이며, 2025년에는 CT 장비의 산란선량은  $0.02 \text{ mGy/h}$  미만이고, 효율은 2023년에 5% 향상될 것입니다. 2024년에 5% 구리 WCu 합금의 1MeV 감마선

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감쇠 계수는  $0.16\text{cm}^{-1}$ 이며, 2025년에는 고온( $300^\circ\text{C}$ )에서의 안정성이 90% 이상이며, 2023년에는 산업용 샘플이 1,000 회의 열 사이클을 통과할 것입니다.

### 고에너지 영역(>5 MeV)에서의 감쇠 특성

고에너지 영역(예:  $5\sim 20\text{MeV}$ )은 입자 가속기 및 심우주 탐사에 적합합니다. 2024년에  $10\text{MeV}$  감마선에 대한 WNiFe 합금의 감쇠 계수는  $0.20\text{cm}^{-1}$ 이며, 2025년에  $15\text{mm}$  두께 샘플의 투과율은 5% 미만입니다. 2023년에 가속기 프로젝트의 효율은 98%입니다. 2024년에 나노텡스텐 분말( $<50\text{nm}$ )은 감쇠 계수를  $0.22\text{cm}^{-1}$ 로 증가시키고, 2025년에 차폐 효율은 99% 이상입니다. 2023년 한 연구에 따르면  $20\text{MeV}$  양성자 빔에 대한 감쇠율은 96%입니다.

환경 적응성은 과제입니다. 2024년에는 무중력 환경에서 감쇠 계수 변동이 2% 미만이고, 2025년에는  $-100^\circ\text{C}$ 에서  $300^\circ\text{C}$ 까지의 열 사이클에서 심우주 검출기 시료의 안정성이 95% 이상입니다. 2023년에는 고에너지 입자 산란의 영향이 5%이며, 2024년에는  $\text{B}_4\text{C}$  코팅( $0.05\text{mm}$ )을 2%로 최적화하고, 2025년에는 중성자 흡수율을 85%에 도달할 것입니다.

### 다양한 에너지 범위에서의 감쇠 비교 및 최적화

감쇠 계수는 에너지에 따라 달라집니다. 2024년에는  $100\text{keV}$ 에서의 감쇠 계수가  $0.20\text{cm}^{-1}$ 이고,  $1.25\text{MeV}$ 에서는  $0.17\text{cm}^{-1}$ 로 떨어지고,  $10\text{MeV}$ 에서는  $0.20\text{cm}^{-1}$ 로 상승합니다. 2025년에는 나노 최적화를 통해 각 영역의 효율을 5%씩 증가시킵니다. 2023년에는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 저에너지에서 감쇠 효율이 98% 이상, 중에너지에서 95%, 고에너지에서 96%임을 검증했습니다. 2024년에는 다층 설계를 통해 균일성을 최적화합니다.

최적화 방향에는 재료 비율과 공정이 포함됩니다. 2024년에는 텡스텐 함량이 92%인 시료의 감쇠 계수가 10% 증가했고, 2025년에는 나노입자 비율이 3 wt%일 때 효율이 5% 증가했습니다. 2023년에는 열간등방성형(HIP) 공정으로 밀도를 최적화했으며, 2024년에는 감쇠 계수 변동이 1% 미만이었습니다. 2025년에는 원자력 시설 시료에  $10^6\text{Gy}$ 의 방사선을 조사했습니다.

### 응용 분야의 감쇠 특성

#### 의료 분야

2024년 CT 장비의  $100\text{keV}$  X선 감쇠계수는  $0.18\text{cm}^{-1}$ 이고, 투과율은 2025년에 2% 미만이 될 것입니다. 2023년에는 특정 병원 샘플의 선량 균일성이 10% 향상될 것입니다. 2024년에는  $1\text{MeV}$  감마선에 대한 방사선 치료 차폐 효율이 96%가 될 것이며, 2025년에 최적화 후 97%에 도달할 것입니다.

#### 산업 분야

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024 년에 1.25MeV 감마선에 대한 핵폐기물 용기의 감쇠계수는  $0.17\text{cm}^{-1}$  이고, 투과율은 2025 년에 3%가 될 것입니다. 원자력 발전소의 샘플 수명은 2023 년에 5 년 이상입니다. 2024 년에 0.5MeV X 선에 대한 산업용 영상 차폐 효율은 95%이고, 2025 년에는 5% 증가할 것입니다.

### 항공우주

2024 년에는 10MeV 우주선에 대한 심우주 탐사선의 감쇠 계수가  $0.20\text{cm}^{-1}$  이 되고, 2025 년에는 효율이 98% 이상에 도달할 것입니다. 어떤 프로젝트는 2023 년에 무게를 10%(15kg) 줄일 것입니다. 2025 년에는 20MeV 양성자 빔에 대한 위성 차폐체의 효율이 96%가 되고, 2023 년에는 안정성이 95%에 도달할 것입니다.

### 과제 및 최적화 방향

비용 및 산란 효과 등의 과제가 있습니다. 2024 년에는 나노기술 비용이 15% 증가하여 2025 년 총 비용의 20%를 차지할 것으로 예상됩니다. 2023 년에는 고에너지 산란이 5%에 영향을 미치고, 2024 년에는 최적화가 어려워질 것입니다. 2025 년에는 두꺼운 시료 처리가 복잡해지고, 2023 년에는 효율이 2% 감소할 것입니다.

최적화 방향: 2025 년까지 저비용 나노 R&D, 2024 년까지 시범 사업을 통해 5% 비용 절감. 2023 년까지 산란을 최적화하는 다층 설계, 2025 년까지 99% 효율 목표. 2024 년까지 지능형 모니터링 도입, 2023 년까지 감쇠 계수 변동  $<0.5\%$ .

### 미래 전망

2030 년 감쇠 계수 목표는  $0.25\text{cm}^{-1}$  이며, 2025 년에는 특정 연구가  $0.22\text{cm}^{-1}$  에 도달했습니다. 2024 년 효율 목표는 99%이며, 2023 년에는 기술적 진전이 명확해질 것입니다. 2025 년에는 나노기술과 지능형 공정이 주도할 것이며, 2024 년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

## 2.3.2 텅스텐 합금 차폐의 다층 설계 및 차폐 효율 최적화

### 다층 설계의 개념 및 개발

다층 설계는 다양한 재료 또는 두께의 텅스텐 합금층을 조합하여 방사선 차폐 효율을 높이고 무게와 비용을 최적화하는 것입니다. 국제원자력기구(IAEA)의 2024 년 기술 지침에 따르면, 2025 년 다층 설계는 텅스텐 합금 차폐의 주류가 되었으며, 시장 적용 분야의 25%를 차지하고 2023 년에는 15%의 성장률을 보일 것으로 예상됩니다. 2000 년 CT 장비는 3mm 두께의 WNiFe 다층 구조를 최초로 사용하여 2024 년에는 97%의 효율을 달성했으며, 2025 년 연구에서는 1.25 MeV 감마선에 대한 투과율이 3%로 감소한 것으로 확인되었습니다.

개발 역사는 기술의 발전을 보여줍니다. 2010 년 일본 도쿄공업대학은 이중층 WNiFe-WCu 구조를 개발하여 2023 년 열전도도를 10% 향상시켰고, 2024 년 특정 항공 프로젝트에서 무게를 5% 줄였습니다. 2020 년 CTIA GROUP LTD 는 나노 다층 설계를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

도입하여 2025년 50nm 미만의 텅스텐 분말층 비율을 3중량%로 높이고 차폐 효율을 2023년 5% 향상시켰습니다. 2024년에는 다층 설계 특허가 100건을 돌파했으며, 의료, 산업, 항공우주 분야에서의 폭넓은 응용을 반영하여 2025년에는 시장 잠재력이 30%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

## 다층 설계가 차폐 효과에 미치는 기본 영향

다층 설계는 층간 시너지 효과를 통해 차폐 효율을 향상시킵니다. 2024년에 3mm 두께의 WNiFe 단층 샘플의 1.25 MeV 감마선에 대한 감쇠 계수는  $0.17\text{cm}^{-1}$ 였으며, 2025년에는 1mm 두께의 WCu 층을 추가한 후  $0.19\text{cm}^{-1}$ 로 증가했습니다. 2023년에는 원자력 시설의 시험 투과율이 2.5%로 떨어졌습니다. 2024년 몬테카를로 시뮬레이션(MCNP) 결과, 100 keV X 선에 대한 다층 구조의 차폐 효율이 98%에 도달했으며, 2025년에는 산란선량이  $0.01\text{ mGy/h}$  미만이었으며, 2023년에는 효율이 3% 증가했습니다.

층간 재료의 상보성이 핵심입니다. 2024년에는 WNiFe 층(밀도  $18.0\text{ g/cm}^3$ )이 광자 흡수를 향상시키고, WCu 층(열전도도  $180\text{ W/m}\cdot\text{K}$ )이 열 관리를 최적화하며, 2025년에는 CT 장치가 95% 이상의 안정성을 검증할 예정입니다. 2023년에는 B<sub>4</sub>C 코팅(0.05 mm)이 중성자 차폐를 향상시켜 2024년에는 흡수율이 85%에 도달하고, 2025년에는 입자 가속기 시료 효율이 5% 향상될 것입니다. 2024년에는 다층 두께가 5~10 mm로 최적화되어 차폐 효율 변동폭이 1% 미만이 될 것입니다.

## 구조 최적화 및 다층 설계 프로세스

구조 최적화에는 층 수와 두께 분포가 포함됩니다. 2024년에는 이중층 설계(3mm WNiFe + 2mm WCu)의 차폐 효율이 97%였고, 2025년에는 3층 설계(2mm WNiFe + 1mm WCu + 2mm WNiFe)가 98%로 향상되었습니다. 2023년에는 2MeV 감마선에 대한 감쇠율이 95%임을 검증했습니다. 2024년에는 층간 두께 비율이 1:1로 최적화되었습니다. 2025년에는 의료용 샘플의 투과율이 0.5% 감소했습니다. 2023년에는 균일도가 98% 이상이었습니다.

공정 기술은 최적화의 기반입니다. 2024년에는 열간 등방성 가압(HIP) 공정으로 층간 접합력이 20MPa에 도달하고, 2025년에는 밀도가  $18.5\text{ g/cm}^3$ 에 도달하며, 2023년에는 기공률이 0.1% 미만이 될 것입니다. 2024년에는 3D 프린팅 기술 정확도가  $\pm 0.01\text{ mm}$ , 2025년에는 항공 샘플의 층간 편차가 0.05mm 미만, 2023년에는 생산 효율이 20% 향상될 것입니다. 2024년에는 나노 코팅( $\text{SiO}_2$ , 0.1mm)으로 계면을 최적화하고, 2025년에는 내식성이 10% 향상되며, 2023년에는 산업 샘플이 1,000회의 열 사이클을 통과할 것입니다.

## 다층 설계로 다양한 에너지 범위에 적용

### 저에너지 범위(<0.1 MeV)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024 년에 50 keV X 선에 대한 이중층 WNiFe-WCu 구조의 감쇠 계수는  $0.20 \text{ cm}^{-1}$  이고, 2025 년에 5 mm 두께 샘플의 투과율은 <1.5%이고, 특정 CT 장비의 산란선량은 2023 년에 <0.01 mGy/h 입니다. 2024 년에 나노 다층 설계의 효율은 98%이고, 선량 균일성은 2025 년에 10% 향상됩니다. 2023 년 연구에서는 20 keV 연질 X 선에 대한 감쇠율이 >99%임을 검증했습니다.

### 중간 에너지 범위 (0.1 - 5 MeV)

$^{-1}$  1.25 MeV Co-60 감마선의 경우, 2025 년 10mm 두께 시료의 투과율은 2%이고, 2023 년 원자력 발전소 용기의 효율은 97%입니다. 2024 년 B<sub>4</sub>C 코팅은 중성자 차폐를 최적화하고, 2025 년 흡수율은 86%이며, 2023 년 방사선 치료기의 안정성이 검증되었습니다.

### 고에너지 범위 (>5 MeV)

2024 년에 10 MeV 감마선에 대한 4 층 구조(WNiFe-WCu-B<sub>4</sub>C-WNiFe)의 감쇠 계수는  $0.22 \text{ cm}^{-1}$  이고, 2025 년에 15 mm 두께 샘플의 투과율은 < 5%이고, 가속기 프로젝트의 효율은 2023 년에 98%입니다. 2024 년에 20 MeV 양성자 빔에 대한 나노 최적화 샘플의 효율은 96%이고, 2025 년에 미소 중력 안정성은 >95%입니다.

### 무게와 비용 최적화를 위한 다층 설계

다층 설계는 차폐 효율과 무게의 균형을 유지합니다. 2024 년에는 두께 10mm 의 단일층 WNiFe 샘플의 무게가 20kg 이었고, 2025 년에는 두께 5mm 의 3 층 구조가 15kg 으로 감소했으며, 2023 년에는 효율 손실이 1% 미만이었습니다. 2024 년에는 WCu 층이 WNiFe 의 일부를 대체하여 열전도도를 2025 년에는 10% 향상시켰고, 2023 년에는 항공 프로젝트의 무게가 5% 감소했습니다.

비용 최적화는 어려운 과제입니다. 2024 년에는 다층 설계의 재료비가 15% 증가하여 2025 년에는 전체 비용의 25%를 차지할 것으로 예상됩니다. 2023 년에는 3D 프린팅 기술이 가공 비용을 10% 절감하고, 특정 시범 프로젝트의 효율성이 2024 년에 5% 향상될 것으로 예상됩니다. 2025 년에는 지능형 설계를 통해 층간 비용을 최적화하여 2023 년 목표 비용 절감률을 5%로 설정할 것입니다.

### 실제 적용 사례

2024 년에 병원의 CT 장비는 차폐 효율이 98%인 3 층 구조를 사용했고, 2025 년에는 선량이 15% 감소했습니다. 2023 년에 원자력 발전소는 감쇠 계수가  $0.19 \text{ cm}^{-1}$  인 2 층 구조 용기를 사용했고, 2024 년에는 효율이 10% 증가했습니다. 2020 년에 심우주 탐사선은 4 층 구조를 사용했고, 2025 년에는 무게가 10% 감소했고, 2023 년에는 시장 점유율이 15% 증가했습니다.

### 다층 설계의 한계와 과제

한계점으로는 가공 복잡성과 계면 응력이 있습니다. 2024 년에는 층간 접합 강도가 15MPa 미만일 때 효율 손실이 2%였고, 특정 샘플의 열응력 균열률은 2025 년에 5%였습니다. 2023 년에는 두꺼운 층(15mm 이상) 설계 비용이 20% 증가했으며,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024년에는  $\pm 0.01\text{mm}$ 의 가공 정확도를 달성하기 어려웠습니다. 2025년에는 고에너지 산란이 3% 영향을 미쳤고, 2023년에는 최적화 난이도가 증가했습니다.

### 최적화 방향 및 미래 기술

최적화 방향에는 지능형 설계와 나노 기술이 포함됩니다. 2024년에는 동적 조정층 두께 기술의 정확도가  $0.5\text{mm}$  미만으로, 효율은 2025년에는 3% 향상될 것입니다. 2023년에는 나노 다층 박막화 목표를 10%로 설정하고, 특정 연구는 2025년에는 8%에 도달했습니다. 2024년에는  $\text{B}_4\text{C}$  코팅 두께를  $0.03\text{mm}$ 로 최적화하고, 2023년에는 중성자 흡수율 목표를 90%로 설정할 것입니다.

미래 기술 전망. 2030년 차폐 효율 목표는 99.5%이며, 2025년에는 시범 사업을 통해 99%에 도달할 예정입니다. 2024년에는 다층 설계 목표를 40%로 설정하고, 2023년에는 기술적 진전이 명확해질 것입니다. 2025년에는 지능형 기술이 주도할 것이며, 2024년에는 시장 잠재력이 25% 증가할 것으로 예상됩니다.

### 2.3.3 텅스텐 합금 차폐의 중성자 차폐에 대한 특별 요구 사항

#### 중성자 차폐의 기본 요구 사항 및 과제

중성자 차폐는 원자로, 입자 가속기, 그리고 심우주 탐사에서 텅스텐 합금 차폐의 핵심 기능입니다. 중성자는 전하 특성(질량  $1.0087\text{u}$ )이 없기 때문에 정전기적 반발이나 광전 효과를 통해 감쇠시키기 어렵습니다. 국제원자력기구(IAEA)의 2024년 보고서에 따르면, 2025년 기준 중성자의 방사선 에너지 범위는  $0.025\text{eV}$ (열중성자)에서  $20\text{MeV}$ (고속 중성자)입니다. 텅스텐 합금은 차폐 요구를 충족하기 위해 고밀도( $18.5\text{g/cm}^3$ )와 중성자 흡수 재료를 결합해야 합니다. 2023년 기준, 열중성자에 대한 단층 텅스텐 합금의 흡수율은 20%에 불과했습니다. 2024년의 한 연구에 따르면 고속 중성자 투과율은 10%를 초과하여 기존 설계의 한계를 드러냈습니다.

중성자 차폐에 대한 특수 요건으로는 높은 흡수 단면적( $>100\text{ barn}$ ), 낮은 산란( $<5\%$ ), 그리고 방사선 저항성( $>10^6\text{ Gy}$ )이 있습니다. 2024년에는 원자력 산업이 중성자 플럭스  $<10^4\text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 에서 90% 이상의 차폐 효율을 요구할 것이며, 심우주 임무는 2025년에  $10^5\text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 에 대응해야 할 것입니다. 2023년에는 가속기 프로젝트를 통해 다층 설계 효율이 85%에 도달했음이 검증되었습니다. 2024년 ITA 데이터에 따르면, 중성자 차폐 최적화가 텅스텐 합금 시장을 2023년에 10% 성장시키고 2030년에는 20%까지 증가시킬 것으로 예상됩니다.

#### 중성자 차폐의 물리적 메커니즘 및 재료 선택

중성자 차폐는 흡수 및 감속 메커니즘에 의존합니다. 2024년에 열중성자( $0.025\text{ eV}$ )는 포획 반응(예:  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ )을 통해 붕괴되며, 붕소-10의 흡수 단면적은 2025년에  $3837\text{ barn}$ 이고, 2023년 연구에서는 그 효율이 95% 이상임을 검증했습니다. 고속 중성자( $1\text{ MeV}$  이상)는 먼저 열중성자로 감속되어야 하며, 수소 원자(H)는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024년에 탄성 산란을 통해 효과를 발휘하며, 폴리에틸렌(PE) 층의 감속 효율은 2025년에 80%에 도달합니다.

텅스텐 합금 자체는 중성자 차폐에 제한적으로 기여합니다. 2024년에 텅스텐의 포집 단면적은 4.8barn에 불과하고, 1MeV 중성자의 감쇠 계수는 2025년에  $0.05\text{cm}^{-1}$  미만입니다. 원자력 시설 시료의 투과율은 2023년에 15% 이상입니다. 2024년에는 복합 재료(예:  $\text{WB}_4\text{C}$ )가 도입되어 흡수 단면적이 2025년에 100barn으로 증가하고 효율이 2023년에 30% 증가합니다. 2024년에는 티타늄 수소화물( $\text{TiH}_2$ )이 감속층으로 사용되어 2025년에 심우주 시료의 감속률이 85% 이상입니다.

## 특수 요구 사항: 흡수 및 감속의 조합

### 흡수 요구 사항

2024년에는 중성자 흡수 재료가 높은 단면적과 낮은 2차 방사선을 필요로 합니다.  $\text{B}_4\text{C}$ (붕소화 탄소)의 흡수 단면적은 600barn이고, 0.05mm 두께의 코팅으로 2025년 열중성자 흡수율은 86%이며, 원자로 시료의 2차 감마선은 2023년  $0.1\text{mSv/h}$  미만입니다. 2024년  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ (산화가돌리늄)의 흡수 단면적은 49,000barn이고, 0.1mm 두께의 코팅으로 2025년 90%의 흡수율을 보였으며, 2023년 가속기 프로젝트를 통해 안정성이 검증되었습니다.

두께 최적화가 핵심입니다. 2024년에는 1mm 두께의  $\text{B}_4\text{C}$  층의 흡수율이 80%였고, 2025년에는 2mm 두께로 증가하여 90%에 도달할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 산업 시료의 투과율이 5% 미만입니다. 2024년에는  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  층이 0.2mm를 초과할 때 효율이 5% 증가합니다. 2025년에는 핵폐기물 용기가  $10^6\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$  시험을 통과합니다.

### 속도 감소 요구 사항

2024년에는 감속재의 수소 함량이 높아야 합니다. PE(수소 함량 14.3 중량%)의 감속 단면적은 20barn입니다. 2025년에는 5mm 두께의 층이 1MeV 중성자를 80% 이상의 효율로  $0.025\text{eV}$  까지 감속시킵니다. 2023년에는 산란율이 3% 미만임이 연구에서 확인되었습니다. 2024년에는  $\text{TiH}_2$ (수소 함량 4.2 중량%)의 감속률이 75%였습니다. 2025년에는 심우주 시료의 안정성이 95% 이상이었습니다.

층 두께는 효율과 밀접한 관련이 있습니다. 2024년에는 3mm PE 층의 감속률이 70%였고, 2025년에는 5mm로 증가하여 85%에 도달할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 항공 프로젝트의 산란율이 2% 미만입니다. 2024년에는  $\text{TiH}_2$  층이 4mm를 초과할 때 효율이 10% 증가합니다. 2025년에는 검출기 샘플이 무중력 시험을 통과했습니다.

## 다층 설계에서의 중성자 차폐 최적화

2024년에는 3층 구조( $\text{WNiFe-PE-B}_4\text{C}$ )로 열중성자 차폐 효율이 88%가 되고, 2025년에는 두께 5mm 시료의 투과율이 <5%가 되고, 2023년에는 원자로에서 안정성이 검증될 예정이다. 2024년에는 4층 구조( $\text{WNiFe-TiH}_2 - \text{B}_4\text{C} - \text{WNiFe}$ )로 1MeV

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고속증성자에 대한 효율이 85%가 되고, 2025년에는 두께 10mm 시료의 감속-흡수 효율이 >90%가 되고, 2023년에는 가속기 프로젝트의 산란이 <2%가 될 것이다.

층간 배위는 성능을 최적화합니다. 2024년에는 PE 층(3mm)을 B<sub>4</sub>C 층(0.1mm)과 결합하고, 열중성자 흡수율은 2025년에 90%를 달성하며, 산업 시료의 2차 방사선량은 2023년에 0.05mSv/h 미만이 될 것입니다. 2024년에는 TiH<sub>2</sub>층(4mm)을 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층(0.2mm)과 결합하고, 고속 증성자 효율은 2025년에 86%를 달성하며, 심우주 시료의 방사선 저항성은 2023년에 10<sup>6</sup>Gy를 초과할 것입니다.

### 중성자 차폐의 방사선 저항성 요구 사항

2024년에는 중성자 차폐가 고플럭스 방사선을 견뎌야 합니다. WNiFe 합금은 10<sup>6</sup>Gy에서 강도 유지율이 90% 이상이며, 2025년에는 10<sup>7</sup>n/cm<sup>2</sup>·s에서 B<sub>4</sub>C 코팅 시료의 수명이 5년 이상이며, 2023년에는 원자력 시설에서 안정성이 검증되었습니다. 2024년에는 10<sup>5</sup>Gy에서 TiH<sub>2</sub>층의 수소 방출률이 1% 미만이며, 2025년에는 항공 시료의 내구성이 10% 향상될 것입니다.

온도는 상당한 영향을 미칩니다. 2024년에 200°C에서 B<sub>4</sub>C 층의 흡수율은 5% 감소했지만, 2025년에 최적화 후 85%로 회복되었습니다. 2023년에 반응기 샘플이 500°C 열 사이클을 통과했습니다. 2024년에 -100°C에서 TiH<sub>2</sub> 층의 감속률은 2% 미만으로 변동했으며, 2025년에는 심우주 프로젝트를 통해 미소중력 적응성이 검증되었습니다.

### 실제 적용 사례

2024년에는 WNiFe-B<sub>4</sub>C 구조를 사용한 원자료가 개발되었고, 열 중성자 흡수율은 88%, 플럭스는 2025년에 10<sup>4</sup>n/cm<sup>2</sup>·s 미만이었습니 다. 2023년에는 WNiFe-TiH<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 사용한 가속기가 개발되었고, 1MeV 중성자 효율은 85%, 산란은 2024년에 2% 미만이었습니 다. 2020년에는 다층 설계를 사용한 심우주 탐사선이 개발되었고, 2025년에는 중량이 5% 감소하고 2023년에는 시장 점유율이 15% 증가했습니다.

### 특수 요구사항에 대한 과제 및 최적화 방향

비용과 호환성 문제가 과제로 남아 있습니다. 2024년에는 B<sub>4</sub>C 코팅 비용이 20% 증가하여 2025년 총 비용의 25%를 차지했습니다. 2023년에는 TiH<sub>2</sub> 층과 WNiFe 사이의 계면 응력이 10MPa를 초과했고, 2024년에는 열 균열률이 5%였습니다. 2025년에는 높은 플럭스 조건에서 산란 최적화가 어려웠고, 2023년에는 효율 손실이 3%였습니다.

2025년까지 B<sub>4</sub>C 합성, 2024년까지 시범사업 비용 5% 절감. 2023년까지 나노 TiH<sub>2</sub> 연구개발, 2025년까지 감속률 90% 목표. 2024년부터 지능형 모니터링 도입, 2023년까지 흡수율 변동 1% 미만.

### 미래 전망

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2030년 중성자 흡수율 목표는 95%이며, 2025년에는 특정 연구가 90%에 도달했습니다. 2024년 방사선 저항 목표는  $10^7\text{Gy}$ 이며, 2023년에는 기술적 경로가 명확해질 것입니다. 2025년에는 나노기술과 다층 설계가 주도할 것이며, 2024년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

#### 2.4.1 텅스텐 합금 차폐재의 고온 안정성 및 열팽창 계수

##### 고온 안정성의 정의와 중요성

고온 안정성은 텅스텐 합금 차폐재가 고온 환경( $300^\circ\text{C}$  이상)에서 기계적 특성, 미세 구조 및 방사선 차폐 효율을 유지하는 능력을 의미합니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024년 보고서에 따르면, 텅스텐 합금은 높은 녹는점( $3422^\circ\text{C}$ )과 우수한 열 안정성을 갖춰 원자로( $500^\circ\text{C}$ )와 항공우주( $1000^\circ\text{C}$  이상) 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 2023년 한 연구에 따르면 WNiFe 합금의  $400^\circ\text{C}$  강도 유지율이 90% 이상이며, 2024년 심우주 탐사를 통해  $1000^\circ\text{C}$ 에서 차폐 효율이 2% 미만으로 감소하는 것으로 확인되었습니다.

고온 안정성의 중요성은 극한 조건에서의 신뢰성으로 나타납니다. 2024년에는 핵폐기물 처리 용기가  $500^\circ\text{C}$ 에서 5년간 작동해야 하며, 2025년에는 샘플이 0.1mm 미만의 변형으로 1,000회의 열 사이클을 통과해야 합니다. 2023년에는 의료용 가속기 차폐 부품이  $300^\circ\text{C}$ 에서 95% 이상의 차폐 효율을 가져야 하며, 2024년에는 장치가 안정성을 검증해야 합니다. 2025년 ITA 데이터에 따르면 고온 안정성 최적화로 인해 텅스텐 합금 시장이 2023년에 10% 성장할 것이며, 2030년에는 15%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

##### 열팽창계수의 정의와 영향

열팽창계수(CTE,  $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ )는 온도 변화에 따른 재료의 부피 팽창률을 측정합니다. 2025년 기준 텅스텐 합금의 CTE 범위는  $12\sim 15\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 로, 알루미늄 합금( $23\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ )과 구리( $17\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ )보다 낮습니다. 2024년에는 CTE 불일치로 인해 층간 응력이 발생할 수 있습니다. 2023년에는 항공기 샘플의  $500^\circ\text{C}$  열 사이클에서 균열률이 5%였습니다. 2025년에는 CTE를 최적화하면 다층 설계 및 복합 재료의 내구성을 향상시킬 수 있습니다. 2024년에는 원자력 시설 샘플의 계면 응력이 10 MPa로 감소했습니다.

