

## 텅스텐 합금 시트란 무엇 인가요

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

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

지난 30년 동안 CHINATUNGSTEN 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 4 만 건 이상의 정보를 게시하여 약 10 만 명의 팔로워를 확보 하고 전 세계 수십만 명의 업계 전문가에게 매일 무료 정보를 제공하고 있습니다. 웹사이트 클러스터와 공식 계정 누적 방문자 수가 수십억 회를 기록하며, CHINATUNGSTEN ONLINE 은 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업 분야에서 세계적으로 인정받는 권위 있는 정보 허브로 자리매김했습니다. 24 시간 다국어 뉴스, 제품 성능, 시장 가격, 시장 동향 서비스를 제공합니다.

CTIA 그룹은 CHINATUNGSTEN ONLINE 의 기술과 경험을 바탕으로 고객 맞춤형 니즈 충족에 집중합니다. AI 기술을 활용하여 특정 화학 조성 및 물리적 특성(입자 크기, 밀도, 경도, 강도, 치수 및 공차 등)을 가진 텅스텐 및 몰리브덴 제품을 고객과 공동으로 설계 및 생산합니다. 금형 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 GROUP 의 한스 박사와 그의 팀은 30년 이상의 업계 경험을 바탕으로 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 지식, 기술, 텅스텐 가격 및 시장 동향 분석을 작성하여 공개하고 텅스텐 업계와 자유롭게 공유해 왔습니다. 1990년대부터 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 전자상거래 및 국제 무역, 그리고 초경합금 및 고밀도 합금의 설계 및 제조 분야에서 30년 이상의 경력을 쌓아 온 한 박사는 국내외 텅스텐 및 몰리브덴 제품 분야의 저명한 전문가입니다. CTIA GROUP 팀은 업계에 전문적이고 고품질의 정보를 제공한다는 원칙을 고수하며, 생산 관행 및 시장 고객 요구에 기반한 기술 연구 논문, 기사 및 산업 보고서를 지속적으로 작성하여 업계에서 폭넓은 호평을 받고 있습니다. 이러한 성과는 CTIA 그룹의 기술 혁신, 제품 홍보, 업계 교류에 대한 탄탄한 지원을 제공하며, 이를 통해 회사가 글로벌 텅스텐 및 몰리브덴 제품 제조와 정보 서비스 분야에서 선두주자로 발돋움하는 데 기여할 것입니다.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

### 제 1 장 텅스텐 합금 시트에 대한 기본 이해

- 1.1 텅스텐 합금 시트의 개념
  - 1.1.1 텅스텐 합금 시트의 정의
  - 1.1.2 관련 자료와의 차별점
- 1.2 텅스텐 합금 시트의 개발 및 연구의 중요성
  - 1.2.1 텅스텐 자원 활용에 기반한 개발 환경
  - 1.2.2 화학공학적 관점에서 텅스텐 합금 시트를 연구하는 것의 가치
  - 1.2.3 응용 분야에서의 텅스텐 합금 시트의 현황

### 제 2 장 텅스텐 합금판의 분류 체계

- 2.1 재료 구성에 따른 텅스텐 합금 시트의 분류
  - 2.1.1 니켈-철 계열 텅스텐 합금 시트
  - 2.1.2 니켈-구리 계열 텅스텐 합금 시트
  - 2.1.3 텅스텐-구리 합금 시트
  - 2.1.4 텅스텐-은 합금 시트
  - 2.1.5 기타 바인더상 텅스텐 합금 시트
- 2.2 핵심 특성에 따른 텅스텐 합금 시트의 분류
  - 2.2.1 고밀도 텅스텐 합금 시트
  - 2.2.2 고경도 텅스텐 합금 시트
  - 2.2.3 내식성 및 내마모성 텅스텐 합금 시트
- 2.3 크기 사양에 따른 텅스텐 합금 시트의 분류
  - 2.3.1 초박형 텅스텐 합금 시트(두께 < 0.1mm)
  - 2.3.2 일반적인 두께의 텅스텐 합금 시트(0.1~10mm)
  - 2.3.3 두꺼운 벽의 텅스텐 합금 시트(두께 > 10mm)
  - 2.3.4 특수 형상 및 크기의 텅스텐 합금 시트 (맞춤 제작)
- 2.4 적용 시나리오별 텅스텐 합금 시트 분류
  - 2.4.1 국방 및 군수 산업용 텅스텐 합금 시트
  - 2.4.2 산업 제조용 텅스텐 합금 시트
  - 2.4.3 원자력 및 의료용 텅스텐 합금 시트
  - 2.4.4 전자 정보용 텅스텐 합금 시트
  - 2.4.5 기타 특수 텅스텐 합금 시트

### 제 3 장 텅스텐 합금판의 합금 원리 및 조성 체계

- 3.1 텅스텐 합금 시트의 합금화에 대한 화학적 원리
  - 3.1.1 텅스텐과 다른 금속 원소의 상평도 분석
  - 3.1.2 고용체 강화 및 분산 강화의 화학적 메커니즘
  - 3.1.3 합금상의 형성 조건 및 안정성
- 3.2 텅스텐 합금 시트의 구성 원소의 역할 및 비율
  - 3.2.1 텅스텐 합금 시트에서 니켈-철 시스템의 시너지 메커니즘
  - 3.2.2 텅스텐 합금 시트에서 니켈-구리 시스템의 시너지 메커니즘

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.2.3 텅스텐 합금 시트에서 미량 원소의 도핑 효과
- 3.3 텅스텐 합금 시트의 조성 설계를 위한 화학적 규칙
  - 3.3.1 텅스텐 합금 시트의 성능 중심 조성 최적화 로직
  - 3.3.2 텅스텐 합금 시트의 조성 균일성을 위한 화학적 제어 방법
  - 3.3.3 불순물 원소가 텅스텐 합금판의 특성에 미치는 영향
  - 3.3.4 텅스텐 합금판에서 불순물 원소를 제거하는 방법

## 제 4 장 텅스텐 합금판의 구조-물성 관계

- 4.1 텅스텐 합금 시트의 미세 구조
  - 4.1.1 결정립 구조 및 결정립계의 화학적 조성
  - 4.1.2 합금상의 분포 및 화학적 상태
  - 4.1.3 구조 결함의 화학적 원인
- 4.2 텅스텐 합금 시트의 특성 및 메커니즘
  - 4.2.1 텅스텐 합금 시트의 고밀도 구조를 위한 화학적 원자 배열 원리
  - 4.2.2 텅스텐 합금판의 열전도도 및 전기전도도에 대한 화학적 운반체 메커니즘
  - 4.2.3 텅스텐 합금 시트의 열 안정성을 위한 화학적 구조적 지원
- 4.3 텅스텐 합금판의 기계적 특성과 화학적 특성 간의 상관관계
  - 4.3.1 텅스텐 합금판의 경도와 화학 결합 강도 간의 관계
  - 4.3.2 텅스텐 합금판의 내마모성 메커니즘 및 화학적 부식 저항성
  - 4.3.3 텅스텐 합금판의 부식 저항성에서 표면 화학적 장벽의 역할
- 4.4 텅스텐 합금 시트의 공정-구조-물성 상관관계 분석
  - 4.4.1 텅스텐 합금 시트의 미세구조에 대한 소결 공정의 조절 역할
  - 4.4.2 압연 공정이 텅스텐 합금 시트의 기계적 특성에 미치는 영향 메커니즘
  - 4.4.3 텅스텐 합금판의 화학적 특성 향상을 위한 표면 처리 최적화 경로
- 4.5 특수 환경에서 텅스텐 합금 시트의 구조 및 물성 변화
  - 4.5.1 고온 환경에서 텅스텐 합금 시트의 구조적 안정성 변화
  - 4.5.2 방사선 환경에서 텅스텐 합금 시트의 화학 구조적 허용 오차
  - 4.5.3 극한 압력 하에서 텅스텐 합금 시트의 물성 변화 법칙
- 4.6 CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 시트의 물질안전데이터시트(MSDS)

## 제 5 장 텅스텐 합금판의 성능 시험 및 특성 분석 방법

- 5.1 텅스텐 합금판의 화학 조성 분석 기술
  - 5.1.1 텅스텐 합금 시트의 원자 흡수 분광법 및 방출 분광법 분석
  - 5.1.2 X선 형광 분광법을 이용한 텅스텐 합금 시트의 조성 정량 분석 방법
  - 5.1.3 텅스텐 합금판의 미량원소에 대한 화학 적정 분석
- 5.2 텅스텐 합금판의 미세구조 특성 분석 방법
  - 5.2.1 주사전자현미경을 이용한 텅스텐 합금판의 형태 및 조성 분석
  - 5.2.2 텅스텐 합금 시트의 X선 회절을 이용한 상 및 결정 구조 분석
  - 5.2.3 텅스텐 합금판의 미세 결함에 대한 투과 전자 현미경 관찰
- 5.3 텅스텐 합금 시트의 성능 지표 시험 기준
  - 5.3.1 텅스텐 합금판의 밀도 및 치밀도 측정 방법
  - 5.3.2 텅스텐 합금판의 경도 시험 방법

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.3.3 텅스텐 합금판의 내식성 시험 방법
- 5.3.4 텅스텐 합금판의 내마모성 시험 방법
- 5.3.5 텅스텐 합금판의 강도 시험 방법

## 제 6 장 텅스텐 합금판 제조 공정

- 6.1 텅스텐 합금 시트의 제조 공정 및 분류
  - 6.1.1 텅스텐 합금 시트의 주요 제조 방법
  - 6.1.2 고밀도 텅스텐 합금 시트와 비고밀도 시트의 공정 차이
  - 6.1.3 일반적인 두께 범위 및 해당 공정 선택 (0.05mm~50mm)
- 6.2 원료 분말 준비
  - 6.2.1 고순도 텅스텐 분말의 제조 및 품질 요구사항
  - 6.2.2 합금 원소 분말(Ni, Fe, Cu, Co, Mo 등)의 선택 및 전처리
  - 6.2.3 분말 입자 크기 분포 제어 및 피셔 입자 크기 시험
  - 6.2.4 분말 혼합 및 합금 방법
- 6.3 분말 성형 공정
  - 6.3.1 냉간 등압 프레스
  - 6.3.2 금형 프레스 및 압력 매개변수 최적화
  - 6.3.3 박판 블랭크에 대한 사출 성형의 적용
  - 6.3.4 녹색 강도 향상 및 탈지 공정
- 6.4 소결 공정
  - 6.4.1 수소 분위기 수직 소결 기술
  - 6.4.2 액상 소결 온도 범위 및 유지 시간 제어
  - 6.4.3 진공 소결 및 통합 소결-고온 등방압 성형 공정
  - 6.4.4 소결 변형 제어 및 지원 툴링 설계
  - 6.4.5 대형 판재 블랭크 소결 시 온도 분포 균일성 확보
- 6.5 열간 가공 및 열처리
  - 6.5.1 블루밍 단조 및 열간 압연 공정
  - 6.5.2 조직 균일성 향상을 위한 다방향 단조
  - 6.5.3 중간 어닐링 및 응력 제거 열처리
  - 6.5.4 고온 용액 처리 및 급속 냉각
- 6.6 박판 제조를 위한 냉간 압연 및 온간 압연
  - 6.6.1 냉간 압연에서의 총 변형 분포 및 패스 감소 일정
  - 6.6.2 고텅스텐 합금에 대한 온간 압연의 적용
  - 6.6.3 롤링 방향 제어 및 텍스처 최적화
  - 6.6.4 모서리 균열 방지 및 다듬기 공정
- 6.7 표면 처리 및 마감
  - 6.7.1 산화층 제거를 위한 화학 세척 및 산세척
  - 6.7.2 결합제 상 표면 농축물 제거를 위한 알칼리 세척
  - 6.7.3 기계적 연삭 및 연마
  - 6.7.4 진공/수소 보호 열 레벨링 공정
  - 6.7.5 정밀 전단, 레이저 절단 및 워터젯 절단

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 제 7 장 텅스텐 합금판의 응용 분야

### 7.1 국방 및 군사 분야에서의 텅스텐 합금 시트의 응용 분야

#### 7.1.1 철갑탄용 텅스텐 합금 시트

#### 7.1.2 카운터웨이트용 텅스텐 합금 시트

#### 7.1.3 보호용 텅스텐 합금 시트

### 7.2 고급 제조 분야에서의 텅스텐 합금 시트의 응용 분야

#### 7.2.1 금형 인서트용 텅스텐 합금 시트

#### 7.2.2 절삭 공구용 텅스텐 합금 시트

#### 7.2.3 기계식 평형추용 텅스텐 합금 시트

### 7.3 원자력 및 의료 분야에서의 텅스텐 합금 시트의 응용

#### 7.3.1 핵 차폐용 텅스텐 합금 시트

#### 7.3.2 의료용 차폐재용 텅스텐 합금 시트

#### 7.3.3 원자력 환경용 텅스텐 합금 시트

### 7.4 전자 및 신에너지 분야에서의 텅스텐 합금 시트의 응용

#### 7.4.1 열 방출 기관용 텅스텐 합금 시트

#### 7.4.2 전자 패키징용 텅스텐 합금 시트

#### 7.4.3 전극용 텅스텐 합금 시트

### 7.5 카드 제작에 사용되는 텅스텐 합금 시트의 응용 분야

#### 7.5.1 텅스텐 합금 은행 카드 및 결제 카드

#### 7.5.2 텅스텐 합금 애완동물 식별 태그

#### 7.5.3 텅스텐 합금 축제 및 기념 맞춤 카드

#### 7.5.4 텅스텐 합금 산업 및 자산 관리 태그

#### 7.5.5 텅스텐 합금 의류 및 고급 제품 행택

#### 7.5.6 텅스텐 합금 고급 명함 및 사회 예절 카드

## 제 8 장 텅스텐 합금판의 일반적인 문제점 및 해결책

### 8.1 텅스텐 합금 시트의 재료적 기초 문제 및 해결책

#### 8.1.1 구성 및 구조 관련 문제

##### 8.1.1.1 텅스텐 합금의 불균일한 조성 문제 및 균질화 방법

##### 8.1.1.2 결정 구조 결함의 유형 및 복구 전략

#### 8.1.2 텅스텐 합금판의 물리적 특성 편차 문제

##### 8.1.2.1 비정상적인 밀도 및 경도의 원인 및 조정 기술

##### 8.1.2.2 열전도율 및 열팽창률 불일치 문제 및 최적화 솔루션

### 8.2 텅스텐 합금 시트의 생산 및 제조상의 문제점과 해결책

#### 8.2.1 분말 야금 공정 문제점

##### 8.2.1.1 분말 제조 결함의 식별 및 관리 조치

##### 8.2.1.2 소결 공정 실패 진단 및 공정 개선

#### 8.2.2 압연 및 성형 문제

##### 8.2.2.1 열간압연 균열의 원인 및 예방 방법

##### 8.2.2.2 냉간 가공 변형 문제의 분석 및 변형 제어

#### 8.2.3 품질 검사 및 관리 문제

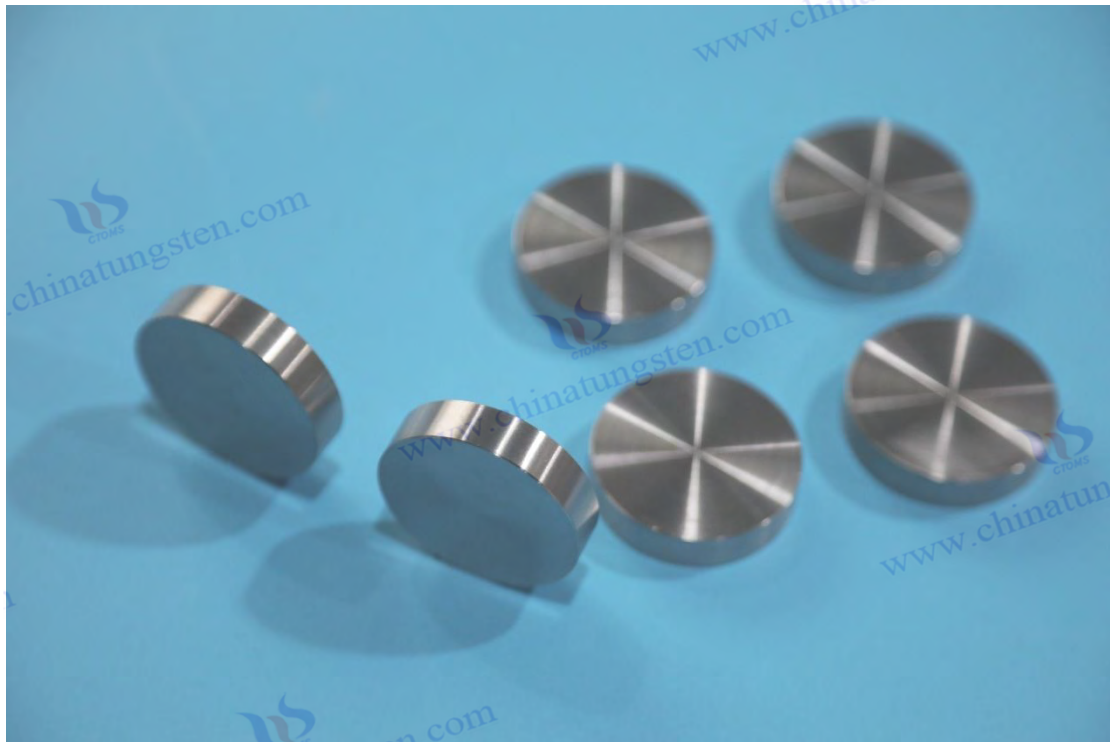
##### 8.2.3.1 비파괴 검사 기술의 적용상의 어려움 및 대안

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.2.3.2 치수 공차 편차 처리 및 정밀도 향상
- 8.3 텅스텐 합금 시트의 적용 및 성능 문제와 해결책
  - 8.3.1 항공우주 분야에서 텅스텐 합금 시트의 응용 문제
    - 8.3.1.1 고온 피로 파괴 메커니즘 및 강화 처리
    - 8.3.1.2 진동 및 충격 하중 문제와 충격 저항 설계
  - 8.3.2 방사선 차폐 분야에서 텅스텐 합금 시트의 응용 문제
    - 8.3.2.1 차폐 효율 저하 및 효율 회복의 원인
    - 8.3.2.2 생체 적합성 위험 평가 및 안전성 개선
  - 8.3.3 전자 및 의료기기 분야에서 텅스텐 합금 시트의 응용 문제
    - 8.3.3.1 비정상적인 전도도 및 자성 현상과 재료 변형에 대한 문제 해결
    - 8.3.3.2 부식 및 산화 문제 방지 및 코팅 기술

#### 부록:

- 부록 A 텅스텐 합금 시트 관련 중국 표준
  - 부록 B 텅스텐 합금 시트에 대한 국제 표준
  - 부록 C 유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가의 텅스텐 합금 시트 표준
  - 부록 D 텅스텐 합금 시트 용어표
- 참고문헌.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

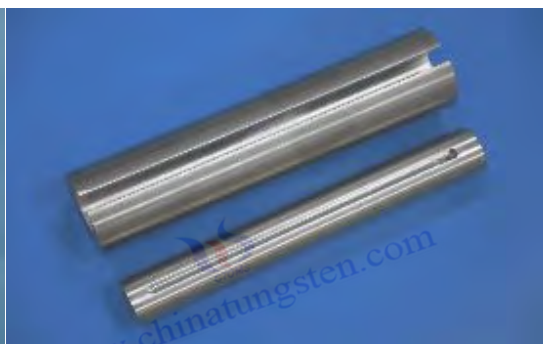
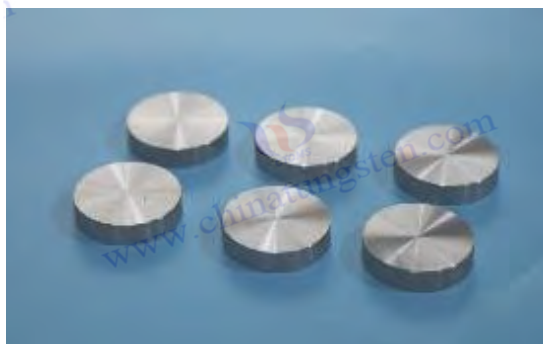
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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)



## 제 1 장: 텅스텐 합금 시트에 대한 기본 이해

### 1.1 텅스텐 합금 시트의 개념

텅스텐 합금 시트는 텅스텐을 주성분으로 하는 소재로, 다른 원소들을 첨가하여 얇은 판 형태로 가공한 것입니다. 이 소재는 텅스텐의 높은 밀도와 높은 용점이라는 장점에 더해, 다른 원소들을 첨가함으로써 가공성과 기계적 특성이 향상되었기 때문에 산업 분야에서 중요한 역할을 합니다. 텅스텐 합금 시트의 등장으로 이전에는 가공이 어려웠던 텅스텐을 다양한 엔지니어링 분야에서 판 형태로 사용할 수 있게 되었습니다.

텅스텐 합금 시트는 일반적으로 높은 텅스텐 함량을 중심으로 구성되며, 다른 원소들은 전체적인 성능을 최적화하기 위해 선택됩니다. 일반적인 합금 시스템에는 텅스텐과 니켈, 철 또는 구리의 조합이 포함되는데, 이러한 원소들은 소결 과정에서 결합제를 형성하여 텅스텐 입자들의 결합력을 향상시킵니다. 시트 두께는 특정 제조 공정 및 적용 요구 사항에 따라 수 밀리미터에서 마이크로미터 수준까지 정밀하게 제어됩니다. 생산 공정은 분말 혼합으로 시작하여 프레스, 소결, 열간 가공 및 냉간 가공을 거쳐 최종적으로 매끄러운 표면과 균일한 모서리를 가진 시트를 얻습니다.

성능 측면에서 텅스텐 합금 시트는 밀도 분포가 우수하여 집중적인 하중이 요구되는 용도에 매우 적합합니다. 또한 연성이 있어 굽힘, 스탬핑 또는 절단과 같은 후속 가공 작업이 용이합니다. 열처리 공정은 매우 중요한데, 온도와 냉각 속도를 제어함으로써 재료의 결정립 크기와 상 분포를 조절할 수 있으며, 이를 통해 경도와 인성 사이의 균형을 맞출 수 있습니다.

텅스텐 합금 시트는 재료 공학의 포괄적인 적용을 보여줍니다. 단순히 텅스텐을 얇게 압연하는 것이 아니라, 취성을 가공성으로 바꾸기 위해 합금을 적용하는 과정을 거칩니다. 이 소재는 치수 안정성과 환경 적응성에 대한 요구 사항을 충족하기 때문에 전자 제품, 의료 기기 및 정밀 기기 분야에서 점차 널리 사용되고 있습니다. 레이저 절단 및 정밀 압연과 같은 제조 기술의 발전으로 텅스텐 합금 시트의 규격 범위가 지속적으로 확대되어 다양한 설계 요구를 충족하고 있습니다.

#### 1.1.1 텅스텐 합금 시트의 정의

텅스텐 합금 시트는 텅스텐을 주성분으로 하고 니켈, 철, 구리 등의 다른 금속 원소를 소량 첨가하여 분말 야금법으로 제조한 후 압연하여 만든 얇은 판형 합금 소재입니다. 일반적으로 텅스텐이 주성분을 이루어 높은 밀도와 경도라는 기본적인 특성을 나타내며, 합금 원소의 첨가는 소재의 가공성과 가공성을 크게 향상시킵니다.

정의에 따르면, 텅스텐 합금 시트와 다른 텅스텐 제품의 주요 차이점은 시트 형태와 합금 조성에 있습니다. 제조 과정에서 텅스텐 분말은 다른 금속 분말과 균일하게 혼합된 후 고온에서 액상 소결되어 치밀한 미세 구조를 형성합니다. 그 후, 여러 번의 압연 공정을 통해 원하는 두께로 점차 얇게 만들어지고, 내부 응력을 해소하기 위해 어닐링 공정이

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수행됩니다. 이러한 정의는 분말에서 완제품에 이르기까지 재료의 전체 변환 과정을 반영합니다.

실질적인 정의에서는 합금 계열의 분류 또한 고려해야 합니다. 예를 들어, 텅스텐-니켈-철 계열은 기계적 특성의 균형을 강조하는 반면, 텅스텐-니켈-구리 계열은 전기 전도성에 더 중점을 둡니다. 이러한 계열의 정의는 모두 텅스텐의 높은 용점을 중심으로 이루어지며, 이는 고온에서도 재료의 형상 안정성을 보장합니다.

텅스텐 합금 시트는 기능적인 측면에서도 높은 밀도와 우수한 성형성을 동시에 요구하는 응용 분야에 적합한 고성능 엔지니어링 소재입니다. 하지만 이러한 정의는 고정된 것이 아니며, 몰리브덴이나 레늄 과 같은 새로운 합금 원소의 첨가에 대한 연구가 진행됨에 따라 새로운 응용 분야에 맞춰 끊임없이 확장되고 있습니다.

### 1.1.2 정의 및 관련 자료와의 구분

텅스텐 합금 시트는 재료 선택 시 혼동을 피하기 위해 구성, 가공 방법, 성능 특성 및 적용 분야를 포함한 다각적인 분석이 필요합니다.

가장 중요한 고려 사항은 순수 텅스텐 판재와의 비교입니다. 순수 텅스텐 판재는 합금 원소가 거의 포함되어 있지 않으며, 고순도 텅스텐 분말을 압연하여 생산됩니다. 그러나 텅스텐은 상온에서 취성이 강하기 때문에 고온에서 가공해야 하며, 이로 인해 완제품에 균열이 발생하기 쉽습니다. 반면, 텅스텐 합금 판재는 합금을 통해 결합제를 도입하여 저온에서 압연이 가능해지므로 표면 품질이 우수하고 더 넓은 범위의 성형 작업에 적합합니다.

텅스텐-구리 복합 시트도 구분해야 합니다. 이 소재는 주로 텅스텐 입자와 구리 상의 기계적 혼합물로, 구리 함량이 높으며 합금 소결법이 아닌 용융 침투법으로 제조됩니다. 이와 대조적으로, 텅스텐 합금 시트는 고용체 구조를 형성하며, 구리 또는 철과 니켈 간의 혼화성이 더욱 균일하여 열팽창 계수와 열전도율에 차이가 발생합니다.