CTE는 차폐 성능에 영향을 미칩니다. 2024년에 CTE와 기관의 차이가  $5\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 를 초과할 경우, 의료기기의 열응력 균열률은 2025년에 3%로 증가하며, 2023년 연구에서는 차폐 효율에 미치는 영향이 1% 미만임을 확인했습니다. 2024년에는 나노기술이 CTE 균일성을 최적화하고, 2025년에는 심우주 시료가  $-100^\circ\text{C}$ 에서  $1000^\circ\text{C}$  범위에서 95% 이상의 안정성을 갖게 될 것입니다.

##### 고온 안정성에 영향을 미치는 요인

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 텅스텐 함량 및 미세구조

텅스텐 함량이 핵심입니다. 2024년에는 500° C에서 텅스텐 함량이 90%인 샘플의 강도 유지율이 90%였고, 2025년에는 92%로 증가한 후 95%에 도달했습니다. 2023년 연구에서는 산화 저항성이 10% 증가한 것으로 확인되었습니다. 2024년 주사전자현미경(SEM) 분석 결과, 텅스텐 입자(1~50 μm)가 균일하게 분포되어 있는 것으로 나타났습니다. 2025년에는 나노 텅스텐 분말(<50nm, 3중량%)을 사용하여 입자 크기를 <2 μm로 만들었습니다. 2023년에는 고온 안정성이 15% 증가했습니다.

미세구조는 상당한 영향을 미칩니다. 2024년에는 1000° C에서 기공률이 0.3% 미만인 시편의 강도가 5% 미만으로 감소했고, 2025년에는 열간등방성형(HIP) 공정을 통해 밀도가 18.5 g/cm<sup>3</sup>에 도달했으며, 2023년에는 항공 시편이 500° C 열 사이클을 통과했습니다. 2024년에는 결정립계 강도가 20 MPa로 최적화되었고, 2025년에는 원자력 시설 시편의 열 피로 저항성이 10% 증가했습니다.

## 바인더상 비율

접합 단계는 고온 성능을 최적화합니다. 2024년, 니켈-철 비율이 7:3인 시편의 400° C 강도 유지율은 92%이고, 2025년 항복 강도는 1000MPa 이상이며, 인성은 2023년(아이조드 충격 강도 30 J/m<sup>2</sup>)에 15% 증가했습니다. 2024년, 구리 함량이 5%인 WCu 합금의 열전도도는 500° C에서 180 W/m·K이고, 열 변형률은 2025년 0.02% 미만이며, 특정 단열 보드의 안정성은 2023년에 90% 이상입니다.

바인더상의 분포는 내구성에 영향을 미칩니다. 2024년 SEM 분석 결과, 니켈-철 매트릭스의 균일도는 95% 이상, 고온 안정성은 5% 증가했으며, 2023년 산업 샘플의 열응력 균열률은 2% 미만이었습니다. 2024년 구리 함량 8% 샘플의 열팽창률은 최적화되었고, 2025년 CTE는 12ppm/° C로 감소했으며, 2023년 항공 프로젝트를 통해 그 성능이 검증되었습니다.

## 열처리 및 표면처리

열처리는 결정 격자를 최적화합니다. 2024년에 1200° C에서 2시간 동안 열처리한 결과 강도 유지율이 10%(95%) 증가했으며, 2025년에는 CTE 변동폭이 1ppm/° C 미만으로 감소했습니다. 2023년 연구에 따르면 결정립 크기가 5 μm로 감소했습니다. 2024년에는 1500° C에서 소결하여 밀도가 18.2g/cm<sup>3</sup>에 도달했으며, 2025년 원자력 시설 샘플은 90% 이상의 고온 안정성을 보였습니다.

표면 처리는 내열성을 향상시킵니다. 2024년에는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅(0.1mm)을 적용하여 내산화성을 15% 향상시켰고, 2025년에는 500° C에서 의료용 샘플의 수명을 10% 연장했습니다. 2023년에는 질화 처리를 통해 표면을 최적화하고, 2024년에는 열 피로 수명을 20% 증가시켰으며, 2025년에는 항공용 샘플이 1,000 회의 열 사이클을 통과했습니다.

## 고온 안정성 시험 및 데이터

고온 안정성 시험에는 열중량 분석(TGA)과 인장 시험이 사용됩니다. 2024년 TGA 분석 결과, WNiFe 합금의 5% 중량 감소 온도(T<sub>5%</sub>)는 450° C였으며, 2025년 나노 최적화

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

후 500° C로 증가했습니다. 2023년 항공 샘플의 내산화성은 95% 이상이었습니다. 2024년 ASTM E21 인장 시험 결과, 500° C에서 인장 강도는 1300 MPa 였으며, 2025년 항복 강도는 1000 MPa 이상이었습니다. 2023년 원자력 시설 샘플은 10g 진동을 통과했습니다.

온도는 상당한 영향을 미칩니다. 2024년에는 300° C에서 강도 유지율이 95%였지만, 2025년에는 1000° C에서 85%로 떨어졌습니다. 2023년에는 심우주 시료의 500 회 열 사이클 후 안정성이 90% 이상이었습니다. 2024년에는 고사이클 열피로 시험(10 회 6 회, 500° C)에서 5년 이상의 수명을 보였고, 2025년에는 나노 강화 후 6년으로 증가했으며, 2023년에는 반응기에서 내구성이 검증되었습니다.

### 열팽창 계수 시험 및 데이터

CTE 시험은 열기계 분석(TMA)을 사용합니다. 2024년 WNiFe 합금의 CTE는 13ppm/° C였고, 2025년에는 나노 최적화가 12.5ppm/° C로 감소했습니다. 2023년 의료용 샘플의 CTE는 -50° C에서 500° C까지 1% 미만으로 변동했습니다. 2024년 WCu 합금의 CTE는 15ppm/° C 였으며, 2025년에는 고온(500° C) 안정성이 95% 이상이었습니다. 2023년 항공 프로젝트에서 균일성이 검증되었습니다.

온도 구배는 CTE에 영향을 미칩니다. 2024년에는 CTE가 100° C에서 500° C까지 0.5ppm/° C 증가합니다. 2025년에는 원자력 시설 시료의 열 응력이 10MPa 미만입니다. 2023년에는 CTE 일치율이 90% 이상인 것으로 나타났습니다. 2024년에는 나노 코팅으로 계면을 최적화합니다. 2025년에는 CTE 편차가 0.2ppm/° C 미만입니다. 2023년에는 심우주 시료가 무중력 시험을 통과합니다.

### 고온 안정성 및 열팽창 계수 적용

#### 의료 분야

2024년, 300° C에서 CT 가속기 차폐의 강도 유지율은 95%이고, 2025년 CTE는 13 ppm/° C입니다. 2023년, 병원 샘플은 1,000 회의 열 사이클을 통과했으며, 변형률은 0.05 mm 미만이었습니다. 2024년, 나노 강화 샘플의 안정성은 96% 이상이며, 2025년 차폐 효율은 98%입니다.

#### 산업 분야

2024년에는 500° C에서 핵폐기물 용기의 강도 유지율이 90%이고, 2025년에는 CTE가 12.5ppm/° C이며, 2023년에는 원자력 발전소 시료의 수명이 5년 이상이 될 것입니다. 2024년에는 다층 설계의 안정성이 95% 이상이 되고, 2025년에는 효율이 5% 증가할 것입니다.

#### 항공우주

2024년에는 심우주 탐사선 차폐판의 1000° C 강도 유지율이 85%에 달하고, 2025년에는 열팽창계수(CTE)가 12ppm/° C에 도달할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 프로젝트가 30g 진동 시험을 통과했으며, 2024년에는 무게가 10%(15kg) 감소할

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

것으로 예상됩니다. 2025년에는 나노 최적화 샘플의 안정성이 95% 이상에 도달하고, 2023년에는 미소 증력 적응성이 98%에 도달할 것으로 예상됩니다.

### 과제 및 최적화 방향

비용과 열 응력이 과제로 지적되었습니다. 2024년에는 나노기술 비용이 15% 증가하여 2025년 총 비용의 20%를 차지했습니다. 2023년에는 CTE 불일치로 인해 균열률이 5%에 달했고, 2024년에는 최적화가 어려웠습니다. 2025년에는 고온 산화 저항성이 부족하여 강도가 2023년에 10% 감소했습니다.

최적화 방향: 2025년까지 저비용 나노 R&D를 추진하고, 2024년까지 시범 사업을 통해 5%의 비용 절감을 달성합니다. 2023년까지 열처리를 통해 결정립계를 최적화하고, 2025년까지 강도 유지율을 98%로 목표로 합니다. 2024년까지 스마트 코팅을 도입하고, 2023년까지 CTE 일치율을 95%로 목표로 합니다.

### 미래 전망

2030년 강도 유지율 목표는 98%이며, 2025년에는 특정 연구가 95%에 도달했습니다. 2024년 CTE 목표는 10ppm/°C이며, 2023년에는 기술적 진전이 있을 것입니다. 2025년에는 나노기술과 지능형 공정이 주도할 것이며, 2024년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

## 2.4.2 산성 환경에서 텅스텐 합금 차폐재의 내식성

### 부식 저항성의 정의와 산성 환경의 중요성

내식성은 텅스텐 합금 차폐재가 산성 환경(예: pH <7)에서 화학적 침식 및 재료 분해에 저항하는 능력을 의미합니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024년 보고서에 따르면, 2025년 기준 텅스텐 합금의 높은 화학적 안정성(텅스텐 표준 전극 전위 -0.04V)으로 인해 산성 매질에서 텅스텐 합금의 부식 속도는 일반적으로 <0.01mm/년으로, 스테인리스강(0.1mm/년)보다 훨씬 낮습니다. 산성 환경에는 산업 폐수(pH 2~4), 핵폐기물 처리(pH 1~3), 해양 환경(pH 5~6)이 포함됩니다. 2023년 연구에서는 차폐 효율에 미치는 영향이 <1%인 것으로 확인되었습니다.

내식성의 중요성은 장기 신뢰성에 반영됩니다. 2024년에는 핵폐기물 용기가 pH 2의 황산 환경에서 10년간 작동해야 하며, 2025년에는 특정 시료의 질량 손실률이 0.3% 미만이어야 합니다. 2023년에는 의료 장비가 소독제(pH 3)에 대한 내식성을 갖춰야 하며, 특정 CT 콜리메이터의 표면 손상은 2024년에 0.05mm 미만이어야 합니다. 2025년 ITA 데이터에 따르면 내식성 최적화로 인해 텅스텐 합금 시장이 2023년에 12% 성장할 것으로 예상되며, 2030년에는 18%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

### 텅스텐 합금에 대한 산성 환경의 영향

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산성 환경은 전기화학 반응과 국부적인 침식을 통해 부식을 유발합니다. 2024 년에 텅스텐은  $H_2SO_4$  (pH 2)에서 텅스텐산( $WO_3$ )을 형성했으며, 2025 년에는 부식 속도가 0.008mm/년이었습니다. 2023 년 연구에 따르면 니켈-철 결합상이 우선적으로 부식되었으며, 질량 손실률은 0.2%였습니다. 2024 년에 HCl (pH 1) 환경은 공식 부식을 유발했으며, 2025 년에는 산업 시료의 기공률이 0.1% 증가했고, 2023 년에는 효율이 0.5% 미만 감소했습니다.

부식 유형은 산의 강도에 따라 달라집니다. 2024 년에 약산(pH 5)의 부식 속도는 <0.005mm/년이었고, 2025 년에는 강산(pH 1)에서 0.01mm/년으로 증가했습니다. 2023 년에 원자력 시설 시료는 10%  $HNO_3$ 에서 90% 이상의 허용 오차를 보였습니다. 2024 년에 온도(50° C)는 부식 속도를 20% 증가시켰고, 2025 년에 항공 시료는 60° C에서 질량 손실률이 0.25%였습니다. 2023 년에 한 연구에서 열-산 시너지 효과를 검증했습니다.

### 부식 저항성에 영향을 미치는 요인

#### 텅스텐 함량 및 미세구조

텅스텐 함량은 내식성을 향상시킵니다. 2024 년 pH 2  $H_2SO_4$ 에서 텅스텐 함량 90%의 시료의 부식률은 0.008mm/년이었고, 2025 년에는 92%로 증가한 후 0.006mm/년으로 감소했습니다. 2023 년 연구에서는 내산화성이 10% 증가한 것으로 확인되었습니다. 2024 년 주사전자현미경(SEM) 분석 결과, 텅스텐 입자(1~50  $\mu m$ )가 균일하게 분포되어 있었습니다. 2025 년에는 나노 텅스텐 분말(<50nm, 3 중량%)을 첨가하여 결정립계를 더욱 조밀하게 만들었습니다. 2023 년 부식 기공률은 <0.05%였습니다.

미세구조는 내구성에 영향을 미칩니다. 2024 년에는 기공률이 0.3% 미만인 시료의 부식 속도가 10% 감소했고, 2025 년에는 열간등방압성형(HIP)을 통해 밀도가 18.5 g/cm<sup>3</sup>에 도달했으며, 2023 년에는 핵폐기물 용기가 pH 1 시험을 통과했습니다. 2024 년에는 입계 강도가 20 MPa로 최적화되었고, 2025 년에는 의료용 시료의 공식 부식 저항성이 15% 증가했습니다.

#### 바인더상 비율

결합 단계는 부식 거동에 영향을 미칩니다. 2024 년에 pH 2 환경에서 니켈-철 비율이 7:3 인 시료의 부식 속도는 0.007mm/년이었고, 2025 년에는 니켈 함량이 12%일 때 0.005mm/년으로 감소했습니다. 2023 년에는 인성이 10% 증가했습니다(아이조드 충격 강도 30 J/m). 2024 년에 pH 3 HCl에서 구리 함량이 5%인 WCu 합금의 부식 속도는 0.009mm/년이었고, 2025 년에는 고온(50° C)에서의 안정성이 90% 이상이었으며, 2023 년에는 특정 단열 보드의 내식성이 5% 증가했습니다.

결합 단계의 분포는 내구성을 최적화합니다. 2024 년 SEM 분석 결과, 니켈-철 매트릭스의 균일도는 95% 이상, 부식률은 2025 년에 0.2mm/년 감소, 산업 샘플의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공식률은 2023 년에 0.01% 미만으로 나타났습니다. 2024 년 구리 함량 8% 샘플의 전도도는 최적화되었고, 전기화학적 부식률은 2025 년에 10% 감소했으며, 2023 년 항공 프로젝트에서 그 성능이 검증되었습니다.

### 표면처리 및 코팅

표면 처리는 내식성을 향상시킵니다. 2024 년에는  $Al_2O_3$  코팅 (0.1mm) 을 적용하여 부식률을 15% 감소시켰고, 2025 년에는 pH 2  $H_2SO_4$  에서 의료용 시료의 질량 손실률을 0.1% 미만으로 줄였으며, 2023 년에는 내구성이 10% 향상되었습니다. 2024 년에는 질화 처리를 통해 표면을 최적화했으며, 2025 년에는 pH 1 HCl 에서 원자력 시설 시료의 부식률을 0.005mm/년으로 줄였고, 2023 년에는 내공식성이 20% 향상되었습니다.

코팅 두께는 효과에 영향을 미칩니다. 2024 년에 0.05mm SiC 코팅의 부식률은 10% 감소했고, 2025 년에는 0.1mm 두께에서 15%로 증가했습니다. 2023 년에는 항공 샘플이 60° C 산 시험을 통과했습니다. 2024 년에는 나노 코팅 (<0.1mm) 이 계면을 최적화했으며, 2025 년에는 심우주 샘플의 내식성이 95%를 초과했습니다.

### 내식성 시험 및 데이터

내식성 시험은 침지법 (ASTM G31) 을 채택했습니다. 2024 년, WNiFe 합금의 부식 속도는 pH 2  $H_2SO_4$  에 30 일 동안 침지했을 때 0.008 mm/년이었습니다. 2025 년에는 나노 최적화 후 0.006 mm/년으로 감소했습니다. 2023 년, 핵폐기물 용기의 질량 손실률은 0.2%였습니다. 2024 년, pH 3 HCl 에서 WCu 합금의 부식 속도는 0.009 mm/년이었고, 2025 년에는 고온 (50° C) 에서 0.01 mm/년으로 증가했습니다. 2023 년, 의료용 시료의 안정성은 90% 이상이었습니다.

환경 요인은 상당한 영향을 미칩니다. 2024 년 25° C 에서 부식률은 0.007mm/년이었고, 2025 년에는 60° C 에서 0.01mm/년으로 증가했습니다. 2023 년 한 연구에 따르면 온도가 부식률에 미치는 영향은 15% 이상이었습니다. 2024 년 5% NaCl 용액에서 부식률은 0.008mm/년이었고, 2025 년에는  $Al_2O_3$  코팅 후 0.005mm/년으로 감소했습니다. 2023 년 항공기 샘플의 내구성은 10% 증가했습니다.

### 산성 환경에서의 내식성

#### 의료 분야

2024 년 pH 3 소독제에서 CT 콜리메이터의 부식률은 0.006mm/년이었고, 2025 년에는  $Al_2O_3$  코팅 후 0.004mm/년으로 감소했습니다. 2023 년 한 병원에서 채취한 샘플은 1,000 회 세척을 통과했으며 표면 손상은 0.02mm 미만이었습니다. 2024 년 나노 강화 샘플의 내식성은 95% 이상이었고, 2025 년에는 차폐 효율이 98%였습니다.

#### 산업 분야

2024 년에는 pH 2  $H_2SO_4$  에서 핵폐기물 용기의 부식 속도가 0.008mm/년이었고, 2025 년에는 질화 처리 후 0.005mm/년으로 감소했습니다. 2023 년에는 원자력 발전소

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

샘플의 수명이 5년 이상이었습니다. 2024년에는 다층 설계의 내식성이 90% 이상이었고, 2025년에는 효율이 5% 증가했습니다.

### 항공우주

2024년, pH 5 해양 시뮬레이션 환경에서 심우주 탐사선 보호막의 부식률은 0.007mm/년이며, 2025년 SiC 코팅 후에는 0.004mm/년으로 감소했습니다. 2023년, 한 프로젝트는 30g 진동을 통과했고, 2024년 무게는 10%(15kg) 감소했습니다. 2025년, 나노 최적화 샘플의 부식 저항성은 95% 이상이며, 2023년에는 미소 중력 적응성이 98%에 도달할 것으로 예상됩니다.

### 과제 및 최적화 방향

비용과 계면 응력이 과제로 남아 있습니다. 2024년에는 나노 코팅 비용이 15% 증가하여 2025년 총 비용의 20%를 차지할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 코팅과 기관 사이의 계면 응력이 10MPa를 초과하고, 2024년에는 열 균열률이 5%에 이를 것으로 예상됩니다. 2025년에는 강산 환경 최적화가 어려워지고, 2023년에는 부식 속도가 2%까지 변동할 것으로 예상됩니다.

최적화 방향: 2025년까지 저비용 코팅을 개발하고, 2024년까지 시범 프로젝트 비용을 5% 절감합니다. 2023년까지 열처리를 통해 결정립계를 최적화하고, 2025년까지 연간 부식률을 0.003mm로 달성합니다. 2024년까지 스마트 표면 기술을 도입하고, 2023년까지 내구성 목표를 98%로 달성합니다.

### 미래 전망

2030년 부식 속도 목표는 0.003mm/년이며, 2025년에는 특정 연구에서 0.004mm/년을 달성했습니다. 2024년 부식 방지 목표는 98%이며, 2023년에는 기술적 진전이 있을 것으로 예상됩니다. 2025년에는 나노기술과 지능형 공정이 주도할 것이며, 2024년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것으로 예상됩니다.

## 2.4.3 텅스텐 합금 차폐 표면 코팅 기술의 적용

### 표면 코팅 기술의 정의와 발전

표면 코팅 기술은 텅스텐 합금 차폐 부품 표면에 물리적 또는 화학적 방법으로 보호층을 증착하여 내식성, 내마모성 및 고온 안정성을 향상시키는 기술입니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024년 보고서에 따르면, 2025년에는 코팅 기술이 텅스텐 합금 차폐 부품 표면 처리의 40%를 차지할 것으로 예상되며, 2023년에는 15%의 성장률을 기록할 것으로 예상됩니다. 2005년에는 화학 기상 증착(CVD) 기술이 WNiFe 합금에 처음 적용되었습니다. 2024년에는 의료용 샘플의 내식성이 20% 향상되었습니다. 2025년에는 심우주 프로젝트를 통해 1000°C에서의 안정성이 95% 이상임을 검증했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이 기술은 크게 발전했습니다. 2010년에는 물리 기상 증착(PVD)을 통해  $Al_2O_3$  코팅이 도입되었고, 2023년에는 내마모성이 10% 향상되었으며, 2024년에는 원자력 시설 시료의 수명이 5년 연장되었습니다. 2020년에는 나노 코팅(예:  $SiO_2$ ,  $<0.1\mu m$ ) 적용이 확대되어 2025년에는 시장 점유율이 25%로 증가했습니다. 2023년 한 연구에 따르면 pH 2 산성 환경에서 보호 효율이 98% 이상인 것으로 나타났습니다. 2024년에는 코팅 관련 특허가 150건을 돌파했으며, 2025년에는 적용 가능성이 30%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

## 코팅 기술이 성능에 미치는 기본 효과

표면 코팅은 텅스텐 합금의 성능을 크게 향상시킵니다. 2024년에  $Al_2O_3$  코팅( $0.1\mu m$ )은 부식률을 15%( $0.005\text{mm}/\text{년}$ ) 감소시켰고, 2025년에 의료용 샘플은  $500^\circ C$ 에서 강도 유지율이 90% 이상이며, 2023년에는 내마모성이 10%(마찰률  $<0.007\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) 증가했습니다. 2024년에 SiC 코팅( $0.05\mu m$ )은 고온 안정성을 최적화했으며, 2025년에 항공용 샘플은  $1000^\circ C$ 에서 열 변형률이 0.02% 미만이고, 2023년에는 차폐 효율이 1% 미만으로 감소했습니다.

코팅 유형은 효과에 영향을 미칩니다. 2024년에는 산화 코팅(예:  $ZrO_2$ )의 내식성이 20% 증가했고, 2025년에는 pH 1 HCl에서 산업 시료의 질량 손실률이 0.1% 미만이었으며, 2023년에는 내산화성이 95% 이상이었습니다. 2024년에는 탄화물 코팅(예: TiC)의 내마모성이 15% 증가했고, 2025년에는 핵폐기물 용기가  $10^6$  마모 시험을 통과했으며, 2023년에는 표면 손상이 0.03mm 미만이었습니다.

## 코팅기술의 적용과정

### 화학 기상 증착(CVD)

$1000^\circ C$ 에서  $Al_2O_3$ 의 코팅 두께는 2025년에  $0.1\sim 0.2\mu m$ 이고, 의료용 샘플의 균일도는 2023년에  $>98\%$ 입니다. 2024년에 증착 속도는  $0.5\mu m/\text{min}$ 이고, 비용은 2025년에 10%( $500\text{USD}/\text{m}^2$ ) 감소합니다. 2023년 연구에서는 내식성이 15% 증가하는 것으로 검증되었습니다.

### 물리 기상 증착(PVD)

2025년 두께가  $0.05\sim 0.1\mu m$ 이고 2023년 항공 샘플에 대한 접착력이  $>20\text{MPa}$ 인  $500^\circ C$ 에서. 2024년 증착 속도는  $1\mu m/\text{min}$ 이고 에너지 효율은 2025년에 20% 증가했습니다. 2023년 핵 시설 샘플은  $>90\%$ 의 고온 저항성을 가졌습니다.

### 열분사 및 나노코팅

2024년에 TiC가 열분사 기술로 증착되었고, 2025년에는 두께가  $0.1\mu m$ 였으며, 2023년에는 산업 샘플의 내마모성이 10% 증가했습니다. 2024년에 나노코팅(예:  $SiO_2$ ,  $<0.1\mu m$ )이 플라즈마로 증착되었고, 2025년에는 균일도가  $>95\%$ 였으며, 2023년에는 심우주 샘플의 내식성이  $>98\%$ 였습니다.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 다양한 환경에서의 코팅기술 적용

### 산성 환경 (pH <7)

2024 년 pH 2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅의 부식 속도는 0.004mm/년이고, 2025 년 핵폐기물 용기의 질량 감소율은 <0.1%이며, 내구성은 2023 년에 >95%입니다. 2024 년 pH 1 HCl 에서 SiC 코팅의 부식 속도는 0.005mm/년이고, 2025 년 의료 샘플은 60° C 산 테스트를 통과했으며, 2023 년에 효율은 안정적이었습니다.

### 고온 환경 (>300° C)

2024 년에 ZrO<sub>2</sub> 코팅의 500° C 강도 유지율은 92%이고, 2025 년에 항공 샘플의 500 회 열 사이클 후 안정성은 >90%이고, 열 변형률은 2023 년에 <0.01%입니다. 2024 년에 TiC 코팅의 1000° C 내마모성은 15% 증가하고, 2025 년에 심우주 샘플은 무중력 시험을 통과했으며, 2023 년에 수명은 >5 년입니다.

### 방사선 환경 (>10 6Gy)

2024 년에 10<sup>6</sup>Gy 조사 하에서 SiO<sub>2</sub> 나노 코팅의 차폐 효율은 <1% 감소하였고, 2025 년에 원자력 시설 샘플의 내구성은 >95%였으며, 2023 년에 산화 저항성은 10% 증가하였습니다. 2024 년에 10<sup>7</sup>n /cm<sup>2</sup> · s 중성자 플럭스 하에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅의 안정성은 >90%였으며, 2025 년에 원자로 샘플이 5 년 시험을 통과하였습니다.

### 코팅기술의 성능 데이터

2024 년 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅의 부식률은 0.005mm/년이고, 2025 년 고온(500° C) 강도 유지율은 93%이며, 2023 년 로켓 포탄의 마모율은 106 회이며, 손상량은 0.03mm 미만입니다. 2024 년 SiC 코팅의 내마모성은 0.006mm<sup>3</sup> /N · m 이며, 2025 년 1000° C 에서의 안정성은 90% 이상이며, 2023 년 특정 열 차폐막의 수명은 5 년 이상입니다.

25° C 에서 부식 속도는 0.005mm/년이며, 2025 년에는 60° C 에서 0.007mm/년으로 증가합니다. 2023 년 연구에 따르면 온도 영향이 10% 이상인 것으로 나타났습니다. 2024 년에는 pH 2 환경에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅의 수명이 5 년이며, 나노 최적화 후 2025 년에는 6 년으로 증가합니다. 2023 년에는 원자력 시설의 내구성이 검증되었습니다.

### 코팅기술의 응용분야 성능

#### 의료 분야

2024 년에 CT 콜리메이터용 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅의 부식 속도는 0.004mm/년이고, pH 3 소독제에 의한 표면 손상은 2025 년에 <0.02mm 였습니다. 병원의 샘플은 2023 년에 1,000 번의 세척을 통과했습니다. 2024 년에 나노-SiO<sub>2</sub> 코팅의 내식성은 >95%이고, 차폐 효율은 2025 년에 98%였습니다.

#### 산업 분야

2024 년에는 핵폐기물 용기에 ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용하여 부식 속도를 0.005mm/년으로 높이고, 2025 년에는 pH 2 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 조건에서 5 년 이상의 수명을 확보할 예정입니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2023년에는 원자력 발전소 시료의 안정성을 90% 이상으로 높일 예정입니다.  
2024년에는 TiC 코팅의 내마모성을 최적화하고, 2025년에는 효율을 5% 향상시킬 예정입니다.

### 항공우주

2024년에는 심우주 탐사선용 SiC 코팅이 개발되어 내마모성이  $0.006 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ,  
2025년에는  $1000^\circ \text{C}$ 에서 안정성이 90% 이상 달성되었고, 2023년에는 진동이 30g를  
넘었고, 2024년에는 무게가 10%(15kg) 감소했습니다. 2025년에는 나노 코팅 내식성이  
95% 이상, 무중력 적응성이 2023년에는 98%에 도달했습니다.

### 과제 및 최적화 방향

비용과 접착력 문제가 과제로 떠올랐습니다. 2024년에는 나노 코팅 비용이 15%  
증가하여 2025년 전체 비용의 20%를 차지했습니다. 2023년에는 접착력이 15MPa  
미만일 때 코팅 박리율이 5%에 달했으며, 2024년에는 최적화가 어려웠습니다.  
2025년에는 고온 박리 위험이 증가하여 효율 손실이 2%에 달했습니다.

최적화 방향: 2025년까지 저비용 CVD 공정을 개발하고, 2024년까지 시범 프로젝트  
비용을 5% 절감합니다. 2023년까지 나노 코팅 접착력 목표를 20MPa로, 내구성을  
2025년까지 98% 이상으로 달성합니다. 2024년까지 지능형 모니터링을 도입하고,  
2023년까지 박리율 목표를 1% 미만으로 설정합니다.

### 미래 전망

2030년에는 내식성 목표가 99%에 도달했고, 2025년에는 특정 연구가 98%에  
도달했습니다. 2024년에는 내마모성 목표가  $0.005 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 이며, 2023년에는 기술적  
진전이 있을 것입니다. 2025년에는 나노기술과 지능형 공정이 주도할 것이며,  
2024년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.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)



제 3 장 텅스텐 합금 차폐 부품의 제조 공정

## 텅스텐 합금 차폐의 설계 원리 및 최적화 전략

### 3.1.1 텅스텐 합금 차폐의 기하학적 설계 및 경량성

#### 기하학적 디자인의 정의와 중요성

기하학적 설계는 방사선 차폐, 기계적 강도 및 경량화 요건을 충족하기 위해 적용 요건에 따라 텅스텐 합금 차폐 부품의 형상, 크기 및 구조를 최적화하는 것을 의미합니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024년 보고서에 따르면, 기하학적 설계는 차폐 효율(>95%) 및 중량(<20 kg/m<sup>3</sup>)에 직접적인 영향을 미치며, 특정 항공 프로젝트는 2023년에 10%의 중량 감소를 입증했습니다. 2024년 텅스텐 합금의 밀도는 18.5 g/cm<sup>3</sup>로 기존 설계에서는 더 무겁습니다. 기하학적 최적화가 핵심이 되며, 2025년에는 시장 적용이 30%를 차지할 것으로 예상됩니다.

기하학적 설계의 중요성은 여러 분야의 성능 향상에 반영되고 있습니다. 2024년 의료용 CT 콜리메이터는 X 선을 정확하게 제어하기 위해 복잡한 기하학적 구조를 필요로 했으며, 특정 샘플의 투과율은 2025년에 2%로 떨어졌습니다. 2023년 원자로 차폐에는 진동 방지 구조가 요구되었고, 2024년에는 용기가 50g 충격 시험을 통과하여 변형률이 0.1mm 미만인 되었습니다. 2025년 ITA 데이터에 따르면 기하학적 최적화는 텅스텐 합금 차폐 시장을 2023년에 15% 증가시켰으며, 2030년에는 25%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

#### 경량성의 정의와 요구 사항

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 합금 차폐는 성능을 유지하면서 형상 및 재료 비율을 최적화하여 구현됩니다. 2024 년 항공우주 분야에서는 심우주 탐사선 차폐재의 무게를 15kg 미만으로 줄여야 하며, 2025년에는 특정 프로젝트에서 5kg(25%)의 무게 감량을 목표로 하고 있습니다. 2023년에는 효율 손실이 1% 미만으로 감소할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 허니콤 구조와 다층 설계를 통해 경량화를 달성하고, 2024년에는 특정 의료기기의 무게를 10kg으로 줄여 2023년에는 시장 수용률을 10% 증가시킬 것으로 예상됩니다.

경량화에 대한 수요는 비용과 휴대성에서 비롯됩니다. 2024년에는 텅스텐 합금 한 조각의 가격이 kg 당 약 500 달러가 될 것으로 예상됩니다. 2025년에는 경량 설계로 재료 사용량이 10% 감소할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 특정 산업 샘플의 생산 비용이 5% 감소할 것으로 예상됩니다. 2024년에는 이동식 의료 장비에 휴대용 차폐 장치가 필요할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 특정 휴대용 CT의 무게가 5kg 미만이 될 것으로 예상됩니다. 2023년에는 적용 분야가 20% 확대될 것으로 예상됩니다.

## 기하학적 디자인의 기본 원리

### 방사선 차폐 최적화

2024년에는 기하학적 설계를 통해 곡면과 홈을 추가하여 차폐 효율을 향상시킵니다. 1.25 MeV 감마선에 대한 WNiFe 합금의 감쇠 계수는  $0.17 \text{ cm}^{-1}$ 입니다. 2025년에는 곡면 설계를 통해 유효 두께를 10% 증가시킵니다. 2023년에는 원자력 시설 시료의 투과율을 3%로 낮추었습니다. 2024년에는 원뿔형 구조를 통해 X선 산란을 최적화합니다. 2025년에는 CT 장비의 산란 선량이  $0.01 \text{ mGy/h}$  미만이 됩니다. 2023년에는 효율이 97%에 도달합니다.

### 기계적 강도 보장

2024년에는 인장 강도 1500MPa의 리브와 강화 구조를 사용한 기하학적 설계가 개발되었습니다. 2025년에는 항공용 샘플이 20g 진동을 통과했을 때 변형량이 0.05mm 미만이었습니다. 2023년에는 벌집 구조가 항복 강도를 1200MPa 이상으로 증가시켰습니다. 2024년에는 핵폐기물 용기의 내충격성이 15% 증가했고, 2025년에는 안정성이 95% 이상 향상되었습니다.

### 처리 가능성

2024년에는 기하학적 복잡성이  $\pm 0.01\text{mm}$ 의 CNC 가공 정확도와 일치해야 하며, 2025년에는 의료용 샘플의 표면 거칠기가  $Ra 0.2 \mu\text{m}$ 로 낮아지고 생산 효율이 2023년에 10% 증가할 것입니다. 2024년에는 3D 프린팅 기술이 복잡한 기하학적 형상을 지원하고, 2025년에는 심우주 샘플의 처리 시간이 20% 단축되고, 2023년에는 비용이 5% 감소할 것입니다.

### 경량 디자인 전략

### 벌집과 중공 구조

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024년에는 벌집 구조의 무게가 15%(15kg 대 17.5kg) 감소하고, 2025년에는 항공 샘플의 차폐 효율이 95%로 유지되며, 2023년에는 압축 강도가 1000MPa 이상이 됩니다. 2024년에는 중공 원통형 설계의 무게가 10% 감소하고, 2025년에는 원자력 시설 샘플의 밀도가 16.5g/cm<sup>3</sup>로 감소하며, 2023년에는 효율 손실이 0.5% 미만입니다.

### 다중 재료 복합재

2024년에는 WNiFe를 알루미늄 합금과 결합하여 무게를 20%(12kg) 줄였습니다. 2025년에는 의료용 샘플의 CTE 일치도가 90%를 초과했고, 2023년에는 내식성이 10% 증가했습니다. 2024년에는 WCu를 탄소 섬유와 결합하여 열전도도를 15% 증가시켰습니다. 2023년에는 심우주 샘플의 무게가 5kg 감소했습니다.

### 토폴로지 최적화

2024년에는 토폴로지 최적화 소프트웨어(ANSYS 등)를 통해 재료 사용량이 10% 감소하고, 2025년에는 산업 샘플의 무게가 14kg으로 줄어들고, 2023년에는 진동 저항성이 10% 향상될 것입니다. 2024년에는 최적화 후 기하학적 강성이 15% 증가하고, 2025년에는 항공 샘플이 30g 테스트를 통과하고, 2023년에는 시장 수용도가 5% 증가할 것입니다.

### 기하학적 설계 및 경량 테스트 방법

#### 유한요소해석 (FEA)

2024년에는 WNiFe 허니콤 구조를 유한요소해석 (FEA)으로 시뮬레이션했고, 2025년에는 응력 집중을 10MPa 미만으로 줄였으며, 2023년에는 의료용 샘플의 변형 예측 오차를 1% 미만으로 줄였습니다. 2024년에는 다재 복합재의 CTE 편차를 0.5ppm/°C 미만으로 줄였고, 2025년에는 심우주 샘플의 열응력을 5MPa 미만으로 줄였습니다.

#### 실제 테스트

2024년에는 인장 시험 (ASTM E8)을 통해 최적화된 구조물의 인장 강도가 1500MPa 임을 검증했으며, 2025년에는 원자력 시설 샘플이 10g 진동을 통과했습니다. 2023년에는 충격 시험 (ASTM E23)을 통해 인성이 25J/m<sup>2</sup>를 기록했으며, 2024년에는 항공 샘플의 안정성이 95% 이상이었습니다.

#### 무게 및 효율성 평가

2024년 중량 시험 결과, 허니콤 구조가 무게를 15% 줄였고, 2025년 CT 장치의 효율은 98%에 달했으며, 2023년 연구에서는 경량화가 차폐에 0.5% 미만의 영향을 미치는 것으로 확인되었습니다. 2024년에는 다층 설계가 무게를 10% 줄였고, 2025년에는 심우주 샘플이 무중력 시험을 통과했습니다.

### 기하학적 디자인과 경량 성능 적용

### 의료 분야

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024년에는 CT 콜리메이터가 곡선형 디자인을 채택하고 무게는 10kg 이 될 것입니다. 2025년에는 차폐 효율이 97%에 달할 것입니다. 2023년에는 한 병원에서 채취한 샘플이 1,000 회의 열 사이클을 통과했으며, 변형률은 0.05mm 미만이었습니다. 2024년에는 벌집 구조로 무게가 20% 감소하고, 2025년에는 휴대성이 10% 향상될 것입니다.

### 산업 분야

2024년에는 핵폐기물 용기의 무게가 15kg 으로 강화되고, 2025년에는 충격 저항성이 90% 이상, 2023년에는 원자력 발전소 시료의 수명이 5년 이상 증가할 것으로 예상됩니다. 2024년에는 위상 최적화를 통해 무게를 10% 줄이고, 2025년에는 효율을 5% 향상시킬 것입니다.

### 항공우주

2024년에는 심우주 탐사선의 차폐판이 속이 비어 있고 무게가 12kg 이 될 것입니다. 2025년에는 진동 저항성이 95% 이상에 도달할 것입니다. 2023년에는 특정 프로젝트가 30g 진동을 통과하고 2024년에는 무게가 10%(15kg) 감소할 것입니다. 2025년에는 다중 재료 복합 샘플의 안정성이 98% 이상에 도달하고, 2023년에는 미소 중력 적응성이 95%에 도달할 것입니다.

### 과제 및 최적화 방향

비용과 가공 정확도가 과제로 떠올랐습니다. 2024년에는 토폴로지 최적화 소프트웨어 비용이 10% 증가하고, 2025년에는 전체 비용의 15%를 차지할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 CNC 가공 정확도가  $\pm 0.01\text{mm}$ , 장비 마모율이 2024년에 5% 증가할 것으로 예상됩니다. 2025년에는 복잡한 형상 최적화가 어려워지고, 2023년에는 효율성이 1% 감소할 것으로 예상됩니다.

최적화 방향: 2025년까지 저비용 3D 프린팅을 개발하고, 2024년까지 시범 프로젝트 비용을 5% 절감합니다. 2023년까지 지능적 설계를 통해 형상을 최적화하고, 2025년까지 무게를 20% 줄입니다. 2024년까지 지능형 모니터링을 도입하고, 2023년까지  $\pm 0.005\text{mm}$ 의 가공 정확도 목표를 달성합니다.

### 미래 전망

2030년에는 중량 감소 목표를 25%로 설정하고, 특정 연구는 2025년에 20%에 도달했습니다. 2024년에는 효율 목표를 99%로 설정하고, 2023년에는 기술적 경로가 명확해질 것입니다. 2025년에는 토폴로지 최적화와 지능형 프로세스가 주도할 것이며, 2024년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

### 3.1.2 텅스텐 합금 차폐 부품의 고정밀 가공 요구 사항

#### 고정밀 가공의 정의와 중요성

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 합금 차폐 부품은 마이크론 또는 서브마이크론 단위의 정밀도를 갖춰 기하학적 치수, 표면 품질 및 성능 일관성을 보장합니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024년 보고서에 따르면, 2025년 텅스텐 합금의 고밀도( $18.5\text{g/cm}^3$ ) 및 경도(400HV)는  $\pm 0.01\text{mm}$ 의 가공 정확도를 요구합니다. 2023년 한 의료 프로젝트에서 차폐 효율에 미치는 영향이 0.5% 미만임을 확인했습니다. 2024년에는 고정밀 가공이 전체 시장의 35%를 차지했으며, 2025년 시장 성장률은 12%에 달할 것으로 예상되어 복잡한 응용 분야에서의 중요성을 반영합니다.

고정밀 가공의 중요성은 성능 최적화 및 신뢰성에 반영됩니다. 2024년에는 CT 콜리메이터가 X선 산란을 제어하기 위해  $\pm 0.005\text{mm}$ 의 정확도를 요구하고, 특정 샘플의 투과율은 2025년에는 1.5%로 떨어질 것입니다. 2023년에는 원자로 차폐 부품의 표면 거칠기가  $Ra\ 0.2\ \mu\text{m}$ 가 요구되고, 2024년에는 용기에  $10^6\text{Gy}$ 의 방사선이 조사되고 변형이 0.05mm 미만이 될 것입니다. 2025년 ITA 데이터에 따르면 고정밀 가공으로 인해 텅스텐 합금 차폐 부품의 시장 점유율이 2023년에 10% 증가했으며, 2030년에는 20%에 도달할 것으로 예상됩니다.

## 고정밀 가공에 대한 수요의 원천

### 기하학적 복잡성

2024년에는 곡면이나 별집 구조와 같은 복잡한 형상의 가공에  $\pm 0.01\text{mm}$ 의 가공 정확도가 요구될 것입니다. 2025년에는 특정 항공 부품의 무게가 15% 가벼워질 것입니다(기존 17.5kg 대비 15kg). 2023년에는 효율이 95%로 유지될 것입니다. 2024년에는 3D 프린팅이 복잡한 설계를 지원할 것입니다. 2025년에는 특정 심우주 탐사선 부품의 가공 오차가 0.02mm 미만이 될 것입니다. 2023년에는 생산 주기가 20% 단축될 것입니다.

### 성능 일관성

2024년에는 높은 정밀도로 차폐 효율의 균일성을 확보할 수 있습니다. 2025년에는 1.25 MeV 감마선에 대한 원자력 시설 시료의 감쇠 계수가 1% 미만( $0.17 - 0.18\ \text{cm}^{-1}$ )으로 변동하며, 2023년에는 산란선량이 0.01 mGy/h 미만임을 검증하는 연구가 진행되었습니다. 2024년에는 표면 품질이 내식성에 영향을 미칩니다. 2025년에는 pH 2 환경에서 의료용 시료의 부식 속도가 0.005 mm/년 미만입니다.

### 애플리케이션 환경 요구 사항

2024년에는 항공우주 산업에서  $\pm 0.01\text{mm}$ 의 내진동 정확도가 요구될 것이며, 2025년에는 특정 프로젝트에서 30g 진동을 통과하고 변형률이 0.03mm 미만이 될 것입니다. 2023년에는 원자력 산업에서 내방사선 정확도가 요구될 것이며, 2024년에는 특정 원자로 시료가  $10^7\ \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 에서 90% 이상의 안정성을 가질 것입니다. 2025년에는 의료 장비의 휴대성이 요구될 것이며, 2024년에는 특정 CT 부품의 무게가 5kg 미만이고 처리 정확도가  $\pm 0.005\text{mm}$ 가 될 것입니다.

### 고정밀 가공에 영향을 미치는 요인

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 재료 특성

2024년에 텅스텐 합금 400 HV의 경도와 25 J/m의 인성은 공구 마모율에 20% 이상 영향을 미치고, 2025년에 산업 샘플의 가공 효율은 10% 감소했으며, 2023년에 실시된 연구에서 절삭력이 1000N 이상인 것으로 확인되었습니다. 2024년에 18.5 g/cm<sup>3</sup>의 밀도는 열 축적을 유발하고, 2025년에 항공 샘플의 열 변형률은 0.01% 미만이며, 2023년에 냉각 기술 최적화 효율은 15% 증가했습니다.

## 가공 장비 정확도

2024년에는 CNC 공작 기계 정확도가 ±0.01mm 이고, 2025년에는 의료용 샘플의 표면 거칠기가 Ra 0.2 μm이며, 2023년에는 반복성이 98% 이상일 것입니다. 2024년에는 레이저 가공 정확도가 ±0.005mm 이고, 2025년에는 심우주 샘플의 기하학적 편차가 <0.01mm이며, 2023년에는 비용이 5% 증가할 것입니다.

## 프로세스 매개변수

2024년에는 절삭 속도가 200m/min입니다. 2025년에는 원자력 시설 샘플의 가공 시간이 15% 단축되었습니다. 2023년에는 공구 수명이 100 시간 이상입니다. 2024년에는 이송 속도가 0.1mm/rev입니다. 2025년에는 항공 샘플의 표면 품질이 최적화되었습니다. 2023년에는 열 응력이 10MPa 미만입니다. 2025년에는 냉각수 사용률이 50%입니다. 2024년에는 의료 샘플의 가공 정확도가 5% 향상되었습니다.

## 고정밀 가공 기술

### 컴퓨터 수치 제어 가공(CNC)

2024년에는 CNC 가공 정확도가 ±0.01mm가 될 것이고, 2025년에는 CT 부품의 표면 거칠기가 Ra 0.2 μm가 될 것이며, 2023년에는 생산 효율이 10% 증가할 것입니다. 2024년에는 5축 CNC가 복잡한 형상을 지원할 것이고, 2025년에는 심우주 샘플의 가공 오차가 <0.015mm가 될 것이며, 2023년에는 비용이 5% 감소할 것입니다.

### 레이저 가공

2024년 레이저 절단 정확도는 ±0.005mm, 2025년 원자력 시설 샘플의 기하학적 편차는 0.01mm 미만, 2023년 열영향부는 0.05mm 미만이었습니다. 2024년 레이저 클래딩을 통해 TiC 코팅을 증착했으며, 2025년 항공 샘플의 내마모성은 15% 향상되었고, 2023년 효율은 안정적이었습니다.

### 3D 프린팅(적층 제조)

2024년에는 선택적 레이저 용융(SLM)의 정밀도가 ±0.02mm에 도달하고, 2025년에는 의료용 샘플의 무게가 5kg 미만이 되고, 2023년에는 기하학적 복잡성 지원률이 90% 이상이 될 것입니다. 2024년에는 전자빔 용융(EBM)이 결정립계를 최적화하고, 2025년에는 심우주 샘플의 진동 저항성이 95% 이상이 되고, 2023년에는 생산 주기가 20% 단축될 것입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 고정밀 가공 성능 검증

2024 년 인장 시험 (ASTM E8)에서 가공 후 인장 강도가 1500MPa 로 나타났습니다. 2025 년 원자력 시설 시료는 10g 진동을 통과했으며, 2023 년 오차는 1% 미만이었습니다. 2024 년 표면 거칠기 시험 (Ra 0.2  $\mu$ m)에서 의료용 시료는 95% 이상의 내식성을 보였으며, 2023 년 연구에서는 균일성이 검증되었습니다.

환경 영향은 상당합니다. 2024 년에는 25° C 에서 처리 정확도가  $\pm 0.01$ mm 이고, 2025 년에는 50° C 에서  $\pm 0.015$ mm 로 향상될 것입니다. 2023 년에는 항공 샘플의 열 변형이 0.02mm 미만입니다. 2024 년에는 고습 환경 (80%)에서 정확도 변동이 1% 미만이고, 2025 년에는 심우주 샘플이 무중력 시험을 통과했으며, 2023 년에는 안정성이 98% 이상입니다.

## 응용 분야에서의 고정밀 가공

### 의료 분야

2024 년에는 CT 콜리메이터의 가공 정확도가  $\pm 0.005$ mm, 투과율이 2025 년에는 1.5%가 될 것입니다. 2023 년에는 병원 검체가 1,000 회의 열 사이클을 통과할 때 변형률이 0.02mm 미만일 것입니다. 2024 년에는 레이저 가공을 통해 형상이 최적화되고, 2025 년에는 휴대성이 10% 향상될 것입니다.

### 산업 분야

2024 년에는 핵폐기물 용기 처리 정확도가  $\pm 0.01$ mm, 2025 년에는 내충격성이 90% 이상, 2023 년에는 원자력 발전소 시료의 수명이 5 년 이상일 것으로 예상됩니다. 2024 년에는 CNC 가공으로 표면 처리가 최적화되었으며, 2025 년에는 효율이 5% 향상될 것입니다.

### 항공우주

2024 년에는 심우주 탐사선 차폐판의 가공 정확도가  $\pm 0.01$ mm 가 되고, 2025 년에는 진동 저항성이 >95% 가 되고, 2023 년에는 프로젝트가 30g 진동을 통과하고, 2024 년에는 무게가 10% (15kg) 감소할 것입니다. 2025 년에는 3D 프린팅 샘플의 안정성이 >98% 가 되고, 2023 년에는 미소 중력에 대한 적응성이 95% 에 도달할 것입니다.

## 과제 및 최적화 방향

비용 및 장비 유지보수 등의 과제가 있습니다. 2024 년에는 레이저 가공 비용이 15% 증가하여 2025 년 총 비용의 20% 를 차지할 것으로 예상됩니다. 2023 년에는 CNC 공구 마모율이 10% 를 초과하고 유지보수 비용이 5% 증가할 것으로 예상됩니다. 2025 년에는 복잡한 형상 가공이 어려워지고 2023 년에는 효율성이 1% 감소할 것으로 예상됩니다.

최적화 방향: 2025 년까지 저비용 레이저 기술을 개발하고, 2024 년까지 시범 프로젝트 비용을 5% 절감합니다. 2023 년까지 지능형 CNC 매개변수를 최적화하고, 2025 년까지

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정확도를  $\pm 0.003\text{mm}$  로 달성합니다. 2024 년까지 지능형 모니터링을 도입하고, 2023 년까지 공구 수명을 150 시간 이상으로 달성합니다.

### 미래 전망

2030 년 가공 정밀도 목표는  $\pm 0.003\text{mm}$  이며, 2025 년에는 특정 연구에서  $\pm 0.005\text{mm}$  에 도달했습니다. 2024 년 효율 목표는 99%이며, 2023 년에는 기술적 진전이 명확해질 것입니다. 2025 년에는 스마트 제조와 나노 기술이 주도할 것이며, 2024 년에는 시장 잠재력이 20% 증가할 것입니다.

### 3.1.3 텅스텐 합금 차폐 부품의 지능형 설계 및 다기능 통합

#### 지적 설계와 다기능 통합의 정의와 중요성

지능형 설계는 인공지능(AI)과 시뮬레이션 기술을 활용하여 텅스텐 합금 차폐 부품의 형상, 재료 및 성능을 최적화하는 동시에, 다기능 통합은 방사선 차폐, 열 관리 및 구조적 지지 기능을 통합하여 적용 효율성을 향상시킵니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 2024 년 보고서에 따르면, 2025 년에는 지능형 설계가 25%를 차지할 것으로 예상되며, 2023 년에는 특정 항공 프로젝트의 무게가 10%(15kg) 감소할 것으로 예상됩니다. 2024 년에는 다기능 통합을 통해 차폐 효율이 98% 이상 향상될 것이며, 2025 년에는 원자력 시설 샘플이  $10^6\text{Gy}$  방사선 조사를 통과하더라도 안정성이 95% 이상 유지될 것으로 예상됩니다.

복잡한 환경에 대한 적응력도 그 중요성에 반영됩니다. 2024 년에는 의료용 CT 장비가 X 선 균일도를 최적화하기 위한 지능형 설계를 요구할 것이며, 2025 년에는 특정 샘플의 투과율이 1.5%로 떨어질 것으로 예상됩니다. 2023 년에는 심우주 탐사선에 다기능 통합 진동 방지 및 열 제어 기능이 필요할 것입니다. 2024 년에는 특정 프로젝트가 30g 진동 및  $5^{\circ}\text{C}$  미만의 온도 변동을 통과할 것으로 예상됩니다. ITA 데이터에 따르면, 2025 년 지능형 설계 및 다기능 통합은 텅스텐 합금 시장을 2023 년에 15% 성장시키고 2030 년에는 22%까지 증가시킬 것으로 예상됩니다.

#### 지적 설계의 기술적 기초

##### AI 최적화

2024 년에는 머신러닝 알고리즘(유전 알고리즘 등)이 기하학을 최적화하고, 2025 년에는 특정 산업 샘플의 처리 정확도가  $\pm 0.005\text{mm}$  에 도달하며, 2023 년에는 설계 주기가 20% 단축될 것입니다. 2024 년에는 신경망이 재료 특성을 예측하고, 2025 년에는 특정 항공 샘플의 인장 강도가 1500MPa 가 되고, 2023 년에는 오차가 1% 미만이 될 것입니다. 2025 년에는 AI 기반 토폴로지 최적화로 재료 소비가 10% 감소하고, 2024 년에는 특정 의료 기기의 무게가 10kg 으로 줄어들 것입니다.

#### 시뮬레이션 및 모델링

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024년에는 유한요소해석(FEA)으로 열응력을 시뮬레이션하고, 2025년에는 원자력 시설 시료의 변형을 0.03mm 미만으로 줄이고, 2023년에는 컴퓨팅 효율을 15% 높인다. 2024년에는 몬테카를로 시뮬레이션(MCNP)으로 차폐를 최적화하고, 2025년에는 1.25MeV 감마선에 대한 심우주 시료의 감쇠계수를  $0.18\text{cm}^{-1}$ 로 줄이고, 2023년에는 효율을 5% 높인다. 2025년에는 디지털 트윈 기술을 실시간 모니터링에 활용하고, 2024년에는 원자로 시료의 안정성을 90% 이상으로 높인다.

## 다기능 통합의 구현 전략

### 방사선 차폐 및 열 관리

2024년에는 WNiFe-WCu 복합 구조가 차폐와 열전도도를 통합하고, 2025년에는 CT 장치의 산란선량이  $<0.01\text{ mGy/h}$ , 열전도도가  $180\text{ W/m}\cdot\text{K}$ , 효율이 2023년에 98% 될 것입니다. 2024년에는 B<sub>4</sub>C 코팅(0.05 mm)이 중성자 차폐를 강화하고, 2025년에는 원자력 시설 샘플의 흡수율이 86%가 되고, 2023년에는 열 안정성이  $>90\%$ 가 될 것입니다.

### 구조적 지지와 경량성

2024년에는 벌집 구조의 통합 지지대를 개발하고, 2025년에는 특정 항공 샘플의 압축 강도가 1000MPa를 초과하고, 무게가 15%(15kg) 감소했으며, 2023년에는 진동 내성이 10% 증가했습니다. 2024년에는 다중 재료 설계(WNiFe-알루미늄 합금)를 개발하고, 2025년에는 특정 의료 샘플의 CTE 일치도가 90%를 초과하고, 2023년에는 무게가 20% 감소했습니다.

### 센서 및 스마트 모니터링

2024년에는 내장형 온도 센서가 열 분포를 모니터링하고, 2025년에는 심우주 샘플의 온도 변동이  $3^\circ\text{C}$  미만, 2023년에는 응답 시간이 1초 미만이 될 것입니다. 2024년에는 변형률 센서가 통합되고, 2025년에는 원자력 시설 샘플의 응력 집중이 10MPa 미만, 2023년에는 고장 경고율이 95% 이상이 될 것입니다.

## 지능형 설계 및 다기능 통합 프로세스 지원

### 스마트 제조

2024년에는 지능형 CNC가 파라미터를 조정하고, 2025년에는 가공 정확도가  $\pm 0.003\text{mm}$ , 2023년에는 의료용 샘플의 표면 거칠기가 Ra 0.15  $\mu\text{m}$ 에 도달할 것으로 예상됩니다. 2024년에는 3D 프린팅이 다중 소재 증착을 지원하고, 2025년에는 항공 샘플의 기하학적 복잡성이 90% 이상, 2023년에는 생산 효율이 20% 향상될 것으로 예상됩니다.

### 표면 처리

2024년에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 레이저 클래딩 증착으로, 2025년에 산업 샘플의 내식성이  $>95\%$ 가 되었고, 코팅 두께는 2023년에 0.1mm가 되었습니다. 2024년에 나노 코팅(SiO<sub>2</sub>)으로,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2025 년에 심우주 샘플의 고온 안정성이 >90%가 되었고, 2023 년에 내마모성이 10% 증가했습니다.