몰리브덴 합금 시트도 흔히 비교 대상이 됩니다. 몰리브덴은 텅스텐보다 밀도와 용점이 낮고 진공 환경에서 우수한 성능을 보이지만, 고온 강도는 텅스텐 합금 시트만큼 좋지 않습니다. 몰리브덴 시트는 전자 진공 장치에 더 적합한 반면, 텅스텐 합금 시트는 더 높은 질량 관성이 요구되는 응용 분야에 더 유리합니다.

초경합금 시트와 비교했을 때, 텅스텐 합금 시트는 탄화물 상을 포함하지 않습니다. 초경합금 시트는 주로 텅스텐 카바이드 입자와 코발트 결합제로 구성되어 있으며, 매우 높은 경도를 지니지만 인성은 제한적이어서 주로 절삭 공구에 사용됩니다. 반면, 텅스텐 합금 시트는 밀도와 연성의 균형을 중시하여 밸런싱 부품이나 차폐 부품에 적합합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 정의는 텅스텐 합금 시트의 위치를 명확히 규정합니다. 텅스텐 합금 시트는 밀도, 가공성 및 안정성의 균형을 갖춘 시트로, 민간 산업에서 특정 성능 격차를 해소합니다. 이러한 구분은 엔지니어가 특정 요구 사항에 맞는 재료를 선택하는 데 도움이 됩니다.

## 1.2 텅스텐 합금 시트의 개발 및 연구의 중요성

텅스텐 합금 시트는 단일 성능 특성 추구에서 종합적인 성능 최적화로 완전히 진화해 왔습니다. 이러한 발전은 텅스텐 자원의 특성과 가공 기술의 발전, 그리고 고밀도, 고안정성 소재에 대한 지속적인 산업적 수요에 의해 주도되었습니다. 초기 텅스텐 소재는 주로 필라멘트나 스퍼터링 타겟과 같은 단순한 형태로 존재했습니다. 분말 야금 공정의 개선과 고밀도 소재의 가공성 요구 증가에 따라 텅스텐 합금 시트는 점차 독립적인 연구 및 생산 방향으로 자리 잡았습니다. 20 세기 중후반에 액상 소결 기술이 성숙되면서 텅스텐 합금의 치밀화를 위한 안정적인 수단이 제공되었고, 이후 다단 압연 및 제어 열처리 공정의 도입으로 벌크 형태에서 박판 형태로의 전환이 완전히 실현되었습니다. 이러한 공정은 텅스텐의 응용 범위를 넓혔을 뿐만 아니라 후속적인 기능화 및 경량화 설계의 토대를 마련했습니다. 현재 텅스텐 합금 시트에 대한 연구는 전통적인 텅스텐-니켈-철 및 텅스텐-니켈-구리 시스템에서 희토류 도핑, 나노결정 강화, 경사 구조 설계와 같은 여러 첨단 방향으로 확대되어 재료 과학과 엔지니어링 요구 사항 간의 심층적인 통합 추세를 반영하고 있습니다.

### 1.2.1 텅스텐 자원 활용에 기반한 개발 환경

매장량은 상대적으로 제한적이지만 분포 범위는 넓은 전략적 금속인 텅스텐의 효율적인 활용은 재료 개발에 있어 항상 중요한 과제였습니다. 초기 텅스텐 자원은 주로 초경합금 생산에 사용되었으며, 나머지 저품위 광석이나 재활용 재료는 추가 가공이 어려웠습니다. 텅스텐 합금 시트의 등장으로 중저품위 텅스텐 자원을 활용할 수 있는 새로운 길이 열렸고, 이전에는 낭비될 뻔했던 텅스텐 분말이 고부가가치 분야로 유입될 수 있게 되었습니다.

1950 년대경, 연구자들은 페로니켈 또는 구리 니켈을 첨가하면 텅스텐의 취성 전이 온도를 크게 낮출 수 있다는 사실을 발견했습니다. 이 발견은 1 세대 텅스텐 중합금 개발로 직접 이어졌으며, 주로 민간용 균형 부품에 대량으로 사용되었습니다. 이후 압연 장비의 정밀도와 어닐링 공정의 발전으로 두께가 초기 수 센티미터 수준에서 수 밀리미터 수준으로, 그리고 오늘날 수십 마이크로미터 수준으로 점차 감소하면서 자원 활용 방식이 광범위 생산에서 집약 생산으로 전환되었습니다. 21 세기에 들어서는 고온 등방압 성형(HIP) 및 스파크 플라즈마 소결(SPS)과 같은 첨단 소결 기술의 산업적 적용으로 빌렛 밀도와 미세구조 균일성이 더욱 향상되었고, 후속 압연 횟수가 줄어들었으며, 에너지 소비와 텅스텐 손실률이 감소했습니다.

최근 몇 년 동안 텅스텐 합금 시트 생산은 전 공정에 걸쳐 자원 재활용에 초점을 맞추고 있습니다. 예를 들어, 텅스텐 합금 가공에서 발생하는 스크랩, 압연 산화 스케일, 폐기 부품 등을 수소 환원이나 아연 용융 을 통해 고순도 텅스텐 분말로 되돌린 후 배합

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공정에 재투입하여 비교적 완전한 폐쇄 루프 활용 시스템을 구축할 수 있습니다. 동시에, 텅스텐 자원의 품질 저하에 대응하여 일부 연구 기관에서는 성능은 유지하면서 텅스텐 함량을 줄이거나 몰리브덴 또는 탄탈륨으로 부분적으로 대체하는 자원 절약형 합금 시스템을 개발하려는 시도를 하고 있습니다. 텅스텐 합금 시트의 개발 궤적은 "고순도, 고소비" 모델에서 "고효율, 순환" 활용 모델로의 텅스텐 자원 진화를 보여주는 축소판이라고 할 수 있습니다. 이러한 과정은 기술 발전과 지속 가능한 개발의 요구를 모두 반영합니다.

### 1.2.2 화학공학적 관점에서 본 텅스텐 합금 시트

화학공학적 관점에서 텅스텐 합금 시트의 연구 개발은 다상 반응, 상 계면 제어, 열 및 물질 전달 최적화와 같은 핵심 문제에 대한 공학적 해결책을 구현합니다. 분말 야금에서 액상 소결은 텅스텐 입자의 재배열, 결합제 상의 습윤 및 확산, 용해-재침전 메커니즘, 가스 배출 속도론 등을 포함하는 화학공학의 대표적인 단위 조작입니다. 연구자들은 소결 온도 프로파일, 수소 이슬점, 빌릿 적재 방식과 같은 매개변수를 조정함으로써 기공률, 결합제 상 분포, 텅스텐 입자 구형화에 대한 정밀한 제어를 달성했습니다. 이는 본질적으로 화학 반응 공학과 재료 과학의 융합 응용 분야입니다.

압연 및 어닐링 단계는 응력장과 확산장의 상호 작용을 수반합니다. 화학 공학에서 흔히 사용되는 유한 요소 시뮬레이션 및 전산 유체 역학 방법은 압연 중 온도 및 응력 분포와 어닐링 중 원소 확산 거동을 분석하는 데 널리 적용되어 왔습니다. 이는 패스 감소 및 중간 어닐링 조건을 최적화하여 모서리 박리 및 균열과 같은 결함을 줄이는 데 도움이 됩니다. 또한 무전해 도금 및 진공 열처리와 같은 표면 처리는 판재의 산화 저항성 및 접착 강도에 직접적인 영향을 미치는 대표적인 화학 공학 단위 공정입니다.

또한, 부식성 환경에서 텅스텐 합금 시트의 거동에 대한 연구는 화학 장비의 재료 선택에 중요한 참고 자료를 제공합니다. 연구진은 전기화학적 시험과 침지 실험을 통해 산성, 알칼리성, 염 환경에서 다양한 합금 시스템에 대한 부식 속도 모델을 구축하여 수명 연장 및 유지보수 비용 절감에 대한 이론적 근거를 제시했습니다. 화학 공학적 관점에서 텅스텐 합금 시트는 최종 제품일 뿐만 아니라 정밀하고 제어 가능한 일련의 화학적 및 물리적 공정이 고도로 통합된 결과물입니다. 이러한 연구의 가치는 유사한 고용점 다상 재료의 엔지니어링 규모 확장에 필요한 재현 가능한 경험을 제공하는 데 있습니다.

### 1.2.3 응용 분야에서 텅스텐 합금 시트의 현황

텅스텐 합금 시트는 높은 밀도와 우수한 가공성 사이의 균형에 대한 요구로 인해 현대 산업 시스템에서 대체 불가능한 위치를 차지하고 있습니다. 의료기기 분야에서 텅스텐 합금 시트는 탁월한 방사선 감쇠 능력과 생체 적합성 덕분에 고성능 방사선 치료 장비의 콜리메이터 및 다엽 격자와 같은 핵심 부품에 선호되는 소재가 되었습니다. 두께 정밀도와 표면 품질은 치료 위치 설정의 정확도에 영향을 미칩니다.

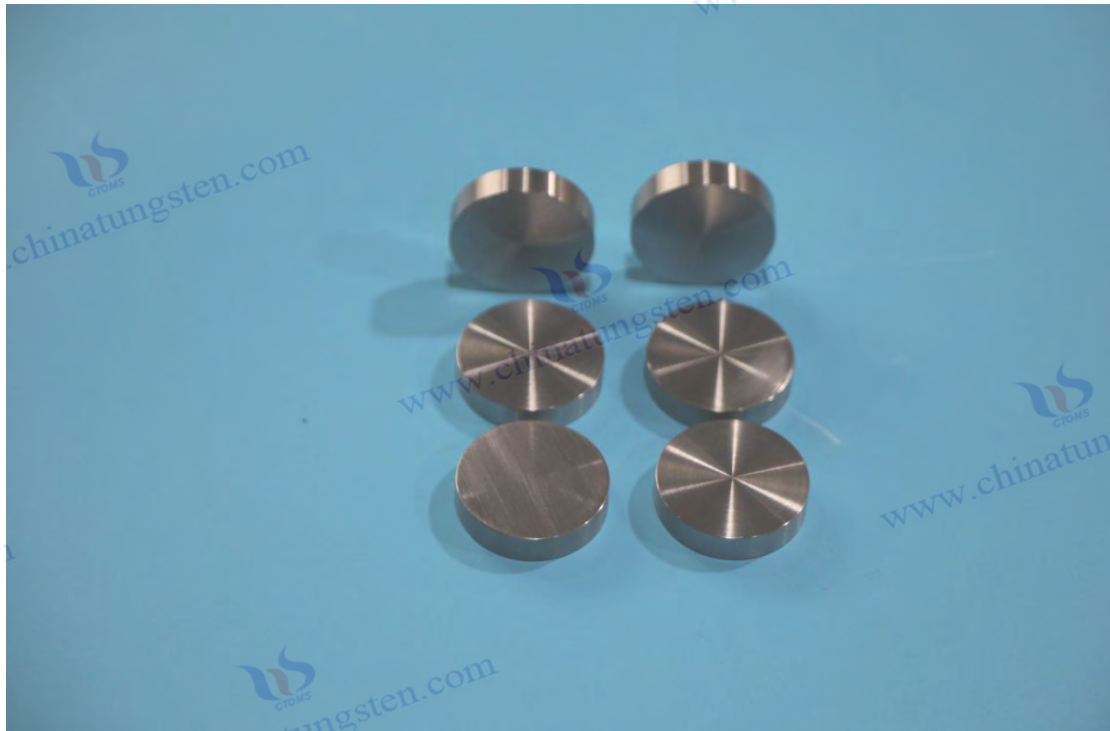
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



정밀 기기 및 전자 산업에서 텅스텐 합금 시트는 높은 밀도와 적당한 전도성으로 인한 관성적 이점을 활용하여 진동 제어 부품 및 전자기 차폐 부품으로 사용됩니다. 분석 기기, 고정밀 저울, 관성 항법 시스템 및 기타 장비에서 텅스텐 합금 시트는 소형화와 높은 안정성 사이의 균형을 달성하는 데 도움을 줍니다.

또한, 텅스텐 합금 시트는 진공 코팅 및 열 관리 분야에서 점차 중요한 위치를 차지하고 있습니다. 스퍼터링 타겟의 백플레이트 또는 방열판 소재로 사용될 때, 높은 열전도율과 낮은 열팽창률이라는 두 가지 요구 조건을 모두 충족합니다. 최근 신에너지 및 차세대 정보 기술의 급속한 발전과 함께 고성능 열 인터페이스 소재 및 차폐 소재에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있습니다. 텅스텐 합금 시트는 이러한 독특한 특성 조합을 바탕으로 기존 응용 분야를 넘어 새로운 분야로 활용 범위가 확대되고 있습니다.

텅스텐 합금 시트는 단독으로 사용되는 것이 아니라 다른 고성능 소재와 함께 사용된다는 점에 주목할 필요가 있습니다. 경우에 따라 경량화와 기능성 사이의 균형을 맞추기 위해 티타늄 합금이나 탄소 섬유 복합재와 함께 사용되기도 합니다. 이처럼 핵심 기능을 독자적으로 수행하면서도 다른 소재와 협력하여 시너지 효과를 낼 수 있는 능력 덕분에 텅스텐 합금 시트는 현대 산업 소재 분야에서 확고한 입지를 다져왔습니다. 가공 정밀도와 표면 처리 기술이 더욱 향상된다면 텅스텐 합금 시트의 응용 분야는 앞으로도 크게 확장될 가능성이 있습니다.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

### 2.1 재질 구성별 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트를 분류하는 가장 일반적이고 직관적인 방법은 재료 조성에 따른 분류입니다. 이러한 분류는 결합상(binder phase)의 화학적 조성 차이를 반영하여 기계적 특성, 열물리적 특성, 전자기적 특성 및 가공성 등의 체계적인 차이를 결정합니다. 현재 산업적으로 생산되는 거의 모든 텅스텐 합금 시트는 니켈을 주요 결합 원소로 사용하는데, 이는 니켈이 텅스텐에 대한 젖음성이 우수하고, 활성화 소결 능력이 적절하며, 텅스텐과의 열팽창 불일치가 작기 때문입니다. 2 차 성분에 따라 니켈-철과 니켈-구리의 두 가지 주요 계열이 형성되어 있습니다. 또한 소량의 니켈-몰리브덴, 니켈-레늄 또는 기타 실험적인 시스템도 존재하지만, 아직 대규모 시트 생산 단계에는 이르지 못했습니다. 두 주류 시스템의 텅스텐 함량은 일반적으로 90%~97%이며, 결합상의 총량은 3%~10%로 조절됩니다. 비율과 열기계적 가공 매개변수를 미세 조정함으로써 최종 물성을 넓은 범위 내에서 제어할 수 있습니다.

#### 2.1.1 니켈-철-텅스텐 합금 시트

니켈-철-텅스텐 합금 시트는 산업화된 최초의 텅스텐 합금 시트 유형이며 오늘날에도 여전히 시장을 주도하고 있습니다. 일반적인 조성은 텅스텐(W) 90~97%, 니켈(Ni) 2.5~7%, 철(Fe) 0.5~3%이며, Ni/Fe 질량비는 보통 7:3 에서 8:2 사이로 유지됩니다. 이러한 조성비는 20 세기 중반에 수행된 광범위한 실험적 검토를 통해 도출되었는데, 이 범위에서 액상 소결 단계에서 적절한 양의 액상이 형성되어 텅스텐 입자의 충분한 재배열을 촉진하는 동시에 결합제의 과도한 응집이나 취성상의 생성을 방지할 수 있음이 밝혀졌습니다.

니켈-철 시스템은 결합상이 철-니켈 고용체로서 상당한 강자성을 나타내어 재료 전체에 강한 자기적 반응을 유발합니다. 이러한 특성은 자기 차폐 또는 자기 구동이 필요한 응용 분야에서 자연스러운 이점을 제공합니다. 동시에, 철의 첨가는 결합상의 적층 결합 에너지를 크게 감소시켜 소결 후기 단계에서 용해-재침전 과정을 촉진하고 텅스텐 입자를 더욱 구형으로 만들어 텅스텐과 결합상 사이의 계면 결합 강도를 높입니다. 거시적으로 이는 인장 강도와 파괴 인성의 증가로 나타납니다.

니켈-철 합금은 판재 가공에서 우수한 열가소성 과 냉간 가공성을 나타냅니다. 고온 소결 후, 빌릿을 1100℃~1300℃에서 여러 번 열간 압연하고, 중간 어닐링 및 냉간 압연을 거쳐 최종적으로 0.05mm 이하로 박판화할 수 있습니다. 압연 중 모서리 균열 발생 가능성이 낮아 높은 수율을 얻을 수 있습니다. 열처리 방식은 최종 물성에 상당한 영향을 미칩니다. 저온 장시간 어닐링은 미세한 텅스텐 입자와 섬유 구조를 유지하여 강도를 높이고, 고온 단시간 어닐링은 텅스텐 입자 조대화 및 결합상 균질화를 촉진하여 연성을 향상시킵니다. 표면 처리 측면에서 니켈-철-텅스텐 합금 시트는 니켈, 금 또는 은으로 무전해 도금이 용이하며, 진공 환경에서 확산 알루미늄 도금을 통해 보호층을 형성하여 산화 및 부식 저항성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 현재 이 시리즈의 시트는 고밀도와

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



일정 수준의 기계적 신뢰성이 요구되는 정밀 부품, 예를 들어 고급 분석 저울용 추, 관성 계측기용 밸런스 블록, 광학 기기용 진동 감쇠 시트 등에 널리 사용되고 있습니다. 압연 장비 및 열처리 기술의 발전으로 니켈-철-텅스텐 합금 시트의 두께 균일성과 평탄도가 마이크로미터 수준에 도달하여, 미세한 품질 편차를 요구하는 고급 계측기의 엄격한 요구 사항을 충족합니다.

### 2.1.2 니켈-구리-텅스텐 합금 시트

니켈-구리-텅스텐 합금 시트는 니켈-철 합금에서 개발된 비자성 텅스텐 합금 시트입니다. 일반적인 조성은 텅스텐(W) 90~96%, 니켈(Ni) 3~8%, 구리(Cu) 1~5%이며, Ni/Cu 질량비는 일반적으로 3:1 에서 7:3 사이입니다. 구리를 첨가함으로써 재료의 거시적인 강자성이 완전히 제거되어 강한 자기장이 존재하는 환경이나 높은 전자과 적합성이 요구되는 환경에 사용하기에 적합합니다. 또한, 구리의 높은 열전도율과 전기전도율은 이 시트 시리즈에 우수한 열 확산 및 전기 접촉 성능을 제공합니다.

미시적 관점에서 볼 때, 니켈-구리 시스템의 결합상은 면심 입방 구조의 고용체입니다. 그러나 구리와 니켈 의 무한한 혼화성 덕분에 결합상의 조성 균일성이 더 우수합니다. 소결 과정에서 액상이 나타나는 온도는 니켈-철 시스템보다 약간 낮아 소결 온도를 낮추고 비정상적인 텅스텐 입자 성장을 억제하는 데 유리합니다. 텅스텐 입자의 구상화 정도는 일반적으로 니켈-철 시스템보다 높아 계면 청정도가 향상됩니다. 이는 동일한 텅스텐 함량에서 연신율이 약간 증가하는 반면 인장 강도는 약간 감소하는 결과를 가져오는데, 이는 강도와 소성 사이의 상충 관계를 반영합니다. 가공 특성 측면에서 니켈-구리 합금은 산화에 민감합니다. 고온 압연은 보호 분위기 또는 진공 상태에서 수행해야 하며, 그렇지 않으면 표면에 느슨한 산화막이 쉽게 형성되어 후속 냉간 압연에 영향을 미칩니다. 냉간 가공 경화율은 니켈-철 합금 보다 약간 낮아 고감축 압연에 적합하며 초박막(두께 최대 20 $\mu$ m) 생산에 유리합니다. 어닐링 공정 범위가 넓고 과열에 대한 민감도가 낮아 연속 생산 라인에 적합합니다. 표면 처리 측면에서 니켈-구리 합금은 본질적으로 우수한 내식성과 전기 접촉 특성을 지니고 있어, 복잡한 도금 공정 없이도 요구 사항을 충족하기 위해 직접 연마 또는 가벼운 화학 세척만으로도 충분한 경우가 많습니다. 응용 분야 측면에서 이 합금 시트는 주로 의료용 방사선 치료 장비의 콜리메이터 블레이드, 전자기 차폐 커버, 진공 스퍼터링 타겟 백플레이트, 방열판 등 비자성, 높은 열전도율 또는 높은 전기 전도성이 요구되는 다양한 분야에 사용됩니다. 최근 5G 통신 및 고출력 전자 기기의 열 방출 수요가 증가함에 따라 니켈-구리-텅스텐 합금 시트의 박막화 및 복합재 응용 분야가 빠르게 확대되고 있으며, 그 잠재력을 보여주고 있습니다.

### 2.1.3 텅스텐-구리 합금 시트

텅스텐-구리 합금 시트는 분류 체계에서 특별한 위치를 차지합니다. 엄밀히 말하면, 전통적인 의미의 고용체 텅스텐 합금이라기보다는 유사 합금 또는 금속 기지 복합재료에 속합니다. 일반적인 조성 범위는 텅스텐 50%~90%와 구리 10%~50%이며, 두 상은 거의 혼합되지 않습니다. 구리는 텅스텐 골격 내에 연속적이거나 반연속적인 네트워크 형태로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분포되어 있습니다. 합금 결합상이 없기 때문에 텅스텐-구리 시트는 미세 구조, 성능 특성 및 가공 방법 면에서 앞서 언급한 니켈 기반 텅스텐 합금 시트와 근본적으로 다릅니다.

텅스텐-구리 시트는 주로 용융 침투법 또는 직접 활성화 소결법을 사용하여 제조됩니다. 용융 침투법은 먼저 다공성 텅스텐 골격을 가압 및 소결한 후, 구리의 용점보다 약간 높은 온도에서 용융된 구리를 기공 내부로 침투시키는 방식입니다. 반면, 활성화 소결법은 텅스텐 분말에 소량의 니켈 또는 코발트를 미리 혼합한 후 1300℃~1400℃의 고온에서 한 번에 직접 치밀화하는 방식입니다. 두 공정 모두 매우 높은 열전도율과 전기전도율을 갖는 시트를 생산하며, 열전도율은 일반적으로 180~220 W/(m·K) 범위이고, 전기전도율은 40~55% IACS에 달하며, 열팽창 계수는 반도체 재료와 잘 일치합니다.

텅스텐 동판은 구리 상의 존재로 인해 판재 가공 시 우수한 열간 및 냉간 가공성을 나타냅니다. 텅스텐 함량이 70~80%인 등급은 상온에서 직접 압연이 가능하며, 높은 감축률로 0.1mm 미만의 얇은 두께와 우수한 표면 조도를 얻을 수 있고 중간 열처리도 거의 필요하지 않습니다. 텅스텐 함량이 85%를 초과하는 경우에는 온간 압연과 보호 분위기가 필요합니다. 텅스텐 동판의 가장 두드러진 장점은 비자성, 우수한 열전도율, 그리고 아크 침식에 대한 강한 저항성입니다. 따라서 고온, 아크 및 열충격에 대한 내성이 동시에 요구되는 고전압 전기 접점, 진공 스위치 전극, 저항 용접 전극, 전자 패키징 방열판, 로켓 엔진 노즐 목 라이너 등 민간 및 산업 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 최근 고출력 IGBT 모듈 및 3세대 반도체 기관의 방열 수요가 폭발적으로 증가함에 따라 초박형 고텅스텐 합량 텅스텐 구리 시트(두께 <0.3mm, 텅스텐 함량 ≥85%)가 연구 및 생산의 핵심 분야로 떠올랐습니다.

#### 2.1.4 텅스텐-은 합금 시트

텅스텐-은 합금 시트는 은이 부드럽고 전도성이 매우 높은 상이고 텅스텐이 단단한 골격 역할을 하는 유사 합금계에 속하며, 두 원소는 서로 용해되지 않습니다. 일반적인 조성은 텅스텐 50~80%와 은 20~50%입니다. 제조 공정은 텅스텐-구리 합금과 매우 유사하며, 주로 고온 용융 및 침투법을 사용하지만, 분말 혼합 후 고압 응고법도 적용할 수 있습니다. 은은 구리보다 용점(961℃)이 낮기 때문에 용융 및 침투 온도도 낮아져 공정 범위가 넓어지고 장비 요구 조건도 완화됩니다.

텅스텐-은 시트는 전기 전도도와 열 전도도 모두에서 텅스텐-구리 시트를 능가합니다. 전기 전도도는 60%~80% IACS에 쉽게 도달하며, 열 전도도는 250~380 W/(m·K) 범위에 이르면서도 텅스텐의 높은 경도와 내삭성을 유지합니다. 더욱 중요한 것은 전기 아크 하에서 형성되는 산화층이 높은 증기압을 가지고 있어 열 손상을 쉽게 제거하므로 아크 침식 및 용접에 대한 저항성이 매우 우수하다는 점입니다. 가공성 측면에서, 은 함량이 30% 이상인 텅스텐-은 시트는 거의 완전히 냉간 상태에서 0.05mm 이하로 압연할 수 있으며, 모서리 균열이 최소화되고 은백색 표면을 유지하여 시각적으로 매우 매력적입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

현재 텅스텐 은 시트는 주로 저전압 및 중전압 전기 접점, 정밀 릴레이 접점, 슬라이딩 전기 접점, 그리고 특정 특수 도파관의 내벽 코팅용 기관으로 사용됩니다. 특히, 고급 가정용 회로 차단기, 자동차 릴레이, 항공 릴레이와 같은 분야에서 텅스텐 은 시트는 긴 수명, 낮은 접촉 저항, 그리고 낮은 물질 전이 특성으로 인해 기존의 은-카드뮴 및 은-니켈 소재를 점차 대체하고 있습니다.