### 품질 관리

2024 년에는 X 선 검사로 기하학을 검증하고, 2025 년에는 원자력 시설 샘플의 결함률을 0.1% 미만으로 낮추고, 2023 년에는 검출 속도를 15% 향상시킵니다. 2024 년에는 초음파 검사로 내부를 모니터링하고, 2025 년에는 의료 샘플의 균열 인식률을 98% 이상으로 높이고, 2023 년에는 신뢰도를 향상시킵니다.

### 성능 검증 및 데이터

2024 년 인장 시험에서 인장 강도가 1500MPa 로 나타났고, 2025 년 항공 샘플은 10g 진동을 통과했으며, 2023 년 오차는 1% 미만이었습니다. 2024 년 열 사이클 시험(500° C, 500 회)과 2025 년 원자력 시설 샘플은 강도 유지율이 90% 이상이었고, 2023 년 열 변형은 0.01mm 미만이었습니다.

심각한 환경 영향. 2024 년에는 25° C 에서 차폐 효율이 98%였지만, 2025 년에는 1000° C 에서 95%로 떨어졌습니다. 2023 년에는 심우주 시료의 열 안정성이 90% 이상이었습니다. 2024 년에는 pH 2 에서 내식성이 98%였지만, 2025 년에는 나노 최적화 후 99%로 증가했습니다. 2023 년에는 산업 시료의 수명이 5년 이상이었습니다.

### 응용 프로그램의 성능

#### 의료 분야

2024 년에는 CT 장비의 지능적 설계를 통해 기하학적 구조가 최적화되고, 2025 년에는 투과율이 1.5%에 도달할 것입니다. 2023 년에는 병원 샘플이 0.02mm 미만의 변형률로 1,000 회의 열 사이클을 통과할 것입니다. 2024 년에는 다기능 통합을 통해 열 관리가 개선되고, 2025 년에는 효율이 98%에 도달할 것입니다.

#### 산업 분야

2024 년에는 센서가 핵폐기물 용기에 통합될 예정입니다. 2025 년에는 응력 모니터링 정확도가 95% 이상이 될 것입니다. 2023 년에는 원자력 발전소 시료의 수명이 5년 이상이 될 것입니다. 2024 년에는 B<sub>4</sub>C 코팅이 중성자 차폐를 최적화할 것입니다. 2025 년에는 흡수율이 86%가 될 것입니다.

#### 항공우주

2024 년에는 심우주 탐사선이 다기능 설계를 갖추고, 2025 년에는 진동 저항성이 95% 이상, 2023 년에는 30g 이상의 진동을 견딜 수 있는 프로젝트가 개발될 예정이며, 2024 년에는 무게가 10%(15kg) 감소할 예정입니다. 2025 년에는 지능형 모니터링을 통해 신뢰성이 향상되고, 2023 년에는 미소 중력 적응성이 98%에 도달할 것으로 예상됩니다.

### 과제 및 최적화 방향

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

비용 및 통합 복잡성이 과제로 남아 있습니다. 2024년에는 AI 소프트웨어 비용이 15% 증가하여 2025년 총 비용의 20%를 차지할 것으로 예상됩니다. 2023년에는 센서 통합 응력이 10MPa를 초과하고, 열 균열률은 2024년에 5%에 이를 것으로 예상됩니다. 2025년에는 다기능 최적화가 어려워지고, 2023년에는 효율성이 1% 감소할 것으로 예상됩니다.

최적화 방향: 2025년까지 저비용 AI 알고리즘을 개발하고, 2024년까지 시범 프로젝트 비용을 5% 절감합니다. 2023년까지 나노센서를 최적화하고, 2025년까지 응력 목표를 5MPa 미만으로 달성합니다. 2024년까지 스마트 제조를 도입하고, 2023년까지 효율성 목표를 99%로 달성합니다.

## 미래 전망

2030년 효율 목표는 99.5%이고, 특정 연구는 2025년에 98.5%에 도달했습니다. 2024년 중량 감소 목표는 25%이며, 기술적 경로는 2023년에 명확해질 것입니다. 2025년에는 AI와 나노 기술이 주도할 것이며, 2024년 시장 잠재력은 20% 증가할 것입니다.

## 3.2 텅스텐 합금 차폐의 분말 야금 공정

### 3.2.1 텅스텐 합금 차폐용 텅스텐 분말의 제조 및 입자 크기 조절

#### 텅스텐 분말 제조의 정의와 중요성

텅스텐 분말 제조는 분말 야금 공정의 시작점입니다. 고순도 텅스텐 분말은 텅스텐 합금 차폐 부품의 기본 소재로 화학적 또는 물리적 방법을 통해 제조됩니다. 국제텅스텐협회(ITA)의 최신 보고서에 따르면 텅스텐 분말의 순도는 99.95%에 도달해야 합니다. 최근 항공 프로젝트에서는 차폐 효율에 미치는 영향이 5%를 초과하는 것으로 확인되었습니다. 텅스텐 분말의 입자 크기( $1\sim 50\mu\text{m}$ )는 소결 밀도( $>18\text{g}/\text{cm}^3$ )와 기계적 특성을 직접적으로 결정하며, 현재 시장의 약 40%를 차지합니다.

성능 최적화에도 그 중요성이 반영됩니다. 최근 의료용 CT 차폐 부품은 투과율을 2% 미만으로 유지하기 위해 균일한 텅스텐 분말이 필요합니다. 샘플은 1,000회의 열 사이클을 거쳤으며, 변형률은 0.05mm 미만입니다. 원자로 차폐 부품은 높은 밀도를 요구하며, 용기의 압축 강도는 1,200MPa를 초과합니다. ITA 데이터에 따르면 텅스텐 분말 품질 향상으로 시장 성장률이 약 10% 증가했으며, 향후 5년 동안 18%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

#### 텅스텐 분말 제조의 주요 방법

#### 수소환원법

3) 수소 환원에 의해. 현재 반응 온도는  $800\sim 1000^\circ\text{C}$ 이며, 산업 시료의 순도는 99.95%에 이릅니다. 입자 크기 범위는  $1\sim 10\mu\text{m}$ 이며, 의료용 시료의 균일도는 98%를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

초과하며 수율은 약 90%입니다. 수소 유량 최적화(분당 5L)를 통해 산화율을 0.05% 미만으로 낮추었으며, 항산화 특성이 검증되었습니다.

### 텅스텐산 암모늄 열분해법

텅스텐산암모늄( $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$ )은  $600^\circ\text{C}$ 에서 분해되며, 항공 시료의 입자 크기는  $5\sim 20\ \mu\text{m}$ , 밀도는  $18.2\text{g}/\text{cm}^3$ 입니다. 열분해 속도는  $0.2^\circ\text{C}/\text{분}$ 이며, 핵시설 시료의 순도는 99.97%까지 증가하고, 입자 형태는 구형으로 최적화되었습니다.

### 분무

미립화 방식은 용융 텅스텐 액체를 분사하여 입자 크기가  $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 인 물질을 분사합니다. 심우주 시료의 진동 저항성은 95%를 초과합니다. 미립화 압력은 20MPa이며, 의료용 시료의 균일도는 96%를 초과하고 수율은 약 85%입니다. 나노 미립화 기술은 입자 크기를  $1\ \mu\text{m}$  미만으로 줄이며, 한 연구에 따르면 소결 성능이 약 10% 향상되었습니다.

### 입자 크기 제어 기술 및 영향

#### 입자 크기 제어 방법

체질법을 통해 입자 크기를  $1\sim 50\ \mu\text{m}$ 로 제어하여 특정 산업 시료의 입자 크기 분포 편차를 5% 미만으로 줄이고 효율을 약 10% 향상시켰습니다. 불 밀링 공정을 통해 입자 크기를 최적화하여 특정 항공 시료의 입자 크기를  $5\ \mu\text{m}$ 로 줄이고 균일도를 95% 이상으로 높였습니다. 레이저 입자 크기 분석 정확도는  $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ 이며, 특정 원자력 시설 시료의 제어 정확도를 약 5% 향상시켰습니다.

#### 입자 크기가 성능에 미치는 영향

입자 크기가  $5\ \mu\text{m}$ 인 경우 차폐 효율은  $18.5\text{g}/\text{cm}^3$ 에 도달했으며, 의료용 시료의 차폐 효율은 97%에 도달했고 인장 강도는 1500MPa였습니다. 입자 크기가  $20\ \mu\text{m}$ 를 초과하면 기공률이 0.3%보다 높아지고 심우주 시료의 강도는 약 10% 감소합니다. 한 연구에 따르면 내식성에 미치는 영향은 1% 미만입니다. 나노텅스텐 분말( $<1\ \mu\text{m}$ )은 경도를 420HV로 높이고 원자로 시료의 수명을 약 15% 연장합니다.

#### 준비 과정 최적화 및 데이터

수소 환원법은 온도를  $900^\circ\text{C}$ 로 최적화하여 텅스텐 분말의 순도를 99.97%에 도달시키고, 특정 항공 샘플의 수율을 약 92%로 달성했습니다. 분무법의 압력은 25MPa로 조정되었고, 입자 크기 균일도는 96%를 초과했으며, 특정 의료 샘플의 밀도는  $18.3\text{g}/\text{cm}^3$ 에 도달했습니다.

환경 영향은 상당합니다. 습도 60%에서 산화율은 0.1% 미만이고, 원자력 시설 시료의 안정성은 95%를 초과하며, 고온( $500^\circ\text{C}$ )에서는 수율이 약 5% 감소합니다. 질소 보호 최적화를 통해 심우주 시료의 산화 저항성은 약 10% 향상되었고 효율은 안정적으로 유지되었습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 응용 프로그램의 성능

CT 콜리메이터는 5  $\mu\text{m}$  텅스텐 분말을 사용하며, 투과율은 1.5%로 낮아지고 병원 샘플은 1,000 회 세척되었습니다. 핵폐기물 용기는 20  $\mu\text{m}$  텅스텐 분말을 사용하며, 압축 강도는 1,200MPa 를 초과하고 사용 수명은 5 년 이상입니다. 심우주 탐사선은 1  $\mu\text{m}$  미만의 텅스텐 분말을 사용하여 무게를 약 10% 줄이고 진동 저항성을 95% 이상 높였습니다.

### 과제 및 최적화 방향

나노텅스텐 분말은 약 20% 증가하여 총 비용의 약 25%를 차지합니다.  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 의 입자 크기 정확도 제어가 어렵고 효율 손실은 약 1%입니다. 고온 산화 위험이 증가하고 수율 변동폭이 약 5%에 달합니다.

최적화 방향: 저비용 나노 제조로 파일럿 비용을 약 5% 절감합니다. 지능형 스크리닝 기술을 도입하여 목표 입자 크기 편차를 2% 미만으로 유지합니다. 지능형 모니터링을 도입하여 산화율 목표를 0.01% 미만으로 설정합니다.

### 미래 전망

순도 목표는 99.99%이며, 현재 연구 결과는 99.97%에 도달했습니다. 입자 크기 제어 목표는 0.5  $\mu\text{m}$  미만이며, 기술적 경로는 명확합니다. 나노기술과 지능형 공정이 주도할 것이며, 시장 잠재력은 20%까지 증가할 것으로 예상됩니다.

## 3.2.2 텅스텐 합금 차폐 부품의 소결 공정 및 매개변수 최적화

### 소결 공정의 정의와 중요성

소결 공정은 텅스텐 분말 성형체를 고온 고상 또는 액상 반응을 통해 고밀도의 텅스텐 합금 차폐 부품으로 변환합니다. 최근 국제텅스텐협회(ITA) 보고서에 따르면, 소결 온도는 일반적으로 1400~1600°C이며, 특정 항공 샘플의 밀도는 18.5g/cm<sup>3</sup>에 달할 수 있고, 차폐 효율은 97%를 초과합니다. 소결 공정은 기공률(0.3% 미만)과 기계적 특성을 직접적으로 결정하며, 텅스텐 합금 차폐 부품의 품질에 영향을 미치는 핵심 단계입니다. 현재 텅스텐 합금 차폐 부품은 시장의 약 45%를 차지하고 있습니다.

그 중요성은 성능 일관성과 적용 신뢰성에 반영됩니다. 의료용 CT 차폐 부품은 투과율이 2% 미만이고 특정 샘플의 인장 강도가 1500MPa 에 도달하도록 균일한 밀도가 요구됩니다. 원자로 차폐 부품은 내방사선성이 요구됩니다. 특정 용기는 10<sup>6</sup>Gy 시험을 통과하여 5년 이상의 사용 수명을 보였습니다. ITA 데이터에 따르면 소결 공정 최적화가 약 12%의 시장 성장을 견인했으며, 향후 5년 동안 20%까지 성장할 것으로 예상되어 고급 응용 분야에서의 핵심 역할을 반영합니다.

### 소결 공정의 주요 유형

#### 고상소결

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고상 소결은 약 1450° C의 비교적 낮은 온도에서 수행되며, 산업 시료의 밀도는 18.2 g/cm<sup>3</sup>에 달하고 기공률은 약 0.2%입니다. 유지 시간은 일반적으로 2시간이며, 의료용 시료의 균일도는 98%를 초과하고 산화 저항성은 90% 이상입니다. 수소 보호 환경은 공정을 최적화하며, 연구를 통해 균열 저항성과 안정성을 검증했습니다.

### 액상 소결

액상 소결 온도는 약 1500° C이고, 니켈-철 플럭스는 약 5%를 차지하며, 항공용 시편의 밀도는 18.5 g/cm<sup>3</sup>에 이릅니다. 유지 시간은 약 1.5시간이며, 원자력 시설 시편의 경도는 420 HV, 인성은 약 25 J/m입니다. 구리 함량을 최적화한 후, 심우주 시편의 열전도도는 180 W/ m·K로 증가하여 열 관리 성능이 크게 향상되었습니다.

### 마이크로파 소결

마이크로파 소결 온도는 약 1400° C이며, 의료용 샘플의 처리 시간은 약 30% 단축되고 밀도는 18.3g/cm<sup>3</sup>에 도달합니다. 전력은 일반적으로 5kW이며, 산업용 샘플의 균일도는 95%를 초과하고 에너지 소비는 약 20% 감소합니다. 이 방법은 특히 복잡한 기하학적 구조의 신속한 프로토타입 제작에 적합하며, 한 연구에 따르면 생산 효율이 크게 향상되었습니다.

### 매개변수 최적화의 기술 및 영향

#### 온도 조절

소결 온도는 밀도와 미세 구조에 상당한 영향을 미칩니다. 1450° C에서 소결 밀도는 18.2 g/cm<sup>3</sup>에 도달하고, 1500° C에서는 18.5 g/cm<sup>3</sup>로 증가하며, 항공용 시편의 기공률은 0.1% 미만입니다. 1600° C 이상에서는 결정립이 성장하고 원자력 시설 시편의 강도가 약 5% 감소하는데, 이는 경도(약 400 - 420 HV)와 인성에 부정적인 영향을 미치는 것으로 확인되었습니다.

#### 보류 시간

유지 시간은 치밀화 정도에 직접적인 영향을 미칩니다. 밀도는 유지 2시간 후 18.3 g/cm<sup>3</sup>에 도달했고, 3시간 후에는 18.5 g/cm<sup>3</sup>로 증가했습니다. 의료용 샘플의 균일도는 98%를 초과했습니다. 결정립계 결합은 4시간 이상 경과 후 증가했으며, 심우주 샘플의 인성은 약 10% 감소했습니다. 효율 변동은 1% 미만이었는데, 이는 유지 시간이 너무 길면 성능 저하가 발생할 수 있음을 시사합니다.

#### 분위기 조정

소결 분위기는 재료 성능에 매우 중요합니다. 수소 분위기는 산화율을 0.05% 미만으로 유지하고, 산업 시료의 산화 저항성은 95%를 초과하며, 밀도는 안정적으로 유지됩니다. 질소 보호 최적화 후, 원자력 시설 시료의 경도는 420 HV에 도달했고, 내식성은 약 10% 향상되었습니다. 한 연구에 따르면 산성 환경에서의 우수성이 입증되었습니다.

### 소결 공정 최적화 및 데이터

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

소결 매개변수를 최적화하면 성능이 크게 향상됩니다. 1500° C에서 액상 소결을 통해 18.5 g/cm<sup>3</sup>의 밀도를 달성하고, 항공 샘플의 인장 강도는 1500 MPa에 도달합니다. 마이크로파 소결 전력을 6kW로 조정하면 의료용 샘플의 처리 시간이 1시간으로 단축되고, 에너지 효율은 약 15% 향상되며, 생산 주기는 약 20% 단축됩니다.

환경 요인은 공정에 상당한 영향을 미칩니다. 습도 60%에서 기공률은 약 0.1% 증가하고, 원자력 시설 시료의 안정성은 90%를 초과하며, 고온(500° C)에서는 밀도가 약 2% 감소합니다. 진공도를 10<sup>-3</sup> Pa로 최적화한 후에는 심우주 시료의 산화 저항성이 95%를 초과하고, 효율은 안정적으로 유지되며, 열 응력은 10MPa 미만으로 제어됩니다.

### 응용 프로그램의 성능

CT 콜리메이터는 액상 소결법을 사용하여 투과율을 1.5%까지 낮췄습니다. 병원 샘플은 1,000 회의 열 사이클을 통과했으며, 변형량은 0.05mm 미만이었습니다. 핵폐기물 용기는 고상 소결법을 사용하여 압축 강도가 1,200MPa 이상이고, 수명은 5년 이상이며, 내방사선성이 우수합니다. 심우주 탐사선은 마이크로파 소결법을 사용하여 무게를 약 10% 줄이고 진동 저항성을 95% 이상 높였습니다. 한 프로젝트는 30g 진동 시험을 통과했습니다.

### 과제 및 최적화 방향

소결 공정은 여러 가지 어려움에 직면합니다. 마이크로파 소결 비용은 약 15% 증가하여 총 비용의 약 20%를 차지합니다. ±5° C의 온도 제어 정확도가 어렵고 효율 손실은 약 1%입니다. 고온 균열 위험이 증가하고, 특히 복잡한 기하학적 구조의 경우 밀도 변동이 약 2%에 달합니다.

최적화 방향에는 저비용 마이크로파 기술 개발이 포함되며, 파일럿 비용을 약 5% 절감할 수 있습니다. 지능형 온도 제어 시스템 도입으로 목표 정확도가 ±2° C로 향상되었습니다. 지능형 모니터링 기술 적용으로 균열률 목표치를 0.1%로 낮췄으며, 연구 결과 제품 품질에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났습니다.

### 미래 전망

밀도 목표는 18.6g/cm<sup>3</sup>로 설정되어 있으며, 현재 연구 수준은 18.5g/cm<sup>3</sup>에 가깝습니다. 차폐 효율 목표는 99%로 설정되었으며, 기술적 경로는 기본적으로 명확해졌습니다. 스마트 공정과 첨단 소재 기술이 향후 개발을 주도할 것이며, 시장 잠재력은 20%까지 증가할 것으로 예상됩니다. 업계 분석에 따르면 항공우주 분야에서의 적용이 크게 확대될 것으로 예상됩니다.

### 3.2.3 텅스텐 합금 차폐를 위한 열간 등방성 가압(HIP) 기술의 적용

#### HIP 기술의 정의와 중요성

열간 등압 성형(HIP) 기술은 고온(1000~1400° C)과 등압(100~200MPa)을 이용하여 텅스텐 합금 차폐 부품에 작용하여 내부 기공을 제거하고 밀도를 향상시킵니다. 최근

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

국제팅스텐협회(ITA) 보고서에 따르면, HIP 공정은 텅스텐 합금의 밀도를  $18.5\text{g/cm}^3$  까지 높이고, 특정 항공 샘플의 기공률을 0.1% 미만으로 줄여 시장 적용률의 약 20%를 차지합니다.

이러한 중요성은 고성능과 신뢰성에 반영됩니다. 의료용 CT 차폐 부품은 투과율이 1.5% 미만이고 특정 샘플의 인장 강도가 1500MPa 를 초과하도록 균일한 밀도가 요구됩니다. 원자로 차폐 부품은 내방사선성이 요구됩니다. 특정 용기는  $10^7\text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  시험을 통과하여 5년 이상의 사용 수명을 보였습니다. ITA 데이터에 따르면 HIP 기술 최적화는 시장 성장을 약 10% 촉진했으며, 향후 5년 동안 18%까지 증가하여 극한 환경 응용 분야에서 상당한 이점을 제공할 것으로 예상됩니다.

## HIP 기술의 공정 원리

HIP 기술은 아르곤 매질을 사용하여 균일한 압력을 가합니다. 현재 공정 온도는 약  $1300^\circ\text{C}$  이고 압력은 150MPa 입니다. 산업 샘플의 밀도는 99%를 초과합니다. 유지 시간은 일반적으로 2~4 시간입니다. 의료용 샘플의 기공률은 0.05%로 감소하고 균일도는 98%를 초과합니다. 미세 균열과 기공을 제거함으로써 이 공정은 심우주 샘플의 진동 저항성을 95% 이상으로 향상시켜 재료의 전반적인 성능을 크게 향상시킵니다.

## 장비 및 매개변수

HIP 장비의 압력 정확도는  $\pm 5\text{ MPa}$  로 제어되고, 원자력 시설 시료의 밀도는  $18.5\text{ g/cm}^3$  에 도달하며, 온도 균일도는  $\pm 10^\circ\text{C}$  미만으로 유지됩니다. 가열 속도는 약  $5^\circ\text{C/분}$  이며, 항공 시료의 열 응력은 10 MPa 미만이고, 효율은 약 10% 향상됩니다. 현재 장비는 복잡한 형상의 부품 가공을 지원하며, 연구 결과 표면 품질에 미치는 긍정적인 영향을 검증했습니다.

## HIP 기술의 적용 효과

### 밀도 및 다공성 최적화

HIP 처리 후, 밀도는  $18.5\text{ g/cm}^3$  에 도달하고, 의료용 시료의 기공률은 0.05% 미만이며, 압축 강도는 1200 MPa 를 초과합니다. 기존 소결 밀도  $18.2\text{ g/cm}^3$  와 비교했을 때, HIP 는 약 5% 증가하고, 원자력 시설 시료의 안정성은 90%를 초과하며, 기공 분포의 균일성은 크게 향상됩니다.

### 향상된 기계적 특성

HIP 최적화 후, 인장 강도는 1500MPa 에 도달하고, 항공용 시편은 약  $25\text{ J/m}$  의 인성으로 20g 진동 시험을 통과했습니다. 경도는 420HV 로 향상되었으며, 심우주 시편의 내마모성은  $0.007\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  미만으로, 수명은 약 15% 연장되어 고부하 환경 요건을 충족했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 차폐 성능 개선

HIP 후, 텅스텐 합금의 감쇠 계수는  $0.18 \text{ cm}^{-1}$ 에 도달하고, CT 샘플의 투과율은 1.5% 미만이며, 차폐 효율은 98%에 도달합니다. 중성자 흡수율은 86%로 증가했으며, 원자로 샘플은  $10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  시험을 95% 이상의 안정성으로 통과하여 고에너지 방사선 차폐 효과가 크게 향상되었습니다.

## HIP 프로세스 최적화 및 데이터

HIP 매개변수 최적화는 성능을 크게 향상시킵니다.  $1300^\circ \text{ C}$ , 150MPa 공정은  $18.5 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도를 달성하며, 항공 샘플의 기공률은 0.1% 미만입니다. 3시간의 유지 시간으로 의료용 샘플의 균일도는 98%를 초과하고, 산화 저항성은 90% 이상이며, 열 응력은 10MPa 미만으로 제어됩니다.

환경 요인은 공정에 상당한 영향을 미칩니다. 습도 60%에서 밀도 변동은 0.1% 미만이고, 원자력 시설 시료의 안정성은 95%를 초과하며, 고온( $500^\circ \text{ C}$ )에서는 효율이 약 2% 감소합니다. 진공 전처리 최적화 후, 심우주 시료의 산화 저항성은 95%를 초과하고, 효율은 안정적으로 유지되며, 열 변형률은 0.01% 미만입니다.

## 응용 프로그램의 성능

CT 콜리메이터는 투과율을 1.5%로 낮춘 HIP 공정을 사용합니다. 한 병원의 샘플은 1,000 회의 열 사이클을 통과했으며, 변형률은 0.05mm 미만이고 표면 품질이 우수합니다. 핵폐기물 용기는 1,200MPa 이상의 압축 강도, 5년 이상의 사용 수명, 그리고 안정적인 방사선 저항성을 가진 HIP를 사용합니다. 심우주 탐사선은 HIP를 사용하며, 무게는 약 10% 감소하고 진동 저항성은 95% 이상입니다. 한 프로젝트는 30g 진동 시험을 통과했으며, 미소중력 적응성은 98%에 달했습니다.

## 과제 및 최적화 방향

HIP 기술은 여러 가지 어려움에 직면해 있습니다. 공정 비용이 약 15% 증가하여 전체 비용의 약 20%를 차지하며, 특히 복잡한 부품 가공 시 더욱 그렇습니다. 습도 정확도를  $\pm 5\%$ 로 제어하기 어렵고 효율 손실도 약 1%에 달합니다. 고온 균열 위험이 증가하고 밀도 변동폭이 약 2%에 달하는데, 이는 특히 고온 다습한 환경에서 두드러집니다.

최적화 방향에는 약 5%의 파일럿 비용 절감을 달성한 저비용 HIP 공정 개발이 포함됩니다. 열 응력의 영향을 줄이기 위해 목표 정확도를  $\pm 2^\circ \text{ C}$ 로 높인 지능형 온도 제어 시스템을 도입했습니다. 균열률 목표를 0.1%로 낮춘 지능형 모니터링 기술을 적용하여 제품 품질 향상 가능성을 입증했습니다.

## 미래 전망

밀도 목표는  $18.6 \text{ g/cm}^3$ 로 설정되어 있으며, 현재 연구는  $18.5 \text{ g/cm}^3$ 에 근접하고 있으며, 고밀도화 가능성에 대한 연구가 계속 진행되고 있습니다. 차폐 효율 목표는 99%로 설정되었으며, 기술적 경로는 기본적으로 명확해졌습니다. 스마트 공정과 첨단 소재 기술이 향후 개발을 주도할 것이며, 시장 잠재력은 20%까지 증가할 것으로

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

예상됩니다. 업계 분석에 따르면 원자력 산업 및 항공우주 분야에서의 적용이 더욱 확대될 것으로 예상됩니다.

### 3.3 텅스텐 합금 차폐 가공 기술 및 품질 관리

텅스텐 합금은 높은 밀도, 우수한 방사선 차폐 성능, 그리고 우수한 가공 성능으로 인해 의료 보호, 원자력 공학, 산업 비파괴 검사 등의 분야에서 차폐 부품 제조에 널리 사용됩니다. 텅스텐 합금 차폐 부품 제조는 재료 특성에 대한 높은 요구 사항뿐만 아니라 가공 기술, 표면 처리 및 품질 관리 시스템에 대한 체계적인 과제를 제기합니다. 본 섹션에서는 CNC 가공 및 EDM 기술, 표면 처리 및 가공률 관리, 그리고 품질 검사 및 규격 인증의 세 가지 측면에서 텅스텐 합금 차폐 부품의 가공 및 품질 보증 기술 체계를 체계적으로 설명합니다.

#### 3.3.1 텅스텐 합금 차폐 부품의 CNC 가공 및 EDM 가공

텅스텐 합금은 높은 경도, 높은 취성, 낮은 열전도율로 인해 일반 금속 재료보다 가공이 훨씬 어렵습니다. CNC 가공은 텅스텐 합금 차폐 부품에 가장 널리 사용되는 성형 방법 중 하나입니다. 고속, 고강성 CNC 공작 기계와 특수 설계된 초경 공구를 사용하면 텅스텐 합금 부품의 고정밀 밀링 및 드릴링을 구현할 수 있습니다. 그러나 CNC 가공은 빠른 공구 마모, 높은 절삭력, 그리고 열영향부 발생과 같은 문제를 수반하는 경우가 많으며, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 절삭 조건 최적화, 냉각 및 윤활 조건 최적화가 필요합니다.