### 2.1.5 기타 바인더 상 텅스텐 합금 시트

앞서 언급한 주류 시스템 외에도, 최근에는 새로운 또는 복합 결합제를 사용하는 텅스텐 합금 시트가 등장했습니다. 이러한 제품들은 주로 연구실 단계에서 산업화 단계로 넘어가는 과도기에 있거나, 특정 기능적 요구 사항을 충족하기 위해 소량 생산되고 있습니다.

텅스텐-니켈-코발트 시스템: 니켈-철 또는 니켈-구리 기반에 코발트를 1~3% 첨가하면 결합제의 강도와 고온에서의 연화 저항성이 크게 향상되어 고온 작동이 요구되는 방열판이나 구조 부품에 적합합니다.

텅스텐-니켈-몰리브덴 시스템: 텅스텐을 몰리브덴으로 부분적으로 대체(5%~20%)함으로써 높은 밀도를 유지하면서 전체 열팽창 계수를 낮추어 세라믹이나 유리와의 열적 정합을 개선합니다. 전자 제품 포장 셀이나 진공 밀봉용 전환 시트에 주로 사용됩니다.  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$  와 같은 희토류 산화물을 미량 첨가하면 분산 강화 메커니즘을 통해 재결정 온도와 고온 강도가 향상되는 동시에 텅스텐 입자가 미세화되고 박판 압연 중 균열 저항성이 개선됩니다.

TiC, ZrC 및 기타 탄화물 입자를 니켈계 결합제 상에 첨가하여 제 3 상 강화제를 형성함으로써 경도와 내마모성을 크게 향상시킵니다. 주로 내마모성 라이닝이나 정밀 금형 인서트에 사용됩니다. FeCoNiCrMn 및 FeCoNiCrAl 과 같은 고엔트로피 합금 분말을 바인더 상으로 사용하여 높은 밀도를 유지하면서 강도와 산화 저항성을 향상시키는 새로운 연구 방향입니다. 현재는 실험실 박막 단계에 머물러 있습니다.

## 2.2 코어 퍼포먼스의 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트를 핵심 특성에 따라 분류하는 것은 엔지니어링 응용 분야에서 해당 재료의 주요 기능에 대한 직접적인 수요를 반영합니다. 현재 텅스텐 합금 시트는 핵심 특성에 따라 고밀도, 고경도, 내식성/내마모성의 세 가지 범주로 크게 분류할 수 있습니다. 이 세 범주는 일부 중복되는 부분이 있지만, 각각의 주요 기능은 다릅니다.

### 2.2.1 고밀도 텅스텐 합금 시트

고밀도 텅스텐 합금 시트는 가장 많이 생산되고 널리 사용되는 텅스텐 합금 시트 유형입니다. 이러한 시트의 핵심 설계 목표는 충분한 가공성과 기계적 신뢰성을 유지하면서 이론적 밀도를 극대화하는 것입니다. 일반적인 밀도는  $17.0\sim 18.8\text{g/cm}^3$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

범위이며, 일부는 거의  $19.0\text{g/cm}^3$ 에 달하여 대부분의 엔지니어링 금속보다 훨씬 높습니다.

이 판재는 텅스텐 함량이 93%~97%인 니켈-철 또는 니켈-구리 합금으로 거의 전적으로 구성되며, 전체 결합재 함량은 3%~7%로 제어됩니다. 이론 밀도에 더욱 근접하기 위해 고순도 미세 텅스텐 분말, 액상 소결 유지 시간 연장, 열간 등방압 성형 후 2 차 성형 등의 공정을 통해 기공률을 0.1% 미만으로 낮추는 것이 일반적인 생산 공정입니다. 압연 공정은 주로 대변량 열간 압연 후 다단계 냉간 압연을 거치며, 두께 방향 밀도 균일도 편차가 0.5%를 넘지 않도록 엄격한 중간 진공 열처리를 시행합니다.

고밀도 텅스텐 합금 시트는 질량 집중과 부피 감소가 요구되는 응용 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 의료 분야에서 방사선 치료 장비의 다엽 콜리메이터에는 일반적으로 0.15~0.5mm 두께의 93W-4.9Ni-2.1Fe 시트가 사용됩니다. 높은 밀도로 인해 방사선 차폐 효율이 향상되고 부피가 절감되어 치료 정확도와 병상 회전율이 직접적으로 향상됩니다. 정밀 기기 분야에서도 이 소재는 분석 저울, 자이로스코프 및 관성 항법 시스템의 카운터웨이트 및 밸런스 플레이트에 널리 사용됩니다. 두께는 일반적으로 0.05~2mm 이며 밀도 허용 오차는  $\pm 0.05\text{g/cm}^3$  이내입니다.

최근 전기 자동차 및 웨어러블 기기에 사용되는 국부 평형추에 대한 수요가 증가함에 따라 고밀도 텅스텐 합금 시트가 초박형( $<0.1\text{mm}$ ) 및 고 표면 조도( $Ra \leq 0.1\mu\text{m}$ ) 방향으로 개발되고 있습니다. 일부 고급 제품은 폴리머 또는 알루미늄 합금과의 복합 적층을 통해 소비자 전자 제품 분야에서의 적용 범위를 더욱 확대하고 있습니다.

## 2.2.2 고경도 텅스텐 합금 시트

고경도 텅스텐 합금 시트는 표면 및 전체 경도를 크게 향상시키는 것을 최우선 목표로 하며, 일반적으로 380~550 HV30 의 비커스 경도를 요구하고, 일부 강화 등급은 600 HV30 을 초과하기도 합니다. 이러한 유형의 시트는 조성 최적화, 변형 강화 및 2 차상 분산이라는 세 가지 방법을 통해 경도 향상을 달성합니다.

일반적인 기술적 접근 방식에는 다음과 같은 것들이 있습니다. 연질 결합상 비율을 줄이기 위해 텅스텐 함량을 95%~98%까지 증가시키는 것; 코발트의 고용 강화 및 석출 강화 효과를 활용하기 위해 코발트-니켈-철 결합상(코발트 함량 3%~8%)을 사용하는 것; 강한 섬유질 조직과 고밀도 전위를 형성하기 위해 총 가공률이 70%를 초과하는 냉간 압연을 하는 것; 분산 강화를 위해 TiC, ZrC, WC 와 같은 탄화물 입자(부피 분율 2%~8%)를 첨가하는 것; 그리고 결합상에서 미세한 금속간 화합물을 석출시키기 위해 저온 장기 시효 처리를 하는 것.

고경도 텅스텐 합금 시트는 일정 수준의 연성을 유지하면서도 내스크래치성, 내압입성 및 내피로성을 크게 향상시킵니다. 정밀 금형 분야에서 휴대폰 프레임 스탬핑용 스테인리스 스틸 금형 인서트로 사용될 경우, 경도 450 HV 이상의 텅스텐 합금 시트는 기존 고속도강에 비해 금형 수명을 3~5 배 연장할 수 있습니다. 광학 유리 열간 프레스

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



금형에서는 표면 경도 520 HV 의 텅스텐 합금 시트와 이온 주입 질화 처리된 텅스텐 합금 시트를 함께 사용하면 고온에서의 유리 접착 및 마모를 효과적으로 방지할 수 있습니다.

또한, 고급 시계 제조에서는 고경도 텅스텐 합금 시트를 로터나 마이크로 기어로 가공하는데, 이는 높은 밀도를 활용하여 관성을 증가시키고 높은 경도를 통해 장기간 작동 시 내마모성을 확보하기 위함입니다. 최근에는 일부 제조업체들이 진공 열처리 및 심층 극저온 처리를 결합한 복합 공정을 사용하여 텅스텐 합금 시트 표면에 경도 구배를 형성함으로써 표면 내마모성과 중심부의 인성을 더욱 균형 있게 맞추고 있습니다.

### 2.2.3 내식성 및 내마모성 텅스텐 합금 시트

내식성 및 내마모성 텅스텐 합금 시트는 주로 화학, 해양, 식품 가공과 같이 부식성 매체 또는 마모성 환경에 노출되는 작업 조건에 사용하기 위해 개발되었습니다. 이러한 시트의 핵심 목적은 산성, 알칼리성, 염분 및 마모성 침식 조건에서 재료의 수명을 향상시키는 것입니다.

주요 구현 경로는 다음과 같습니다. 고니켈 구리 또는 니켈-크롬 바인더 상 시스템을 선택하고, 니켈 함량을 8%~12%, 크롬 함량을 2%~5%로 증가시켜 자체 부동태화 기능을 형성하는 것; 표면에 니켈-인 또는 니켈-붕소 화학 도금을 하거나, CrN, TiAlN, DLC 와 같은 경질 코팅을 10~50μm 두께로 진공 도금하는 것; 바인더 상에 더욱 조밀한 보호 산화막 형성을 촉진하기 위해 미량의 희토류 원소 또는 붕소와 인을 첨가하는 것; 그리고 고에너지 볼 밀링 + 스파크 플라즈마 소결 공정을 사용하여 나노결정질 또는 비정질-나노결정질 복합 구조를 얻는 것입니다.

화학 펌프용 임펠러 가드, 식품 등급 교반기용 인서트, 해수 담수화 장비용 벨브 플레이트와 같은 용도에서 고니켈 표면 코팅 및 기판을 갖춘 텅스텐 합금 시트는 공식 및 틈새 부식에 대한 탁월한 저항성을 나타냅니다. 슬러리 파이프라인 라이닝 및 광물 처리 장비의 선별 스크린과 같은 마모가 심한 환경에서 TiC 분산 강화 텅스텐 합금 시트의 무게 손실은 고크롬 주철의 1/5~1/8에 불과 합니다 .

내식성 및 내마모성이 뛰어난 일부 텅스텐 합금 시트는 경사 구조 설계를 채택하고 있다는 점을 언급할 가치가 있습니다. 표면층은 고크롬-니켈 결합상과 경질상으로 강화된 반면, 중심부는 기존의 니켈-철 비율을 유지하여 전체적인 인성과 가공성을 희생하지 않고도 내식성 및 내마모성을 확보합니다. 이러한 구조 설계는 복잡한 사용 환경에서 텅스텐 합금 시트를 위한 최선 전략을 나타냅니다.

### 2.3 크기 및 규격에 따른 텅스텐 합금 시트의 분류

텅스텐 합금 시트를 크기에 따라 분류하는 것은 제조업체와 최종 사용자 간의 가장 직접적인 소통 방식입니다. 두께는 가공 난이도, 비용 및 적용 방향을 결정하는 가장 중요한 요소입니다. 너비와 길이 또한 영향을 미치지만, 두께가 결정되면 전단, 레이저

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

절단 또는 워터젯 절단을 통해 유연하게 조정할 수 있습니다. 현재 업계에서는 가공 능력의 한계와 다양한 적용 시나리오를 반영하는 비교적 통일된 두께 범위 분류 체계를 구축해 왔습니다.

### 2.3.1 초박형 텅스텐 합금 시트(두께 < 0.1 mm)

초박형 텅스텐 합금 시트는 일반적으로 최종 두께가 0.005mm 에서 0.099mm 사이인 포일을 의미하며, 가장 얇은 것은 0.008mm 미만입니다. 이러한 시트의 제조는 텅스텐 합금 압연 기술의 최고 수준을 보여주며, 원료 순도, 빌릿 균일성, 압연 정밀도 및 청정 환경에 대한 매우 높은 기준이 요구됩니다.

초박막 포일 생산에는 일반적으로 텅스텐 함량이 90~95%인 니켈-철 또는 니켈-구리 시스템이 사용되며, 냉간 가공 성능을 확보하기 위해 바인더 상의 비율을 약간 높입니다. 빌릿은 먼저 열간 등방압 성형 또는 진공 열간 압연을 통해 2~5mm 두께의 판재로 성형한 후, 여러 차례의 냉간 압연 공정을 거쳐야 합니다. 각 공정의 압연 감소율은 5~15%로 엄격하게 제어되며, 전체 공정 수율은 95%를 초과하는 경우가 많습니다. 산화 개재물로 인한 취성 파괴를 방지하기 위해 고진공 또는 고순도 수소 분위기에서 중간 열처리를 수행해야 합니다. 완성된 포일의 표면 조도는 Ra 0.05 $\mu$ m 미만에 도달할 수 있으며, 두께 공차는  $\pm 0.003$ mm 이내로 제어됩니다.

초박형 텅스텐 합금 시트는 주로 의료용 방사선 치료 장비의 다엽 콜리메이터의 가장 얇은 날개, 유연한 방사선 차폐 커튼, 정밀 기기용 진동 감쇠 필름, 고급 시계의 자동 회전 장치 및 일부 유연 전자 기관에 사용됩니다. 최근 웨어러블 의료 기기 및 폴더블 스마트폰에 초박형 고밀도 소재에 대한 수요가 증가함에 따라, 두께 0.03~0.07mm 의 니켈-구리 기반 초박형 포일이 폴리머와 결합되어 차폐 및 유연성을 겸비한 새로운 기능성 필름을 형성하는 데 사용되고 있습니다.

### 2.3.2 일반적인 두께(0.1~10mm)의 텅스텐 합금 시트

현재 가장 널리 사용되는 두께 범위는 0.1mm 에서 10mm 사이로, 텅스텐 합금 시트 전체 생산량의 90% 이상을 차지합니다. 이 두께 범위에 대한 가공 기술은 매우 성숙되어 있고, 비용 관리가 비교적 용이하며, 치수 정확도와 성능 일관성이 대부분의 산업 분야 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

이 두께 범위는 열간 압연부터 냉간 압연 마무리까지 전체 공정 단계를 포괄합니다. 1100~1300℃에서 여러 차례 열간 압연을 거치면 빌릿의 두께가 3~8mm 로 줄어들고, 이후 냉간 압연 및 여러 차례의 중간 어닐링 공정을 통해 최종적으로 요구되는 규격의 제품을 얻습니다. 두께 공차는 일반적으로  $\pm 0.01 \sim \pm 0.05$ mm 이내로 관리되며, 표면은 필요에 따라 연마, 샌딩 또는 화학적 에칭 처리를 할 수 있습니다.

표준 두께의 텅스텐 합금 시트는 거의 모든 주요 응용 분야에 사용됩니다. 0.1~0.5mm 는 콜리메이터 블레이드 및 차폐판에, 0.5~2mm 는 카운터웨이트, 진동 감쇠기 및 방열판에,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



2~6mm 는 금형 인서트 및 표적 후면판에, 그리고 6~10mm 는 주로 구조 지지대 또는 프리캐스트 블랭크에 사용 됩니다 . 이러한 다양한 두께는 표면 처리에도 반영되어 니켈, 금, 은, DLC 도금 또는 직접 양극 산화 처리를 통해 다양한 색상의 장식층을 형성할 수 있어 산업 기능에서부터 소비자 제품의 미적 측면에 이르기까지 다양한 요구를 충족합니다.

### 2.3.3 두꺼운 벽의 텅스텐 합금 시트(두께 > 10mm)

두께가 10mm 를 초과하는 텅스텐 합금 시트는 일반적으로 후판 또는 후벽 시트라고 하며, 최대 두께는 50mm 를 넘습니다. 이러한 제품은 전체 텅스텐 합금 시트 생산량에서 차지하는 비중은 작지만, 시트당 가격이 높고 가공이 어려워 많은 제조업체들이 핵심 생산 설비로 유지하고 있습니다.

후판은 주로 열간 압연을 통해 생산되며, 냉간 압연이 보조적으로 사용됩니다. 소결 밀도의 직경은 일반적으로 300~500mm 입니다. 열간 압연 온도는 1350~1450℃로 제어되며, 두께가 12~15mm 에 도달할 때까지 패스당 20~30%의 감축률로 압연합니다. 이후 온간 압연 또는 냉간 압연으로 전환하여 마무리를 진행합니다. 모서리 균열을 방지하기 위해 클래딩 압연 또는 측면 구속 압연 기술이 일반적으로 사용됩니다. 최종 제품의 두께 공차는 일반적으로  $\pm 0.1 \sim \pm 0.3\text{mm}$  이며, 표면은 탈탄층과 산화막을 제거하기 위해 밀링 또는 연삭 가공이 필요합니다.

두꺼운 벽을 가진 텅스텐 합금 시트는 주로 대형 의료용 선형 가속기의 폴리메이더 베이스, 산업용 CT 검출기의 차폐체, 대형 관성 계측기의 평형판, 석유 시추용 카운터웨이트, 고에너지 물리 실험의 열 흡수체 등에 사용됩니다. 이러한 소재는 크기가 크고 무게가 무거워 운송 및 가공에 특수 공구가 필요한 경우가 많습니다. 따라서 최종 사용자들은 후속 가공을 최소화하기 위해 거의 최종 형상에 가까운 설계를 채택하는 경우가 흔합니다.

### 2.3.4 맞춤형 크기의 텅스텐 합금 시트

맞춤형 텅스텐 합금 시트는 표준 직사각형 및 두께를 초과하는 다양한 불규칙한 모양, 초광폭, 초장형 또는 복합 구조 시트를 의미합니다. 이러한 제품은 고객 도면에 따라 전적으로 제작되며, 이는 텅스텐 합금 시트 생산이 "표준화된 공급"에서 "솔루션 제공"으로 전환되는 추세를 반영합니다.

일반적인 특수 유형에는 깊게 성형된 계단형 시트, 관통 구멍이나 카운터싱크 구멍이 있는 천공 시트, 폭이 600mm 를 초과하는 초광폭 시트, 길이가 2m 를 초과하는 초장형 스트립, 표면에 미세 구조 배열이 있는 기능성 시트, 구리, 알루미늄, 몰리브덴, 세라믹 등과 직접 복합된 적층 시트 등이 있습니다. 생산에는 특수 금형, 레이저 절단, CNC 밀링, 진공 브레이징 또는 열간 등방압 성형(HIP) 캡슐화와 같은 특수 공정이 필요한 경우가 많습니다. 예를 들어, 일부 고급 의료 기기에는 폭 500mm, 두께 0.2mm, 모서리 정밀도 0.05mm 의 도브테일 홈이 있는 텅스텐 합금 시트가 필요하고, 일부 항공우주 광학

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기기에는 거울처럼 매끄럽게 연마된 표면과 복잡한 곡선 벤딩이 있는 텅스텐 합금 진동 감쇠 시트가 필요합니다. 이러한 특수 제품은 단가가 높지만, 고객의 2 차 가공 단계를 직접적으로 줄여주기 때문에 전체적인 비용은 실제로 더 낮아집니다.

## 2.4 적용 시나리오별 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트를 적용 시나리오별로 분류하면 다양한 산업 분야에서 이 소재의 실제 가치를 더욱 명확하게 파악할 수 있습니다. 현재 텅스텐 합금 시트의 주요 적용 분야는 의료, 산업 제조, 전자 정보 및 기타 특수 시나리오를 포괄하는 비교적 안정적인 패턴을 형성하고 있습니다.

### 2.4.1 국방 및 군사용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 높은 밀도, 고강도 및 우수한 인성으로 인해 주로 국방 및 군사 산업에서 사용됩니다. 이러한 응용 분야에는 집중된 질량, 구조적 안정성 또는 특정 기능이 요구되는 부품이 포함됩니다. 텅스텐 합금 시트의 높은 텅스텐 함량은 관성 이점을 제공하며, 결합제는 가공성을 최적화하여 정밀 성형 및 표면 처리를 가능하게 합니다.

균형추의 평형을 맞추는 데 있어 텅스텐 합금판은 질량 분포를 조절하여 시스템의 안정적인 작동을 돕고, 균일한 두께로 정확성을 보장합니다. 보호 구조물에 사용될 경우, 텅스텐 합금판은 방사선 감쇠 특성을 활용하여 얇은 층으로 높은 효율의 차폐를 제공하며, 복합 소재 설계는 전체적인 강도를 향상시킵니다. 텅스텐 합금판은 열 안정성이 뛰어나 고온 환경에 적합하며, 표면 코팅은 내식성을 향상시킵니다.

응용 분야에서는 신뢰성이 최우선시되며, 텅스텐-니켈-철 시스템이 일반적으로 사용되어 장기간 사용에 필요한 화학적 안정성을 보장합니다. 국방 및 군수 산업에서 텅스텐 합금 시트의 역할은 부품 소형화를 가능하게 했으며, 고밀도 소재는 부피를 줄여줍니다.

### 2.4.2 산업 제조용 텅스텐 합금 시트

산업 제조 분야에서 텅스텐 합금 시트는 높은 밀도와 뛰어난 내마모성이라는 장점을 결합하여 다양한 밸런싱 부품, 진동 감쇠 부품, 내마모성 라이너 및 금형 부품에 널리 사용됩니다. 정밀 기기에서는 카운터웨이트, 분석 저울추, 관성 항법 부품에 니켈-철 기반의 고밀도 시트를 사용하여 질량 분포를 정밀하게 제어함으로써 장비의 안정성을 향상시키는 데 활용합니다. 고속 회전 기계의 진동 제어판은 텅스텐 합금 시트의 높은 탄성 계수와 적절한 감쇠 특성을 이용하여 공진을 효과적으로 억제합니다.

금형 산업에서 텅스텐 합금 시트는 스탬핑 다이 인서트, 열간 프레스 유리 금형 코어 또는 와이어 드로잉 다이 입구 부싱으로 가공됩니다. 높은 경도와 고온 연화 저항성은 금형의 수명을 크게 연장시켜 줍니다. 석유 및 광산 장비의 내마모성 라이너, 밸브

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

플레이트 및 노즐에도 마모 침식과 부식성 매체의 이중적인 영향에 대처하기 위해 탄화물 강화 텅스텐 합금 시트가 자주 사용됩니다.

#### 2.4.3 원자력 및 의료용 텅스텐 합금 시트

의료 및 원자력 산업에서 텅스텐 합금 시트는 주로 방사선 차폐 및 콜리메이션 부품에 사용됩니다. 방사선 치료 장비의 다엽 콜리메이터는 일반적으로 0.1~2mm 두께의 니켈-철 또는 니켈-구리 기반 시트를 사용하여 적층을 통해 방사선 빔의 형태를 유연하게 조절할 수 있습니다. 기존의 납과 비교하여 텅스텐 합금 시트는 무독성, 고강도, 그리고 날카로운 모서리를 쉽게 유지할 수 있다는 장점이 있어 현재 주류 소재로 자리 잡고 있습니다. 핵의학 영상 장비의 검출기 콜리메이터와 PET/CT 산란 방지 그리드에도 영상 해상도 향상을 위해 텅스텐 합금 시트가 널리 사용됩니다. 대형 구조물의 X 선 결함 검사 및 파이프 용접부의 감마선 검사와 같은 산업 비파괴 검사에서도 텅스텐 합금 시트로 제작된 차폐 상자 또는 콜리메이션 창이 필요합니다. 원자력 산업에서는 제한된 공간 내에서 효율적인 차폐를 위해 방사선 차폐 용기의 내부 마감재나 폐기물 저장 탱크의 부분 보강재로 두꺼운 텅스텐 합금판이 사용되는 경우가 있습니다. 양성자 및 중이온 치료 장비의 보급이 증가함에 따라 초박형 고균일 텅스텐 합금판에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있습니다.

#### 2.4.4 전자 정보 응용 분야용 텅스텐 합금 시트

전자 및 정보 산업에서 텅스텐 합금 시트에 대한 수요는 주로 열 관리, 전자기 차폐 및 스퍼터링 타겟 재료의 세 가지 영역에 집중되어 있습니다. 고출력 칩, 5G 기지국 전력 증폭기, 레이저 및 기타 장치에는 반도체 재료와 유사한 열팽창 계수와 높은 열전도율을 활용하여 접합 온도를 효과적으로 낮추는 텅스텐-구리 또는 니켈-구리 기반 텅스텐 합금 시트가 방열판 또는 확장층으로 자주 사용됩니다. 또한 텅스텐 합금 시트는 진공 스퍼터링 타겟의 후면판으로도 자주 사용되며, 브레이징 또는 폭발 접합을 통해 순수 텅스텐 또는 텅스텐-레늄 타겟에 접합되어 접합 강도를 확보하는 동시에 전체 비용을 절감할 수 있습니다.

전자기 호환성(EMC) 분야에서 비자성 텅스텐 합금 시트는 휴대전화, 의료 전자 기기, 항공 전자 기기 등 자기장에 민감한 기기의 차폐 커버, 흡수 패치 또는 접지 스프링을 제작하는 데 사용됩니다. 일부 고급 오디오 장비는 저주파 응답을 향상시키기 위해 고밀도 텅스텐 합금 시트를 사용하여 스피커 진동판 무게 링을 제작합니다. 최근 3 세대 반도체(질화갈륨, 탄화규소) 소자의 급속한 발전과 함께 더욱 얇고 열전도율이 우수한 텅스텐 구리 시트에 대한 수요가 급증하면서 관련 공정의 지속적인 최적화가 이루어지고 있습니다.

#### 2.4.5 기타 특수 텅스텐 합금 시트

앞서 언급한 주요 용도 외에도 텅스텐 합금 시트는 특정 분야에서 독특한 역할을 수행합니다. 고급 시계 제조 산업에서는 광택 처리된 텅스텐 합금 시트를 사용하여 자동

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



회전축을 제작함으로써 와인딩 효율을 높이고 착용 시 견고한 느낌을 제공합니다. 스포츠 용품 분야에서는 일부 골프 클럽 헤드에 텅스텐 합금 시트를 상감하여 무게 중심을 조정하고 샷 안정성을 향상시킵니다. 보석 및 장식 예술 분야에서는 금도금 또는 흑도금된 텅스텐 합금 시트가 시계 케이스, 반지 안쪽 밴드, 장식용 버클 등에 사용되어 긁힘 방지 표면과 독특한 금속 광택으로 인기를 얻고 있습니다.

과학 연구에서 텅스텐 합금 시트는 싱크로트론 방사선 발생 장치 및 입자 가속기 실험에 사용되는 고밀도 표적 시트, 시료 홀더 또는 진공 챔버의 국소 라이닝으로 가공되는 경우가 많습니다. 미술 복원 및 문화재 보존 분야에서도 정밀 추 또는 구조 보강재로 텅스텐 합금 시트가 간혹 사용됩니다. 나아가 웨어러블 기기 진동 모터 추, 드론 짐벌 밸런스 플레이트, 경주용 자동차 휠 웨이트와 같은 새로운 융합 분야에서도 소형화와 고성능을 동시에 구현하기 위해 텅스텐 합금 시트가 점차 채택되고 있습니다.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

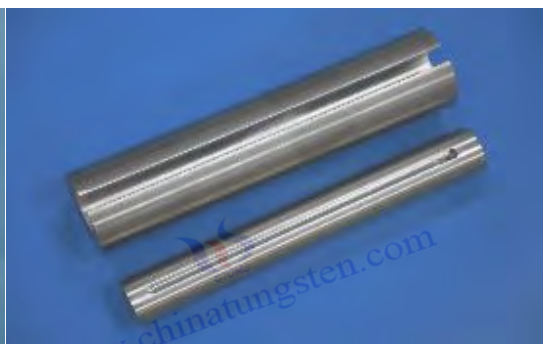
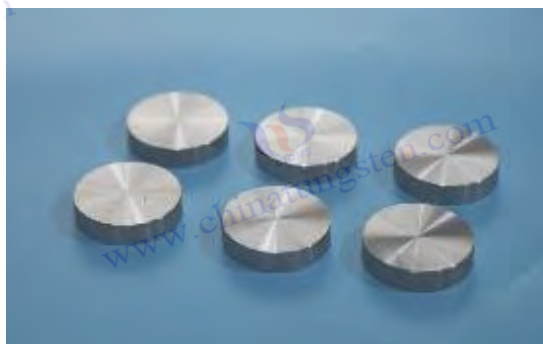
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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)

## 제 3 장 텅스텐 합금판의 합금 원리 및 조성 체계

### 3.1 텅스텐 합금판 합금의 화학적 원리

텅스텐 합금 시트는 본질적으로 텅스텐에 소량의 다른 금속이나 화합물을 첨가하여 텅스텐 고유의 높은 밀도와 높은 용점을 유지하면서 상온에서의 소성, 고온 강도, 산화 저항성 및 가공 성능을 크게 향상시키는 것을 목표로 합니다. 텅스텐 자체는 체심 입방 구조와 큰 원자 반지름을 가지고 있습니다. 순수 텅스텐은 상온에서 이동 가능한 슬립 시스템이 거의 없으며, 취성 전이 온도가 300~400°C 이상으로 매우 높아 상온 압연 시 균열이 발생하기 쉽습니다. 합금을 통해 도입된 면심 입방 구조 또는 육방 밀집 구조의 결합상은 텅스텐 입자에 연속적인 소성 변형 채널을 제공합니다. 소결 및 열간 가공 과정에서 용해-재침전, 계면 습윤, 계면 응력 조절 등 일련의 물리화학적 과정이 동시에 발생하여, 최종적으로 텅스텐 입자가 결합상에 둘러싸인 전형적인 2 상 복합 구조가 형성됩니다. 이 구조는 텅스텐의 단단한 골격을 유지하면서 순수 텅스텐을 훨씬 능가하는 거시적 가소성과 인성을 달성하여, 이후 큰 변형을 가해 얇은 판재로 압연할 수 있는 조건을 제공합니다.

#### 3.1.1 텅스텐과 다른 금속 원소의 상평도 분석

텅스텐은 액체 상태에서 대부분의 전이 금속과 무한히 혼합 가능하지만, 고체 상태에서는 용해도가 극히 낮습니다. 이는 텅스텐 합금 시트의 합금화에 있어 기본적인 상평도 특성을 나타냅니다. W-Ni 이원 상평도를 보면, 1500°C에서 텅스텐에 대한 니켈의 고용도는 2at%를 넘지 않으며, 상온으로 냉각되면 거의 0에 가깝습니다. 반면, 니켈에 대한 텅스텐의 용해도는 이보다 약간 높지만 여전히 제한적입니다. W-Fe, W-Cu, W-Co, W-Mo 등의 시스템에서도 유사한 특성이 나타납니다. 고온에서는 넓은 액상 영역이 존재하여 액상 소결을 용이하게 하고, 저온에서는 거의 완전히 혼합되지 않는 공용 또는 준공용계가 형성됩니다. 텅스텐 합금은 "고온에서의 혼화성과 저온에서의 분리성"이라는 특성 덕분에 액상 소결 단계에서 오스트발트 숙성 메커니즘을 통해 텅스텐 입자의 구형화 및 치밀화를 달성하는 동시에, 고체 냉각 후에는 텅스텐 입자와 결합제 상이 명확하게 분리된 2상 구조를 형성할 수 있습니다.

W-Cu 및 W-Ag 시스템은 더욱 극단적인 특성을 보입니다. 액체 상태에서도 부분적으로만 혼합 가능하며 고체 상태에서는 전혀 화합물을 형성하지 않아 전형적인 유사합금으로 분류됩니다. 반면 W-Mo 및 W-Re 시스템은 몰리브덴과 레늄이 텅스텐과 연속적인 고용체를 형성할 수 있도록 합니다. 이러한 특성을 이용하여 텅스텐을 몰리브덴이나 레늄으로 부분적으로 치환함으로써 열팽창 계수를 조절하거나 재결정 온도를 높일 수 있습니다. 실제 생산에서는 W-Ni-Fe 삼원상 평형도가 가장 일반적으로 사용됩니다. 액상선 출현 온도 부근에는 액상과 텅스텐 고체상으로 이루어진 넓은 2 상 영역이 존재합니다. 니켈-철 비율이 7:3에서 8:2 사이일 때, 액상의 양은 적당하여 빌릿이 붕괴되지 않고 텅스텐 입자를 적시기에 충분합니다. 상태도 분석은 조성물 설계에 직접적인 기반을 제공합니다. 결합제 상의 총량은 일반적으로 부피 기준으로 3%에서 10%

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



사이로 조절됩니다. 부피가 너무 낮으면 습윤성이 부족하고 밀도가 떨어지며, 너무 높으면 밀도와 경도가 크게 감소합니다.

### 3.1.2 고용체 강화 및 분산 강화의 화학적 메커니즘

텅스텐 합금 시트는 결합상으로부터 유래합니다. 니켈, 철, 구리, 코발트와 같은 원소들은 면심 입방 구조의  $\gamma$ 상에 무한히 혼합되어 치환 고용체를 형성합니다. 원자 반지름이 더 큰 텅스텐, 몰리브덴, 레늄이 니켈 기반 결합상에 용해되면 격자 왜곡이 발생하여 전위 이동을 억제하고, 결과적으로 결합상 자체의 항복 강도를 증가시킵니다. 특히 코발트를 첨가하면 적층 결합 에너지를 감소시키고, 교차 슬립 및 쌍정 형성을 촉진하여 가공 경화 능력을 더욱 향상시키기 때문에 효과적입니다. 철과 구리는 어느 정도 결합상의 적층 결합 에너지를 감소시켜 변형이 더 쉽게 배향되도록 하고, 간접적으로 전체적인 소성을 향상시킵니다.

분산 강화는 텅스텐 합금 시트가 고강도 및 고온 성능을 달성하는 핵심 메커니즘입니다. 소결 과정에서 바인더 상에 대한 텅스텐의 용해도는 온도가 낮아짐에 따라 급격히 감소하며, 이로 인해 과포화된 텅스텐 원자가 냉각 단계에서 매우 미세한 입자로 재석출되어 텅스텐/바인더 상 계면에 고정되고 계면 강화층을 형성합니다. 동시에 TiC 와 같은 인위적으로 첨가된 제 2 상 입자는 지르코늄(ZrC), HfC 와 희토류 산화물은 소결 과정에서 용해되지 않고 결합상 또는 계면에 균일하게 분포되어 전위 및 결정립계 이동을 효과적으로 억제합니다. 최근에는 나노결정 텅스텐 합금 시트에서 텅스텐 입자 크기를 100nm 이하로 더욱 정밀하게 제어하여 Hall-Petch 법칙을 활용해 강도를 크게 향상시켰습니다. 이러한 두 가지 강화 메커니즘의 시너지 효과로 텅스텐 합금 시트는 900°C 이상의 고온에서도 높은 강도를 유지할 수 있습니다.

### 3.1.3 합금상의 형성 조건 및 안정성

텅스텐 합금 시트의 주요 합금상은 텅스텐 고용체상,  $\gamma$ - (Ni, Fe, Cu) 결합상, 그리고 금속간 화합물 또는 산화물 분산상을 포함합니다.  $\gamma$ 상의 형성은 액상 소결 과정에서 결합 원소의 충분한 확산 및 균질화에 달려 있습니다. 소결 온도는 최저 공융점보다 약 50~100°C 높게 설정하고, 텅스텐 입자가 재배열되고 구상화될 수 있도록 해당 온도를 유지해야 합니다. 수소 분위기에서 미량의 수증기를 제어하는 것은 산소 함량에 영향을 미칩니다. 산소 함량이 너무 높으면 휘발성  $WO_2$  ( $OH$ )<sub>2</sub> 가 생성되어 텅스텐 손실이 발생하고, 너무 낮으면 통풍이 불량해지고 기공이 막힙니다.

바인더 상의 장기 안정성은 주로 텅스텐과 바인더 상 사이의 계면 에너지 및 열팽창 차이에 의해 좌우됩니다. 텅스텐과 니켈, 철, 구리 사이의 계면에서의 접촉각은 액상 소결 온도에서 0°에 가깝습니다. 냉각 후, 계면 결합은 주로 금속성 결합으로 이루어져 높은 강도를 나타냅니다. 열팽창 계수 차이로 인한 잔류 계면 응력은 어닐링 과정에서 부분적으로 해소될 수 있지만, 지나치게 높은 온도에서는 커켄달 공극이나 취성 계면상(예:  $Ni_4W$ )이 생성될 수 있습니다.  $Fe_7W_6$ ). 미량의 희토류 원소 또는 붕소와 인을 첨가하면 계면에서 분리되어 얇은 비정질 또는 화합물 막을 형성함으로써 계면의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고온 안정성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 진공 또는 중성 분위기에서는 텅스텐 합금 시트를 1000°C 이상의 고온에서 장기간 사용해도 상당한 상변화나 미세구조 조대화 현상이 발생하지 않지만, 공기 중에서는 결합상 보호 및 선택적 산화 억제를 위해 표면 코팅이 필요합니다.

### 3.2 텅스텐 합금 시트의 구성 원소의 역할 및 비율

텅스텐 합금 시트의 구성 원소의 역할과 비율은 합금 설계의 핵심 요소입니다. 텅스텐, 결합 원소 및 미량 첨가제의 비율을 합리적으로 선택하고 제어함으로써 고밀도 및 고용점을 유지하면서 재료의 가공 성능, 기계적 특성 및 환경 적응성을 최적화할 수 있습니다. 주성분인 텅스텐은 재료의 밀도 기반과 고온 안정성을 제공하며, 니켈, 철, 구리와 같은 결합 원소는 취성을 개선하고 치밀화를 촉진하는 역할을 합니다. 배합 설계는 일반적으로 상평형도 분석, 소결 동역학 및 열기계적 가공 실험을 기반으로 하며, 각 원소가 액상 소결 단계에서 습윤 및 확산 효과를 충분히 발휘하고 고체 상태에서 안정적인 2 상 구조를 형성하도록 합니다. 텅스텐 함량이 과도하면 소성이 부족해지고, 결합 원소가 너무 많으면 전체 밀도가 감소하므로 적용 시나리오에 따라 배합 비율을 조정해야 합니다. 예를 들어, 높은 경도가 요구되는 응용 분야에서는 텅스텐의 비율을 적절히 높일 수 있으며, 열전도율이 중요한 시스템에서는 구리와 같은 원소의 함량을 그에 상응하게 증가시킬 수 있습니다. 미량 원소의 첨가는 미세 구조를 더욱 미세화하고, 결정립 성장을 억제하거나, 계면 강도를 향상시키지만, 유해한 상의 생성을 방지하기 위해 그 비율을 엄격하게 제어해야 합니다. 전반적으로, 구성 원소의 역할은 원자 수준의 고용체 강화, 마이크론 수준의 상 계면 조절, 그리고 거시 수준의 성능 균형이라는 다중 스케일 시너지 효과에 반영됩니다. 이러한 배합 원리는 기존의 니켈-철 및 니켈-구리 시스템뿐만 아니라 새로운 복합 시스템에도 적용 가능하므로, 재료 엔지니어가 특정 요구 사항에 따라 합금 조성을 맞춤화하는 데 도움이 됩니다.

실제 배합에서 텅스텐 분말의 순도와 입자 크기 분포는 최종 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 고순도의 미세 분말은 균일한 분포와 기공 감소에 유리하며, 결합상 원소는 일반적으로 금속 분말 또는 사전 합금 분말 형태로 첨가되어 균일한 혼합을 보장합니다. 소결 온도의 선택은 배합과 밀접한 관련이 있습니다. 결합상 함량이 높을수록 소결 온도를 낮추고 에너지 소비를 줄이며 텅스텐 입자의 조대화를 억제할 수 있습니다. 열처리 중 배합 최적화는 어닐링 조건을 설계하고 냉각 속도를 조절하여 고용체 내 원소 분포를 제어함으로써 강도와 인성 사이의 균형을 맞추는 것을 포함합니다. 표면 처리 시에도 배합을 고려해야 합니다. 예를 들어, 코팅 전 표면 원소의 농도를 조절하여 접착력을 향상시킬 수 있습니다. 텅스텐 합금 시트의 조성은 자원 가용성과 환경 요인에도 영향을 받습니다. 일부 철이나 구리는 재활용 재료에서 얻을 수 있지만, 불순물은 허용 가능한 한도 내로 관리해야 합니다.

#### 3.2.1 니켈-철 시스템에서 텅스텐 합금 시트의 시너지 메커니즘

텅스텐 합금 시트에서 니켈-철 시스템의 시너지 메커니즘은 주로 결합상 내 니켈과 철의 상호보완적인 작용 및 텅스텐 입자와의 계면 상호작용에서 비롯됩니다. 이 시스템에서 주

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결합 원소인 니켈은 우수한 젖음성과 연성을 제공하는 반면, 철의 첨가는 고용체 강화를 증진시키고 상 안정성을 조절합니다. 이들은 함께 액상 소결 공정의 원활한 진행을 촉진합니다. 소결 초기 단계에서 니켈과 철은 저융점 액상을 형성하여 텅스텐 입자를 빠르게 감싸 입자 재배열 및 초기 치밀화를 달성합니다. 철의 참여는 액상의 점도를 낮추고 확산 속도를 증가시켜 텅스텐 원자가 결합상에 더 쉽게 용해되도록 하며, 냉각 시 미세 입자를 석출시켜 계면을 더욱 강화합니다. 이러한 시너지 효과는 미세구조 변화에도 반영됩니다. 니켈-철 고용체는 면심 입방 구조를 가지므로 변형 응력을 효과적으로 흡수하고 텅스텐 입자 간의 직접적인 접촉을 줄여 전체적인 소성을 향상시킵니다. 열간 가공 단계에서 이러한 시너지 효과로 인해 압연 중 균열 전파가 덜 발생하며, 어닐링 후 미세구조는 균일성을 회복합니다.

화학적 관점에서 니켈과 철의 전자 구조 차이는 고용체 내 격자 왜곡을 유발하여 전위 이동을 억제하고 결합상 강도를 증가시킵니다. 동시에 철의 강자성은 전자기적 특성에 영향을 미치지만 시스템의 비자성적 우세성은 변화시키지 않습니다. 계면에서 니켈은 깨끗한 결합을 형성하는 경향이 있는 반면, 철은 미세 산화물의 안정적인 존재를 촉진하여 계면 에너지를 향상시킵니다. 냉각 과정에서 이 두 원소의 시너지 효과는 비정상적인 텅스텐 입자 성장을 억제하여 미세한 구형 형태를 유지하며, 이는 후속 냉간 가공에 유리합니다. 미시적으로 이 메커니즘은 용해-재침전 메커니즘을 포함합니다. 고온에서 텅스텐은 니켈-철 상에 부분적으로 용해되고, 저온에서 재침전되어 결정립계를 고정시켜 고온 안정성을 향상시킵니다. 거시적으로 이는 반복적인 열 순환 동안 재료의 치수 안정성을 유지하는 것으로 나타나며, 열 피로 저항성이 요구되는 응용 분야에 적합합니다. 비례 제어는 메커니즘의 효율성을 좌우하는 핵심 요소이며, 니켈-철 비율은 일반적으로 습윤 효과와 강화 효과의 균형을 맞추도록 조정됩니다. 철 함량이 과도하면 취성상이 발생할 수 있지만, 적절한 양은 인성을 최적화합니다.

추가 분석 결과, 이러한 시너지 효과는 부식 거동에도 적용되는 것으로 나타났습니다. 니켈은 부동태 피막의 기초를 제공하고, 철은 피막의 균일한 분포를 도와 산성 환경에서의 내식성을 향상시킵니다. 가공 성능 측면에서, 층간 열처리는 두 원소의 시너지 효과를 활용하여 미세 구조를 복원하고 잔류 응력 축적을 감소시킵니다. 환경 적응성 측면에서, 이 시스템은 다양한 습도 또는 온도 조건에 맞춰 미세 조정할 수 있어 장기적인 사용 신뢰성을 보장합니다. 요컨대, 니켈-철 시스템의 시너지 메커니즘은 원소 간 상호 보완성과 다중 스케일 상호작용이라는 재료 과학 원리를 구현하며, 텅스텐 합금 시트의 엔지니어링 응용 분야에 안정적인 기반을 제공합니다.

### 3.2.2 텅스텐 합금 시트 니켈-구리 시스템의 시너지 메커니즘

구리 의 무한한 혼화성과 텅스텐과의 독특한 계면 화학적 거동에 기반합니다. 이 시스템에서 니켈은 결합 강도와 습윤성을 제공하는 반면, 구리의 첨가는 열전도도와 전기전도도를 크게 향상시킵니다. 이들은 함께 균일한 고용체 결합상을 형성하여 소결 과정에서 치밀화 및 미세구조 최적화를 촉진합니다. 액상 출현 단계에서 니켈-구리 액상은 낮은 표면 장력을 가지므로 쉽게 퍼져 텅스텐 입자를 덮어 효율적인 재배열을 가능하게 합니다. 구리의 존재는 액상의 유동성을 증가시키고 텅스텐 원자의 확산 및

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



이동을 가속화하며, 응고 과정에서 더욱 미세한 계면층을 형성하여 기공 잔류물을 감소시킵니다. 이러한 시너지 효과는 열물리적 특성에 반영됩니다. 니켈-구리 고용체는 니켈의 연성과 구리 의 열 확산 특성을 결합하여 열충격에 대한 재료의 우수한 안정성을 제공합니다. 가공 과정에서 이 메커니즘은 열간 압연과 냉간 압연 중 재료의 변형을 조절하여 층간 분리를 방지하는 데 도움을 줍니다.

화학적 메커니즘 측면에서, 니켈과 구리의 유사한 원자 크기는 고용체 내에서 불규칙적인 분포를 보장하여 격자 변형을 최소화하고 상 강도를 증가시킵니다. 동시에, 구리의 비자성 특성은 시스템 전체의 자화를 방지하여 전자기파에 민감한 환경에 적합하게 만듭니다. 계면 상호작용에서, 니켈은 화학적 결합을 형성하는 경향이 있는 반면, 구리는 물리적 흡착을 도와 저에너지 계면을 형성하고 결합 내구성을 향상시킵니다. 냉각 과정에서, 두 원소는 시너지 효과를 발휘하여 텅스텐 입자의 불균일한 구형화를 억제하고 미세구조의 균일성을 유지하며 초박막 시트 생산을 용이하게 합니다. 미시적 규모에서, 이 메커니즘은 열역학적 평형을 포함합니다. 즉, 텅스텐 원자는 고온에서 용해되고 저온에서 석출되어 고온 크리프 저항성을 향상시키는 분산된 강화 입자를 형성합니다. 거시적으로 볼 때, 이 소재는 온도 구배 환경에서도 균일한 열전도율을 유지하여 열 관리 부품에 적합합니다. 내식성 및 내후성 측면에서 니켈과 구리는 시너지 효과를 발휘하여 표면 보호막 형성을 신속하게 촉진함으로써 습하거나 염수 분무 조건에서도 보호 성능을 향상시킵니다. 압연 최적화 과정에서 어닐링은 두 원소 간의 확산 차이를 이용하여 결정 결합을 복원하고 표면 품질을 개선합니다. 환경 조건에서 이 시스템은 다양한 산화 분위기에 맞춰 비율을 미세 조정할 수 있도록 하여 장기간 노출 시에도 재료 특성의 점진적인 변화를 제어 가능하게 합니다.

### 3.2.3 미량 원소의 텅스텐 합금 시트에 대한 도핑 효과

텅스텐 합금 시트는 주로 결정립계 편석, 상 계면 변형, 고용체 교란을 통해 미세구조와 물성에 영향을 미칩니다. 이러한 영향은 특히 기존의 니켈-철 또는 니켈-구리 시스템에서 두드러집니다. 미량의 희토류 원소(붕소, 인, 코발트 등)를 첨가하면 텅스텐 입자를 미세화하고 결합상 인성을 향상시키며 전체적인 균일성을 높일 수 있습니다. 소결 과정에서 첨가물은 액상에 축적되어 표면 에너지를 감소시키고 텅스텐 입자의 균일한 분포를 촉진하며 성장을 억제합니다. 첨가 후 미세구조는 더욱 안정화되어 기공이 감소하고 밀도가 증가합니다. 열간 가공 시 이러한 효과는 균열 발생을 줄이고 어닐링 중 응력 해소를 촉진하며 항복 강도를 향상시키는 데 도움이 됩니다.

기계적 관점에서, 란탄과 이트륨 같은 희토류 원소를 도핑하면 분산된 산화물 상이 형성되어 결정립계를 고정시키고, 결정립 이동을 억제하며, 재결정화 온도를 높입니다. 붕소와 인은 계면에 얇은 막을 형성하여 접촉각을 조절하고 계면 결합을 강화합니다. 코발트 도핑은 바인더 고용체를 강화하고, 적층 결합 에너지를 증가시키며, 변형 적합성을 향상시킵니다. 미시적으로, 도핑은 국부적인 전자 밀도 변화를 일으켜 확산 속도에 영향을 미치고, 저온에서 미세상을 석출시켜 재료의 강도를 더욱 높입니다. 거시적으로, 이러한 작용들은 파괴 인성과 경도가 조화롭게 어우러진 기계적 특성의 균형을 이루어 정밀 부품에 적합한 재료를 만들어냅니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



부식 거동 측면에서, 도핑 원소는 부동태 피막의 성장을 촉진하여 매체 침식에 대한 저항성을 향상시킵니다. 표면 처리 시, 도핑은 코팅 접착력을 개선하고 수명을 연장합니다. 환경 적응 측면에서, 이러한 효과는 다양한 온도 또는 습도 조건에 대응하기 위한 맞춤형 조정을 가능하게 합니다. 요컨대, 미량 원소 도핑 효과는 소량 첨가가 큰 영향을 미친다는 재료 원리를 보여주며, 텅스텐 합금 시트의 성능을 최적화하는 효과적인 접근 방식을 제공합니다. 실험적 검증을 통해 이러한 효과가 새로운 도핑 전략을 제시하고 재료 과학의 지속적인 발전을 촉진할 수 있음을 확인했습니다.

### 3.3 텅스텐 합금판 구성 설계의 화학적 원리

텅스텐 합금 시트의 제조는 주로 상평형, 확산 속도론, 계면 화학적 거동을 중심으로 이루어집니다. 이러한 원리는 원료 준비부터 최종 열처리까지 전 과정에 적용되어 재료 특성의 안정성과 재현성을 보장합니다. 조성 설계의 핵심은 텅스텐과 바인더 상 원소의 비율을 제어하는 데 있습니다. 상평형도 분석은 잠재적인 상 구조를 예측하고 유해한 상의 형성을 방지하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 텅스텐-니켈-철 시스템에서 화학적 원리는 액상 소결 중 습윤성을 유지하고 냉각 후 고용체의 안정성을 확보하기 위해 니켈-철 비율의 균형을 유지하는 데 중점을 둡니다. 확산 원리는 고온에서의 원소 이동 속도를 고려해야 합니다. 텅스텐 원자는 니켈이나 구리보다 확산 속도가 느리기 때문에 균일한 분포를 위해서는 유지 시간을 연장해야 합니다. 계면 화학적 원리는 텅스텐 입자와 바인더 상 사이의 결합 에너지를 다룹니다. 표면 장력을 조절하고 계면 결합 강도를 향상시키기 위해 미량 원소가 설계에 종종 첨가됩니다.

실제 설계에서 화학적 원리에는 산화환원 균형에 대한 고려도 포함됩니다. 소결 분위기의 수소 이슬점은 텅스텐 산화를 억제하고 바인더 상의 환원을 촉진하기 위해 조성물과 일치해야 합니다. 배합 과정에서 텅스텐 함량이 높을 경우 소성 손실을 보상하기 위해 바인더 상의 양을 늘려야 하지만, 바인더 상이 과도할 경우 밀도를 유지하기 위해 조정이 필요합니다. 열처리 공정은 상변환 원리를 따르며, 냉각 속도를 제어하여 석출상의 크기와 분포를 조절하고 기계적 특성을 최적화합니다. 표면 화학적 원리는 코팅 설계에 반영됩니다. 조성물은 원소 분리로 인한 접착 문제를 방지하기 위해 도금 용액과 호환되어야 합니다. 환경적 고려 사항으로는 재활용 원소의 사용이 권장되지만, 취성상의 생성을 방지하기 위해 산소 및 탄소와 같은 불순물의 함량을 제어해야 합니다.