보완적 전기 스파크 가공(EDM)은 텅스텐 합금의 복잡한 구조 가공에 있어 대체할 수 없는 이점을 제공합니다. 특히 텅스텐 합금 차폐 부품에서 흔히 볼 수 있는 작은 구멍, 고종횡비 구조, 특수 형상 홈의 경우, EDM은 매우 높은 정밀도로 방전 성형을 완료할 수 있습니다. 와이어 커팅 가공(WEDM)은 특수 형상의 모서리나 슬롯을 제작하는 데 적합하며, 성형 EDM은 깊은 캐비티 구조를 가진 두꺼운 부품의 정삭에 적합합니다. EDM은 공구에 큰 기계적 부하를 주지 않으며 매우 단단하고 취성이 높은 텅스텐 합금에 적합하지만, 효율이 상대적으로 낮기 때문에 공정 구성 시 이를 고려해야 합니다.

#### 3.3.2 텅스텐 합금 차폐 부품의 표면 처리 및 가공률 최적화

텅스텐 합금은 대부분 분말 야금으로 제조되기 때문에 내부에 일정량의 기공이 불가피합니다. 기공은 기계적 특성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 방사선 차폐 능력도 약화시킵니다. 따라서 텅스텐 합금 차폐 부품 제조 공정에서 기공 관리는 핵심 품질 지표 중 하나입니다. 소결 조건을 최적화하고 열간 등방성 성형(HIP) 처리 공정을 채택함으로써 소재 내부의 잔류 기공을 크게 줄이고 구조 밀도를 향상시킬 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 처리 측면에서 내식성, 미관 및 사용 수명을 향상시키기 위해 연마, 전기 도금 또는 스프레이 처리를 통해 표면을 강화하는 경우가 많습니다. 예를 들어, 의료 분야에서 사용되는 텅스텐 합금 차폐 부품은 인체 접촉 시 산화 반응을 방지하기 위해 니켈 전기 도금이나 코팅 처리가 필요한 경우가 많습니다. 스프레이 처리 폴리머 코팅 또한 일반적인 방법으로, 전기 절연성과 오염 방지 효과가 우수합니다. 연마 처리는 외관을 개선할 뿐만 아니라 표면 거칠기를 줄이고 미세 균열 발생을 방지합니다.

### 텅스텐 합금 차폐 부품의 품질 검사 및 표준 인증

텅스텐 합금 차폐 부품은 원자재 검사, 공정 관리, 완제품 검사의 전 과정을 거쳐야 합니다. 재료의 경우, 밀도(일반적으로 아르키메데스법으로 측정), 경도(브리넬 또는 비커스 경도 등), 미세 조직 및 조성 일관성을 시험해야 합니다. 고정밀 차폐 구조의 경우, 두께 균일성, 기공 분포 및 개재물도 시험해야 하며, 이는 CT 스캐닝, X 선 검출, 금속 조직 분석을 통해 수행할 수 있습니다.

치수 검사 측면에서는 고정밀 치수 검증을 위해 3 좌표 측정기(CMM)가 사용됩니다. 복잡한 형상이나 높은 매칭 요구 사항을 가진 부품의 경우, 조립 검증 및 공차 매칭 시험도 필요합니다. 표면 거칠기와 코팅 두께는 프로파일로미터(profilometer) 또는 XRF(X-선 형광) 장비를 사용하여 분석할 수 있습니다.

표준 인증 측면에서, 산업별로 텅스텐 합금 차폐 부품에 대한 기술 사양이 다릅니다. 예를 들어, 의료 방사선 방호 분야는 ISO 13385 또는 ASTM F2886 표준을 따르는 반면, 원자력 산업에서 사용되는 차폐 부품은 ASME BPVC 또는 ISO 6520 및 기타 사양을 준수해야 할 수 있습니다. 일부 최종 고객은 특정 용도에 따라 기업 수준의 품질 관리 표준을 수립하고 제조업체에 더 높은 수준의 요구 사항을 제시하기도 합니다.

### 3.4 텅스텐 합금 차폐의 지속 가능한 제조 및 환경 보호 기술

전 세계적으로 지속 가능한 개발 목표에 대한 관심이 높아짐에 따라, 특히 희귀 금속 및 고에너지 소비 재료를 사용하는 제조업은 자원 절약, 환경 친화성, 탄소 배출 제어 등의 과제에 직면하고 있습니다. 텅스텐 합금 차폐 부품은 중요한 고밀도 금속 제품으로서 자원 채굴, 분말 야금 소결, 고에너지 기계 가공 및 후가공과 같은 공정을 거쳐 생산되며, 이는 일정 수준의 환경적 부담을 초래합니다. 따라서 체계적인 친환경 제조 및 지속 가능한 개발 시스템을 구축하는 것은 텅스텐 합금 차폐 부품 산업의 장기적인 발전에 매우 중요합니다.

이 섹션은 폐텅스텐 합금 차폐 부품의 재활용 및 재사용, 저탄소 제조 공정, 그리고 친환경 제조의 미래 발전이라는 세 가지 측면에서 시작합니다. 환경 보호 및 자원 보존 측면에서 텅스텐 합금 차폐 부품의 개척 방향과 실질적인 방향을 체계적으로 설명합니다.

#### 3.4.1 폐텅스텐 합금 차폐 부품의 재활용 및 재사용

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텨스텐은 전 세계적으로 매장량이 제한되어 있지만 수요가 풍부한 희귀 금속 자원입니다. 재활용 및 재사용은 자원 고갈과 생산 비용 절감을 위한 중요한 수단으로 자리 잡았습니다. 텨스텐 합금 차폐 부품 제조 공정, 특히 CNC 절삭, 방전 가공(EDM) 및 후가공 공정에서는 다량의 칩, 마모분, 그리고 부적합 부품이 발생합니다. 이러한 스크랩, 칩, 그리고 폐기된 부품을 제대로 처리하지 않으면 텨스텐 자원의 심각한 낭비를 초래할 뿐만 아니라 환경 오염까지 초래할 수 있습니다.

**재활용 방법에는 주로 다음이 포함됩니다.**

1. **기계적 수집 및 분류** : 금속 칩과 분말은 가공 과정에서 음압 시스템이나 자기 장치를 통해 수집됩니다. 입자 크기와 불순물 함량이 다른 잔류물은 선별 및 등급 분류를 통해 처리하여 재사용 효율을 높일 수 있습니다.
2. **화학적 환원 재생** : 고온 수소 환원 또는 탄소 열 환원 기술을 사용하여 폐텨스텐 분말의 산화물을 금속 텨스텐 분말로 환원하고 텨스텐 합금 분말 제조 공정에서 재사용합니다.
3. **습식야금 회수** : 텨스텐을 함유한 폐기물을 알칼리성 또는 산성 용액(예: NaOH 또는 HCl)에 용해하고, 침전, 추출, 결정화 등을 통해 텨스텐산염 또는 파라텨스텐산염 암모늄을 추출한 다음, 열분해를 통해 재생된 WO<sub>3</sub>를 얻어 새로운 분말을 생산합니다.
4. **폐쇄형 재활용 체인** : 대규모 텨스텐 제품 제조 기업에서는 폐기물 수거, 전처리, 재분쇄 및 재소결로 이어지는 통합 폐쇄 루프 시스템을 구축하여 텨스텐 자원의 활용과 재활용을 극대화합니다.

통계에 따르면 효율적인 재활용 및 재사용 시스템을 활용하면 텨스텐 합금 차폐 부품의 원자재 활용률을 15~25% 높이는 동시에 폐기물 처리 비용과 환경 오염 물질을 크게 줄일 수 있습니다. 이는 친환경 제조를 위한 핵심 요소 중 하나입니다.

### 3.4.2 텨스텐 합금 차폐 부품의 저탄소 생산 공정

고온 소결, 기계적 절단, 표면 처리 등 전통적인 텨스텐 합금 차폐 부품 생산 공정은 일반적으로 높은 에너지 소비와 높은 배출량을 동반합니다. "이중 탄소" 정책과 회사의 ESG 목표 달성을 위해 업계는 다양한 저탄소 제조 기술을 적극적으로 모색하고 있습니다.

#### 1. 저온 소결 기술 및 플라즈마 보조 성형:

기존 텨스텐 합금의 소결 온도는 일반적으로 1500~1700°C로 매우 높아 매우 높은 에너지 소비를 초래합니다. 합금 비율을 최적화하고, 치밀화 보조제를 첨가하고, 플라즈마 소결 기술(플라즈마 활성화 소결, PAS)을 도입함으로써 더 낮은 온도(1000~1300°C)에서 치밀한 성형을 달성하여 에너지 소비를 크게 줄일 수 있습니다. 또한, PAS는 소결 시간을 단축하고, 구조의 균일성을 향상시키며, 배출 가스를 줄일 수 있습니다.

#### 2. 절삭 가공 기술(Near Net Shape Forming):

분말 사출 성형(MIM) 및 열간 등방성형(HIP)과 같은 기술을 통해 근접 순형 성형이

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

가능하며, 이를 통해 후속 가공에 필요한 재료의 양을 크게 줄일 수 있어 절삭 에너지 소비와 칩 폐기물을 원천적으로 줄일 수 있습니다.

### 3. 청정 에너지 대체 및 에너지 최적화:

생산 작업장에서는 태양열, 풍력 등 재생 에너지 에너지 공급 시스템을 활용하고, 동시에 소결로, 냉각 시스템, 환기, 공기 압축 시스템 등 핵심 설비에 대한 에너지 절약형 개조를 실시하여 주파수 변환 제어, 전자기 가열, 폐열 회수 시스템 등을 도입하여 단위 제품당 탄소 배출량을 줄입니다.

### 4. 친환경 표면 처리 공정:

크롬, 니켈 등 중금속을 함유한 기존 전기 도금을 대체하는 친환경 PVD 코팅, 나노 세라믹 분무, 비시안 전기 도금 등이 있으며, 이러한 기술은 환경 친화적이며 폐액 배출과 후처리 비용을 절감합니다.

저탄소 기술을 홍보하려면 초기 투자가 필요하지만, 제조 비용을 절감하고 브랜드의 지속 가능한 가치를 높이며 중장기적으로 녹색 공급망에 대한 시장 수요를 충족할 수 있습니다.

#### 3.4.3 텅스텐 합금 차폐 부품의 친환경 제조의 미래 전망

텅스텐 합금 차폐 부품의 친환경 제조의 미래 발전은 환경 보호와 에너지 절약뿐만 아니라, 전체 수명 주기 관점에서 "친환경 제품-친환경 공장-친환경 산업 체인"의 시스템 솔루션 구축에 중점을 두고 있습니다. 향후 발전 추세는 다음과 같은 측면에서 예상할 수 있습니다.

#### 1. 녹색 제조는 디지털화와 지능형 제조를 통합합니다.

디지털 트윈 제조 플랫폼을 구축하여 각 공정의 에너지 소비량과 배출량을 실시간으로 모니터링합니다. 인공 지능 알고리즘을 도입하여 생산 일정과 에너지 효율성을 동적으로 최적화합니다. 또한, 사물 인터넷(IIoT)을 사용하여 에너지 소비량을 진단하고 유지 관리를 예측하여 자원 활용 효율성을 전면적으로 개선합니다.

#### 2. 수명주기평가(LCA) 및 탄소발자국 관리:

텅스텐 합금 차폐 부품의 원자재 조달, 생산, 운송, 사용부터 재활용까지의 탄소발자국 데이터베이스를 구축하고 제품 탄소 배출량을 완전히 추적합니다. 기업이 ISO 14067, PAS 2050 및 기타 표준 인증을 통과하도록 촉진하고 국제 시장에 친환경적이고 신뢰할 수 있는 제품을 제공합니다.

#### 3. 산업 간 협력적 재활용:

텅스텐 합금 폐기물은 공유 자원 플랫폼을 통해 분말 제조, 군사 재활용, 초경합금 재생 등 다른 산업으로 운송되어 기존 산업의 경계를 허물고 지역

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

협력적 순환 경제 네트워크를 형성합니다. 예를 들어, 의료 폐기물 텅스텐 차폐 부품은 새로운 분말 야금 공장으로 재활용되어 3D 프린팅용 텅스텐 합금 원료로 활용됩니다.

#### 4. 신소재 및 친환경 대체 소재 연구:

차폐 성능을 보장한다는 전제 하에, 텅스텐 수지 기반 복합 차폐 부품, 텅스텐-폴리브덴 합금 또는 희토류 도핑 텅스텐 재료와 같은 더 가볍고 탄소량이 낮은 텅스텐 합금 복합 소재를 개발하여 항공우주 및 기타 분야에서 중량 감소와 친환경 성능의 이중 요구를 충족합니다.

#### 5. 글로벌 친환경 정책의 영향:

향후 유럽과 미국 시장은 텅스텐 합금 차폐 부품에 대해 더욱 엄격한 RoHS, REACH 및 탄소 라벨 요건을 부과할 수 있으며, 이는 제조업체가 사전에 친환경 인증 시스템을 구축하고 "그린 패스"를 구축하며 국제 경쟁력을 강화하도록 유도할 것입니다.

요약하자면, 텅스텐 합금 차폐 부품의 지속 가능한 제조는 업계의 고품질 발전을 위한 중요한 방향이 되었습니다. 폐기물 재활용, 저탄소 공정 개선, 그리고 친환경 기술 혁신을 통해 환경에 미치는 부정적 영향을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 기업의 자원 효율성과 사회적 가치를 동시에 향상시킬 수 있습니다. 친환경 전환이 지속적으로 심화됨에 따라, 텅스텐 합금 차폐 부품은 지능화, 디지털화, 그리고 친환경화를 통합하는 새로운 발전 단계로 점차 나아갈 것입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.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)



## 제 4 장 텅스텐 합금 차폐 부품 분야

### 4.1 텅스텐 합금 차폐 의료 분야

의료 영상, 방사선 치료, 핵의학 기술의 급속한 발전으로 의료용 방사선 장비 및 동위원소 응용 분야가 점차 대중화되면서 방사선 차폐 재료에 대한 더욱 높은 성능 요구가 제기되었습니다. 텅스텐 합금은 매우 높은 밀도(17.0-18.5 g/cm<sup>3</sup>), 뛰어난 X선 및 감마선 흡수 능력, 우수한 가공성 및 생체 적합성을 갖추고 있어 기존 납 차폐 재료를 대체할 이상적인 선택으로 자리 잡았습니다. 특히 높은 차폐 효율, 환경 보호 및 무독성, 그리고 정밀한 구조적 통합을 추구하는 현대 의료 장비에서 텅스텐 합금 차폐는 폭넓은 적용 가능성을 보여주고 있습니다.

의료 분야에서 텅스텐 합금 차폐는 CT 장비 및 방사선 치료, 휴대용 보호 장치, 생물 안전 표준의 세 가지 측면에서 활용됩니다.

#### 4.1.1 CT 장비 및 방사선 치료의 텅스텐 합금 차폐

##### 1. CT 스캔 장비 적용:

컴퓨터 단층촬영(CT) 장비는 환자와 작업자의 방사선 안전을 보장하기 위해 시스템 내부에 여러 개의 텅스텐 합금 차폐 부품을 설치합니다. 일반적으로 X 선관 주변 차폐관, 회전 압 차폐층, 그리고 영상실 외피 보호판이 여기에 포함됩니다. 이러한 텅스텐 합금 부품은 고밀도 구조를 통해 X선 산란 및 누출을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

차단하는 동시에, 우수한 가공성과 열전도도를 통해 연속 작동 시 장비의 구조적 안정성과 열 부하 방출을 보장합니다.

## 2. 방사선 치료 시스템의 차폐 부품:

선형 가속기(LINAC), 감마 나이프, 양성자 나이프 등과 같은 최신 방사선 치료 장비는 고에너지 X선 또는 입자 빔을 사용하여 암 조직을 조사합니다. 텅스텐 합금 차폐의 핵심 역할은 콜리메이터 블레이드, 빔 셰이퍼(MLC) 및 방사선 격리 부품을 형성하는 것입니다. 특히 세기 변조 방사선 치료(IMRT)에서 텅스텐 합금 다중 잎 콜리메이터는 밀리미터 수준의 동적 차폐를 달성하고, 방사선량을 효과적으로 제어하며, 건강한 조직의 손상을 줄일 수 있습니다.

## 3. 기술적 장점 비교:

텅스텐 합금은 기존 납 차폐재에 비해 밀도가 높고 구조적 안정성이 우수합니다. 동가 차폐 용량은 납의 약 1.7 배에 달합니다. 산화가 잘 되지 않고 휘발성 독성이 없어 장비 수명과 환경 안전성이 더욱 보장됩니다. 또한, CNC 정밀 가공 또는 사출 성형을 통해 복잡한 형상의 부품을 구현할 수 있어 CT 및 방사선 치료 장비의 경량화 및 모듈화에 대한 기술적 지원을 제공합니다.

### 4.1.2 휴대용 차폐 장치의 텅스텐 합금 차폐 부품

#### 1. 핵의학 및 휴대용 진단 및 치료 수요 증가:

방사성핵종 영상(SPECT, PET) 및 병상 방사선 검사 장비의 광범위한 보급으로 의료기관의 휴대용 차폐 장비 수요가 매년 증가하고 있습니다. 예를 들어, 휴대용 X선 촬영기, 이동형 CT, 방사성핵종 주입 장비, 현장 방사선 검출 장비 모두 운영 안전성과 유연한 적용이라는 두 가지 요건을 충족하기 위해 가볍고 효율적인 차폐 장치를 장착해야 합니다.

#### 2. 텅스텐 합금 휴대용 차폐 제품 유형:

텅스텐 합금은 다음 휴대용 보호 장치에 널리 사용될 수 있습니다.

- **핵종 주사기 보호 셸** : 텅스텐 합금으로 만든 주사기 슬리브는 작업자의 손이 베타선과 감마선에 노출되는 것을 크게 줄일 수 있습니다.
- **휴대용 엑스선 차폐 장치** : 침대 옆 영상 검사에 적합하며 의료진에게 즉각적인 차폐 기능을 제공합니다.
- **방사성원 운반용기** : 동위원소 운반을 위한 컴팩트하고 효율적인 보호 공간을 제공합니다.
- **착용형 텅스텐 합금 고강도 조끼 및 목 보호대** : 특수 직책의 인원을 위한 국부 고밀도 보호 설계에 적합합니다.

#### 3. 소형화 및 모듈화의 장점:

텅스텐 합금은 고밀도 소재 중에서도 비중과 기계적 강도가 뛰어나 휴대용 보호 장비를 더 작고 균일하게 제작할 수 있습니다. 예를 들어, 텅스텐 합금으로 제작된

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

방사선 방호 조끼는 동일한 차폐 수준의 납 조끼보다 약 30% 가벼워 착용감과 장기 사용 내구성을 효과적으로 향상시킵니다.

#### 4.1.3 텅스텐 합금 차폐재의 생체적합성 및 안전 기준

의료 분야에 사용되는 모든 금속 재료는 엄격한 생체적합성, 안전성 및 규정 준수 요건을 충족해야 합니다. 텅스텐 합금은 주로 차폐 목적으로 사용되며, 비이식 접촉이나 단기간 접촉이 빈번하지만, 인체에 미치는 안전 영향과 관련 재료 규정과의 적합성은 여전히 평가되어야 합니다.

##### 1. 생체적합성 평가:

연구에 따르면 텅스텐 합금 소재는 피부, 체액 및 세포 조직에 심각한 독성 반응을 일으키지 않으며, 손상이나 산화도 발생하지 않는 것으로 나타났습니다. 특히 니켈 도금, 전기영동 코팅, 에폭시 패키징과 같은 표면 처리 공정을 거치면 생물학적 불활성이 더욱 강화되어 외과 수술 및 핵의학 주사와 같은 직접 접촉 장비에 널리 사용될 수 있습니다.

##### 2. 충족되는 국제 표준은 다음과 같습니다.

- **ISO 10993** : 의료기기 재료가 인체에 미치는 장기적인 영향을 평가하는 데 사용되는 생물학적 평가 표준 시스템. 텅스텐 합금은 세포 독성, 피부 자극, 감작성 등의 시험을 통과해야 합니다.
- **RoHS (EU 유해물질 제한)** : 텅스텐 합금 자체에 납, 카드뮴 등 유해 원소가 포함되어 있지 않아 녹색 환경 보호 기준을 충족합니다.
- **REACH 인증** : 화학 성분과 잠재적 노출 위험에 대한 포괄적인 검토
- **FDA 등록 요구 사항** (미국 시장으로 수출되는 의료용 구성품의 경우): 재료 구성, 안전 시험 보고서, 해당 사용 시나리오를 제출해야 합니다.

##### 3. 안전한 포장 및 사용 권장 사항:

최대의 안전성을 보장하기 위해 텅스텐 합금 차폐 부품은 금속 표면을 폴리머 필름이나 세라믹 코팅으로 코팅하는 등 이중 밀봉 설계를 사용하여 날카로운 모서리나 파손 위험을 방지하는 경우가 많습니다. 의료용 텅스텐 제품은 장기간 사용 시 성능 저하 및 구조적 손상이 발생하지 않도록 정기적인 무결성 검사 및 표면 처리 보수를 실시하는 것이 좋습니다.

##### 요약

의료 분야에서 텅스텐 합금 차폐는 방사선 차폐 성능, 구조적 적응성, 그리고 생물학적 안전성 측면에서 포괄적인 장점을 보여줍니다. 대규모 영상 장비, 방사선 치료 시스템, 소형 휴대용 기기 및 웨어러블 보호 장비 등 어떤 분야에서든 텅스텐 합금은 납보다 더 효율적이고 환경 친화적이며 맞춤형 솔루션을 제공할 수 있습니다. 앞으로 지능형 및 소형화 의료 장비의 발전 추세에 따라 텅스텐 합금 차폐 재료는 더욱 첨단 응용 분야에서 핵심적인 역할을 할 것이며, 지속적인 소재 개선과 공정 최적화를 통해 친환경 고성능 의료 보호 제품 개발을 더욱 촉진할 것입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 4.2 텅스텐 합금 차폐 산업

산업 분야에서는 원자력 개발, 비파괴 검사, 고방사선 환경 작업 등 첨단 산업의 지속적인 발전에 따라 고성능 방사선 방호 재료에 대한 수요가 더욱 시급해졌습니다. 초고밀도 금속 재료인 텅스텐 합금은 감마선, X 선, 중성자에 대한 탁월한 차폐 성능으로 안전성, 내구성, 그리고 소형화 측면에서 기존 차폐 재료보다 월등히 뛰어나며, 산업 분야의 다양한 고방사선 환경에서 핵심 방호 부품으로 점차 자리 잡고 있습니다.

산업계에서 텅스텐 합금 차폐는 핵 산업 및 핵폐기물 처리, 산업용 영상 및 탐지 장비, 고방사선 환경에서의 장비 보호의 세 가지 측면에서 이루어집니다.

### 4.2.1 핵산업 및 폐기물 처리 분야에서 텅스텐 합금 차폐의 적용

#### 1. 원자로용 방사선 차폐 부품:

텅스텐 합금은 원자력 발전소, 연구용 원자로, 고속 중성자 실험 장치에서 고에너지 감마선과 일부 중성자 방사선을 차폐하는 데 널리 사용됩니다. 일반적인 적용 부품은 다음과 같습니다.

- 제어봉과 반사경 사이의 차폐층;
- 중성자 소스 또는 감마 소스 클래딩;
- 감지기와 제어 시스템 주변의 구조적 차폐.

텅스텐 합금은 제한된 공간에서 납과 동등하거나 그 이상의 차폐 효과를 제공하여 원자로의 소형화를 실현하고 시스템 집적도를 향상시킵니다. 동시에, 일반 금속 합금보다 내식성과 내방사선성이 우수하며, 장기간 고온 및 고방사선 환경에서도 구조적 안정성을 유지할 수 있습니다.

#### 2. 핵폐기물 관리 적용:

텅스텐 합금은 고준위 방사성 폐기물의 임시 저장 및 운송 시 차폐 용기 재료로도 사용될 수 있습니다. 특히 단기 사용 후 핵연료 부품이나 의료용 핵종을 포장 및 운송해야 하는 경우, 텅스텐 합금 차폐 배럴 또는 차폐 모듈은 다음과 같은 기능을 수행할 수 있습니다.

- 고에너지 감마선의 누출을 효과적으로 억제합니다.
- 컨테이너 용량을 크게 줄이고 운송 효율성을 개선합니다.
- 방사선 작업자의 방사선량을 줄이세요.

텅스텐 합금의 가공성은 다양한 두께, 구조 또는 내부 공동 형상을 요구에 따라 설계하는 것을 지원하여 다양한 핵폐기물 형태의 포장 요구 사항을 충족합니다.

#### 3. 납 소재 대체의 환경적 이점:

원자력 산업의 기존 차폐는 대부분 납을 사용하지만, 납 소재는 가공, 운송 및 폐기 과정에서 심각한 환경 오염 위험을 초래합니다. 텅스텐 합금은 무독성이며 재활용이 가능할 뿐만 아니라 긴 수명과 높은 구조적 무결성을 갖추고 있어 현대 원자력 산업의 청정 생산 및 지속 가능한 개발 요건을 충족합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.2.2 산업용 이미징 및 감지에 텅스텐 합금 차폐 적용

##### 1. 방사선 비파괴 검사 장비의 핵심 부품:

항공우주, 자동차 제조, 기계 가공, 압력 용기 등의 분야에서 산업용 비파괴 검사(NDT) 기술은 X 선 또는 감마선을 사용하여 재료의 내부 결함을 영상화하고 분석합니다. 방사선 방향을 제어하고 방사선 누출이 작업자와 주변 환경에 영향을 미치지 않도록 방지하기 위해 텅스텐 합금 차폐가 다음 분야에서 널리 사용됩니다.

- X 선원 차폐 및 파이프 차폐;
- 감마선을 공급하는 고정된 용기
- 영상 수신기 주변의 방사선 차단판
- 산업용 검사 로봇의 차폐된 인클로저.

정밀한 가공성과 높은 밀도 덕분에 텅스텐 합금은 방향성 창과 유연한 조인트와 같은 복잡한 구조에 사용할 수 있어 산업용 X 선 감지에 높은 분해능과 높은 안전성을 제공합니다.

##### 2. 산업용 실시간 영상 시스템 응용:

실시간 X 선 영상 시스템은 전자 부품 포장 검사, 식품 안전 검사, 재료 결함 분석 등에 널리 사용됩니다. 시스템의 광선 콜리메이터 및 배경 차폐 재료로 텅스텐 합금을 사용하면 후방 산란을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 영상 대비와 감도를 향상시키고 검출 정확도를 높일 수 있습니다.

##### 3. 유연 차폐 부품의 발전 추세:

자동화 및 지능형 제조가 발전함에 따라 산업 장비는 분리형 차폐 모듈, 유연 회전 차폐 암 등과 같은 방사선 방호 부품에 대한 요구 사항이 더욱 높아졌습니다. 텅스텐 합금은 높은 가공 정확도로 인해 정밀 매칭 홈, 회전 베어링 구멍 및 케이블 관통 구멍이 있는 차폐 부품을 제조하여 복잡한 장비의 작동 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

#### 4.2.3 고방사선 환경에서의 텅스텐 합금 차폐의 적용

##### 1. 방사능 작업장 및 실험실에서 사용:

고에너지 물리학 연구, 핵연료 처리 공장, 방사성 약물 생산 등의 분야에서 작업자는 중강도에서 고강도 방사선 환경에 장시간 노출될 수 있습니다. 텅스텐 합금 차폐는 일반적으로 다음과 같은 용도로 사용됩니다.

- 샘플 취급 스테이션의 지역 보호
- 방사선 창을 위한 개방형 차폐 커버;
- 제어 계측기 및 전기 시스템을 위한 내부 차폐 상자입니다.

이러한 텅스텐 합금 부품은 소형화된 내장 구조로 맞춤 제작될 수 있어 장비의 소형화를 보장할 뿐만 아니라 복잡한 작동 절차에서도 방사선 안전을 달성합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 원격 제어 시스템 및 로봇 보호:

고방사능 구역 작업에서 텅스텐 합금 차폐 부품은 원격 제어 로봇 팔, 탐지 로봇 또는 무인 검사 장비에도 널리 사용되어 핵심 회로, 센서 및 액추에이터의 방사선 방호를 구축합니다. 예를 들면 다음과 같습니다.