#### 3.3.1 텅스텐 합금 시트의 성능 중심 조성 최적화 로직

텅스텐 합금 시트의 성능 지향적인 조성 최적화 논리는 최종 용도 요구사항에서 출발하여 역으로 원소 비율과 첨가 순서를 도출함으로써 밀도, 경도, 열전도율, 연성 등의 물성 균형을 확보합니다. 이 논리는 먼저 핵심 물성을 파악합니다. 예를 들어 고밀도를 추구할 경우, 가공성을 유지하기 위해 바인더 상을 미세 조정하면서 텅스텐 비율을 높이는 것을 우선시합니다. 최적화 과정은 여러 번의 반복을 거칩니다. 초기 비율은 상평형도를 기반으로 액상 함량을 결정하여 추정하고, 실험적 검증 후 소결 수축률에 맞춰 조정합니다. 이 논리는 원소 간의 시너지 효과를 강조합니다. 예를 들어 니켈은 연성을 제공하고, 철이나 구리는 강도 또는 열전도율을 향상시키며, 이들의 비율을 최적화하면

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열 안정성을 개선할 수 있습니다. 미량 도핑은 미세 조정 방법으로 사용됩니다. 희토류 원소는 미세 구조를 개선하고, 붕소와 인은 계면을 조절하여 내식성을 향상시킵니다.

이 설계 논리에는 성능 간의 상충 관계도 고려됩니다. 높은 경도를 위해서는 텅스텐 함량을 늘리고 탄화물을 첨가하지만, 인성 감소를 모니터링하고 어닐링 최적화를 통해 균형을 맞춰야 합니다. 열전도율을 높이기 위해서는 구리 비율을 높이지만, 다공성 미세구조를 유발하는 과도한 액상 생성을 피해야 합니다. 최적화 과정에서 화학 시뮬레이션 도구를 활용하여 상 형성 경로를 예측하고 실험 횟수를 줄일 수 있습니다. 열기계적 가공 피드백도 논리에 통합되어 있으며, 압연 결함 분석을 통해 코발트를 첨가하여 변형 조정을 개선하는 등 조성 미세 조정을 수행합니다. 환경 성능 측면에서는 내식성 상 형성에 초점을 맞추고, 크롬 또는 몰리브덴의 첨가 비율을 매체의 종류에 따라 조정합니다. 전체적인 논리는 요구사항 정의 - 배합 설계 - 제조 검증 - 성능 시험 - 반복 조정의 폐쇄 루프를 형성하여 조성과 성능 간의 긴밀한 상관관계를 보장합니다. 이러한 논리를 통해 텅스텐 합금 시트는 정밀 기기 및 열 관리 와 같은 분야의 다양한 요구 사항에 적응할 수 있으며, 소재 설계의 실용적인 지향성을 보여줍니다.

### 3.3.2 텅스텐 합금 시트의 조성 균일성을 위한 화학적 제어 방법

텅스텐 합금 시트의 조성 균일성 제어는 주로 분말 혼합, 소결 매개변수 조정 및 열처리 확산을 통해 이루어집니다. 이러한 방법들은 원료에서 완제품에 이르기까지 모든 단계에서 품질 관리를 보장하고, 편석 및 불균일성으로 인한 성능 변동을 방지합니다. 분말 혼합 단계에서는 기계적 합금화 또는 분무 건조와 같은 방법을 사용하여 텅스텐, 니켈, 철과 같은 원소들이 마이크론 규모에서 균일하게 분포되도록 합니다. 계면활성제와 같은 화학 첨가제는 분말 분산을 돕습니다. 소결 제어에서는 액상량 조절이 매우 중요합니다. 온도 구배 설계는 균일한 습윤을 촉진하고, 수소 흐름은 휘발성 불순물을 제거하여 국부적인 농축을 줄입니다. 냉각 속도 조정은 불균일한 원소 확산을 억제하고, 급속 냉각은 균일한 상태를 유지합니다.

열처리 방법에는 원자 수준의 확산을 촉진하고 농도 구배를 제거하며 여러 번의 어닐링 과정을 통해 재료를 더욱 균질화하는 진공 어닐링이 포함됩니다. 이온 주입이나 화학 기상 증착과 같은 표면 화학적 방법은 관개 표면에 균일한 층을 형성하여 전반적인 일관성을 향상시킵니다. 품질 관리에서는 화학 분석 결과를 바탕으로 방법을 반복적으로 개선하는데, 예를 들어 분광 분석을 통해 편석 영역을 감지한 후 배합 비율을 조정합니다. 환경 친화적인 방법에서는 불균일한 혼합 위험을 줄이기 위해 사전 합금된 분말을 사용합니다.

### 3.3.3 불순물 원소가 텅스텐 합금 시트의 성능에 미치는 영향

텅스텐 합금 시트의 불순물은 주로 원료 텅스텐 분말, 결합제 분말, 가공 중 유입되는 가스 및 장비 잔류물에서 비롯됩니다. 극히 미량의 불순물이라도 미세구조, 기계적 특성 및 환경 적응성에 상당한 영향을 미칠 수 있습니다. 일반적인 불순물로는 산소, 탄소,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

질소, 인, 황, 규소, 칼륨, 나트륨, 칼슘 등이 있으며, 이 중 산소와 탄소가 가장 광범위한 영향을 미칩니다.

산소가 자유 상태 또는 산화물 형태로 존재할 경우, 텅스텐 입자 표면에 얇은 산화막을 쉽게 형성하여 액상 소결 시 습윤성을 저하시키고, 계면 결합을 약화시키며, 국부적인 미세 기공이나 개재물을 생성합니다. 이는 결과적으로 파괴 인성을 감소시키고 롤링 균열 발생 경향을 증가시킵니다. 또한, 산소는 고온에서 텅스텐과 반응하여 휘발성 산화물을 형성함으로써 텅스텐 입자 표면을 거칠게 만들고, 입자 재배열을 방해하며, 최종 밀도에 영향을 미칩니다. 탄소의 존재는 더욱 복잡합니다. 미량의 탄소는 텅스텐과 미세한 탄화물을 형성하여 분산 강도를 어느 정도 향상시키지만, 과량의 탄소는 결정립계 또는 계면에 편석되어 취성 WC 또는  $W_2C$  를 형성함으로써 계면 강도를 크게 약화시키고 응력 하에서 입계 파괴 발생 경향을 증가시킵니다. 일반적으로 고온 수소 분위기에서 질소는 환원되어 제거되지만, 잔류 질소는 텅스텐 과 함께 질화물 바늘상 상을 형성하여 균열 발생 지점이 될 수 있습니다. 인이나 황과 같은 미량의 원소조차도 결합제 상이나 계면에 쉽게 축적되어 저융점 화합물을 형성함으로써 고온 강도를 저하시키고 열 취성을 유발합니다. 칼륨, 나트륨과 같은 알칼리 금속뿐만 아니라 칼슘, 규소는 주로 텅스텐 분말 제조를 위한 텅스테이트 공정의 잔류물에서 유래합니다. 이들은 소결 과정에서 휘발되거나 기공을 형성하여 구조의 연속성을 방해하고 심한 경우 기포 발생이나 박리를 유발합니다.

불순물은 성능에 시너지 효과를 미칩니다. 예를 들어, 산소와 인이 공존하면 인산염 유리상이 쉽게 형성되는데, 이 유리상은 텅스텐 입자를 감싸 용해-재침전 과정을 방해하고 텅스텐 입자의 불규칙한 모양을 유발하여 구형도를 저하시킵니다. 고온 환경에서는 불순물이 풍부한 부분이 산화 또는 부식이 우선적으로 발생하는 부위가 되어 재료의 파손을 가속화합니다. 초박막 시트 생산 시에는 불순물로 인한 미세한 결함이 증폭되어 모서리 균열이나 오렌지 껍질 같은 표면 결함의 원인이 될 수 있습니다. 따라서 현대 텅스텐 합금 시트 생산에서는 원료 순도와 공정 청결도에 대한 요구가 점점 더 높아지고 있으며, 불순물 제어는 재료가 고급 응용 분야에 적용될 수 있는지 여부를 결정하는 핵심 요소 중 하나가 되었습니다.

### 3.3.4 텅스텐 합금판에서 불순물을 제거하는 방법

텅스텐 합금 시트는 원료 준비부터 완제품 열처리까지 전 공정에 걸쳐 제조 됩니다. 화학적 정제, 물리적 정제, 분위기 정제 및 후처리 등 다양한 방법을 종합적으로 적용하여 다단계 정제 시스템을 구축합니다.

원료 단계에서의 불순물 제거 공정은 매우 중요합니다. 텅스텐 분말은 일반적으로 고순도 텅스텐산암모늄을 전구체로 사용하며, 여러 차례의 재결정 및 침출 수소 환원 공정을 통해 산소, 알칼리 금속, 인과 같은 불순물을 낮은 수준으로 줄입니다. 바인더 역할을 하는 니켈, 철, 구리 분말은 카르보닐법 또는 전해법으로 제조한 후 진공 탈기 과정을 거쳐 탄소, 산소, 황 함량을 더욱 줄입니다. 혼합 전에 텅스텐 분말은 종종 고온 수소 정제 처리를 거치는데, 이 과정에서 수소와 산화물의 환원 반응을 이용하여 수증기를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



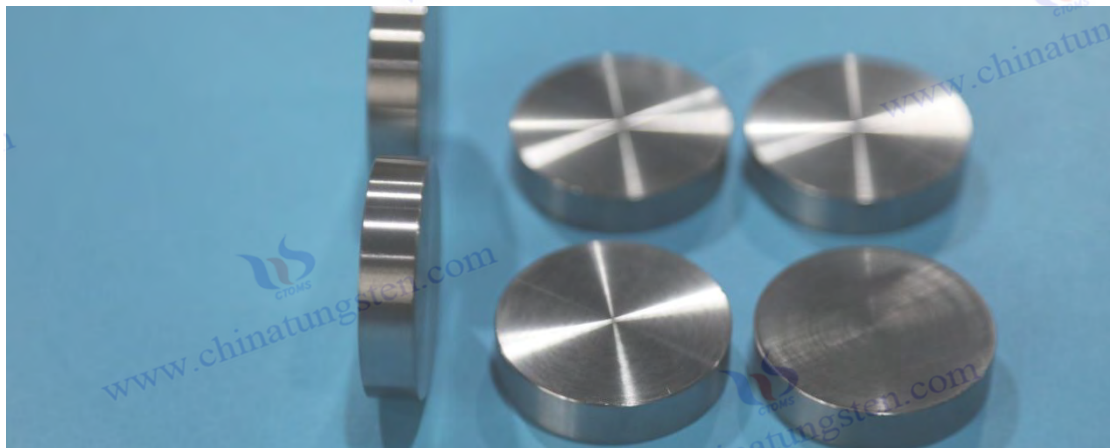
발생시키고, 이 수증기를 방출함으로써 칼륨, 나트륨과 같은 잔류 휘발성 불순물을 제거합니다.

소결 단계는 기체 및 휘발성 불순물을 제거하는 데 매우 중요한 단계입니다. 습식 수소 분위기(이슬점을 엄격하게 제어)는 텅스텐 입자 표면의 산화물을 효율적으로 환원시키고 용광로에서 수증기를 제거합니다. 건식 수소 또는 고진공 소결은 질소 및 잔류 탄화수소를 제거하는 데 사용됩니다. 인이나 황과 같은 저융점 불순물이 휘발 후 재응축되는 것을 방지하기 위해, 먼저 낮은 온도에서 탈기를 완료한 다음 온도를 액상 소결 온도까지 빠르게 올리는 단계별 가열 공정이 종종 사용됩니다. 용광로 장입물과 빌릿 사이의 절연 패드는 2 차 오염을 방지하기 위해 고순도 흑연 또는 알루미늄으로 만들어야 합니다.

열간 가공 및 열처리 중 잔류물 제거는 주로 고진공 또는 고순도 수소 기류를 이용합니다. 열간 압연 또는 온간 압연 전 예열은 진공로에서 수행하여 잔류 알칼리 금속을 추가로 휘발시킵니다. 냉간 압연 후 여러 차례의 중간 어닐링 또한 고진공 조건에서 진행하여 잔류 가스가 확산에 의해 빠져나가도록 합니다. 초박막 포일 생산 시에는 두께 방향으로 미세 기공이 발생하지 않도록 진공 탈기 어닐링 공정을 추가하는 경우가 많습니다.

후처리 제거는 표면 또는 표면 근처의 불순물을 제거하는 데 목적이 있습니다. 화학적 산세척은 표면의 산소가 풍부한 층과 인이 풍부한 층을 선택적으로 용해시킬 수 있으며, 전해연마 또는 플라즈마 세척은 흡착된 유기물과 금속 이온을 효과적으로 제거할 수 있습니다. 티타늄 게터를 사용한 진공 열처리는 잔류 산소와 질소를 깊숙이 제거할 수 있습니다. 일부 고급 판재의 경우, 최종 정제를 위해 구역 용융 정련 또는 전자빔 용융을 사용하기도 합니다.

요약하자면, 텅스텐 합금 시트의 불순물 제거는 "원천 제어 - 공정 제거 - 최종 제품 정제"의 3단계 전략을 따릅니다. 여러 방법의 시너지 효과를 통해 산소 함량을 극히 낮은 범위 내에서 안정적으로 제어할 수 있으며, 기타 유해 불순물도 크게 줄여 소재의 높은 신뢰성과 긴 수명을 위한 기반을 마련합니다.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

### 4.1 텅스텐 합금 시트의 미세구조

텅스텐 합금 시트의 미세구조는 일반적으로 텅스텐 입자가 경질상으로 존재하고 니켈 또는 구리 기반의 결합상으로 둘러싸여 세라믹-금속 복합체와 유사한 미세구조를 형성하는 2 상 복합체 특성을 나타냅니다. 이러한 구조는 분말 야금에서 시작하여 열기계적 가공을 통한 소결 후 더욱 발전합니다. 텅스텐 입자는 대부분 구형에 가깝거나 다면체이며, 입자 크기 분포는 구조적 균일성에 영향을 미칩니다. 결합상은 입자 사이의 틈을 채워 연속적인 변형 채널을 제공합니다. 가공 및 전위와 같은 결합은 구조에서 불가피하지만 공정 제어를 통해 최소화할 수 있습니다. 미세구조에는 원소 확산에 의해 형성된 전이 영역이 상간 결합을 강화하는 계면층도 포함됩니다. 주사전자현미경(SEM) 및 투과전자현미경(TEM)과 같은 관찰 방법을 통해 구조적 세부 사항을 확인할 수 있으며, 이는 물성의 기원을 분석하는 데 도움이 됩니다. 구조적 변화는 가공 단계에 따라 달라집니다. 소결 과정에서 입자들이 구형화되고, 압연 과정에서 섬유질 형태로 변합니다.

#### 4.1.1 결정립 구조 및 결정립계의 화학적 조성

텅스텐 합금 시트는 주로 체심 입방 구조(BCC)의 텅스텐 상 결정과 면심 입방 구조(FCC)의 결합상 결정으로 구성됩니다. 전자는 부피의 대부분을 차지하여 높은 경도와 밀도를 제공하는 반면, 후자는 연속적인 기지 역할을 하여 전체적인 소성을 향상시킵니다. 소결 과정에서 텅스텐 결정립은 용해-재침전 메커니즘을 통해 점차 구상화됩니다. 초기에는 다각형 입자가 액상의 영향으로 균일한 표면 곡률을 가지게 되며, 최종적으로는 비교적 균일한 크기의 응집체를 형성합니다. 이러한 구조적 변화는 결합상 상의 젖음성에 영향을 받는데, 젖음성이 좋을수록 입자 재배열이 촉진되고 접촉각이 감소하며 저에너지 결정립계가 형성됩니다. 결정립 크기는 일반적으로 분말 입자 크기와 소결 온도에 의해 조절됩니다. 미세 분말과 긴 유지 시간은 미세 결정립 구조를 형성하는 데 유리하여 강도를 향상시키지만 연성은 저하될 수 있습니다. 압연 공정은 변형 유도 재결정을 일으켜 압연 방향을 따라 결정립을 길게 늘리고 섬유질 조직을 형성함으로써 이방성 특성을 더욱 최적화합니다.

텅스텐 합금 시트에서 결정립계의 화학적 조성은 매우 중요한 역할을 하며, 특히 텅스텐-결합상 계면에서의 원소 분포가 핵심적인 요소입니다. 이 계면에는 결합상에서 석출된 소량의 텅스텐 원자가 축적되어 얇은 고용체 영역을 형성하고, 이는 결합 강도를 향상시킵니다. 니켈-철 시스템에서는 철이 결정립계에 편석되어 전자 밀도를 조절하고 전위 이동 경로에 영향을 미칩니다. 구리 시스템에서는 구리가 계면에 균일하게 분포하여 열전도 채널의 연속성을 촉진합니다. 산소 및 인과 같은 미량 불순물은 결정립계에 축적되어 경계 에너지를 변화시키는 화합물 막을 형성할 수 있으며, 취성을 방지하기 위해서는 정제 공정을 통해 이러한 불순물을 제어해야 합니다. 화학적 조성 분석에는 일반적으로 에너지 분산 분광법 (EDS) 또는 원자 탐침 미세분석이 사용되어 계면에서의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기울기 변화를 파악합니다. 이러한 기울기는 응력을 완충하고 균열 전파를 줄이는 데 도움이 됩니다.

또한, 결정 구조의 안정성은 결정립계 조성과 밀접한 관련이 있습니다. 고진공 소결은 계면에서 산화산화물 생성을 억제하고 깨끗한 계면을 유지하며 고온 사용 신뢰성을 향상시킬 수 있습니다. 어닐링은 확산을 통해 조성을 조절하고 편석 원소를 희석하며 구조적 균형을 회복합니다. 결정립계는 종류가 다양하며, 큰 각도의 결정립계는 원소 이동을 용이하게 하는 반면, 작은 각도의 결정립계는 더욱 안정적입니다. 환원량과 같은 가공 변수는 결정립계 밀도에 영향을 미치며, 고밀도 결정립계는 전위를 고정시키고 경도를 증가시킬 수 있습니다. 환경에 노출될 때, 결정립계 조성은 부식 경로를 결정하며, 부동태화 원소의 농축은 보호막을 형성할 수 있습니다.

#### 4.1.2 합금상의 분포 및 화학적 상태

텅스텐 합금 시트의 합금상은 주로 텅스텐 고용체상과 바인더 고용체로 구성됩니다. 전자는 텅스텐 결정립 내에 제한적으로 용해된 합금 원소로 이루어져 있으며, 후자는 니켈 또는 구리 기반 기지에 용해된 텅스텐 원자로 이루어져 있습니다. 분포 측면에서 텅스텐상은 바인더상에 개별 입자로 균일하게 내장되어 복합 네트워크를 형성합니다. 입자 간격은 바인더상의 부피 비율에 따라 결정되며, 간격이 작을수록 응력 전달이 균일합니다. 화학적으로 텅스텐상은 높은 순도를 유지하며, 표면에 얇은 산화물 또는 고용체 전이 영역이 존재할 수 있습니다. 바인더상은 더 복잡한 화학적 상태를 가집니다. 니켈-철 시스템에서는 철 원자가 일부 니켈 위치를 치환하여 무질서한 배열을 형성하는 γ상 고용체입니다. 이 상태는 안정적이지만 온도 변화에 따라 질서상이 석출될 수 있습니다. 구리 시스템도 유사합니다. 구리와 니켈은 무한히 혼합 가능하여 균일한 상태를 유지하며 상 분리 경향이 없습니다.

상 분포 최적화는 소결 속도에 따라 달라집니다. 액상에서의 입자 재배열은 보다 무작위적인 분포를 유도하여 응집을 방지합니다. 열처리 분포를 더욱 균일하게 만들고, 확산에 의한 입자 경계 조정은 국부적인 밀도 차이를 감소시킵니다. 화학적 상태는 냉각 속도의 영향을 받습니다. 급속 냉각은 과포화 상태를 유지하는 반면, 완속 냉각은 침전을 촉진하여 미세하고 강화된 상을 형성합니다. 계면의 화학적 상태는 원소 농도 구배 영역이 존재하는 독특한 특성을 보입니다. 텅스텐은 입자에서 결합재 상으로 점진적으로 전이되어 상용성을 향상시킵니다. X 선 회절과 같은 관찰 기법은 유해한 화합물 피크가 나타나지 않음을 보여줌으로써 이러한 상태를 확인합니다. 불균일한 분포는 성능 구배를 유발할 수 있으므로 교반 및 혼합을 통해 초기 균일성을 제어해야 합니다. 어닐링 과정에서는 재결정화가 일어나 결정 결함이 감소하고 전도도가 향상됩니다.

또한, 상 분포와 상태 간의 상호작용은 환경적 거동에 영향을 미칩니다. 균일하게 분포된 바인더 상은 지속적인 보호 기능을 제공하는 반면, 화학적으로 안정한 상태는 산화에 저항합니다. 가공 과정에서 압연 및 연신을 통해 상이 분포되어 배향된 구조가 형성됩니다. 이러한 상태는 유지되지만, 변형으로 인해 전위가 축적됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.1.3 결합 구조의 화학적 기원 분석

텅스텐 합금 시트는 주로 점결합, 선결합, 표면결합 및 체적결합을 포함합니다. 이러한 결합의 화학적 원인은 불균일한 원소 확산, 상 반응 및 불순물의 유입에서 비롯됩니다. 공공 및 침입형 원자와 같은 점결합은 소결 과정에서 결합제 상에 텅스텐 원자가 용해되거나 석출되면서 발생하는 경우가 많으며, 과포화된 텅스텐은 공공 농도를 증가시킵니다. 전위와 같은 선결합은 압연 변형과 관련이 있으며, 결합제 상의 고용체 강화는 전위 밀도를 증가시키고, 화학적으로는 철 또는 구리 원자가 전위를 고정시켜 이동을 저해합니다. 결정립계 및 상 경계와 같은 표면결합은 불순물 편석에 의해 화학적으로 발생하며, 산소와 인이 계면에 축적되어 화합물을 형성하고 에너지 상태를 변화시킵니다. 기공 및 개재물과 같은 체적결합은 잔류 가스 또는 제거되지 않은 산화물로 인한 불완전한 소결 때문에 발생합니다.

분석 결과, 결합 형성은 열역학적 요인에 의해서도 좌우되는 것으로 나타났습니다. 고온에서의 확산은 공공 이동을 촉진하는 반면, 저온에서의 응고는 클러스터 형성을 유도합니다. 불순물은 화학적으로 상당한 영향을 미치는데, 탄소와 질소는 격자간 화합물을 형성하여 결합 부피를 증가시킵니다. 어닐링 처리는 결합을 감소시키고, 확산을 통해 공공을 복구하며, 화학적 평형 상태에서 불순물을 재분포합니다. 계면 결합은 고유한 원인을 가지는데, 열팽창 차이는 미세 균열을 유발하고, 원소 농도 구배는 응력을 완화합니다. 전자 현미경과 같은 관찰 방법을 통해 이러한 원인을 밝힐 수 있으며, 에너지 분산형 X 선 분광법(EDX)은 불순물과의 상관관계를 보여줍니다. 결합이 성능에 미치는 영향을 제어해야 하며, 화학적 정제는 결합 형성 강도를 감소시킵니다.

#### 4.2 텅스텐 합금 시트의 특성 및 메커니즘

텅스텐 합금 시트의 특성은 주로 독특한 복합 구조 설계에서 비롯됩니다. 텅스텐 상과 바인더 상 사이의 상호작용은 밀도, 열전도율, 열 안정성과 같은 다양한 특성을 결정합니다. 이러한 성능 메커니즘은 원자 수준의 패킹, 전자 이동, 계면 결합과 같은 화학적 과정과 관련이 있습니다. 예를 들어, 높은 밀도는 텅스텐 원자의 조밀한 배열에서 비롯되며, 열전도율과 전기전도율은 자유 전자의 이동 경로에 따라 달라집니다. 열 안정성 메커니즘은 상 구조의 열역학적 평형에 기반하며, 계면 결합은 고온에서의 변형을 억제합니다. 메커니즘 분석을 통해 압연 공정이 전자 산란에 미치는 영향과 그에 따른 전도율 조절 방식 등 성능의 근원을 이해할 수 있습니다. 환경적 요인 하에서는 산화 거동 또한 중요한 요소이며, 표면의 화학적 상태가 안정성에 영향을 미칩니다.

##### 4.2.1 텅스텐 합금 시트에서 고밀도 화학 원자 배열의 원리

텅스텐 합금 시트의 고밀도 화학적 원자 패킹 원리는 주로 텅스텐 원자의 높은 원자 질량과 체심 입방 결정 구조의 조밀한 배열에 기반합니다. 이러한 구조는 원자들이 제한된 공간을 효율적으로 채울 수 있도록 하며, 합금 공정은 패킹 방식을 더욱 최적화합니다. 분말 야금법을 통해 텅스텐 분말은 소결 과정에서 입자 재배열을 거치고, 액상 결합제는 텅스텐 원자들의 근접성을 촉진하여 조밀한 네트워크를 형성합니다. 원자

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

패킹 원리는 반 데르 발스 힘과 금속 결합의 시너지 효과를 포함합니다. 텅스텐 원자는 비교적 큰 반지름을 가지지만 적절한 격자 상수를 가지므로 체심 입방 단위 내에서 원자 간 간격이 최소화됩니다. 니켈이나 철과 같은 합금 원소의 첨가는 텅스텐 상의 패킹을 직접적으로 변화시키지는 않지만, 고용체 형성을 통해 전체 부피를 조절하고 궁극 결합을 감소시킵니다.

적층 원리는 계면 상호작용에도 반영됩니다. 결합제 상의 원자는 액체가 고체 표면을 적시는 것과 유사하게 텅스텐 입자 사이의 틈을 채우고, 화학적 결합은 연결 강도를 강화합니다. 소결 과정에서 표면 에너지는 원자 이동을 유도하고, 텅스텐 표면 원자는 옅은 부분으로 확산되어 매끄러운 적층을 이룹니다. 냉각 과정에서 열 수축으로 인해 원자 간 간격이 더욱 좁아지고, 화학적 평형 상태에 있는 석출상이 구조를 고정하는 데 도움을 줍니다. 미시적으로, 이 원리는 텅스텐 격자의 규칙성으로 나타납니다. 치환형 고용체는 격자 팽창을 억제하여 높은 충진율을 유지합니다. 거시적인 측면에서, 높은 밀도는 이러한 원자 수준의 치밀함에서 비롯되며, 고충진 질량이 요구되는 응용 분야에 적합합니다.