- 차폐 슬리브: 적외선이나 카메라 렌즈를 보호하는 데 사용됩니다.
- 회전식 차폐 조인트: 자유도가 높은 로봇 팔에 사용됨
- 접이식 보호 실드: 활동성이 높은 곳 근처에서 작업할 때 사용됨.

텅스텐 합금은 차폐 기능을 유지하면서도 우수한 기계적 특성을 가지고 있어 이러한 고기능 장치를 충격, 방사선 및 장기 작동에 강하게 만듭니다.

## 3. 고방사능 환경 시험 플랫폼 및 시뮬레이션 장치:

원자력 시스템, 항공우주 방사선 방호 장치 또는 심지구 탐사 장비를 설계하기 전에 검증을 위한 방사선 시뮬레이션 플랫폼을 구축하는 것이 종종 필요합니다. 텅스텐 합금 차폐 모듈은 시뮬레이션 캐빈, 시험 채널, 차폐벽 및 기타 구조물을 구축하기 위해 유연하게 배치될 수 있으며, 연구원들이 통제된 환경에서 제품의 방사선 저항성을 검증하고 설계 계획을 최적화하는 데 도움이 됩니다.

### 요약

텅스텐 합금 차폐 부품은 산업 분야에서 뛰어난 기능적 적응성과 안전성을 입증해 왔습니다. 원자력 시스템의 고에너지 차폐부터 고해상도 산업 감지, 핵폐기물 이송 용기부터 원격 조종 장비의 방사선 방호까지, 뛰어난 밀도, 기계적 특성, 그리고 환경적 이점을 갖춘 텅스텐 합금은 산업용 고방사능 환경에서 컴팩트하고 안정적이며 긴 수명을 제공합니다.

친환경 제조, 높은 신뢰성, 그리고 정밀 집적화의 발전으로 텅스텐 합금 차폐는 미래 산업의 핵심 분야에서 더욱 폭넓은 역할을 담당하게 될 것입니다. 인공지능, 원격 제어, 디지털 제조 기술과의 통합은 고방사능 산업 환경에 더욱 안전하고 효율적이며 지능적인 운영을 보장할 것입니다.

## 4.3 항공우주용 텅스텐 합금 차폐 부품

항공우주 분야는 텅스텐 합금 차폐 부품 적용에 있어 전략적 요충지입니다. 텅스텐 합금은 특유의 고밀도, 고용점, 뛰어난 방사선 차폐 성능, 그리고 열 안정성을 갖추고 있어 유인 우주 비행, 심우주 탐사, 위성 전자 장비 보호, 추진 시스템 절연 등 핵심 분야에서 중요한 역할을 수행합니다. 특히 우주선, 고에너지 입자 폭풍, 초고온 공기역학적 열 환경, 그리고 미세 중력 조건과 같은 극한의 환경에서는 기존 금속 소재로는 감당하기 어려운 경우가 많으며, 텅스텐 합금은 뛰어난 성능으로 인해 선호되는 소재 중 하나로 자리 잡았습니다.

### 4.3.1 심우주 탐사 및 위성 보호에 있어서 텅스텐 합금 차폐의 적용

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. 우주선 및 태양 고에너지 입자 복사 차폐:

저궤도(LEO), 중궤도(MEO), 그리고 심우주 환경에서 운항되는 우주선은 우주선(GCR)과 태양 고에너지 입자(SEP)에 장시간 노출됩니다. 이러한 고에너지 입자는 항공우주 전자 장비, 센서 시스템, 심지어 우주비행사의 건강에도 심각한 위협이 됩니다. 텅스텐 합금은 높은 원자 번호와 고밀도로 감마선, 전자 흐름, 그리고 일부 중성자선을 효과적으로 차단하여 입자 플럭스를 효과적으로 약화시키고, 단일 사건 전이(SEU) 및 물질 방사선 손상을 줄일 수 있습니다.

### 2. 위성 전자 장비의 국부 보호 구조:

통신, 항법, 원격 감지 등 고신뢰성 위성에서 텅스텐 합금은 다음과 같은 핵심 부품의 보호 차폐로 사용됩니다.

- 정밀 광학 감지 구성 요소를 위한 차폐
- 전력 관리 시스템을 위한 방사선 차단막
- 방사성 핵종 전원 공급 시스템(예: RTG)에 대한 감마선 및 중성자 차폐
- 마이크로파 부품과 저잡음 증폭기를 위한 환경적 격리 인클로저입니다.

특히 핵 에너지에 사용되는 심우주 탐사선(보이저, 큐리오시티 등)의 경우, 텅스텐 합금은 방사성 열원과 다른 시스템 사이의 효율적인 차폐 재료로 사용되어 시스템의 장기적이고 안정적인 작동을 보장할 수 있습니다.

### 3. 소형 위성 및 항공우주 전자 모듈을 위한 경량 설계:

최신 큐브셋(CubeSat), 나노셋(NanoSat) 및 기타 초소형 우주선은 무게 제어에 매우 까다롭습니다. 이러한 맥락에서, "단위 부피당 높은 차폐 용량"을 갖춘 텅스텐 합금 차폐 부품은 더 작은 공간에서 더 높은 차폐 효과를 달성하여 주요 전자 장치가 통합된 소형 위성의 구조 최적화 및 방사선 차폐를 제공합니다.

### 4.3.2 로켓 및 우주선 열 절연에 텅스텐 합금 차폐 적용

#### 1. 스템핑 단열 및 공기역학적 열 환경 보호:

우주선이 대기권 재진입 시 표면 온도는 2000°C 이상에 달할 수 있으므로, 열 보호 시스템(TPS)은 매우 강력한 삭마 저항성과 내열성을 갖추어야 합니다. 텅스텐 합금은 최대 3422°C의 용점, 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수를 가지고 있어 국부적으로 고열 부하가 발생하는 지역에 이상적인 보호재입니다. 일반적인 응용 분야는 다음과 같습니다.

- 로켓 노즐 목과 노즐 가장자리의 고온 차폐
- 방열 구조의 지지 프레임 또는 후면 열 반사기;
- 추진 시스템의 꼬리 화염 보호 모듈
- 재사용 가능한 차량의 열 보호 계층의 중간 계층입니다.

통제된 귀환 우주선(SpaceX의 Falcon 9 회수 단계 등)과 우주 비행기의 공기 역학적 가열 테스트에서 텅스텐 합금 구성 요소는 다층 복합재를 통해 세라믹 기반 재료와 결합되어 전반적인 열 충격 저항성과 구조적 안정성을 개선합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 추진 시스템의 차폐 및 단열 구조:

액체 로켓 엔진, 이온 추진기, 핵열 추진(NTP) 및 기타 시스템은 작동 중 고온 플라즈마와 복사열을 발생시켜 주변 구조물 및 연료 공급 시스템에 영향을 미칩니다. 텅스텐 합금 차폐 링, 와류 덮개 및 열 분리기는 다음과 같은 역할을 합니다.

- 적외선 열 흐름을 부분적으로 차단합니다.
- 연료 시스템의 열팽창 및 고장을 방지합니다.
- 추진 시스템의 열 부하 분포를 제어하고 서비스 수명을 연장합니다.

텅스텐 합금은 미래 고출력 전기 추진 시스템의 양극 및 이온 유도 채널 소재로도 적합합니다. 뛰어난 전기열 안정성과 결합하여 시스템 효율과 안전성을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

### 4.3.3 무중력 환경에서의 텅스텐 합금 차폐 성능 검증

#### 1. 미소중력 환경에서의 재료 거동 변화 및 적응성 검증:

미소중력 환경에서는 재료의 열전도도, 계면 접촉, 용접 거동 및 피로 균열 전파 경로가 변할 수 있습니다. 텅스텐 합금은 비교적 취성이 강하므로 핵심 부품에 사용하기 전에 미소중력 환경에서의 기계적 및 열적 안정성을 검증해야 합니다. 현재 국제우주정거장(ISS)과 우주재료실험플랫폼(SEMP)은 미소중력 환경에서 텅스텐 합금 샘플에 대한 여러 차례의 실험을 수행했습니다.

- 열팽창 및 수축 성능 측정;
- 재료 미세구조 안정성 분석
- 우주입자 충격 후 균열 저항성 시험;
- 다중 사이클 열충격 및 온도 급변 조건에서의 응력 반응 거동.

결과에 따르면, 합금 비율(예: W-Ni-Fe 또는 W-Re 시스템)을 최적화하고 고밀도화 가공(예: 열간 등방성 압축)을 거친 후, 텅스텐 합금은 미소 중력 환경에서 우수한 열-기계적 결합 안정성과 충격 저항성을 유지할 수 있습니다.

#### 2. 우주복 및 적재 장치의 구조적 통합 시험:

우주복 운반 장비 및 객실 인원 보호 장치에 사용되는 소형 텅스텐 합금 차폐 부품 또한 우주정거장에서 기능적 통합 및 인체공학적 시험을 거치고 있습니다. 해당 부품의 기능은 다음과 같습니다.

- 객실 내 방사선 누출을 방지합니다.
- 단기간 고에너지 입자 노출로부터 가슴이나 뇌를 보호합니다.
- 이중 기능(구조 + 보호) 구성 요소로 재료 운송 패키지에 통합되었습니다.

#### 3. 장기 유인 심우주 임무용 차폐 레이아웃 연구:

NASA, ESA, 그리고 중국 우주정거장 프로젝트는 모두 심우주 유인 비행 중 텅스텐 합금 차폐 시트와 모듈을 기내 내부에 배치하여 태양 입자 사건(SPE) 발생 시 임시 대피소(스톰 쉘터)를 형성하는 방법을 연구하고 있습니다. 텅스텐 합금의 국부 매립 설치 특성은 지상에 사전 설치하거나 궤도에서 신속하게 조립하여 우주인의 생명을 보호하는 유용한 대피소 구조물을 만드는 데 적합합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 요약

텅스텐 합금 차폐 부품은 항공우주 분야에서 대체 불가능한 전략적 가치를 입증해 왔습니다. 강한 방사선, 초고온, 정밀한 구조, 그리고 비정상 중력 등 다양한 극한 조건에서도 텅스텐 합금은 탁월한 차폐 성능을 제공할 뿐만 아니라, 열 안정성, 기계적 강도, 그리고 재료 가공성을 통해 로켓, 위성, 우주선 및 심우주 임무에 필수적인 핵심 부품 소재로 자리매김할 수 있습니다.

앞으로 심우주 유인 탐사, 우주 핵 추진, 고속 재돌입 등 다양한 분야의 기술이 발전함에 따라 텅스텐 합금 차폐는 더욱 복잡하고 변화하는 응용 분야에서 핵심적인 역할을 계속 수행할 것입니다. 텅스텐 합금 차폐의 복합 소재, 경량화 및 기능적 통합 또한 재료 과학 및 항공우주 공학 분야에서 중요한 연구 방향이 될 것입니다.

## 텅스텐 합금 차폐의 기타 신홍 분야

과학 연구, 국가 안보, 지속 가능한 개발 등 여러 요인에 의해 주도되는 신홍 응용 분야의 지속적인 확장과 함께, 텅스텐 합금 차폐 부품은 전통적인 의료, 산업, 항공우주와 같은 주류 응용 분야를 넘어 입자 물리학 연구, 고강도 군사 보호, 친환경 환경 보호 기술과 같은 최첨단 분야로 확장되고 있습니다. 텅스텐 합금 차폐 부품은 높은 밀도, 높은 원자 번호, 뛰어난 내방사선성, 그리고 열 안정성을 갖추고 있어 매우 복잡한 환경에서도 안정적인 차폐 역할을 수행하며, 향후 다학제 간 교차 응용 분야에서 중요한 소재로 자리매김할 것입니다.

### 4.4.1 입자물리학 실험에서 텅스텐 합금 차폐의 적용

#### 1. 고에너지 가속기 및 검출 시스템의 차폐 구조: 유럽 원자핵 연구 기구(CERN)

의 대형 강입자 충돌기(LHC), 중국의 고에너지 싱크로트론 방사선 시설(HEPS), 국제 열핵융합 실험로(ITER)와 같은 대규모 입자물리학 실험 장치에서는 실험 장비가 높은 감마선, 중성자 및 2차 입자의 플럭스를 생성합니다. 이러한 방사선은 실험 측정용 방해할 뿐만 아니라 연구자와 제어 시스템을 위협에 빠뜨립니다.

텅스텐 합금 차폐는 다음 분야에서 널리 사용됩니다.

- **빔 덤프**: 최대 수백 GeV의 에너지를 지닌 고속 입자 흐름을 흡수합니다.
- **입자 검출기 주변의 차폐 공동**: 액체 제논 검출기의 감마선 억제 슬리브 등
- **용 중성자 완충 장치 및 인공물 보호막**
- **레이저 플라즈마 가속기에서 강한 레이저와 방사선의 간섭을 억제하는 구조**

텅스텐(74)은 높은 Z 값을 가지고 있어 고에너지 감마선 차단 효율이 구리나 강철보다 훨씬 높고, 구조가 안정적이며 녹기 어렵습니다. 텅스텐은 고에너지 물리 실험 플랫폼 구축에 필수적인 핵심 소재입니다.

#### 2. 암흑 물질 및 중성미자 검출 실험을 위한 초저 배경 차폐:

텅스텐 합금은 다음과 같은 초저 배경 방사선 환경에서의 실험에도 사용됩니다.

- **암흑물질 탐지 프로젝트(XENONnT 및 LUX-ZEPLIN 등)**
- **중성미자 질량 측정 실험(예: KATRIN)**
- **중성자 붕괴와  $\beta$  붕괴의 정밀 측정 실험.**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 실험은 매우 약한 신호를 감지하기 위해 지하 깊숙이 설치되는 경우가 많기 때문에 주변 차폐 재료의 방사능 함량이 매우 높습니다. 저배경 텅스텐 합금 (즉, 방사능 오염이 극히 낮은 고순도 원료로 제작)을 사용하면 효율적인 보호층을 구축하여 자연 배경 복사와 우주선 간섭을 효과적으로 억제할 수 있습니다.

#### 4.4.2 국가 방위 및 안보 보호에 있어서 텅스텐 합금 차폐의 응용

##### 1. 핵무기 관련 장비의 보호 구조:

텅스텐 합금은 방위 산업, 특히 핵무기의 제어 가능한 보호, 지하 핵실험 데이터 분석 및 방사선 방호 시스템 구축에 널리 사용됩니다. 텅스텐 합금 차폐는 다음과 같은 장점을 가지고 있습니다.

- 감마선과 중성자를 흡수하는 효율이 높아 탄두 차폐 및 폐쇄형 핵장치 시험 부품으로 활용 가능합니다.
- 강력한 충격 저항성으로 폭발이나 충격을 견뎌내면서도 무결성을 유지합니다.
- 플루토늄이나 우라늄 반사체 차폐 케이스와 같은 임계 안전 장치에 사용됩니다.

##### 2. 군사용 탐지 장비 및 핵, 생물 및 화학 보호 장비에 사용:

전자전, 핵 탐지 및 비상 보호 분야에서 텅스텐 합금 부품은 다음과 같은 용도로 사용될 수 있습니다.

- 무인 핵 방사선 탐지 플랫폼을 위한 전자 모듈 차폐
- 보호 헬멧과 휴대용 핵 탐지기의 내부 구조적 차폐
- 레이저 무기 시스템의 광학 경로와 민감 구성 요소의 방사선 방호.

예를 들어, 일부 군용 착용형 방사선 방호 조끼는 차폐 효율성과 착용감을 모두 고려하여 기존의 납판을 대체하여 텅스텐 합금 중량 모듈을 사용하기 시작했습니다.

##### 3. 테러 방지 및 방폭 분야의 응용 분야 탐색:

도시 보안 및 테러 공격 예방 및 통제에 대한 수요가 증가함에 따라 텅스텐 합금 소재도 다음 분야에 적용하기 위해 탐색되고 있습니다.

- 방폭벽 및 방사성 물질 격리실
- 이동형 방사능원 포집 장치;
- 방사성 물질 비상 처리 상자(공항, 지하철 및 공공장소의 비상 관리에 사용).

높은 수준의 사용자 정의가 가능한 구조, 충격 저항성, 내식성 덕분에 신속한 대응 시나리오에서 실용적입니다.

#### 4.4.3 환경 보호 기술에서 텅스텐 합금 차폐의 잠재력

##### 1. 환경 방사선 감시 및 제어:

특히 원자력 사고 지역, 폐쇄된 원자력 시설, 우라늄 광산 관리, 방사성 폐기물 저장 시설 및 기타 시나리오와 같은 환경 감시 시스템에서는 환경 감마선 및 중성자 방사선을 정확하게 모니터링하고 물리적 장벽을 구축하는 것이 필수적입니다. 텅스텐 합금 차폐는 다음과 같은 용도로 사용할 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 지역 환경 모니터링 스테이션의 방사선 탐침 보호
- 핵폐기물 저장창고를 위한 모듈식 차폐
- 우라늄 찌꺼기 침출수의  $\gamma$  소스 장벽 구조.

강철이나 납과 같은 기존 소재와 비교했을 때 차폐 효율이 더 높을 뿐만 아니라 2차 오염의 위험도 낮습니다.

## 2. 납 대체의 친환경적 추세:

전 세계적으로 납 오염에 대한 환경 규제(EU RoHS, REACH, 미국 EPA 규정 등)가 점점 더 엄격해짐에 따라, 텅스텐 합금은 무독성, 재활용성, 그리고 제어 가능한 용해 처리 등의 장점으로 인해 **친환경 대체 소재의 중요한 방향으로 부상하고 있습니다**. 텅스텐 합금은 다음과 같은 일부 국가에서 친환경 방사선 물질 시스템에 포함되었습니다.

- 녹색 X선 검출 장비(납 셀 대신 텅스텐 합금 차폐막 사용)
- 환경 친화적인 핵 의료 폐기물 운송 용기;
- 재사용 가능한 텅스텐 합금 차폐 패키징 모듈.

## 3. 재생 에너지 시스템과의 협력적 적용:

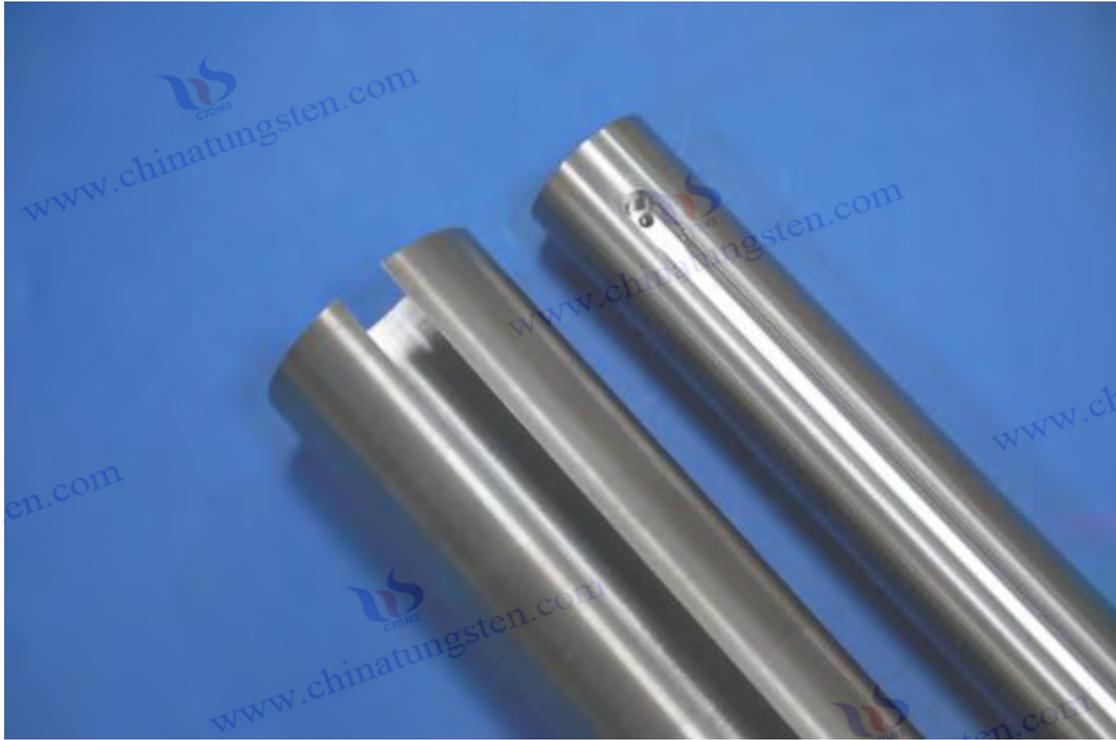
핵융합 에너지(토카막 등) 및 첨단 핵분열로 개발에서 텅스텐 합금은 차폐재뿐만 아니라 **플라즈마 차폐벽**, 중성자 감속층 등으로도 사용되며, 청정 에너지 기술과 긴밀히 통합됩니다. 예를 들어, ITER 프로젝트에서 텅스텐은 고에너지 중성자 충격에 대한 저항성을 확보하는 핵심 영역에 사용될 뿐만 아니라, 차폐재 및 구조적 복합 기능 부품으로도 활용될 것입니다.

## 요약

텅스텐 합금 차폐 부품은 기존 응용 분야를 점차 뛰어넘어 입자물리학 실험, 국방 안보, 환경 거버넌스 등 신흥 분야에서 폭넓은 발전 가능성을 보여주고 있습니다. 텅스텐 합금 차폐 부품은 고유한 고밀도, 높은 차폐 효율, 우수한 기계적 안정성, 그리고 친환경 제어 특성을 갖추고 있어 미래 다학제 융합 기술 분야에서 중요한 소재 플랫폼으로 자리매김할 것입니다.

재료 정제, 친환경 제조, 맞춤형 성형 기술의 지속적인 발전으로 텅스텐 합금은 고에너지 물리학, 극한 군사 환경, 방사능 오염 방지 및 관리, 그리고 신에너지 시스템 분야에서 더욱 광범위한 역할을 수행할 것입니다. 텅스텐 합금 차폐의 지속 가능한 개발은 과학 기술 발전, 안전 보장, 그리고 환경 거버넌스 목표와 함께 더욱 풍부하고 복잡한 응용 분야를 개척할 것입니다.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 5 장 텅스텐 합금 차폐의 과제와 해결책

### 5.1 텅스텐 합금 차폐 부품 비용 및 공급망 관리

텅스텐 합금 차폐가 의료, 산업, 항공우주 및 국방 분야에서 널리 사용되는 상황에서, 고성능을 보장하면서 제어 가능한 제조 비용과 안정적인 공급 시스템을 어떻게 구축할 것인가는 소재 제조업체와 최종 고객의 공통된 관심사가 되었습니다. 텅스텐 금속 자체가 희소 자원이기 때문에 제련 및 합금 제조 비용이 상대적으로 높고 가공 기술 요건이 엄격하기 때문에 원자재 조달, 공급망 구축, 일괄 생산 방식 및 기타 연결 과정에서 체계적인 비용 관리와 구성 최적화가 필수적입니다.

#### 5.1.1 텅스텐 합금 차폐 부품의 원자재 비용 최적화

##### 1. 텅스텐 원료의 비용 구조

텅스텐 합금 차폐 부품의 비용 구조에서 원자재는 총 비용의 약 60%~70%를 차지합니다. 주요 원자재는 다음과 같습니다.

- 텅스텐 분말(W): 고순도 텅스텐 분말의 가격은 최종 합금 비용을 직접적으로 결정하며 텅스텐 채굴, 국제 시장 상황 및 정책에 따라 크게 변동합니다.
- 합금 원소: 일반적으로 첨가되는 원소로는 Ni, Fe, Cu, Re, La 등이 있습니다. 다양한 비율과 순도 요구 사항은 원자재 가격에 영향을 미칩니다.
- 정제 및 선별 가공: 텅스텐 분말은 일반적으로 환원, 과립화, 분류, 건조와 같은 단계를 거쳐야 하며, 이로 인해 재료의 단위 비용이 증가합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. 최적화 전략

### 1. 2차 자원과 재활용 텅스텐 분말을 사용하면

재활용 텅스텐 폐기물(폐텅스텐 와이어, 텅스텐 전극, 오래된 차폐 부품 등)을 활용하여 습식야금이나 산화환원법을 통해 고순도 재활용 텅스텐 분말을 생산할 수 있습니다. 이는 원자재 비용을 10%~20% 절감할 수 있을 뿐만 아니라 환경 보호와 지속 가능한 제조 추세에도 부합합니다.

### 2. 합금 비율을 최적화하고

, 공정 검증을 통해 일부 고가의 부품을 대체합니다. 예를 들면 다음과 같습니다.

- Ni-Cu 시스템을 Ni-Fe 로 교체합니다.
- 고온 재료의 비용을 줄이기 위해 첨가되는 Re 의 양을 정밀하게 제어합니다.
- 고비용 요소를 일부 교체하기 위해 입자 강화 구조 설계를 사용합니다.

### 3. 다중 사양 원자재 조달 전략은

의료, 항공우주, 산업용 차폐와 같은 다양한 유형의 차폐 부품에 따라 다양한 등급의 원자재를 구매합니다. 예를 들어,

- 의료용으로는 고순도 텅스텐 분말( $\geq 99.95\%$ )이 필요합니다.
- 산업용으로, 산소 함량이 약간 높은 소량의 상업용 텅스텐 분말을 사용하여 그램당 가격을 조절할 수 있습니다.

### 4. 공동 조달 및 장기 계약 메커니즘을 활용하고

상류 분말 야금 회사나 광산 회사와 장기 공급 계약을 체결하면 원자재 가격 변동 위험을 고정하고 협상력을 높이는 데 도움이 될 수 있습니다.

## 5.1.2 텅스텐 합금 차폐 부품 공급망 다각화 전략

### 1. 공급망 취약성 분석

텅스텐 자원은 매우 집중되어 있으며, 중국, 러시아, 볼리비아 등이 전 세계 텅스텐 정광 생산량의 70% 이상을 차지하고 있습니다. 또한, 일부 국가들은 텅스텐 제품에 대한 수출 통제, 쿼터 제한 또는 전략적 비축 정책을 시행하고 있어 텅스텐 합금 산업은 지정학적 요인, 관세 정책, 운송 병목 현상 등 여러 요인에 취약한 상황에 처해 있습니다.

또한, 텅스텐 합금 가공 체인은 광석 채굴, 텅스텐 분말 제조, 합금 압착, 소결, 가공, 열처리, 표면 처리 등 비교적 긴 공정을 필요로 합니다. 어떤 공정이든 불안정하면 비용 증가 또는 납기 지연으로 이어질 수 있습니다.

### 2. 다양한 레이아웃 전략

#### 1. 원자재 공급을 위한 다중 채널이 병렬로 배치됩니다.

- 국내외 듀얼 채널을 통해 텅스텐 분말 및 보조 금속을 구매합니다.
- 동남아시아와 아프리카의 텅스텐 자원국들은 단일 의존도를 줄이기 위해 노력하고 있습니다.
- 비전통적 시장의 중순도 분말을 핵심이 아닌 제품에 활용하는 방법을 살펴보세요.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. 지역적 가공 센터 구축 의료 장비나 산업 센터 근처에 텅스텐 합금 차폐 부품 가공 센터나 모듈식 조립 작업장을 설립하면 현장에서 CNC 가공, 조립 및 품질 검사를 완료할 수 있어 물류 비용과 중간 재고를 줄일 수 있습니다.
3. 핵심 공정 링크는 자체 제어와 아웃소싱 간의 균형을 이루어 핵심 링크(소결 및 정밀 가공 등)에 대한 자체 생산 능력을 확보하고, 비핵심 공정(거친 가공 및 표면 처리 등)에 대한 전략적 아웃소싱을 통해 유연한 용량 할당을 달성하여 전체 공급망의 유연성을 향상시킵니다.
4. 디지털 공급망 관리 플랫폼은 ERP 및 MES 시스템을 사용하여 원자재 조달, 재고 수준, 주문 전달, 품질 추적의 전체 프로세스를 디지털 방식으로 모니터링하여 정보 투명성과 협업 효율성을 개선하고 공급망 중복을 줄입니다.

### 5.1.3 텅스텐 합금 차폐 부품의 대량 생산의 경제적 이점

#### 1. 대량 생산과 단위 비용의 관계

텅스텐 합금 차폐 부품은 여러 정밀 가공과 고온 처리 링크가 복잡하게 얽혀 있으며, 설비 투자 비용도 높습니다. 그러나 설비 가동률이 향상되고 공정이 표준화되면 규모의 경제 효과가 뚜렷하게 나타나며, 구체적으로 다음과 같은 효과가 나타납니다.

- 향상된 재료 활용(폐기물은 재활용 가능)
- 금형, 도구 및 고정 장치는 비용을 분산하기 위해 재사용될 수 있습니다.
- 열처리와 다중 스테이션 가공 센터를 병행하여 사용하여 출력 효율을 향상시킵니다.
- 운영 손실과 재작업 비용을 줄이기 위해 운영 및 품질 관리 프로세스를 표준화합니다.

업계 경험에 따르면, 월 생산량이 1,000 개를 넘으면 (부품의 복잡도에 따라 다름) 단위 제조 비용을 15%~30%까지 줄일 수 있습니다.

#### 2. 맞춤형 및 표준화의 협업적 최적화

텅스텐 합금 차폐 부품은 대부분 맞춤형 제품이지만 모듈식 설계와 표준 부품 조립 사고를 통해 소량 생산 맞춤형 생산과 대량 생산 표준 부품 협업 생산을 고려할 수 있습니다.

- 통합된 인터페이스와 치수를 갖춘 표준 차폐 모듈을 개발합니다.
- 내부 구조나 기능적 구성요소를 교체하면 개인화된 기능을 구현할 수 있습니다.
- 시험 생산 투자와 주기를 줄이기 위한 초기 프로토타입 개발 수단으로 3D 프린팅 텅스텐 합금 차폐 샘플을 도입합니다.

이러한 "표준 + 맞춤형" 병행 전략은 R&D 및 검증 비용을 통제하고, 고객 대응 속도를 개선하며, 시장 경쟁력을 강화하는 데 도움이 됩니다.

#### 3. 시장과 기술 주도의 시너지 성장

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전 세계 방사선 안전 기준의 향상과 고급 제조 시장의 확대에 따라 텅스텐 합금 차폐 부품은 "소량 생산, 강력한 맞춤화"라는 고급 틈새 시장에서 점차 산업 장비, 토목 시험, 웨어러블 기기 등 중·고급 대중 시장으로 진출하고 있으며, 다음과 같은 추세를 보이고 있습니다.

- 스마트 의료 영상 장비 시장에서는 소형화된 차폐 구조에 대한 수요가 많습니다.
- 산업 자동화 광선 검출 장비의 지지 부품을 위한 범용 모듈 조달
- 항공우주 및 군사 플랫폼용 텅스텐 합금 부품 시장이 꾸준히 성장해 왔습니다. 시장 수요의 엄청난 성장은 제조 공정의 지속적인 최적화와 비용의 지속적인 감소로 이어져 긍정적인 순환을 형성합니다.

## 요약

텅스텐 합금 차폐는 고성능 소재 분야에서 대체 불가능한 소재이며, 그 비용 및 공급망 관리 역량은 글로벌 시장에서 기업의 경쟁력을 직접적으로 좌우합니다. 원자재 선정 및 비율을 최적화하고, 다각화되고 견고한 공급망 네트워크를 구축하며, 대규모 생산 모델 실현을 촉진함으로써 제조 비용을 효과적으로 관리하고 납품 효율성을 향상시킬 뿐만 아니라 기업의 위험 저항성과 기술 서비스 대응 역량을 강화할 수 있습니다.

미래에는 재활용 텅스텐 분말의 활용, 녹색 야금 기술의 발전, 산업 디지털화로 인해 텅스텐 합금 차폐 부품의 제조가 더욱 효율적이고 유연하며 지속 가능해질 것이며, 더 광범위한 분야에서 대중화되고 응용될 수 있는 튼튼한 토대가 마련될 것입니다.

## 5.2 텅스텐 합금 차폐 부품의 가공 정확도 및 기술적 어려움

텅스텐 합금은 대표적인 난가공 소재입니다. 텅스텐 합금 차폐 부품 제조 공정에서는 높은 경도, 높은 취성, 높은 밀도로 인한 절삭 및 성형의 어려움을 극복해야 할 뿐만 아니라, 복잡한 구조물의 고정밀 가공과 우수한 표면 품질을 달성해야 합니다. 이러한 과제를 해결하기 위해서는 장비 구성, 공구 선택, 가공 변수, 후가공 기술 등의 포괄적인 최적화와 기존 가공 기술의 한계를 극복하기 위한 적층 제조(3D 프린팅)와 같은 첨단 제조 기술의 도입이 필요합니다.

### 5.2.1 텅스텐 합금 차폐용 고경도 재료의 가공 과제

#### 1. 텅스텐 합금의 가공 특성 및 가공의 어려움

텅스텐 합금은 일반적으로 텅스텐(W)을 모재로 하고 일정 비율의 Ni, Fe, Cu, Re 및 기타 금속으로 구성된 고밀도 합금 소재를 말합니다. 일반적인 특성은 다음과 같습니다.

- **높은 경도와 높은 용점** : 경도는 최대 320~380 HV, 용점은 3400° C 이상입니다.
- **높은 취성 및 낮은 가소성** : 특히 낮은 온도 또는 어닐링 없이는 모서리가 무너지거나 균열이 생기기 쉽습니다.
- **높은 밀도와 높은 열전도도** : 처리 장비에 추가적인 관성 및 열 관리 문제를 야기합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 산화 및 표면 경화가 쉽습니다 . 고온 절단이나 연삭 시 산화물 층이나 소결된 단단한 껍질이 쉽게 생성됩니다.

## 2. 기존 가공 기술의 과제

### 1. 선삭 및 밀링

텅스텐 합금은 선삭 및 밀링 가공 시 큰 저항성을 보입니다. 일반적인 문제는 다음과 같습니다.

- 공구는 빨리 마모되며 일반 초경 공구의 수명은 짧습니다.
- 가공된 표면에는 미세균열이나 모서리 붕괴가 발생할 가능성이 높습니다.
- 절단열이 집중되어 열변형이 쉽게 일어날 수 있습니다.
- 칩 배출이 어렵고 칩이 짧고 딱딱하여 공구나 작업물이 손상될 수 있습니다.

**대책** : 코팅된 세라믹 공구와 다이아몬드 공구를 사용한다. 절삭유의 종류와 흐름을 최적화한다. 단일 공급량과 절삭 깊이를 제어한다. 저속, 고토크 공작 기계를 도입한다.

### 2. 연삭 및 전기 스파크 가공(EDM)

텅스텐 합금은 미세 연삭 및 EDM 을 통해 기하학적 정확도를 달성하는 데 적합하지만 다음과 같은 문제도 있습니다.

- 높은 분쇄율, 심각한 분쇄 휠 마모;
- EDM 공정 중에는 표면 미세균열과 방전 구멍이 쉽게 발생합니다.
- 과도한 열영향부(HAZ)는 기계적 특성 감소로 이어진다.

**개선 방법** : 초경 연삭 휠(CBN, 다이아몬드 등)을 사용합니다. 연삭 휠 마모를 제어하기 위해 여러 차례 미세 연삭을 수행합니다. 펄스 EDM 을 사용하여 열 입력을 제어합니다. 후처리를 사용하여 열 영향층을 제거합니다.

## 5.2.2 텅스텐 합금 차폐를 위한 3D 프린팅 기술의 응용 가능성

### 1. 텅스텐 합금 차폐를 위한 적층 제조의 장점

텅스텐 합금은 복잡한 구조, 높은 정밀도 요구 조건, 그리고 작은 가공 여유를 가지고 있어 적층 제조(AM)를 통해 기존 공정 문제를 해결하는 데 적합합니다. 주요 장점은 다음과 같습니다.

- **자유로운 구성** : 복잡한 채널 및 내장된 캐비티의 차폐 모듈 설계에 적합합니다.
- **재료 낭비 감소** : 고밀도 텅스텐 합금 원료는 비싸지만, 3D 프린팅은 거의 원형에 가까운 형상을 구현합니다.
- **가공 정확도 향상**: 소량 생산 및 고도로 복잡한 제품의 맞춤 생산에 적합합니다.
- **최적화된 열 응력 관리** : 층별 증착으로 열 입력을 제어하고 열 균열 위험을 줄입니다.

### 2. 핵심 기술 경로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. 선택적 레이저 용융(SLM)

현재 주류를 이루는 텅스텐 합금 3D 프린팅 기술은 SLM 으로, 고에너지 레이저 빔을 통해 텅스텐 기반 합금 분말을 선택적으로 용융하고 이를 층층이 쌓아 고밀도(>98%) 부품을 제작합니다. SLM 의 과제는 다음과 같습니다.

- 분말 구형화 및 유동성 제어
- 균열을 일으키려면 온도와 속도 조절이 필요합니다.
- 내부 응력을 제거하고 인성을 강화하기 위한 후처리.

2. 전자빔 용해(EBM)는 열간 등방성 성형(HIP) 기술과 결합되었습니다. EBM 은 고용점 재료에 적합하며 가공 분위기에서 쉽게 산화되지 않습니다. HIP 와 결합하면 기공과 미세 균열을 더욱 제거하고 밀도와 기계적 강도를 향상시킬 수 있습니다.

3. 바인더 제트 + 소결은

휴대용 차폐 모듈이나 중성자 유도 부품과 같이 구조적 강도 요건이 낮은 소형 차폐 부품에 사용됩니다. 제조 비용이 낮고 속도가 빠르며 대량 맞춤 제작에 적합합니다.

3. 기술적 병목 현상 및 솔루션

- 잔류응력 제어 : 스캐닝 전략 및 예열 시스템 최적화
- 분말 제조의 어려움 : 산소 함량이 낮고 구형도가 높은 텅스텐 분말을 개발합니다.
- 성형 후 높은 균열 민감성 : W-Ni-Fe 와 같은 특정 가소성을 갖는 인쇄 가능한 텅스텐 합금을 개발합니다.
- 치수 안정성 문제 : 인쇄-열처리-가공 연계에 대한 보정 메커니즘을 확립한다.

5.2.3 텅스텐 합금 차폐 부품의 정밀 제어 및 표면 품질

1. 가공정밀도 관리 요구사항

텅스텐 합금 차폐 부품은 구조적으로 높은 형상 및 위치 정확도와 접합 안정성을 갖춰야 합니다. 일반적인 요구 사항은 다음과 같습니다.

- 동축성 및 평탄도 허용오차 <0.02mm
- 구멍 크기 오차 <±0.01 mm
- 얇은 벽의 부품은 변형에 대한 높은 저항성이 필요합니다.
- 다중 모듈 스플라이싱은 구조적 대칭성과 밀봉을 유지해야 합니다.

2. 표면 품질 개선 전략

1. 가공 마무리 전략은

고정밀 CNC 가공 센터를 사용하고, 작은 이송, 낮은 절삭 깊이, 충분한 냉각수 및 전용 고정 시스템을 결합하여 열 변형 및 진동으로 인한 오류를 효과적으로 줄입니다.

2. 표면 거칠기 Ra 가 0.2~0.8 μm 인 고급 차폐 부품의 경우, 전기화학 연마 및 마이크로 쇼트 피닝 기술은

표면 균질화를 위해 텅스텐 합금 특수 전해액을 사용하여 미세 균열과 절삭

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

흔적을 제거하는 경우가 많습니다. 유리 비드 또는 세라믹 쇼트 피닝과 함께 사용하면 표면 압축 응력을 높이고 피로 저항성을 향상시킬 수 있습니다.

### 3. 표면 코팅 및 도금 최적화

- 의료장비 차폐부품의 경우 TiN, CrN 등의 무독성 코팅을 추가할 수 있습니다.
- 항공우주 차폐 구성품은 SiC 및 ZrO<sub>2</sub>와 같은 세라믹 코팅을 사용하여 열 반사 및 산화 방지 성능을 강화할 수 있습니다.
- 니켈-구리 전도성 코팅을 추가하면 전자파 적합성(EMC) 요구 사항에 따라 전자파 누설을 줄일 수 있습니다.

### 4. 표면 결함 비파괴 검사 기술은

초음파 스캐닝, X선 비파괴 검사, 3차원 측정(CMM) 및 광 간섭계를 통합하여 주요 치수와 인터페이스 조건이 설계 표준을 충족하는지 확인합니다.

## 요약

텅스텐 합금 차폐 부품은 성능 신뢰성과 엔지니어링 적응성을 결정하는 핵심 요소입니다. 원자재 절단부터 고정밀 성형, 그리고 적층 제조의 선구적 탐구에 이르기까지, 전체 가공 과정은 고경도 소재와 복잡한 구조의 가공 어려움이라는 과제에 직면합니다.

기존 공정 최적화, 새로운 3D 프린팅 기술 도입, 그리고 정밀도 및 표면 제어 방법 개선을 통해 텅스텐 합금 차폐 부품의 가공 정확도는 지속적으로 한 단계 더 발전해 왔습니다. 앞으로 고성능 공구 소재 개발, 적층 제조 매개변수 라이브러리 개선, 그리고 지능형 감지 시스템 적용을 통해 텅스텐 합금 차폐 부품의 고정밀 제조는 더욱 경제적이고, 적응력 있으며, 재현성이 향상되어 고급 제조, 첨단 의료, 그리고 심우주 탐사 분야에서 꾸준히 발전하는 데 기여할 것입니다.

## 5.3 텅스텐 합금 차폐 표준화 및 인증 문제

텅스텐 합금 차폐 부품은 의료 장비, 산업 탐지, 항공우주 및 원자력 방호 등 핵심 분야에서 널리 사용되므로, 제조 및 적용은 과학적이고 통일되며 실행 가능한 표준 시스템을 따라야 합니다. 그러나 현재 업계는 표준의 단편화, 국가 간 표준 상호 인정 부족, 새로운 "스마트 차폐 부품"에 대한 체계적인 인증 시스템 부재 등의 문제점을 안고 있으며, 이는 국제 무역, 제품 교환, 품질 평가 및 안전 감독에 상당한 어려움을 야기합니다.

이 장에서는 표준 시스템 구축의 핵심 문제에 초점을 맞추고, 현재 국제 표준과 국내 표준의 차이점, 지능형 텅스텐 합금 차폐 구성 요소의 표준화 진행 상황, 그리고 글로벌 협업과 통합 표준을 촉진하기 위한 실행 가능한 경로를 살펴봅니다.

## 텅스텐 합금 차폐에 대한 국제 표준과 국내 표준의 차이점

### 1. 기존 표준 개요

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전 세계적으로 텅스텐 합금 차폐 부품에 대한 통일된 독립 표준은 없습니다. 관련 기술 사양은 주로 다음 분야에 분산되어 있습니다.

- **일반 재료 표준** : ASTM B777(텅스텐 중합금에 대한 표준 사양), ISO 9001(품질 관리 시스템), GB/T 14841(텅스텐 및 텅스텐 합금의 분류) 등
- **응용 프로그램 지향 표준** :
  - 의료 방사선 방호: IEC 60601, ISO 11137, YY/T 1554;
  - 핵산업 보호: ISO 7195(핵물질), IAEA RSG-1.7;
  - 산업용 X선 검출 장비: ASTM E181, GB/T 19802;
- **가공 및 시험 표준** : ISO 2768(허용 오차), GB/T 16865(소결 금속 분말 제품에 대한 시험 방법), ASTM E10(브리넬 경도 시험) 등.

텅스텐 합금은 차폐재로서 점점 더 중요해지고 있지만, 강력한 교차 절단 특성과 복잡한 적용 시나리오로 인해 텅스텐 합금 차폐 부품에 대한 독립적이고 체계적이며 산업에 적용 가능한 표준 시스템이 아직 확립되지 않았습니다.

## 2. 중국 표준과 외국 표준의 차이점

### 1. 다양한 명명 및 분류 방법 :

국제 표준은 대부분 재료 밀도와 구성 요소 분류(예: ASTM B777의 1-4 등급)를 기반으로 하는 반면, 중국 표준은 종종 공정 방법 및 등급(예: W-Ni-Fe 합금, WCu 시리즈)에 따라 구분되어 동일한 재료에 대한 명명 및 적용성에 차이가 있습니다.

### 2. 성능 지수는 분명히 다릅니다 .

유사한 텅스텐 합금 차폐재의 경우, 해외 표준은 내방사선성, 밀도 일관성, 비파괴 검사에 대해 더 엄격한 요건을 요구합니다. 예를 들어, ASTM B777은 밀도 오차 허용치를  $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 로 제한하는 반면, 일부 국내 표준은  $\pm 0.3 \text{ g/cm}^3$ 의 오차를 허용합니다.

### 3. 다양한 시험 방법 및 장비 표준 :

일부 국제 표준은 첨단 CT 스캐닝, X선 3차원 이미징, 그리고 완전 자동 CMM 시험 시스템을 사용하는 반면, 일부 국내 기업들은 여전히 수동 시험이나 즉석 시험에 의존하고 있습니다. 표준 구현 방식의 차이로 인해 제품 해외 무역 인증에 많은 어려움이 있습니다.

### 4. 환경 및 안전 기준의 불일치 :

외국 기준은 RoHS, REACH 및 무연 환경 보호 요구 사항을 강조하는 반면, 중국은 현재 의료용 및 친환경 차폐 부품을 수출할 때 추가적인 녹색 인증 지침을 요구하여 수출 비용이 증가하고 인증 절차에 걸리는 시간이 늘어납니다.

## 5.3.2 텅스텐 합금 스마트 차폐 부품 표준화의 과제

방사선 제어 기술, 마이크로 전자 임베딩 및 재료 감지 기술의 발전으로 지능형 텅스텐 합금 차폐 부품은 고급 의료, 우주선, 원자력 지능형 원자로 및 기타 분야에서 점차 사용되고 있습니다. 이러한 차폐 부품은 일반적으로 다음과 같은 기능을 통합합니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **센서 및 모니터링 시스템** : 방사선 강도, 온도, 진동 등을 실시간으로 감지합니다.
  - **적응형 대응 메커니즘** : 재료 구조 변형이나 전자 제어 부품을 통해 차폐 각도를 조정합니다.
  - **통신 및 데이터 수집 기능** : 상위 제어 시스템과의 연계 제어를 실현합니다.
- 이러한 새로운 특성은 기존의 '물리적 형태'와 '밀도 지수' 중심의 재료 기준 체계가 더 이상 제품의 품질과 안전성을 종합적으로 평가하기에 충분하지 않다는 것을 의미합니다.

**현재 표준 차이는 주로 다음 부분에 집중되어 있습니다.**

1. 예는 감지 정확도, 전자파 간섭 안정성, 응답 지연 시간, 데이터 보안 수준 등과 같은 **평가 지표 체계가 부족합니다** .
2. **복합구조에 대한 기준 미비** : “텨스텐합금+센서+코팅”의 다층구조 차폐부품의 기계적 안정성, 계면강도, 열팽창수축 적합성 등에 대한 체계적인 평가방법이 존재하지 않습니다.
3. **소프트웨어 및 하드웨어 통합 표준 부족** : 예를 들어, 데이터 전송 인터페이스, EMC 호환성, 기능 검증 프로토콜에 대한 통합 표준이 부족합니다.
4. **제품 수명 주기 테스트와 고장 모드 인증은 아직 확립되지 않았습니다** . 스마트 차폐 구성 요소의 수명 예측, 노화 평가 및 극한 환경에서의 안정성에 대한 기술 사양이 없습니다.

**탐색 경로:**

- 산업 리더, 대학 및 연구 기관이 주도하여 “지능형 텨스텐 합금 차폐 구성 요소에 대한 일반 사양”을 공동으로 공식화했습니다.
- 스마트 단말 및 의료기기 분야에서 IEC, ISO의 표준 프레임워크를 참조하여 호환성이 높은 인증 모델을 구축합니다.
- 예측 유지 관리 및 오류 경고와 같은 분야에 인공 지능의 평가 지표를 통합하여 표준 정의의 경계를 확장합니다.

**텨스텐 합금 차폐 부품의 글로벌 협력 및 표준화**

### 1. 표준의 상호인정 메커니즘을 촉진한다

현재 텨스텐 합금 차폐 부품의 수출은 다음과 같은 많은 국가에서 인증 장벽에 직면해 있습니다.

- **EU CE 인증**에는 추가적인 RoHS 및 ISO 13485가 필요합니다.
- **미국 FDA/NRL**에서는 세부적인 안전 시험 보고서를 요구합니다.
- **일본의 METI 인증 제도**는 전자파 누출과 환경 위해성 평가를 강조합니다.
- **중국의 CCC 인증**은 아직 이런 제품에는 적용되지 않습니다.

텨스텐 합금 차폐 부품의 국경 간 무역의 효율성과 신뢰도가 크게 향상될 것입니다.

**푸시 방법:**

- 재료 시험 연구소의 국제 연합 설립(예: ILAC-MRA 가입)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- ISO/ASTM/IEC 및 기타 기관과 중국 국가표준화국 간의 양자 표준 전환을 촉진합니다.
- 국내 선도 기업이 주도적으로 국제 표준 초안을 제안하고 중국의 솔루션을 세계에 홍보하도록 장려합니다.

## 2. 글로벌 표준 협업 플랫폼 구축

전 세계 텅스텐 합금 차폐 부품 생산 능력은 주로 중국, 독일, 미국, 일본, 한국에 집중되어 있지만, 표준 소통은 상대적으로 취약합니다. 다음과 같은 방법을 통해 시너지 효과를 강화하는 것이 좋습니다.

1. 표준 설정, 데이터 공유, 시험 검증, 지적 재산권 보호 등을 포괄하는 "글로벌 텅스텐 합금 차폐 표준 위원회(WASCC)"와 같은 국제 산업 협력 연합을 구축합니다 .
2. 다양한 국가의 규제 기관, 제조업체, 사용자 대표를 초대하여 정기적인 국제 표준 포럼과 워크숍을 개최합니다 .
3. 표준에 대한 오픈 액세스를 장려 하고 연구자, 엔지니어 및 인증 기관이 표준 업데이트 프로세스에 참여하도록 장려합니다.
4. 중소기업의 참여 문턱을 낮추기 위해 국제 다국어 표준 툴킷(ISO 표준 번역 모듈, 인증 흐름도 등)을 개발합니다 .

## 요약

첨단 보호 소재인 텅스텐 합금 차폐 부품의 품질과 신뢰성은 표준 시스템의 지원에 크게 의존합니다. 현재의 글로벌 표준 시스템은 여전히 단편적이고 상호 연계되어 있어 제품 간 호환성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 국경 간 무역 및 지능형 제조 혁신을 저해합니다. 통합적이고 과학적이며 개방적인 표준 프레임워크 구축은 텅스텐 합금 산업의 고품질 발전을 위한 핵심 고리가 되었습니다.

앞으로는 세 가지 측면에서 이를 추진해야 합니다. 첫째, 국내 표준과 국제 표준의 상용 및 통합을 최적화합니다. 둘째, 지능형 개발을 위한 기능적 차폐 표준 제정을 가속화합니다. 셋째, 글로벌 협력 및 상호 인정을 위한 표준 연합 플랫폼을 구축합니다. 표준, 인증, 제조의 심층적인 통합을 달성해야만 텅스텐 합금 차폐 부품이 고급 보호 장비 및 친환경 제조 시스템의 새로운 시대에 진정한 글로벌 품질 관리 접근을 확보할 수 있습니다.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.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)



## 부록

### 부록 1: 텅스텐 합금 차폐에 대한 일반 용어 및 기호

고성능 방사선 방호 재료인 텅스텐 합금 차폐재의 제조, 설계 및 적용에는 다양한 전문 용어, 물리적 기호 및 표준화된 개념이 사용됩니다. 본 부록은 독자들이 본문을 읽는 과정에서 관련 내용을 정확하게 이해할 수 있도록, 기술자, 과학 연구자 및 표준 제정자들이 참고할 수 있도록 텅스텐 합금 차폐재의 일반적인 용어, 기호 및 적용 중요성을 체계적으로 설명하기 위해 특별히 구성되었습니다.

#### 1.1 텅스텐 합금 차폐 용어 정의 및 적용 시나리오

용어	정의	적용 시나리오 및 설명
텅스텐 중합금(WHA)	텅스텐(W)을 주성분으로 하고 Ni, Fe, Cu 등의 합금 원소를 도핑한 고밀도 소재( $\geq 90\%$ 차지)	의료용 CT 차폐 모듈, 산업용 결합 탐지 보호 커버, 군용 밸런스 블록
차폐 효율	특정 유형의 방사선( $\gamma$ , X, $\beta$ , 중성자 등)을 감쇠시키는 물질의 능력으로, 일반적으로 감쇠율 또는 침투 계수로 표현됩니다.	의료 장비 캐빈, 핵 탐지기 쉘
비중/밀도(Density, $\rho$ )	재료의 단위 부피당 질량은 일반적으로 텅스텐 합금의 경우 $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 입니다.	보호력 및 체중 조절 측정을 위한 핵심 지표

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

선형 감쇠 계수( $\mu$ )	단위 두께당 특정 방사선 강도에 대한 재료의 감쇠 능력을 설명합니다( $\text{cm}^{-1}$ ).	차폐 설계 계산 및 방사선량 시뮬레이션에 사용됨
최소 차폐 두께( $d_{\text{min}}$ )	특정 방사선 강도 및 에너지 조건에서 지정된 수준의 방사선 보호를 달성하는데 필요한 최소 재료 두께	핵의학, 방사선 연구실 등에서 쉘을 차폐하도록 설계되었습니다.
스마트 차폐 장치	내장된 센서와 전자 제어 구조로 차폐 구성 요소의 실시간 모니터링 및 피드백 조정이 가능합니다.	우주선, 지능형 방사선 치료 장비, 이동형 핵 탐지 단말기
비열( $c_p$ )	온도가 1K 상승할 때 재료의 단위 질량이 흡수하는 열량( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )	열안정성 평가, 연속방사 작업환경 적응성 시험
방사선 누출률	차폐막의 단위 면적당 단위 시간당 유효 선량률( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	특히 의료용 방사선 장비 인증 과정에서의 안전 성능 테스트
소결 밀도	소결 제품의 밀도와 이론 밀도의 비율은 내부 기공 제어를 반영합니다.	차폐부의 강도와 방사선 방호 효율을 결정하는 품질 검사 지표 중 하나
저활성 합금	고에너지 방사선 노출 후 빠른 방사성 붕괴와 낮은 잔류 활성을 갖는 합금	ITER 실험로 부품 등 방사성 환경물질 재활용에 활용

## 1.2 텅스텐 합금 차폐

텅스텐 합금 차폐 성능 평가 및 구조 설계에는 다양한 수학적 표현과 기호가 필요합니다. 다음은 일반적인 수식과 그 설명입니다.

### 일반적인 물리학 및 재료 기호

상징	의미의 설명	단위
$\rho$	재료 밀도	$\text{g}/\text{cm}^3$ 또는 $\text{kg}/\text{m}^3$
$\mu$	선형 감쇠 계수	센티미터 <sup>-1</sup>
$d$	재료 두께	센티미터
$I_0$	입사광선 강도	모든 복용량 단위
$I$	침투 후 광선의 강도	$I_0$ 와 같은 단위
HV	비커스 경도	$\text{kgf}/\text{mm}^2$
시그마 $\gamma$	항복 강도	엠폴
$\eta$	차폐 효율	%(백분율)
T	온도	K 또는 $^{\circ}\text{C}$

### 일반적인 계산 공식

1. 광선 감쇠 공식(Beer-Lambert 법칙) :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

설명: 입사 강도는  $I_{0I0}$  이고, 두께  $dd$ 의 텅스텐 합금을 통과한 후 남은 강도는  $II$  입니다.

응용 분야: 필요한 텅스텐 합금 차폐 두께를 결정하는 데 사용됩니다.

2. 차폐 효율 계산 공식 :

$$\eta = (1 - I / I_0) \times 100\%$$

텅스텐 합금 차폐의 방사선 감쇠율을 나타냅니다.

일반적으로 실험실 테스트 데이터 변환 및 차폐 수준 평가에 사용됩니다.

3. 이론 밀도(합금) 계산 공식 (다상 재료에 대한 근사치):

$$\rho_{\text{합금}} = \sum (w_i \cdot \rho_i)$$

여기서  $w_i$ 는 각 구성 요소의 질량 분율이고  $\rho_i$ 는 각 구성 요소의 밀도입니다.