추가 분석 결과, 패킹 원리는 원소의 전기음성도에 영향을 받는 것으로 나타났습니다. 텅스텐과 바인더 상 원소 간의 전기음성도 차이는 전자 공유를 촉진하여 안정적인 결합 네트워크를 형성합니다. 계면의 독특한 원자 패킹 구조와 그로 인한 기울기 영역은 텅스텐 원자가 바인더 상에 점진적으로 통합되도록 하여 전체적인 응집력을 향상시킵니다. 온도 기울기와 같은 공정 변수는 패킹 과정을 제어하며, 고온은 확산 시간을 연장하고 충전 균일성을 최적화합니다. 불순물 원소는 패킹을 방해하는데, 산소 및 기타 원소로 형성된 화합물은 공간을 차지하므로 환원 분위기를 사용하여 제거해야 합니다. 어닐링은 패킹 결서를 복원하고, 확산은 공극을 메웁니다. 환경 적응성 측면에서, 이 원리는 온도 변화에도 비교적 안정적인 밀도를 보장하여 장기간 사용을 가능하게 합니다.

#### 4.2.2 텅스텐 합금 시트의 열전도도 및 전기전도도에 대한 화학적 운반체 메커니즘

텅스텐 합금 시트는 주로 자유 전자와 포논의 전송에 의존합니다. 텅스텐 상은 높은 전자 밀도를 제공하고, 결합제 상은 전송 경로를 최적화하여 복합 캐리어 시스템을 형성합니다. 전도 메커니즘은 금속 결합 내에서의 전자 공유를 포함합니다. 텅스텐 원자의 외부 전자는 쉽게 분리되어 전자 가스를 형성하고, 합금을 통해 니켈 또는 구리 원자를 도입하면 캐리어 농도가 증가합니다. 열전도도는 포논 진동을 통해 이루어지며, 격자 진동은 텅스텐 상에서 효율적으로 전파되고 결합제 상은 산란을 완충합니다. 이 메커니즘의 화학적 근거는 원자가 전자 배치에 있습니다. 텅스텐의 d-전자층은 결합제 상의 sp<sup>2</sup> 전자와 혼성화되어 캐리어 이동도를 향상시킵니다.

전하 운반 메커니즘은 상 분포에도 반영됩니다. 연속적으로 결합된 상은 전도성 네트워크를 형성하여 계면 저항을 감소시키고, 화학적 안정성은 원활한 전자 흐름을 보장합니다. 소결 공정은 이 메커니즘을 최적화하는데, 액상은 깨끗한 계면을 형성하고 전위 장벽을 낮춥니다. 냉각된 석출물은 전하 운반체를 산란시킬 수 있지만, 적절한 강화는 실제로 열전도도를 향상시킵니다. 미시적으로는 페르미 표면의 형상과 관련이

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



있으며, 합금 원소는 전자 구조를 조절하여 전하 운반체의 유효 질량에 영향을 미칩니다. 거시적인 성능 측면에서 이 메커니즘은 열 관리 및 전자 응용 분야를 지원하며, 열전도도와 전기 전도도 사이의 균형을 달성합니다.

또한, 이 메커니즘은 결합 화학의 영향을 받는데, 전위나 공공이 전하 운반체를 산란시키므로 어닐링을 통해 이를 줄여야 합니다. 산소와 같은 불순물은 트랩을 형성하여 전자를 포획하고 전도도를 저하시키는데, 정제 공정을 통해 이러한 영향을 완화할 수 있습니다. 온도 의존성 측면에서, 이 메커니즘은 전자-포논 결합을 나타냅니다. 고온에서는 산란이 증가하지만 텅스텐 상의 안정성은 기본 수준을 유지합니다. 표면의 화학적 상태 또한 메커니즘에 영향을 미치는데, 산화층은 전하 운반체를 차단하는 반면 코팅은 보호 기능을 제공하고 성능을 복원합니다. 가공 과정에서 압연은 결정 방향을 유도하고, 배향 메커니즘은 이방성 전도도를 향상시킵니다. 환경적 요인 하에서, 부식은 전하 운반체 경로를 변화시키고, 부동태화막은 성능 유지에 도움을 줍니다.

#### 4.2.3 텅스텐 합금 시트의 열 안정성을 뒷받침하는 화학 구조

텅스텐 합금 시트는 주로 2 상 구조의 열역학적 평형에서 비롯됩니다. 텅스텐 상의 높은 용점은 골격 지지대 역할을 하며, 결합제 상의 고용체는 응력 분포를 조절하고 고온에서의 변형을 억제합니다. 구조적 지지대의 화학적 원리는 상간 결합에 있으며, 금속 성분과 공유 결합 성분의 혼합으로 인해 고온에서도 결합 네트워크가 파괴되지 않습니다. 소결 과정에서 형성되는 계면층은 원소 확산을 통해 경사 구조를 만들어 열팽창 차이를 완충하고 전체적인 구조적 안정성을 유지합니다. 냉각 과정에서 지지대가 고정되고, 석출된 상은 결정립계를 고정시켜 상 이동을 억제합니다.

지지 메커니즘은 미세구조 안정성에도 반영됩니다. 텅스텐 입자의 구형화는 응력 집중을 감소시키고, 결합상(binder phase)의 균일한 분포는 열 부하를 분산시킵니다. 화학적으로는 고용체 강화로 인해 상의 용융점이 상승하고, 합금 원소는 자유 에너지를 조절하여 상변환의 구동력을 감소시킵니다. 미시적으로는, 지지 메커니즘이 상들 사이의 조화로운 원자 진동과 조정된 포논 모드를 통해 국부적인 연화를 방지합니다. 거시적인 측면에서, 이 지지 메커니즘은 고온 응용 분야에 적합하며, 반복 가열 시험 동안 안정성이 입증되었습니다.

추가 분석 결과, 이 메커니즘은 산화 화학 반응의 영향을 받아 표면에 보호막을 형성하여 산소 확산을 차단하는 동시에 내부 구조를 유지하는 것으로 나타났습니다. 불순물은 지지체 구조를 방해하는데, 인과 기타 원소들은 취성상을 유발하며, 이는 고온도 공정을 통해 제거됩니다. 어닐링은 지지체 구조를 최적화하고, 확산은 조성을 조절하며, 평형 상태를 회복합니다. 온도 구배 하에서, 지지체는 점진적인 반응을 보이며, 저온 영역에서는 텅스텐상이, 고온 영역에서는 결합상이 보조적인 역할을 합니다. 가공 이력 또한 메커니즘에 영향을 미치는데, 이전의 변형은 전위 네트워크를 형성하여 고온 강도를 향상시킵니다. 환경 노출 조건에서의 부식 시험은 지지체의 신뢰성을 입증하며, 화학적으로 불활성인 상은 수명을 연장합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.3 텅스텐 합금 시트의 기계적 및 화학적 특성 간의 상관관계

텅스텐 합금 시트의 특성은 주로 재료의 미세구조가 화학 결합 및 원소 분포를 통해 거시적 거동에 미치는 영향에서 나타납니다. 이러한 상관관계는 경도, 내마모성, 내식성과 같은 물성의 근원을 이해하는 데 도움이 됩니다. 강도 및 인성과 같은 기계적 특성은 격자 배열 및 상간 상호작용에서 비롯되는 반면, 내식성과 같은 화학적 특성은 표면 반응 및 원소의 전기화학적 거동과 관련이 있습니다. 이 두 가지 특성은 계면 화학을 통해 밀접하게 연결되어 있습니다. 예를 들어, 텅스텐 상의 단단한 골격은 기계적 지지력을 제공하는 반면, 결합제 상의 고용체는 화학적 안정성을 조절하여 성능 균형을 이룹니다. 이러한 상관관계 메커니즘에는 원자 수준의 결합 강도 기여도가 포함됩니다. 금속 결합은 텅스텐 상의 경도를 결정하는 반면, 공유 결합 성분은 계면에서의 결합을 강화하여 변형 저항에 영향을 미칩니다. 소결 과정 중 발생하는 화학 반응은 구조를 형성하고, 액상은 원소 확산을 촉진하여 구배 영역을 형성함으로써 기계적 응력 집중을 감소시키고 화학적으로 산화 저항성을 향상시킵니다.

열처리하는 이러한 상관관계를 더욱 강화합니다. 어닐링은 확산을 통해 원소 위치를 조정하여 기계적 가소성과 화학적 불활성을 최적화합니다. 환경적 요인 하에서 이러한 상관관계는 성능 면에서 시너지 효과를 나타냅니다. 습도나 산성 환경은 기계적 강도와 화학적 보호층을 동시에 약화시킬 수 있습니다. 가공 이력 또한 상관관계에 영향을 미칩니다. 압연 과정에서 발생하는 전위 네트워크는 기계적 강도를 증가시키고 화학적으로 전자 분포를 변화시켜 부식 가능성에 영향을 줍니다. 불순물 원소의 역할도 무시할 수 없습니다. 산소나 인의 편석은 화학적으로 약한 결합 부위를 형성하고 기계적으로는 균열 발생 부위가 되므로 이러한 영향을 완화하기 위해서는 정제가 필요합니다.

##### 4.3.1 텅스텐 합금판의 경도와 화학 결합 강도 간의 관계

텅스텐 합금 시트의 화학 결합 강도는 재료 내 결합 유형의 다양성과 강도 분포에 기반합니다. 이러한 관계는 텅스텐 상과 결합제 상 사이의 상호작용이 재료의 변형 저항성에 어떻게 기여하는지를 보여줍니다. 기계적 지표인 경도는 원자 간 상호작용 강도에서 비롯되는 반면, 화학 결합 강도는 결합 에너지와 전자 공유 정도에 영향을 받습니다. 텅스텐 합금 시트에서 텅스텐 상의 체심 입방 구조는 높은 결합 강도를 가지며 기본적인 경도를 제공하는 금속 결합이 지배적입니다. 결합제 상의 면심 입방 고용체는 더 많은 공유 결합 성분을 도입하여 전체 결합 네트워크를 조절합니다. 이러한 관계의 핵심은 계면에서의 결합 혼합에 있습니다. 텅스텐 원자와 니켈 또는 철의 결합은 결합 강도의 기울기 분포를 갖는 전이 영역을 형성하여 외부 하중을 완충하는 데 도움을 줍니다.

화학 결합 강도의 향상은 종종 고용체 강화를 통해 이루어집니다. 합금 원소가 결정 격자에 용해되어 변형을 일으키고 전위 이동에 대한 저항을 증가시켜 경도를 향상시킵니다. 텅스텐 상 내에서 결합 강도는 순도에 따라 달라지는데, 고순도 상태에서는 금속 결합이 균일하게 분포되어 안정적인 경도를 나타냅니다. 불순물이

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

첨가되면 결합이 약해져 국부적으로 연화된 영역이 형성됩니다. 바인더 상에서는 니켈-철 혼합이 결합 강도를 향상시키고, 철 원자가 전자 구름 밀도를 조절하여 결합 안정성을 증진시킵니다. 소결 공정은 이러한 관계에 영향을 미치는데, 액상에서 결합 재결합이 일어나고 냉각 과정에서 석출물이 결합 네트워크를 더욱 강화하여 경도 변화를 초래합니다. 압연 변형은 결합 변형을 유발하고 전위를 주변 원소로 화학적으로 농축시켜 국부적인 경도를 증가시키지만, 평형 상태에 도달하려면 어닐링이 필요합니다.

이러한 관계는 온도 의존성에도 적용됩니다. 고온에서는 결합 진동이 증가하여 경도가 감소합니다. 그러나 텅스텐 상의 결합 강도는 비교적 안정적으로 유지되므로 열 환경에서의 응용 분야에 적합합니다. 표면 화학 결합 강도는 경도 시험에 영향을 미칩니다. 산화층은 약한 결합을 형성하므로 이를 복원하기 위해 보호 코팅이 필요합니다. 탄소와 같은 불순물을 첨가하면 탄화물 결합이 형성될 수 있는데, 이는 강하지만 취성을 방지하기 위해 균일하게 분포되어야 합니다. 환경 요인 중 습도는 수소 결합을 촉진하여 표면 결합을 약화시키고 간접적으로 경도를 감소시킵니다.

#### 4.3.2 텅스텐 합금판의 화학적 부식 저항 메커니즘

텅스텐 합금 시트의 내마모성은 주로 복합적인 재료 구조 설계와 표면 화학 반응의 시너지 효과에서 비롯됩니다. 이러한 메커니즘은 마찰 및 매체 작용 하에서도 재료의 안정성을 유지하는 데 도움을 줍니다. 기계적 특성인 내마모성은 표면 경도와 인성의 균형에 의해 결정되며, 내화학성 부식성은 부동태 피막 형성 및 원소의 전기화학적 거동을 통해 침식을 억제합니다. 이 두 가지 요소가 상호 작용하여 보호 시스템을 형성합니다. 텅스텐 합금 시트에서 텅스텐상은 내마모성 골격을 제공하고, 결합상은 화학적 활성을 조절하며, 계면에서의 원소 분포는 내마모성 메커니즘을 최적화합니다. 이 메커니즘의 핵심은 마찰 중 발생하는 화학적 변화에 있습니다. 응력 하에서 표면 원자들이 재배열되어 산화층 또는 흡착막을 형성함으로써 마모율을 감소시키는 것입니다.

내식성 메커니즘은 전기화학적 부동태화를 통해 달성되는데, 니켈이나 구리가 표면에 안정적인 산화막 형성을 촉진하여 매체의 침투를 차단합니다. 기계적으로, 피막 접착력은 결합 강도에 따라 달라집니다. 마모 환경에서는 산화 마모와 부식 마모가 복합적으로 작용하며, 화학 반응을 통해 보호 생성물이 생성되어 기계적으로 마찰 계수를 감소시킵니다. 소결 공정은 구조를 형성하는데, 액상은 균일한 미세 구조를 촉진하고 부식에 취약한 영역을 줄입니다. 압연 후 표면 질감은 내식성 메커니즘에 영향을 미치는데, 화학적으로 표면을 평활화하면 매체 잔류량이 감소하고 기계적으로 응력이 고르게 분산됩니다. 불순물 원소의 간접 메커니즘에는 인과 황의 농축으로 인한 국부 부식이 포함되므로 정제 및 관리가 필요합니다.

이 메커니즘은 온도에 따라 상당한 의존성을 보입니다. 고온에서는 산화가 가속되지만 텅스텐 상의 안정성은 유지됩니다. 코팅 처리는 이 메커니즘을 강화하며, 무전해 니켈 도금은 추가적인 보호막을 형성하여 내마모성을 향상시킵니다. 산이나 알칼리와 같은 환경 조건은 이 메커니즘을 변화시키며, 부동태 피막의 적응성이 장기적인 성능을 결정합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.3.3 텅스텐 합금판의 표면 화학적 장벽 효과가 내식성에 미치는 영향

텅스텐 합금 시트의 내식성은 주로 산화막 및 흡착층 형성에 기반 합니다 . 이러한 기능은 매체와 기관 사이의 접촉을 차단하여 재료의 안정성을 유지합니다. 화학적 특성으로서의 내식성은 표면 원소의 전기화학적 거동에서 비롯되며, 차단 효과는 다층 구조 형성과 관련이 있습니다. 기계적으로, 필름층은 박리에 저항하기 위해 접착력을 가져야 합니다. 텅스텐 합금 시트에서 텅스텐 상 표면은 쉽게 산화되어  $WO_3$  층을 형성하지만, 니켈과 같은 결합 원소는 복합 필름 형성을 촉진하여 차단 효과를 향상시킵니다. 근본적인 원리는 열역학적 안정성과 낮은 필름 자유 에너지로, 이는 추가적인 반응을 억제합니다.

차단 효과는 자체 패시베이션을 통해 달성됩니다. 필름은 초기 산화 후 자가 복원되며, 화학적 조성에는 니켈 또는 구리 산화물이 포함됩니다. 기계적 측면에서 필름의 유연성은 균열을 방지합니다. 소결 후 표면 상태는 차단 성능에 영향을 미치는데, 깨끗한 표면은 균일한 필름 형성을 촉진합니다. 롤링 과정에서의 표면 거칠기는 차단 효과를 제어하며, 화학적으로 미세 구조는 접착점을 증가시킵니다. 산소 와 같은 불순물의 초기 함량은 차단 품질을 결정하며, 과도한 산소는 다공성 필름을 생성합니다. 환경 조건에 따라 차단막은 다양한 매체에 적응하며, 산성 조건에서는 필름이 용해되었다가 재구성됩니다. 또한 온도는 차단 성능에 큰 영향을 미치는데, 고온에서는 확산이 가속화되지만 복합 필름의 안정성과 차단 기능은 유지됩니다. 코팅 기술은 차단 효과를 확장하며, 진공 크롬 도금은 추가 층을 형성하여 전체적인 저항성을 향상시킵니다.

#### 4.4 텅스텐 합금 시트의 공정-구조-성능 상관관계 분석

텅스텐 합금 시트의 공정-구조-성능 상관관계 분석은 재료 준비부터 최종 성능에 이르는 논리적 연결 고리에 초점을 맞춥니다. 이 분석은 공정 변수가 미세 구조를 어떻게 제어하고, 결과적으로 거시적 특성에 어떤 영향을 미치는지 이해하는 데 도움을 줍니다. 소결, 압연, 표면 처리와 같은 공정 단계는 각각 다른 규모에서 작용합니다. 소결은 초기 구조를 형성하고, 압연은 변형을 더욱 최적화하며, 표면 처리는 화학적 계면을 대상으로 합니다. 중간 매개체 역할을 하는 구조는 결정립 분포, 계면 결합, 결합 상태를 포함하며, 이러한 요소들은 화학적 결합과 원소 확산을 통해 성능과 연결됩니다. 성능은 기계적, 열적, 화학적 측면을 포괄합니다. 예를 들어, 경도는 격자 강도에서 비롯되고, 내식성은 표면 장벽에 따라 달라집니다. 이러한 상관관계는 단단계 전도 형태로 나타납니다. 공정은 원자 배열을 변화시키고, 구조는 결합 네트워크를 조정하며, 성능은 이에 따라 반응합니다. 분석 프레임워크는 피드백 루프를 강조하며, 성능 시험 결과는 공정 조정에 활용되어 산업 응용 분야에 적합한 재료를 확보하는 데 도움을 줍니다. 이 분석을 통해 텅스텐 합금 시트의 설계가 더욱 체계화되어 정밀 분야에서의 활용이 가능해집니다.

실제 분석에서 상관관계는 열역학과 반응 속도론의 균형을 고려해야 합니다. 공정 온도는 확산 속도에 영향을 미치고, 구조적 안정성은 성능 내구성을 결정합니다. 원소 비율은 상관관계에서 중요한 역할을 합니다. 텅스텐 함량이 높으면 밀도가 높은 구조가 형성되어 고밀도에 유리한 성능을 보이지만, 소성 변형에 대한 공정 보정이 필요합니다. 환경적

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



요인도 분석에 포함됩니다. 습도나 온도 변화는 상관관계의 견고성을 검증하는 데 사용됩니다. 불순물 관리는 전체 공정에서 유지되며, 화학적 정제를 통해 결함 증폭이 성능에 영향을 미치는 것을 방지합니다.

#### 4.4.1 소결 공정이 텅스텐 합금 시트의 미세구조에 미치는 영향

소결 공정은 온도, 분위기, 시간과 같은 변수를 통해 텅스텐 합금 시트의 미세 구조를 조절하며, 상 형성, 입자 진화, 계면 결합을 제어합니다. 이러한 조절은 후속 재료 가공 및 성능의 기초를 마련합니다. 소결 과정에서 분말 혼합물은 고상 확산에서 액상 형성으로 변환됩니다. 텅스텐 입자는 결합제 상의 습윤 작용 하에서 재배열되어 균일하게 분포된 이중상 구조를 형성합니다. 온도 제어는 매우 중요합니다. 고온은 액상 형성을 촉진하고, 니켈이나 구리와 같은 결합제 원소가 녹아 텅스텐 입자를 감싸면서 표면 에너지를 화학적으로 감소시키고 입자 구형화를 촉진합니다. 저온은 고상 소결에 사용되어 과도한 액상으로 인한 다공성 구조 생성을 방지합니다. 분위기 또한 제어에 영향을 미칩니다. 수소는 산화물을 환원시켜 깨끗한 계면을 유지하는 반면, 질소 또는 진공은 잔류 가스로 인한 다공성을 억제합니다. 시간 변수는 충분한 확산을 허용합니다. 장시간 유지하면 결합제 상의 텅스텐 원자가 제한적으로 용해되고, 이후 냉각 과정에서 미세한 상이 석출되어 구조가 강화됩니다.

조절 효과는 입자 크기 조절에도 반영됩니다. 급속 가열은 미세 입자를 유지하는 반면, 완만한 가열 공정은 입자 성장을 가능하게 합니다. 화학적 메커니즘은 오스트발트 숙성(Ostwald ripening)을 통해 이루어지는데, 이 과정에서 큰 입자가 작은 입자를 감싸면서 균일한 크기를 얻습니다. 상 분포는 배합 비율을 통해 제어됩니다. 결합제 상의 비율이 증가함에 따라 구조는 연속적인 네트워크 형태로 발달하여 응집성이 향상됩니다. 소결 과정에서 계면 화학이 점진적으로 형성되고, 원소 농도 구배 영역이 나타나며, 텅스텐과 니켈의 상호 확산으로 전이층이 생성되어 결합력이 강화됩니다. 결합 제어는 핵심적인 요소입니다. 액상 충전을 통해 기공을 감소시키고, 고온에서 전위가 회복되며, 화학적 불순물이 휘발되어 배출됨으로써 응집을 방지합니다. 소결된 구조는 압연의 기반을 제공하며, 균일한 미세 구조는 균열 없이 변형을 용이하게 합니다.

또한, 조절 효과는 열처리 단계까지 확장됩니다. 소결 후 열처리는 구조를 더욱 균일하게 하고, 원소의 확산 및 위치 조정을 통해 결정립계 조성을 최적화합니다. 공정 변수의 조합을 통해 특정 목표에 맞춘 조절이 가능합니다. 예를 들어, 미세 결정립 구조를 얻고자 할 때는 낮은 온도와 긴 유지 시간을 사용하여 결정립계 이동을 화학적으로 억제합니다. 분위기 순도 또한 조절 효과에 영향을 미칩니다. 고순도 환경은 산화물 개재물을 줄이고 구조적 안정성을 유지합니다. 불순물 원소 처리는 소결 과정에 반영됩니다.

#### 4.4.2 압연 공정이 텅스텐 합금 시트의 기계적 특성에 미치는 영향 메커니즘

압연 공정은 주로 변형으로 인한 구조 변화를 통해 텅스텐 합금 시트의 기계적 특성에 영향을 미치며, 강도, 인성 및 경도를 조절합니다. 이러한 메커니즘에는 전위 축적,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결정립 미세화 및 상간 상호작용을 포함한 다단계 상호작용이 관여합니다. 열간 압연이든 냉간 압연이든, 압연 과정에서 텅스텐 상은 주요 응력을 받는 반면, 결합제는 변형 흐름을 도와 화학 결합 네트워크 재구성, 전위 밀도 증가 및 항복 강도 향상을 유도합니다. 고온의 열간 압연은 동적 회복을 일으켜 확산이 결정 결합 치유를 촉진하고 취성을 방지합니다. 냉간 압연은 슬립 시스템 활성화, 압연 방향을 따른 텅스텐 입자의 연신, 섬유 조직 형성 및 인장 특성 향상과 같은 가공 경화를 더 많이 유발합니다.

영향 메커니즘은 인성 조절에도 반영됩니다. 중간 어닐링을 동반한 다중 패스 롤링은 화학적 확산을 통해 응력 분포를 조절하고 잔류 응력으로 인한 균열 발생 경향을 감소시킵니다. 압연 감소율 제어 메커니즘은 매우 중요합니다. 큰 압연 감소율은 재결정핵 생성을 유도하고 결정립을 미세화하여 강도와 인성 간의 균형을 향상시킵니다. 계면 메커니즘에서 결합상은 완충층 역할을 하여 변형 에너지를 흡수하고, 화학 결합 강도가 배위 효율을 결정합니다. 결합 발생 또한 메커니즘의 중요한 요소입니다. 롤링 과정에서 전위벽이 생성되고, 화학적으로 원소 편석 및 피닝이 구조를 안정화합니다. 표면 효과 또한 메커니즘에 반영됩니다. 롤링 마감은 피로 성능에 영향을 미치고 화학적으로 산화 개시점을 감소시킵니다.

추가 분석 결과, 이 메커니즘은 온도에 따라 크게 달라지며, 온간 압연과 열간 압연의 장점을 결합하는 것으로 나타났습니다. 이 메커니즘은 회복 및 경화 현상을 모두 나타내어 기계적 특성을 최적화합니다. 압연 속도와 같은 공정 변수는 이 메커니즘에 영향을 미쳐 회복 시간을 급격히 단축하고 경도를 증가시킵니다. 불순물, 특히 산소 및 기타 원소는 이 메커니즘에 악영향을 미쳐 균열을 유발하므로, 이러한 영향을 완화하기 위해서는 사전 정제가 필요합니다.

#### 4.4.3 텅스텐 합금 시트의 화학적 특성에 대한 표면 처리의 최적화 경로

표면 처리는 도금, 산화 또는 화학적 변형과 같은 방법을 통해 보호막을 형성하여 텅스텐 합금 시트의 화학적 특성을 최적화합니다. 이러한 접근 방식은 내식성, 내산화성 및 친화성과 같은 화학적 특성을 향상시킵니다. 표면 처리 과정은 표면 세척 후 박막 증착을 통해 새로운 화학적 상층을 형성하여 매체의 침투를 차단하는 방식으로 진행됩니다. 전기 도금은 니켈 또는 금 층을 전기화학적으로 증착하여 이온 환원을 통해 치밀한 박막을 형성하고, 접착력은 기지 원소의 확산에 따라 달라지는 일반적인 방법입니다. 진공 도금은 고온 환경에서 사용되며, 증발 알루미늄 증착을 통해 알루미늄 장벽을 형성하여 높은 화학적 안정성을 제공합니다. 화학적 연마는 표면 결함을 제거하고, 산성 조건에서 텅스텐 상을 약간 용해시켜 계면을 매끄럽게 하고 화학적 불활성을 향상시킵니다.