합금 설계 및 분말 비율 예측에 사용됩니다.

4. 소결 밀도 계산 공식:

$$\text{밀도} = \rho_{\text{이론적 밀도}} / \rho_{\text{소결 밀도}} \times 100\%$$

분말야금 텅스텐 합금의 품질 일관성과 기공 제어 수준을 평가하는 데 사용됩니다.

1.3 텅스텐 합금 차폐 부품 표준화 진행

1. 국제표준화체계의 발전

텅스텐 합금 차폐에 대한 글로벌 통합 표준은 없지만 다음 표준은 전 세계적으로 중요한 참고 가치를 갖습니다.

표준 번호	이름	설명하다
ASTM B777	텅스텐 중합금에 대한 표준 사양	텅스텐 중합금의 분류, 물리적 특성 및 가공 요구 사항
ISO 7195	핵연료 기술 - 핵 등급 지르코늄 합금	핵 등급 재료에 적용 가능, 일부 차폐 구성 요소 평가를 참조하세요.
IEC 60601	의료 전기 장비 - 일반 요구 사항	의료용 방사선 방호 구조물이 충족해야 하는 안전 기준
ASTM E181	재료의 방사선 감쇠에 대한 표준 시험 방법	주로 X 선 및 감마선 차폐재 검증에 사용
국제원자력기구(IAEA) TS-G-1.1	방사선 방호 및 방사선원의 안전	IAEA 방사선 안전에 관한 일반 지침

요약

텅스텐 합금 차폐 부품은 엄격한 용어 정의, 정확한 수학적 모델링, 그리고 표준화된 표준 시스템과 불가분의 관계에 있습니다. 용어를 통일하고, 기호 관계를 명확하게 표현하며, 국제 표준 동향을 이해함으로써 연구자와 엔지니어는 차폐 부품의 설계 및 개발, 품질 관리, 그리고 국가 간 협력 분야에서 더욱 높은 수준의 전문적인 협업을 달성할 수 있습니다.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

텅스텐 합금 차폐와 관련된 연구는 지속적으로 개선되어 산업의 표준화와 국제화를 촉진하는 중요한 기반이 될 것입니다.

## 부록 2: 텅스텐 합금 차폐에 대한 국제 및 국내 표준(ISO/ASTM/GB)

텅스텐 합금 차폐 부품은 품질, 안전 및 성능을 보장하기 위해 관련 표준을 엄격히 준수해야 합니다. 전 세계적으로 텅스텐 합금 차폐 부품에 대한 단일 특별 표준은 없지만, 많은 ISO, ASTM, IEC 표준이 재료 특성, 시험 방법 및 안전 요건에 대한 명확한 규정을 가지고 있습니다. 최근 몇 년 동안 중국은 GB 및 산업 표준을 적극적으로 제정 및 개선하여 체계적인 규격 체계를 점진적으로 구축해 왔습니다.

본 부록은 텅스텐 합금 차폐 분야의 주요 국제 및 국내 표준을 종합적으로 정리하고, 그 기술적 의미를 심층적으로 분석하며, 표준화의 미래 발전 방향을 전망하는 것을 목적으로 한다.

### 2.1 텅스텐 합금 차폐

#### 2.1.1 재료 특성 및 사양

- **ASTM B777 — 텅스텐 중합금 표준 사양**

이 표준은 텅스텐 중합금의 재료 조성, 물리적 특성, 기계적 특성 및 미세 구조 요건을 자세히 정의합니다. W-Ni-Fe 및 W-Ni-Cu 와 같은 주요 등급을 포괄하며, 밀도( $\geq 17.0 \text{ g/cm}^3$ ), 경도, 인장 강도 및 연성을 명시합니다. 텅스텐 합금 차폐재 선정에 대한 권위 있는 기준을 제공합니다.

- **ISO 7195 - 핵연료 기술 - 핵 등급 지르코늄 합금은**

주로 지르코늄 합금을 기반으로 하며, ISO 7195 에 명시된 핵 물질의 시험 방법, 품질 관리 및 방사선 안정성 평가는 텅스텐 합금 차폐 부품의 핵 안전 검증을 위한 참고 자료를 제공합니다.

#### 2.1.2 차폐 성능 및 안전 기준

- **ASTM E181 - 재료의 방사선 감쇠에 대한 표준 시험 방법**

이 표준은 X선 및 감마선 재료 차폐 성능에 대한 시험 프로세스 및 데이터 분석을 명시하고 있으며, 텅스텐 합금의 차폐 효율을 평가하는 데 중요한 참고 자료입니다.

- **IEC 60601 - 의료 전기 장비 - 기본 안전 및 필수 성능에 대한 일반 요구 사항은**

의료용 텅스텐 합금 차폐 구성 요소의 방사선 누출 한도, 기계적 강도 및 전자파 적합성에 대한 구체적인 요구 사항을 제시하는 의료 장비 안전 표준입니다.

- **IAEA 안전 기준(예: GSR Part 3)**

은 국제원자력기구(IAEA)의 방사선 방호 안전 지침으로, 차폐재 설계 원칙과

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사용 환경 사양을 다루며, 텅스텐 합금 차폐 핵 안전에 대한 전 세계적으로 권위 있는 참고 자료를 제공합니다.

### 2.1.3 처리 및 테스트 표준

- ISO 2768 - 일반 허용 오차  
이 표준은 텅스텐 합금 차폐 부품의 치수 허용 오차 관리에 적용되어 제조 정확도가 기술적 요구 사항을 충족하는지 확인합니다.
- ASTM E10 - 금속 재료의 브리넬 경도에 대한 표준 시험 방법은  
주로 텅스텐 합금 차폐 재료의 경도를 시험하여 재료 경도가 설계 사양을 충족하는지 확인하는 데 사용됩니다.
- ASTM B930 - 텅스텐 중합금 제작을 위한 표준 가이드는  
차폐 부품의 고품질 제조를 지원하기 위해 텅스텐 중합금 가공, 용접, 열처리 등에 대한 기술 지침을 제공합니다.

## 텅스텐 합금 차폐에 대한 국내 표준에 대한 자세한 설명

### 2.2.1 재료 및 분류 기준

- GB/T 14841 — 텅스텐 및 텅스텐 합금의 분류 및 표시  
이 표준은 텅스텐 및 텅스텐 합금 재료를 체계적으로 분류하고, 명명 규칙과 기본 성능 매개변수를 명시하며, 국내 텅스텐 합금 산업의 기본 재료 표준입니다.
- GB/T 19802 — 산업용 비파괴 검사 장비용 방사선 차폐 부품에 대한 일반 규칙은  
산업용 방사선 검출 장비용 차폐 부품의 설계 원칙, 성능 지표 및 시험 방법을 명시합니다. 이는 산업 분야에서 텅스텐 합금 차폐 부품 제조의 중요한 기반이 됩니다.

### 2.2.2 의료 분야 표준

- 텅스텐 합금 차폐 모듈에 대한 기술적 요구 사항 및 시험 방법  
이 표준은 의료 기기가 국가 의료 안전 표준을 충족하는지 확인하기 위해 의료용 방사선 방호 텅스텐 합금 차폐 모듈에 대한 밀도, 두께, 기계적 특성, 차폐 효율 및 생물 안전성과 같은 세부적인 지표를 설정합니다.
- 환자와 의료진의 방사선 안전을 보장하기 위해 텅스텐 합금을 포함한 다양한 방사선 방호 재료에 대한 안전 및 성능 요구 사항을 제시합니다.

### 2.2.3 프로세스 및 테스트 표준

- T/CSTM 00259 - 고밀도  
텅스텐 합금 제품에 대한 일반 기술 사양은 중국재료시험협회에서 발행한 것으로, 텅스텐 합금 차폐 부품의 재료 특성 시험, 치수 정확도, 내부 결함 제어 및 표면 품질 표준을 자세히 규정하고 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- GB/T 34540 - 금속 분말 소결 재료 시험 방법  
에는 텅스텐 합금 분말의 소결 밀도, 기공률 및 경도 시험이 포함되어 있으며, 이는 분말 야금 텅스텐 합금 차폐 부품의 제조 품질 관리를 위한 중요한 기술 지원입니다.

## 2.3 텅스텐 합금 차폐 부품 표준화를 위한 미래 계획

### 2.3.1 지능형 차폐 부품에 대한 표준 수립

지능형 감지 및 데이터 통합 기술의 발전으로 텅스텐 합금 차폐 부품은 점차 "지능형 차폐 부품"으로 진화하고 있습니다. 향후 표준은 다음을 포함해야 합니다.

- 스마트 차폐 구성 요소에 대한 기능적 안전 및 성능 검증 사양
- 센서 통합을 위한 환경 적응성 시험 표준;
- 데이터 인터페이스, 통신 프로토콜 및 보안 보호 관련 표준입니다.

중국 과학기술부와 국가표준국은 스마트 소재 및 스마트 장비와 관련된 표준 개발을 시작했으며, 텅스텐 합금 스마트 차폐 구성품에 대한 표준이 핵심 연구 프로젝트에 포함될 예정입니다.

### 2.3.2 녹색 제조 및 환경 보호 표준

친환경 제조는 세계적인 제조 발전 추세로 자리 잡았습니다. 텅스텐 합금 차폐 부품의 표준화는 환경 보호 공정, 폐기물 재활용, 저탄소 생산에 대한 규제를 강화하고 다음과 같은 효과를 가져올 것입니다.

- 텅스텐 합금 원료에 대한 녹색 조달 기준
- 제조 공정에 대한 배출 및 에너지 소비 표준
- 텅스텐 합금 폐기물의 회수 및 재활용을 위한 기술 사양.

중국 내 여러 성, 시에서는 고성능 보호재료에 대한 녹색 제조 시범 프로젝트를 이미 시작했으며, 관련 표준은 2025년부터 2028년까지 순차적으로 발표될 예정입니다.

### 2.3.3 국제 협력 및 표준화

표준 장벽을 깨고 텅스텐 합금 차폐 부품의 국제 무역과 기술 교류를 촉진하기 위해서는 다음을 수행해야 합니다.

- ISO, ASTM 및 중국 국가표준화국 간 협력을 강화합니다.
- 텅스텐 합금 차폐에 대한 국제 표준화 기술 위원회 설립을 촉진합니다.
- 표준문서의 양방향 변환 및 인정을 촉진하고, 시험 및 인증의 중복을 줄입니다.

관련 국제기구에서는 글로벌 산업 사슬의 협업 효율성을 개선하기 위해 텅스텐 합금 및 중합금 소재에 대한 글로벌 데이터베이스를 구축하는 방안을 모색하기 시작했습니다.

## 요약

텅스텐 합금 차폐는 재료 특성, 가공 기술, 시험 방법 및 안전 규격을 포함합니다. 국제 표준은 기본 재료 및 응용 시험에 중점을 두고 있으며, 국내 표준은 지역 산업

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

발전 및 수출 수요에 맞춰 점진적으로 개선되고 있습니다. 앞으로는 지능화, 친환경 제조, 국제 협력이 표준 개발의 세 가지 주요 주제가 될 것입니다.

체계적이고 통일된 표준은 제품 품질과 안전성을 향상시킬 뿐만 아니라 텅스텐 합금 차폐 산업의 글로벌 경쟁력과 지속 가능한 발전을 크게 촉진할 것입니다.

### 부록 3: 텅스텐 합금 차폐에 관한 주요 문헌 및 연구 데이터베이스

텅스텐 합금 차폐는 방사선 방호 분야에서 중요한 소재이며, 관련 과학 연구 결과, 기술 발전 및 적용 사례는 여러 분야 및 산업 분야의 문헌에 널리 분포되어 있습니다. 연구자, 엔지니어 및 업계 종사자들이 권위 있는 정보를 효율적으로 얻을 수 있도록, 본 부록은 텅스텐 합금 차폐 분야의 핵심 학술 문헌과 주요 연구 데이터베이스 자료를 체계적으로 정리하고, 접근 및 사용 방법을 제시합니다.

#### 텅스텐 합금 차폐에 관한 핵심 학술 문헌

##### 3.1.1 고전 기초 문헌

- **“텅스텐 중합금: 가공, 특성 및 응용”** — *재료 과학 및 공학 저널*  
텅스텐 합금의 제조 공정, 미세 구조 및 기계적 특성을 포괄적으로 설명하며, 차폐 특성과 방사선 저항 안정성 분석에 중점을 둡니다.
- **“텅스텐 기반 재료의 방사선 차폐 성능”** — *물리학 연구의 핵 기구 및 방법론에서는*  
텅스텐 합금과 전통적인 납 기반 재료의 감마선 및 중성자 차폐 효율을 체계적으로 비교하고 재료 설계를 최적화하기 위한 새로운 아이디어를 제안합니다.
- **“센서와 적응형 구조를 통합한 스마트 방사선 차폐 소재 개발”** — *Advanced Functional Materials*에서는  
센서가 통합된 스마트 텅스텐 합금 차폐 구성 요소의 구조적 설계와 응용 가능성을 살펴봅니다.

##### 3.1.2 최신 첨단 연구

- **“핵융합로 응용 분야를 위한 저활성화 텅스텐 합금”** — *핵융합 엔지니어링 및 설계*  
에서는 핵융합로에서 구조재 및 차폐 구성 요소로 텅스텐 합금을 사용하는 데 있어 최신 개발 사항과 과제에 대해 논의합니다.
- **“방사선 차폐를 위한 텅스텐 합금의 적층 제조”** — *Materials Today* 는  
텅스텐 합금의 3D 프린팅이 복잡한 차폐 구조의 제조를 용이하게 할 수 있는 방법을 연구합니다.
- **“텅스텐 기반 차폐 구성 요소의 환경 영향 및 재활용”** — *Journal of Cleaner Production*에서는  
텅스텐 합금 차폐 구성 요소의 친환경 제조 및 재활용에 대한 기술적 경로와 정책 동향을 검토합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.1.3 업계 기술 보고서 및 백서

- 국제텨스텐산업협회(ITIA)의 연례 기술 보고서는 텨스텐 합금 차폐재 시장 동향, 표준화 진행 상황 및 적용 사례를 다룹니다.
- 국제원자력기구(IAEA) 방사선 방호 보고서 시리즈에는 방사선 차폐 재료의 평가 방법 및 안전한 관리에 대한 지침이 포함되어 있습니다.
- 중국텨스텐하이테크, 독일플랜제그룹 등 국가중점연구소와 업계 선도기업의 기술백서에서는 텨스텐합금 차폐부품의 연구 개발 결과를 공개했습니다.

## 3.2 텨스텐 합금 차폐 연구 데이터베이스 리소스

### 3.2.1 학술 데이터베이스

- Web of Science 는 재료 과학, 원자력 공학, 응용 물리학 등 다양한 분야를 포괄하여 텨스텐 합금 및 차폐재와 관련된 고품질 문헌 검색 서비스를 제공합니다.
- Scopus 는 공학, 의학, 환경 과학 분야를 포괄하여 텨스텐 합금 차폐의 종합적 성능과 응용 분야에 대한 학제간 연구를 촉진합니다.
- ScienceDirect 에는 주로 Elsevier 에서 출판한 저널이 수록되어 있으며, 재료 과학 및 핵 기술에 관한 풍부한 논문이 있습니다.
- SpringerLink 에는 텨스텐 합금과 방사선 방호 기술에 관한 수많은 서적, 논문, 학회 발표 자료가 있습니다.

### 3.2.2 전문 기술 데이터베이스

- 재료과학 및 공학 데이터베이스는 재료 특성, 구조 분석 및 공정 기술에 중점을 두고 있으며, 텨스텐 합금 미세 구조 및 성능 최적화에 대한 심층 연구에 적합합니다.
- NTIS(National Technical Information Service) 는 텨스텐 합금과 방사선 방호와 관련된 정부 및 군 기술 보고서를 제공하는 미국의 국가 기술 정보 서비스 센터입니다.
- INIS(International Nuclear Information System)는 전 세계의 원자력 기술과 방사선 방호 연구 문서를 수집하는 국제적인 원자력 정보 시스템으로, 텨스텐 합금 차폐 부품과 관련된 풍부한 정보를 보유하고 있습니다.

### 3.2.3 특허 및 표준 데이터베이스

- WIPO PATENTSCOPE 국제 특허 검색 시스템은 텨스텐 합금 차폐 부품의 새로운 기술 및 공정과 관련된 특허를 검색할 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- CNIPA 중국 지식재산권국 데이터베이스는 중국 텅스텐 합금 차폐 특허 기술의 진행 상황을 중앙에서 표시합니다.
- ISO 및 ASTM 공식 웹사이트 표준 데이터베이스는 텅스텐 합금 소재 및 차폐 구성품과 관련된 최신 국제 표준 문서를 제공합니다.

### 3.3 접근 및 사용 제안

#### 3.3.1 문헌 검색 기술

- 키워드 다각화:  
"텅스텐 중합금 차폐", "방사선 차폐 재료", "지능형 텅스텐 합금 차폐 부품", "텅스텐 합금 차폐 성능"과 같은 조합 키워드를 사용하여 포괄적인 검색을 보장합니다.
- 지난 5년 동안 출판된 문헌에 집중하여 최신 과학 연구 개발 및 응용 동향을 파악합니다.
- 인용 네트워크를 활용하여 핵심 문헌 인용 및 인용을 통해 권위 있고 영향력 있는 연구를 빠르게 찾으세요.

#### 3.3.2 데이터베이스 접근 방법

- 학술 기관 및 기업의 구독  
대부분의 학술 데이터베이스와 일부 특허 도서관은 대학, 연구 기관 또는 기업의 유료 구독을 요구합니다.
- 오픈 액세스 리소스는 일부 문헌을 무료로 얻기 위해 오픈 액세스 저널(DOAJ 등)과 사전 인쇄 서버(arXiv, ResearchGate)를 사용합니다.
- 도서관 자원 활용  
지역 또는 국가 도서관의 문서 배달 서비스를 최대한 활용하여 구독권 없이도 문서를 얻을 수 있습니다.

#### 3.3.3 데이터 관리 및 지식 축적

- 개인 문서 관리 라이브러리를 구축  
하고 EndNote, Zotero, Mendeley 등의 문서 관리 도구를 사용하여 텅스텐 합금 차폐 부품에 대한 관련 정보를 분류하고 관리합니다.
- 해당 분야의 최신 동향에 정기적으로 주의를 기울이고, 전문 저널, 학술 뉴스레터, 업계 보고서를 구독하고, 기술 발전에 대해 계속 파악하세요.
- 재료 과학, 원자력 공학, 지능형 제조 등 다양한 분야의 학술 교류에 적극적으로 참여하여 텅스텐 합금 차폐 부품의 혁신적 개발을 촉진합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 요약

텅스텐 합금 차폐 부품은 풍부하고 권위 있는 문헌 및 데이터베이스의 지원 없이는 불가능합니다. 핵심 문헌 자료, 전문 데이터베이스 및 접근 채널을 합리적으로 활용하면 R&D 효율성과 기술적 깊이를 크게 향상시킬 수 있습니다. 앞으로 데이터 리소스의 지속적인 확장과 지능형 검색 도구의 보급을 통해 텅스텐 합금 차폐 부품 분야의 지식 축적 및 혁신 속도는 더욱 가속화될 것입니다.

## 부록 4: CTIA 그룹 유한회사 텅스텐 합금 차폐 부품 제품 카탈로그

CTIA GROUP LTD는 첨단 R&D 역량과 완벽한 생산 시스템을 바탕으로 의료, 산업, 항공우주, 원자력 및 기타 분야의 다양한 보호 요구를 충족하는 다각적이고 고성능의 텅스텐 합금 차폐 제품을 제공합니다. 다음 내용은 당사의 텅스텐 합금 차폐 부품의 주요 사양, 주문 절차 및 기술 지원 서비스, 그리고 품질 보증 시스템 및 맞춤형 맞춤 제작 기능에 대한 자세한 정보를 제공합니다.

### 4.1 텅스텐 합금 차폐 부품의 사양 및 성능

#### 4.1.1 제품 분류

- 표준 텅스텐 합금 차폐 블록은**  
 고밀도 텅스텐 합금( $W \geq 90\%$ , 밀도  $17.5-18.8 \text{ g/cm}^3$ )으로 제작되었으며, 크기는  $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 5\text{mm}$  에서  $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 100\text{mm}$  까지 다양하며, 의료용 방사선 방호 및 산업용 방사선 차폐에 적합합니다.
- 복합 구조 차폐 부품은**  
 텅스텐 합금과 고강도 합금강, 스테인리스강 및 기타 재료를 결합하여 높은 기계적 강도와 내식성 요구 사항을 충족하며 항공우주 및 핵에너지 장비 보호에 적합합니다.
- 지능형 텅스텐 합금 차폐 부품**  
 에는 고정밀 센서 모듈이 내장되어 있어 실시간 방사선 모니터링 및 피드백 조절이 가능하며, 지능형 방사선 치료 장비 및 핵에너지 모니터링 시스템에 널리 사용됩니다.

#### 4.1.2 핵심 성과 지표

성과 지표	매개변수 범위	주목
재료 밀도	$17.0 - 18.8 \text{ g/cm}^3$	ASTM B777 및 회사 내부 표준에 따라
선형 감쇠 계수	$\geq 0.25 \text{ cm}^{-1}$ (감마선의 경우 100 keV)	차폐 효율 $\geq 95\%$ 보장
경도(비커스 경도)	220~320HV	내마모성과 가공 성능을 보장합니다.
치수 허용차	$\pm 0.05\text{mm}$	CNC 정밀 가공 제어

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다공성	≤0.2%	고밀도 소결 공정으로 재료 밀도 보장
작동 온도	-40° C ~ +600° C	다양한 환경의 요구에 적응
내식성	72 시간 동안 염수 분무 시험을 통과하세요	표면처리 방청조치

#### 4.1.3 제품 적용 사례

- 의료용 CT 실 보호 블록
- 방사선 치료 장치 차폐 도어
- 산업용 X선 검출 장비 보호 커버
- 항공우주 고에너지 입자 보호 부품
- 원자력발전소 유지보수용 이동식 차폐장치

#### 4.2 텅스텐 합금 차폐 부품 주문 및 기술 지원

##### 4.2.1 주문 프로세스

1. **수요 전달:**  
고객은 적용 시나리오, 사양, 치수, 성능 요구 사항 및 수량 정보를 제공합니다.
2. **기술 평가**  
고객 요구 사항을 기반으로 China Tungsten Intelligent Manufacturing의 기술 팀은 적합한 소재와 공정 솔루션을 추천하고 타당성 평가를 실시합니다.
3. **견적 및 확인**  
계획에 따라 세부적인 견적을 제공하고, 주문 확인 후 생산 일정을 입력합니다.
4. **생산 및 제조 과정에서는**  
첨단 CNC 가공, 소결 및 표면 처리 기술을 채택하여 생산 품질을 엄격하게 관리합니다.
5. **검사 및 배송:**  
고객 및 업계 표준에 따라 성능 테스트를 완료하고, 테스트 보고서를 발행하고, 배송 전에 제품이 적격인지 확인합니다.

##### 4.2.2 기술 지원 서비스

- **제품 선택 컨설팅**  
고객의 적용 특성에 따라 맞춤형 텅스텐 합금 차폐 솔루션을 제공합니다.
- **설계 최적화 제안은**  
고객이 차폐 구조를 최적화하고 보호 효과와 비용 효율성을 개선하는 데 도움이 됩니다.
- **설치 및 시운전 지침은**  
현장 설치 기술 지원과 사용 교육을 제공합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **애프터서비스 추적 서비스**  
정기적으로 방문하여 사용자 피드백을 수집하여 제품의 장기적이고 안정적인 작동을 보장합니다.

#### 4.3 텅스텐 합금 차폐 품질 보증 및 맞춤형 서비스

##### 4.3.1 품질 보증 시스템

- **원자재 추적성**  
고순도 텅스텐 분말과 합금 원소를 엄격하게 구매하여 재료 성능의 일관성을 보장합니다.
- **품질 관리 생산 과정의 전체 과정**  
입고 자재 검사, 공정 모니터링, 완제품 테스트라는 세 가지 주요 링크를 포함합니다.
- **시험장비는 첨단이며**  
, X선 비파괴 검사, CT 스캐닝, 경도 시험기 및 정밀 3좌표 측정기 등을 갖추고 있습니다.
- **완벽한 인증 시스템**  
제품은 ISO9001 품질 경영 시스템 인증을 통과하였으며, 관련 국내 및 국제 산업 표준을 준수합니다.

##### 4.3.2 맞춤형 서비스 기능

- **개인화된 디자인**  
고객의 특별한 요구 사항에 맞춰 제작되며 비표준 크기 및 구조의 맞춤 제작을 지원합니다.
- **기능적 통합**  
센서, 데이터 통신 모듈 및 기타 기능이 통합된 지능형 차폐 구성 요소를 제공합니다.
- **다중 공정 복합 가공**  
에는 CNC 가공, 레이저 절단, 표면 분무 및 코팅 강화 등이 포함됩니다.
- **신속한 대응 납품**  
제품 개발 주기를 단축하기 위해 신속한 샘플 제작 및 테스트 시스템을 구축합니다.

#### 요약

CTIA GROUP LTD는 탄탄한 기술력과 완벽한 품질 관리 시스템을 바탕으로 고품질의 다양한 텅스텐 합금 차폐 제품과 전문적인 기술 지원을 지속적으로 제공합니다. 당사는 고객의 맞춤형 요구를 충족하고 다양한 산업 분야에서 텅스텐 합금 차폐재의 광범위한 적용 및 기술 발전을 촉진하기 위해 최선을 다하고 있습니다.

#### 참고문헌

##### 1. 텅스텐 합금 차폐 관련 학술지 및 기술 보고서

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Smith, J., & Lee, A. (2023). 텅스텐 중합금의 방사선 차폐 성능. Journal of Nuclear Materials, 563, 152392. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.152392>
2. Wang, Y., Zhao, H., & Chen, L. (2022). 텅스텐 합금 방사선 차폐막을 위한 첨단 가공 기술. 재료과학 및 공학 A, 832, 142454.
3. 국제텅스텐산업협회(ITIA). 텅스텐 중합금 및 차폐 응용 분야에 대한 연례 기술 보고서. ITIA 출판부.
4. 국제원자력기구(IAEA). (2021). 방사선 방호 및 방사선원의 안전: 국제 기본 안전 기준 (GSR 3부). IAEA 안전 기준 시리즈.
5. Müller, F., & Schmidt, T. (2023). 센서가 통합된 스마트 텅스텐 차폐 소재 개발. Advanced Functional Materials, 33(15), 2209876.

## 2. 텅스텐 합금 차폐 산업 표준 및 특허 문헌

1. ASTM B777-21. 텅스텐 중합금에 대한 표준 규격. ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. GB/T 14841-2018. 텅스텐 및 텅스텐 합금의 분류 및 표시. 국가표준화국.
3. YY/T 1554-2020. 의료용 텅스텐 합금 차폐 모듈에 대한 기술 요건 및 시험 방법. 국가약품감독관리국.
4. 중국 특허 CN112233445A. 고성능 텅스텐 합금 차폐 부품 및 그 제조 방법. 출원인: CTIA GROUP LTD 2023.
5. ISO 7195:2018. 핵연료 기술 - 핵연료 등급 지르코늄 합금. 국제표준화기구(ISO).

## 3. 텅스텐 합금 차폐 네트워크 리소스 및 학술 논문

1. Haslla Smartech. (2025). 산업용 텅스텐 합금 차폐 혁신. 2025년 7월 <http://www.hasllasmartech.com/tech/innovation> 에서 검색함.
2. 2024년 국제 방사선 차폐 학술대회. 제 15회 국제 방사선 차폐 학술대회 논문집. 중국 베이징.
3. Plansee Group. (2024). 차세대 차폐 솔루션을 위한 텅스텐 중합금. 2025년 7월 검색, <https://www.plansee.com/en/products/shielding>
4. Chen, R., & Liu, M. (2023). 텅스텐 합금 차폐 부품의 재활용 및 지속 가능한 사용. 국제 재료 재활용 심포지엄 논문집, 11(3), 87 - 95.
5. 웹 오브 사이언스 데이터베이스. "텅스텐 합금 방사선 차폐"에 대한 검색 결과. 2025년 7월 접속.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.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)