최적화 경로는 복합 처리, 코팅 후 열 확산, 강화된 화학 결합, 그리고 경로 내 원소 상호 침투를 통해 그라디언트 영역을 형성하여 접착력을 향상시키는 것을 포함합니다. 이온 주입 경로는 질소 또는 탄소를 도입하여 표면을 경화시키면서 화학적 성질을 최적화합니다. 이 메커니즘은 원자가 결정 격자에 삽입되어 전자 구조를 변화시키고 유전 저항을 개선하는 것을 포함합니다. 양극 산화 경로는 산화막을 생성합니다. 전해 조건에서 텅스텐 산화물 층이 자체적으로 생성되며, 이 경로는 전압을 제어하여 두께를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

조절합니다. 또한 화학적으로 보호되는 막층이 기판을 보호합니다. 세척 전처리는 이 경로의 핵심이며, 초음파 또는 플라즈마 처리를 통해 오염 물질을 제거하여 균일한 후속 접착을 보장합니다.

또한, 코팅 공정에서 온도 제어는 매우 중요합니다. 저온 처리는 기판 구조를 보존하는 반면, 고온 확산은 계면을 최적화합니다. 불순물은 코팅 공정에 영향을 미치고, 표면 잔류물은 피막 형성을 방해하므로 이를 완화하기 위해 다단계 세척이 필요합니다. 환경 적응형 코팅 공정은 산성 및 알칼리성 매체에 적합한 특정 코팅을 선택하는 것을 포함하며, 화학적 호환성이 효과를 결정합니다. 후속 열처리(어닐링)는 피막층을 더욱 안정화시켜 균일한 확산을 보장하고 장기적인 화학적 성능을 향상시킵니다.

#### 4.5 특수 환경에서 텅스텐 합금 시트의 구조 및 성능 반응

텅스텐 합금 시트의 거동은 주로 외부 조건에 대한 재료의 적응성을 보여줍니다. 이러한 적응에는 미세구조의 변화와 거시적 특성의 조정이 포함되며, 고온, 방사선 또는 고압과 같은 조건에서 재료가 어떻게 기능을 유지하는지 이해하는 데 도움이 됩니다. 구조적 반응에는 결정립 변화, 상간 상호작용 및 결합 동역학이 포함되며, 성능 반응은 고온에서의 열 안정성, 방사선 하에서의 화학적 내성, 고압 하에서의 기계적 특성 변화와 같은 기계적, 열적, 화학적 측면에 반영됩니다. 이러한 반응 메커니즘은 화학 결합의 탄성과 상 구조 사이의 균형에서 비롯됩니다. 텅스텐 상은 골격 구조를 제공하고, 결합제 상은 완충 작용을 조절합니다. 환경 요인의 중첩은 반응을 더욱 복잡하게 만듭니다. 온도가 상승하면 확산이 유발되고, 방사선은 전자 구조에 영향을 미치며, 압력은 원자 간 간격을 변화시킵니다. 상관 분석은 원자 수준의 결합 재구성에서 거시적인 성능 저하에 이르기까지 다중 스케일 관점을 강조합니다. 합금 최적화와 같은 공정 전처리를 통해 반응성을 향상시킬 수 있으며, 원소 비율 조정을 통해 구조가 환경에서 점차 안정화될 수 있습니다.

실제 반응에서 구조와 성능 간의 상호작용은 피드백 루프를 형성합니다. 초기 구조는 반응의 시작점을 결정하며, 이후의 변화는 성능의 내구성에 영향을 미칩니다. 불순물의 역할도 고려해야 하는데, 예를 들어 산소는 반응의 부정적인 변화를 가속화할 수 있으며, 이는 정제를 통해 완화할 수 있습니다. 온도 구배 또는 방사선량의 점진적인 변화에 따라 반응은 비선형성을 나타내며, 초기에는 안정화되었다가 나중에는 가속화됩니다. 압력 반응은 부피 압축을 수반하며, 화학 결합의 압축은 강도를 향상시킵니다.

##### 4.5.1 고온 조건에서 텅스텐 합금 시트의 구조적 안정성 변화

텅스텐 합금 시트의 변화는 주로 열 활성화 확산 과정과 계면 열팽창의 상호작용에서 비롯됩니다. 이러한 변화는 재료의 전체적인 안정성과 기능적 연속성에 영향을 미칩니다. 고온에서 텅스텐 상의 체심 입방 격자는 비교적 안정적으로 유지되지만, 결합상 고용체에서는 원자 이동이 시작됩니다. 텅스텐 원자는 입자 가장자리에서 결합상으로 용해되어 과포화 상태를 형성합니다. 온도가 증가함에 따라 이러한 용해는 더욱 심화되어 입자의 표면 곡률이 변화하고, 작은 입자는 점차 수축하고 큰 입자는 약간 커져 조대화

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구조가 형성됩니다. 이러한 메커니즘에는 계면 화학이 관여합니다. 열 에너지는 원소 확산을 촉진하며, 니켈 또는 구리 원자가 텅스텐 상으로 침투하여 얇은 고용체 영역을 형성함으로써 응력 분포를 조절하고 계면 분리를 방지합니다. 냉각 시 과포화 텅스텐은 미세한 상을 석출시켜 결정립계를 고정시키고 초기 구조를 부분적으로 복원합니다. 그러나 반복적인 사이클링으로 인해 잔류 변화가 축적될 수 있습니다.

구조적 변화는 결합 동역학에도 반영됩니다. 고온에서는 전위 상승이 활발해지고, 공공 농도가 증가하며, 산소와 같은 화학적 불순물이 결정립계에 축적되어 화합물 막을 형성하고 이는 전위 이동 속도에 영향을 미칩니다. 상 분포는 점진적으로 변화합니다. 결합상은 약간 팽창할 수 있지만, 텅스텐상의 낮은 팽창 계수가 전체적인 변형을 완충합니다. 변화의 정도는 환경 노출 시간에 따라 달라집니다. 단기 노출은 구조적 회복을 촉진하는 반면, 장기 노출은 재결정핵을 생성하여 새로운 결정립을 형성하고 안정성을 최적화할 수 있습니다. 이러한 변화 과정에서 화학 결합이 재구성됩니다. 금속 결합은 텅스텐상의 강도를 유지하는 반면, 공유 결합 성분은 계면에서 내열성을 향상시킵니다. 어닐링을 통해 이러한 변화를 제어할 수 있으며, 냉각 속도를 조절하면 바람직한 구조를 고정하고 과도한 조대화를 방지할 수 있습니다.

추가 분석 결과, 변화하는 온도 임계값은 합금 시스템과 관련이 있는 것으로 나타났습니다. 니켈-철 시스템은 고온에서 점진적인 조대화를 보이는 반면, 니켈-구리 시스템은 구리의 열전도율로 인해 균일한 반응을 보입니다. 불순물 제어는 이러한 변화에 영향을 미치는데, 인과 같은 원소는 국부적인 연화를 유발하므로 사전 정제가 필요합니다. 주변 습도가 존재할 경우, 수분은 표면 산화를 촉진하여 구조적 변화가 외부에서 내부로 확산되어 경사 영역을 형성할 수 있습니다. 기계적 반응은 구조적 변화와 상관관계가 있으며, 고온 크리프 조건에서 입자들은 미끄러지고 결합상은 조화롭게 변형됩니다. 열 순환 환경에서 이러한 변화는 피로 누적을 나타내며, 도핑을 통해 결정립계 약화를 완화해야 합니다.

#### 4.5.2 방사선 환경 하에서의 텅스텐 합금 시트의 화학적 구조적 저항성

방사선 환경에 노출된 텅스텐 합금 시트의 내성은 주로 에너지 조사에 대한 재료의 복합 미세구조의 반응에 기반 합니다. 이러한 내성은 방사선이나 입자의 영향 하에서도 화학 결합 네트워크와 상 구조의 무결성을 유지하는 데 도움을 줍니다. X선이나 전자빔과 같은 방사선에 노출되면, 원자 번호가 높은 텅스텐 상은 에너지를 흡수하여 연쇄적인 변위를 일으킵니다. 화학적으로, 원자 결합은 일시적으로 끊어졌다가 다시 형성되어 점 결합 클러스터를 형성합니다. 구조적 내성 메커니즘은 전자 구조의 조절을 포함합니다. 방사선은 전자 여기를 유도하여 텅스텐 원자의 외각 전자가 이동하게 하지만, 이들은 빠르게 이완되어 평형 상태로 돌아갑니다. 결합상 고용체는 충격을 완충하고, 니켈 또는 구리 원자의 균일한 분포는 에너지를 분산시켜 국부적인 손상을 방지합니다. 계면 화학 또한 내성에 중요한 역할을 합니다. 기울기 영역에서 원소들의 상호 침투는 결합 강도를 향상시키고, 방사선에 의해 변위된 원자는 자가 복원됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



내성은 결합 진화에도 반영됩니다. 방사선은 공공-격자간 원자 쌍을 생성하고, 화학적 확산은 재결합을 촉진하며, 축적을 감소시킵니다. 상 분포는 안정적으로 유지되는데, 텅스텐 입자가 결합상(binder phase)을 차폐하여 방사선 플럭스를 감소시키기 때문입니다. 이러한 변화는 선량에 따라 크게 달라집니다. 낮은 선량에서는 구조가 미세하게 조정되는 반면, 높은 선량에서는 팽창이 발생할 수 있으며, 약간의 부피 변화는 도핑을 통해 완화될 수 있습니다. 화학적 상태도 방사선에 반응하여 산화막이 형성될 수 있고, 표면 패시베이션은 내성을 향상시킵니다. 어닐링은 내성을 더욱 향상시키는데, 열 에너지가 결합 이동을 촉진하여 격자 결서를 복원하기 때문입니다.

합금 시스템들은 내구성에서 상당한 차이를 보인다. 니켈-철 시스템은 자기장 방사선 하에서 협동적인 반응을 보이는 반면, 니켈-구리 시스템은 전도성으로 인해 에너지를 고르게 분산시킨다. 불순물 원소는 내구성에 영향을 미치는데, 산소 및 기타 원소들이 방사선 생성물을 포획하여 정제 및 제어가 필요한 화합물을 형성한다. 복사열과 같은 환경 조건에서 내구성은 시너지 효과를 나타내며, 열 확산은 결합 복구를 가속화한다. 기계적 관계에서 방사선 경화는 강도를 향상시키지만, 인성 변화는 모니터링해야 한다. 장기간 노출 시 내구성은 점진적으로 변화하며, 구조는 방사선장에 적응하여 지속적인 기능을 지원한다.

#### 4.5.3 극한 압력 조건에서 텅스텐 합금 시트의 성능 변화

텅스텐 합금 시트의 거동은 주로 구조의 압축 반응과 계면 조정의 동적 과정에서 비롯됩니다. 이러한 동적 과정은 재료의 기계적 거동과 화학적 안정성에 영향을 미치며, 고압 하에서의 적응 메커니즘을 이해하는 데 도움을 줍니다. 압력이 가해지면 텅스텐 상의 격자가 압축되고, 원자 간 거리가 감소하며, 화학 결합 강도가 증가하고, 경도가 증가합니다. 이러한 변화는 부피 변화와 전체적인 재료 수축을 수반하지만, 결합상(binder phase)의 연성이 텅스텐 상의 취성 경향을 완충하여 파단을 방지합니다. 이 메커니즘에서 전위 이동이 활발해지고, 고압 하에서 활주계가 활성화되며, 화학 원소 분포가 조정되고, 응력 집중이 분산됩니다. 계면은 매우 중요한 역할을 하며, 경사 영역에서의 변형 조정은 분리를 방지합니다.

성능 변화는 인성과 강도 사이의 균형에도 반영됩니다. 강도는 초기에 증가하다가 인성은 점차 감소하고, 압력 해제 후 부분적으로 회복됩니다. 결합 동역학은 체계적으로 나타나는데, 공공 압축은 강도를 감소시키고, 전위벽이 형성되며, 화학적 확산은 안정화를 촉진합니다. 상 분포는 압력에 반응하여 텅스텐 입자가 더욱 조밀하게 배열되고, 결합상이 간극을 채워 결정 구조를 최적화합니다. 성능 변화에 대한 압력 임계값은 시스템에 따라 다릅니다. 니켈-철 시스템은 점진적인 경화를 보이는 반면, 니켈-구리 시스템은 열전도율로 인해 균일하게 반응합니다. 어닐링 후 고압 처리를 통해 성능 변화를 조절하고 구조적 평형을 복원할 수 있습니다.

일정한 온도 중첩 효과가 중요하며, 고압 가열 조건에서 확산이 촉진되고 변화 속도가 빨라지지만 냉각을 통해 제어할 수 있습니다. 불순물 원소는 규칙성을 저해하며, 인을 비롯한 일부 원소는 국부적인 취약 영역을 유발하므로 이를 완화하기 위해서는 정제가

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

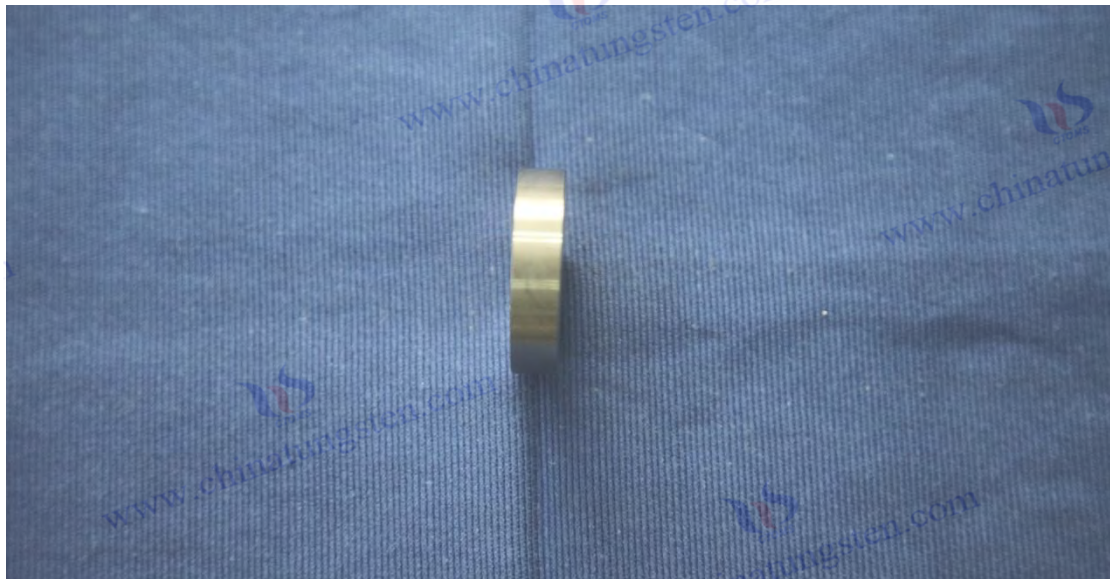
필요합니다. 압력 사이클링과 같은 환경적 요인은 변화 과정에서 피로를 유발하며, 점진적인 구조 변화에는 도핑 최적화가 요구됩니다. 화학적 특성 측면에서 고압 하에서의 결합 압축은 내식성을 향상시키고 표면 장벽을 더욱 치밀하게 만듭니다. 장기간 고압 조건에서는 변화가 적응하는 양상을 보이며, 성능은 안정화되어 지속적인 하중을 견딜 수 있게 됩니다.

#### 4.6 CTIA 그룹 유한회사 텅스텐 합금 시트 MSDS

CTIA 그룹 유한회사 텅스텐 합금 시트의 물질안전데이터시트 (MSDS) 는 GB/T 16483-2008 "화학물질 안전데이터시트의 내용 및 항목 순서"와 같은 표준을 기반으로 작성됩니다. 이 시트에는 제품의 특정 구성 요소(예: 텅스텐, 니켈, 철 또는 구리의 비율)와 함께 물리화학적 특성, 위험성 식별 및 비상 대응 조치가 자세히 기술되어 있습니다.

텅스텐 합금은 주성분으로 텅스텐을 포함하며, 이는 높은 밀도와 경도의 기반을 제공합니다. 니켈, 철 또는 구리가 결합제로 첨가되며, 그 비율은 계열에 따라 조정됩니다. 예를 들어, 텅스텐-니켈-철 시스템에서 니켈-철의 비율은 습윤성과 강도의 균형을 이룹니다. 탄소 및 산소와 같은 미량 원소는 취성상 형성을 방지하기 위해 낮은 수준으로 제어됩니다. 화학적으로, 이 부분에서는 원소를 식별하기 위해 CAS 번호를 사용하며, 텅스텐은 CAS 7440-33-7, 니켈은 CAS 7440-02-0 입니다. 불순물에는 원료에서 유래하는 인 및 황과 같은 잠재적 오염 물질이 포함되며, 이러한 불순물의 함량을 줄이기 위한 정제 공정이 강조됩니다.

구성 정보에는 합금 상 구조에 대한 설명도 포함됩니다. 2상 복합재료에서 텅스텐 입자는 체심 입방 구조이며, 결합상은 면심 입방 구조의 고용체입니다. 휘발성 성분이 없어 화학적으로 안정합니다. 용해도 분석 결과, 이 재료는 물에 녹지 않습니다.



#### 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

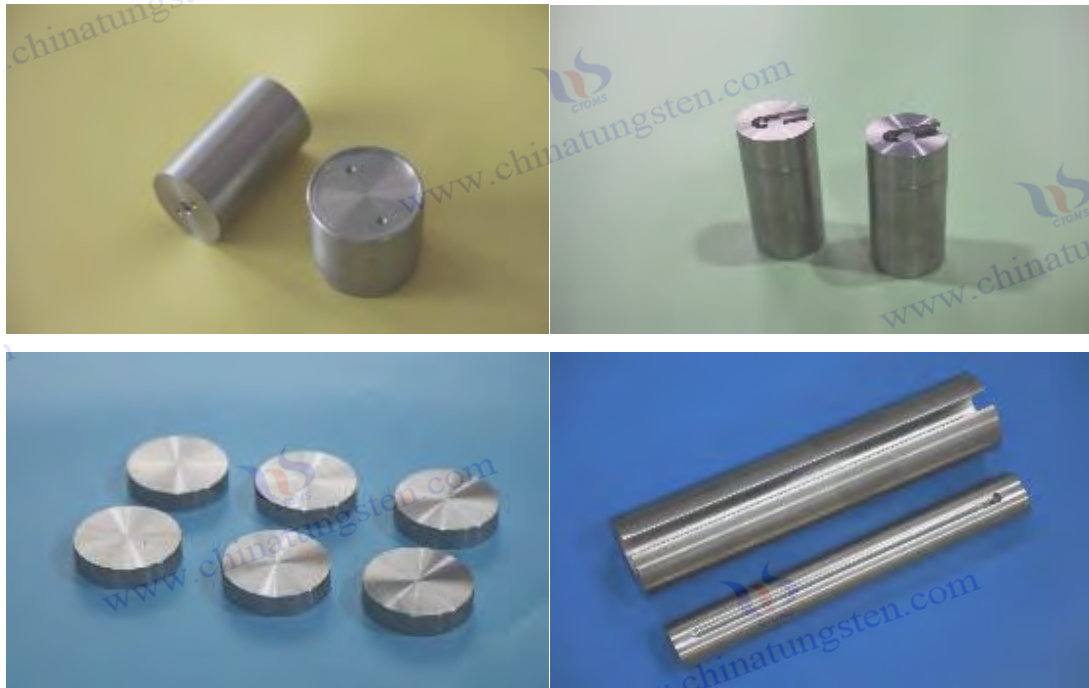
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 5장 텅스텐 합금판의 성능 시험 및 특성 분석 방법

### 5.1 텅스텐 합금판의 화학 조성 분석 기술

텅스텐 합금 시트의 주요 구성 성분을 분석하기 위해 분광학, 형광학, 습식 화학 분석법 등을 활용하여 텅스텐, 니켈, 철, 구리 등의 주요 원소와 미량 불순물을 정성 및 정량적으로 검출합니다. 이러한 분석 기법들은 합금의 조성, 순도, 균질성을 검증하는 데 중요한 역할을 하며, 재료 품질 관리에 필수적입니다. 원자 흡수 분광법과 방출 분광법은 용해된 시료의 원소 분석에 적합하고, X 선 형광 분광법은 비파괴적이고 신속한 분석을 제공하며, 화학 적정법은 특정 미량 원소 분석에 사용됩니다. 분석 전 시료 준비 과정에는 절단, 용해, 표면 세척 등이 있으며, 용해 시에는 일반적으로 질산과 불산 혼합물을 사용하여 내화성 텅스텐 상을 처리합니다. 분석 기법의 선택은 분석 대상 원소의 종류와 함량에 따라 달라집니다. 형광 분석법은 텅스텐과 같이 함량이 높은 주요 원소 분석에 적합하고, 미량 원소 분석에는 고감도 분광법이 필요합니다. 분석 결과는 공정 조정에 도움이 되어 산업 응용 분야에서 재료의 신뢰성을 보장합니다.

이러한 기술들은 매트릭스 효과도 고려합니다. 텅스텐 매트릭스의 높은 밀도는 신호에 간섭을 일으킬 수 있는데, 이는 표준 시료를 이용한 보정을 통해 완화할 수 있습니다. 형광 분광법과 같은 비파괴적 방법은 실시간 검출을 용이하게 하는 반면, 흡수 분광법과 같은 파괴적 방법은 더 높은 정밀도를 제공합니다. 불순물 분석은 조직 안정성에 영향을 미치는 산소, 탄소, 인 등에 초점을 맞춥니다. 형광 스크리닝 후 정밀 분광 분석과 같이 여러 기술을 조합하여 완전한 시스템을 구성할 수 있습니다. 환경적 요인으로 인해 오염을 방지하기 위해 분석은 반드시 청정 실험실에서 수행되어야 합니다.

#### 5.1.1 텅스텐 합금 시트의 원자 흡수 및 방출 스펙트럼 분석

텅스텐 합금 시트는 시료 용해 후 원소 정량 분석에 일반적으로 사용되는 분석 기법입니다. 원자 흡수 분광법(AAS)은 원자의 특성광 흡수를 이용하는 반면, 음향 방출 분광법(AE)은 들뜬 원자가 방출하는 특성 스펙트럼선을 이용합니다. 이 두 가지 방법을 결합하면 텅스텐, 니켈, 철, 구리와 같은 주요 원소뿐만 아니라 미량 불순물도 분석할 수 있습니다. AAS 분석에서는 시료를 산에 용해시켜 용액을 만든 후 분무하여 불꽃이나 흑연로에 넣습니다. 원소 원자는 중공 음극 램프에서 방출되는 특성광을 흡수하며, 흡수 강도는 농도에 따라 달라지므로 표준 곡선을 이용하여 함량을 계산합니다. 이 방법은 특히 니켈이나 철과 같은 저농도 원소를 측정할 때 텅스텐 합금 시트에 매우 적합하며, 화학적 바닥 상태 원자 흡수 메커니즘이 선택성을 보장합니다. 시료 준비 시 텅스텐의 낮은 용해도를 고려해야 하며, 용해에는 일반적으로 질산과 불산 혼합물이 사용됩니다. 불소 이온의 간섭을 피하기 위해 붕산을 첨가하여 착물을 형성합니다. 불꽃 원자 흡수 분광법(Flame AAS)은 고농도 원소 분석에 적합하며, 흑연로 원자 흡수 분광법(Graphite Furnace AAS)은 미량 원소 검출 감도를 향상시킵니다.

광학 방출 분광법(OES)은 용해된 시료를 플라즈마 또는 전기 아크에 도입하여 여기시키고, 원자 또는 이온에서 방출되는 특성 스펙트럼 선을 검출합니다. 검출된

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



스펙트럼 선의 강도는 회절 격자와 검출기를 통해 기록되며, 이를 통해 여러 원소를 동시에 정량할 수 있습니다. 텅스텐 합금 시트의 경우, 텅스텐의 높은 용점 때문에 유도 결합 플라즈마(ICP-OES)와 같은 고에너지 여기 소스가 필요하며, 화학적으로 여기된 상태 전이를 통해 풍부한 스펙트럼 정보를 얻을 수 있습니다. 텅스텐 매트릭스가 배경 간섭을 일으킬 수 있으므로 매트릭스 정합 보정이 필요하며, 이는 내부 표준법이나 배경 감산법을 사용하여 최적화합니다. OES의 장점은 신속한 다원소 분석이 가능하다는 점으로, 생산 배치 검증에 적합합니다. 원자 흡광 분광법(AAS)과 OES는 서로 보완적인 기술입니다. AAS는 특정 원소에 대해 더 정밀한 분석을 제공하는 반면, OES는 광범위한 스펙트럼을 분석할 수 있습니다.

분석 과정에는 기기 교정, 인증된 표준 용액을 사용한 곡선 설정, 그리고 편식을 방지하기 위해 텅스텐 합금 시트 시료를 균일하게 채취하는 작업이 포함됩니다. 이온화와 같은 화학적 간섭은 OES에서 억제제를 첨가하여 완화합니다. 안전상의 이유로 산 용해 과정에는 통기가 필요합니다. 결과는 일반적으로 니켈-철 또는 니켈-구리와 같은 합금계의 화학양론적 균형을 평가하는 데 도움이 되도록 질량 백분율로 표시됩니다.

### 5.1.2 텅스텐 합금 시트의 X선 형광 분광법을 이용한 정량적 조성 분석

X선 형광 분광법(XRF)은 텅스텐 합금판의 정량 분석을 위한 비파괴 표면 분석 기술입니다. 이 기술은 X선을 이용하여 시료 원자를 여기시켜 특유의 형광을 발생시키는데, 이 형광의 강도는 원소 함량과 상관관계가 있으므로 텅스텐, 니켈, 철, 구리 등의 원소를 신속하게 정량할 수 있습니다. XRF는 파장 분산형(WD-XRF)과 에너지 분산형(ED-XRF)으로 나뉩니다. 파장 분산형은 높은 해상도를 제공하여 정밀한 실험실 분석에 적합하고, 에너지 분산형은 휴대성이 뛰어나 현장 분석에 적합합니다. 시료 준비는 간단합니다. 텅스텐 합금판 표면은 산화층의 간섭을 피하기 위해 연마 및 세척만 하면 됩니다. 화학적으로, 특유의 X선은 내부 껍질 전자 전이에서 발생하므로 원소 특이성을 보장합니다. X선관과 같은 여기 광원에서 발생하는 1차 X선은 시료 원자에 흡수되어 2차 형광을 방출하고, 이 형광은 검출기에 의해 수집됩니다.

정량 분석은 기본 매개변수법 또는 경험적 보정법을 기반으로 합니다. 전자는 매트릭스 효과를 계산하고, 후자는 표준 시료를 사용하여 곡선을 설정합니다. 텅스텐 합금 시트는 텅스텐 함량이 높아 강한 흡수를 유발하므로 이를 완화하기 위해 매트릭스 일치 표준 시료가 필요합니다. WD-XRF는 결정 분광법을 통해 스펙트럼 선을 정밀하게 분리하여 주요 원소 정량에 적합하며, ED-XRF는 에너지 분해능은 낮지만 여러 원소를 동시에 검출하는 데 매우 효율적입니다. 이 방법의 장점은 비파괴적 특성으로 시료의 손상을 방지하고 반복 측정이 가능하다는 점입니다. 심도 분석은 수 마이크로미터 이내의 표면으로 제한되며 균일한 시트에 적합합니다.

중첩된 스펙트럼 선과 같은 화학적 간섭은 소프트웨어 기반 스펙트럼 분석을 통해 해결됩니다. 텅스텐 L 선과 니켈 K 선의 잠재적 중첩은 알고리즘적 보정이 필요합니다. 진공 또는 헬륨 분위기는 경원소 검출을 향상시키지만, 텅스텐 합금 시트의 경우 대기 조건에서도 중원소가 쉽게 검출됩니다. 휴대용 XRF 기술은 생산 환경에서의 신속

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

스크리닝에 활용되고 있습니다. 결과의 신뢰성은 인증 표준 물질을 사용하여 검증되었으며, 편차는 허용 가능한 범위 내에서 관리됩니다. 이 시스템은 화학 시약을 사용하지 않아 안전성이 높습니다.

### 5.1.3 텅스텐 합금판의 미량원소에 대한 화학 적정 분석

텅스텐 합금 시트를 이용한 정량 분석은 고전적인 습식 화학 분석법입니다. 이 방법은 시료를 용해시킨 후 표준 시약과 반응시키고, 색 변화 또는 지시약의 전위 변화를 통해 종말점을 판별하는 방식입니다. 인, 황 또는 특정 금속 이온과 같은 미량 불순물 분석에 적합합니다. 분석 전 시료는 완전히 용해되어야 합니다. 텅스텐 합금 시트는 질산과 불산 혼합물로 가열 처리하여 텅스텐의 가용성 착물을 형성하는 경우가 많으며, 이렇게 하면 침전으로 인한 간섭을 방지할 수 있습니다. 인과 같은 미량 원소는 포스포몰리브덴 블루로 착물을 형성한 후 적정 하거나, 황은 침전시켜 분리한 후 정량합니다. 적정 방법에는 산화환원 적정, 착물 형성 적정, 산-염기 적정 등이 있으며, 분석 대상 원소의 특성에 따라 선택됩니다.

착물적정은 일반적으로 EDTA 를 적정액으로 사용하여 니켈이나 철의 미량 변화를 측정하는 데 사용되며, 화학 평형이 반응을 제어합니다. 산화환원적정은 황이나 특정 전이 원소에 적합하며, 과망간산칼륨 또는 요오드 적정이 일반적으로 사용됩니다. 지시약 선택은 매우 중요하며, 뚜렷한 색 변화가 종말점을 나타냅니다. 시료의 부피와 농도는 정확해야 하며, 미량 분석은 오차를 증폭시키지만 여러 번 병렬 분석을 통해 오차를 줄입니다. 화학적 분리 전처리가 필요합니다. 예를 들어, 주요 원소의 간섭을 피하기 위해 텅스텐 매트릭스에서 인을 추출해야 합니다.

이 방법의 장점은 간단한 장비, 저렴한 비용, 그리고 실험실에서 분광학적 결과를 검증할 수 있다는 점에 있습니다. 감도는 분광광도법을 이용한 종말점 측정과 같은 반응 증폭을 통해 향상시킬 수 있습니다. 안전 수칙으로는 산 취급 시 적절한 환기를 확보하고 불화수소의 위험을 피하는 것이 포함됩니다.

### 5.2 텅스텐 합금판의 미세구조 특성 분석 방법

텅스텐 합금 시트의 분석에는 주로 주사전자현미경(SEM), 분광 분석, 회절 분석이 활용됩니다. 이러한 방법들은 다양한 스케일에서 재료의 결정립 분포, 상 조성, 결합 특성을 파악하는 데 도움을 주어 구조와 물성 간의 관계를 규명합니다. SEM은 표면 형태 및 조성 분포 분석에, XRD는 상 및 결정 구조 분석에, 투과전자현미경(TEM)은 내부 결함 분석에 사용됩니다. 분석 전 시료 준비 과정에서는 오염 방지를 위해 절단, 연마, 이온 박막화 등의 공정을 거칩니다. 분석 방법의 선택은 연구 목적에 따라 달라지는데, SEM은 표면 분석에, 회절 분석은 결정 구조 분석에, TEM은 나노 스케일 결함 분석에 적합합니다. 이러한 방법들을 결합하면 다차원적인 분석이 가능하며, 예를 들어 SEM과 회절 분석을 결합하면 상 구조를 확인할 수 있습니다. 이러한 분석 방법들의 화학적 원리는 전자와 물질의 상호작용에 기반하며, 여기 신호는 원자 배열을 반영합니다. 산화 방지를 위해서는 진공과 같은 환경 제어가 필수적입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.2.1 텅스텐 합금 시트의 주사 전자 현미경을 이용한 형태 및 조성 매핑

텅스텐 합금 시트는 미세구조를 분석하는 데 널리 사용되는 방법입니다. 전자빔으로 시료 표면을 스캔하여 2 차 전자 및 후방 산란 전자 신호를 발생시키면 텅스텐 입자의 형태, 결합상 분포, 계면 특성 등을 파악할 수 있습니다. 동시에 에너지 분산 분광법(EDS)을 이용하여 원소의 공간 분포를 분석합니다. 이 방법은 전자와 원자 간의 상호작용을 이용합니다. 입사 전자는 시료 원자를 여기시켜 특유의 신호를 생성하고, 2 차 전자는 표면 형태를 반영하며, 후방 산란 전자는 원자 번호의 차이에 따라 달라집니다. 텅스텐은 원자 번호가 높아 결합상보다 입자가 더 밝게 나타나므로 구별이 용이합니다. 시료 준비는 기계적 연마 후 전해 연마 또는 이온 연마를 거칩니다. 전하 축적을 방지하기 위해 표면에 탄소 또는 금으로 전도성 도금을 해야 합니다. 이미징은 진공 환경에서 수행되며, 가속 전압을 조절하여 해상도와 침투 깊이의 균형을 맞춥니다. 저전압은 표면 세부 관찰에 적합하고, 고전압은 더 깊은 곳까지 관찰할 수 있도록 합니다.

형태학적 관찰에서 텅스텐 합금 시트의 2 상 구조가 명확하게 나타납니다. 텅스텐 입자는 구형 또는 다면체이며, 결합상이 입자 사이의 틈을 채워 연속적인 네트워크를 형성합니다. 배율을 조절하여 결정립계 균열이나 기공을 관찰할 수 있습니다. 화학 조성 매핑은 X 선 검출기를 사용하여 특징적인 피크를 수집하고, 소프트웨어 처리를 통해 원소 분포 지도를 생성합니다. 텅스텐 영역은 밀집된 신호를 나타내는 반면, 니켈이나 철은 결합상에 풍부하게 존재하여 편석 또는 농도 구배 영역을 보여줍니다. 매핑 해상도는 검출기 효율과 스캔 시간에 따라 달라지며, 스캔 시간이 길수록 신호 대 잡음비가 향상됩니다. 이 방법의 장점은 형태학적 정보와 화학적 정보를 직관적으로 결합하여 소결 불균일로 인한 구조적 결함을 분석하는 데 도움이 된다는 점입니다. 전자 후방 산란 회절과 같은 보조 모드를 사용하면 결정 방향을 더욱 자세히 분석할 수 있으며, 화학적으로는 결정립계에 편석된 원소가 회절 패턴에 영향을 미칩니다.

또한, 이 방법은 열처리 후 구조 변화를 추적하는 데 중요한 역할을 합니다. 어닐링된 시료를 비교하면 입자 구형화 및 계면 결합이 향상된 것을 확인할 수 있습니다. 환경 스캐닝 모드를 사용하면 습식 시료 관찰이 가능 하지만, 텅스텐 합금 시트는 일반적으로 건식 상태에서 분석됩니다. 이미지 처리 소프트웨어는 입자 크기 분포 및 상 부피 분율을 정량화하는 데 도움을 주며, 화학적 매핑 데이터를 형태 이미지와 중첩하여 종합적인 이미지를 얻을 수 있습니다. 산소와 같은 불순물 원소의 매핑을 통해 산화물 개재물의 위치를 파악하여 정제 공정을 최적화할 수 있습니다. 이 방법의 한계는 표면 민감도에 있으며, 심층 구조를 평가하려면 단면 관찰이 필요합니다.

### 5.2.2 텅스텐 합금 시트의 X선 회절을 이용한 상 및 결정 구조 분석

텅스텐 합금 시트의 상 분석은 비파괴적인 특성 분석 기법입니다. 이 기법은 X 선이 결정의 원자면과 상호작용하여 회절 피크를 생성하는 원리를 이용하며, 이를 통해 상 조성을 확인하고 격자 상수를 분석하여 합금계의 상 평형 및 구조적 안정성을 이해하는 데 도움을 줍니다. 이 분석은 브래그 법칙에 기반합니다. 입사 X 선은 결정에 의해 반사되고, 피크 위치는 면간 거리에 해당하며, 강도는 원자 배열을 반영합니다. 시료는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



전체 시트 또는 분말 형태일 수 있으며, 산란 간섭을 피하기 위해 표면이 매끄러워야 합니다. 일반적으로 Cu-K $\alpha$ 선이 광원으로 사용되고, 검출기는 회절 신호를 수집하며, 소프트웨어는 표준 카드와 비교하여 텅스텐의 체심 입방 구조 피크와 결합상 피크와 같은 상을 식별합니다. 상 분석에서 텅스텐 합금 시트는 강하고 날카로운 텅스텐 피크를 나타내는 반면, 결합상 피크는 약하게 나타납니다. 합금 원소의 용해는 피크 이동을 유발하며, 이는 고용체의 정도를 나타냅니다.

결정 구조 분석은 피크 피팅을 통해 격자 상수를 계산하는 과정을 포함합니다. 텅스텐 상의  $\alpha$  매개변수는 온도에 따라 미미하게 변화하는 반면, 결합제 상은 철 또는 구리 비율에 따라 팽창하거나 수축합니다. 화학 조성의 영향은 회절 피크 폭에 반영됩니다. 결정립 미세화는 피크 폭을 증가시키고, 재결정된 시료는 피크 폭이 감소합니다. 정량적 상 분석은 적분 강도 비율을 이용하여 부피 분율을 추정함으로써 소결상 형성 과정을 이해하는 데 도움을 줍니다. 이 방법의 장점으로서는 실험실 및 휴대용 기기 모두에서 사용 가능하며, 시료 배치를 신속하게 스캔할 수 있다는 점이 있습니다. 현장 가열 회절과 같은 고급 모드는 고온 상전이를 추적하고 텅스텐 용해 거동을 화학적으로 관찰할 수 있도록 합니다. 데이터 처리에는 배경 제거 및 피크 분리가 포함되며, 복잡한 스펙트럼의 경우 다중 피크 피팅이 필요합니다.

또한, 이 분석법은 압연 변형 구조를 평가하는 데 효과적입니다. 조직 피크 강도의 변화는 배향 분포를 반영하며, 화학적으로는 변형으로 인한 변형물이 피크 이동에 영향을 미칩니다. 산화물과 같은 불순물상은 약하지만 검출 가능한 피크를 나타내어 정제 과정을 안내합니다. 진공 또는 불활성 가스를 이용한 환경 제어는 산화 피크로 인한 간섭을 방지합니다. 이러한 회절 결과는 전자 현미경과 같은 다른 특성 분석 기법과 결합하여 검증할 수 있습니다.

### 5.2.3 투과 전자 현미경을 이용한 텅스텐 합금판의 미세 결합 관찰

텅스텐 합금 시트를 이용한 고해상도 특성 분석 기법입니다. 고에너지 전자빔을 얇은 시료에 투과시켜 명시야 및 암시야 이미지와 회절 패턴을 생성함으로써 전위, 공공, 결정립계, 석출물과 같은 나노 규모의 결합을 관찰할 수 있으며, 이를 통해 구조가 성능에 미치는 영향을 분석할 수 있습니다. 이러한 관찰은 전자파와 결정 사이의 상호작용을 기반으로 하며, 투과 전자 현미경은 결합의 대비를 나타내고, 전자 회절은 결정의 국소적인 정보를 제공합니다. 시료의 휨이나 오염을 방지하기 위해 수십 나노미터 두께까지 이온 도금을 해야 합니다. 텅스텐의 높은 밀도를 투과시키기 위해 높은 가속 전압이 사용됩니다. 화학적으로 전자 산란은 원자 번호에 따라 달라지며, 텅스텐은 결합상과 상대적으로 강한 대비를 나타냅니다. 결합 관찰에서 전위선은 명시야 이미지에서 휘어져 보이며, 화학적 전위핵 원소의 편석은 전위 이동에 영향을 미칩니다.

결정립계 관찰을 통해 계면 구조를 파악하고, 고해상도 이미징을 통해 원자 배열을 관찰할 수 있습니다. 화학적으로는 붕소와 같은 편석 원소가 계면에 축적되어 결합력을 강화합니다. 미세한 텅스텐 입자와 같은 석출상은 결합상 내 격자 구조로 이미징되어 모양과 분포를 관찰할 수 있습니다. 암시야 이미징을 통해 특정 결합을 강조하고, 회절

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



비교를 통해 전위 유형을 분석합니다. 이 방법의 장점은 원자 수준의 해상도와 두께 효과를 제거하기 위한 에너지 필터링의 조합에 있습니다. 현장 가열을 통해 결합 동역학을 관찰하고 고온 확산을 통해 화학적으로 공공을 복구합니다. 데이터 처리에는 이미지 필터링과 시뮬레이션 매칭을 통해 결합 모델을 검증하는 과정이 포함됩니다.

또한, 이 관찰 방법은 압연 변형 결함을 추적하는 데 효과적입니다. 냉간 가공된 시료는 고밀도의 전위 네트워크를 나타내는데, 이는 어닐링 후 감소합니다. 바늘 모양 화합물과 같은 불순물 유발 결함은 이미지화하여 제어 방향을 설정하는 데 활용할 수 있습니다. 탄소 오염을 방지하기 위해 고진공 환경을 사용합니다. 이 방법은 주사 투과 전자 현미경(STEM) 원소 매핑을 결합하여 결함의 화학적 정보를 확장합니다.

### 5.3 텅스텐 합금 시트의 성능 지표 시험 사양

텅스텐 합금 시트는 주로 국가 표준, 산업 표준 및 회사 내부 규격을 기반으로 합니다. 이러한 규격에는 밀도, 경도, 기계적 강도, 열전도율 및 전기 전도율과 같은 주요 매개변수를 측정하는 방법이 포함되어 산업 응용 분야에서 재료의 일관성과 신뢰성을 보장합니다. 시험 과정에서는 시료 대표성, 장비 교정 및 일정한 습도와 실온 조건에서의 작업과 같은 환경 제어가 강조됩니다. 밀도와 충전 밀도는 물 치환법 또는 기체 치환법을 사용하여 측정하고, 경도는 브리넬, 비커스 또는 로크웰 경도법을 사용하여 측정합니다. 규격에는 균일성을 반영하기 위해 여러 시료의 평균값을 사용하는 반복성 요구 사항도 포함됩니다. 화학적 조성은 성능 시험에 영향을 미치며, 텅스텐 함량이 높을 경우 측정 오차 보정을 고려해야 합니다. 시험 보고서에는 장비 모델, 표준 번호 및 편차 분석 결과가 기록되어야 합니다.

#### 5.3.1 텅스텐 합금판의 밀도 및 충전 밀도 시험 방법

텅스텐 합금 시트의 밀도 측정에는 아르키메데스 물 치환법과 기체 치환법이 있습니다. 전자는 일반적인 실험실 환경에 적합하고, 후자는 정밀도가 높은 시료나 액체에 담그기 어려운 시료에 적합합니다. 이 방법은 부피 치환 원리를 이용하여 재료의 밀도를 계산하고, 이론 밀도와 비교하여 충전 밀도를 평가합니다. 물 치환법에서는 먼저 시료를 건조시켜 무게를 측정한 후, 증류수나 에탄올에 담가 습윤 무게를 측정합니다. 화학적으로 액체는 합금과의 반응을 피하고 표면 용해를 방지할 수 있도록 선택해야 합니다. 계산 공식에는 액체 밀도와 온도 보정이 포함되어 정확한 측정이 가능합니다. 시료의 모양이 규칙적일 경우 부피를 직접 측정하고, 불규칙한 모양의 시트는 가는 실크 매달아 액체에 담급니다. 기포로 인한 오차를 줄이기 위해 여러 번 측정하여 평균값을 사용합니다.

기체 치환법은 헬륨 또는 질소를 사용합니다. 시료를 부피가 알려진 용기에 넣고 기체 압력의 변화를 측정하여 시료의 부피를 확인합니다. 화학적으로 불활성인 기체를 사용하면 산화를 방지할 수 있습니다. 이 방법의 장점은 건식 공정이 가능하다는 점으로, 얇은 판이나 산화되기 쉬운 표면에 적합합니다. 밀도 계산에는 구성 성분의 가중 평균을 기반으로 한 이론적 밀도 기준값이 필요하며, 텅스텐이 주성분인 경우 이론적 밀도 값은

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

순수 텅스텐의 밀도에 가깝습니다. 시험 규격에서는 오일이나 산화막이 없는 깨끗한 시료를 사용하고, 표면 연마 후 측정해야 합니다. 측정 환경은 표준 실온으로 유지하고, 흡착된 수분의 영향을 방지하기 위해 습도는 낮게 유지합니다.

또한, 이 방법은 균일성을 평가하고 편차가 클 경우 소결 공정을 추적하기 위해 다지점 샘플링을 통해 생산 배치 검증에 널리 사용됩니다. 화학적 순도는 결과에 영향을 미치며, 불순물과 기공은 측정된 밀도를 감소시킵니다. 기기 교정에는 표준 블록이 사용되며 주기적인 검증이 필요합니다. 박편을 측정할 때는 굽힘 오류를 방지하기 위해 쌓거나 접어야 합니다. 결과는 밀도의 백분율로 세제곱센티미터당 그램( $\text{g/cm}^3$ ) 단위로 표시됩니다. 규격에서는 안전을 강조하며, 물 치환법의 경우 액체 증발에 주의해야 하고, 가스 치환법의 경우 밀봉 상태를 확인해야 합니다.

### 5.3.2 텅스텐 합금판의 경도 측정 방법

텅스텐 합금 시트의 경도 측정에는 브리넬 경도, 비커스 경도, 로크웰 경도 시험이 포함됩니다. 시험 방법 선택은 재료의 두께와 측정하고자 하는 값에 따라 달라집니다. 브리넬 경도는 전체적인 경도를 측정하는 데 적합하며, 비커스 경도와 로크웰 경도는 표면 또는 얇은 시트의 경도를 측정하는 데 사용됩니다. 이러한 방법들은 압흔의 크기 또는 깊이를 통해 소성 변형에 대한 저항성을 평가합니다. 브리넬 경도 시험에서는 강철 구슬 또는 초경 구슬 압입자를 사용하여 특정 하중을 가해 시편 표면에 압입합니다. 일정 시간 동안 유지한 후, 압흔의 직경을 측정하여 경도 값을 계산합니다. 화학적으로 압입자 재질은 텅스텐 표면에 의한 굽힘을 방지하기 위해 내마모성이 있어야 합니다. 시편 표면은 매끄럽게 연마되어야 하며, 뒷면의 변형을 방지하기 위해 충분한 두께를 가져야 합니다. 하중 선택은 합금의 높은 경도를 고려하여 이루어지며, 일반적으로 선명한 압흔을 얻기 위해 높은 하중을 사용합니다.

비커스 경도 시험은 넓은 하중 범위를 가진 다이아몬드 피라미드 압입기를 사용하여 미세 영역 측정에 적합합니다. 압입 대각선 길이는 현미경으로 측정하며, 다이아몬드의 화학적 불활성 덕분에 정확도가 높습니다. 얇은 판재 시험 시에는 관통을 방지하기 위해 낮은 하중을 사용합니다. 로크웰 경도 시험은 예하중 후 본 하중을 가하는 방식으로 신속하게 진행되며, 깊이 차이를 직접 측정합니다. 텅스텐 합금 판재에는 HRA 또는 HRC 척도가 적합합니다. 규격에 따라 다점 시험, 그리드 분포 평균화, 균일성 평가가 요구됩니다. 환경 진동 제어와 수평적인 장비 배치가 필수적입니다.

또한, 이 방법은 열처리 후 성능 추적에 효과적이며, 어닐링된 시료에서 관찰되는 경도 감소가 회복되는 것을 보여줍니다. 화학적 조성은 결과에 영향을 미치는데, 바인더 상의 비율이 높을수록 경도가 낮아집니다. 코팅과 같은 표면 처리는 측정 전에 기판에서 제거해야 합니다. 표준 블록은 기기 교정 및 주기적인 검증에 사용됩니다. 가장자리 효과를 방지하기 위해 박편 굽힘 및 고정 시험을 수행합니다. 결과는 HB, HV 또는 HR 단위로 표시되며, 하중이 명시됩니다. 사양은 안전을 최우선으로 고려하며, 파손 방지를 위해 압입기 보호 장치를 사용합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.3.3 텅스텐 합금판의 내식성 시험 방법

텅스텐 합금판의 내식성 평가에는 침지 시험, 전기화학 시험, 염수 분무 시험 등이 있습니다. 이러한 방법들은 다양한 부식 환경을 모사하여 산성, 알칼리성, 염수 환경에 대한 재료의 내성을 평가하고, 표면 보호 및 조성 설계 최적화에 도움을 줍니다. 침지 시험은 가장 기본적인 방법입니다. 시료를 특정 부식성 용액에 넣고 무게 변화, 표면 형태, 용액 조성을 주기적으로 관찰합니다. 화학적 시험에서는 황산, 염산, 염화나트륨 용액 등을 사용하고, 표준에 따라 온도와 시간을 설정합니다. 시험 후 시료를 세척하고 무게 감소를 측정하여 부식 속도를 계산하며, 표면 금속 조직 관찰을 통해 공식 또는 균일 부식 특성을 기록합니다. 이 방법의 장점은 간단하고 직관적이어서 장기간 부식 거동 연구에 적합하다는 점입니다.

전기화학적 시험은 주로 분극 곡선과 임피던스 분광 분석을 이용하여 동적 부식 정보를 제공합니다. 시료는 3 전극 시스템 내의 전해액에 담겨 작업 전극 역할을 합니다. 전위 스캐닝을 통해 전류 변화를 기록하고, 타펠 외삽법을 이용하여 부식 전류 밀도를 계산합니다. 자체 부식 전위는 열역학적 안정성을 반영합니다. 교류 임피던스 분광법은 계면 저항과 정전 용량을 측정하고, 등가 회로 모델을 적용하여 부동태 피막의 보호 효과를 평가합니다. 텅스텐 합금 시트의 결합재 상의 반응성이 높기 때문에 시험 중 기준 전극의 안정성을 신중하게 고려해야 합니다. 염수 분무 시험은 중성 염수 분무 챔버에 염화나트륨 용액을 분사하여 해양 환경을 모사합니다. 표면의 녹이나 피팅을 주기적으로 관찰하며, 화학적으로 염화 이온의 침투는 국부 부식을 유발하고, 평가 기준은 부식 면적을 기반으로 합니다.

시험 규격에 따라 시료는 표면 상태가 일정해야 하며, 연마 또는 코팅 후 시험한 경우에는 그 사실을 기록해야 합니다. 환경 제어는 일정한 온도와 습도를 유지하고 외부 간섭을 차단해야 합니다. 여러 개의 병렬 시험을 실시하고 평균값을 사용하여 부식 깊이 또는 속도를 통계적으로 분석해야 합니다. 부식 생성물은 화학적으로 분석하고, X선 회절 분석을 통해 산화물 상을 확인해야 합니다. 정성적 침지 시험, 정량적 전기화학 분석, 가속 염수 분무 시험 등 다양한 방법을 조합하여 사용해야 합니다. 안전 예방 조치에는 산성 미스트의 적절한 환기 및 폐액의 중화가 포함됩니다.

### 5.3.4 텅스텐 합금판의 내마모성 시험 방법

텅스텐 합금판의 내마모성 시험에는 핀-디스크 마모 시험, 연삭 휠 마모 시험, 왕복 마찰 시험 등 다양한 방법이 있습니다. 이러한 방법들은 건식 마찰 또는 윤활 조건에서의 마모 거동을 모사하고, 접촉 응력 하에서의 재료의 파괴 손실 및 마찰 계수를 평가하며, 경도 및 표면 처리를 최적화하는 데 도움을 줍니다. 핀-디스크 마모 시험에서는 시편을 디스크 형태로 고정하고 핀에 하중을 가하여 회전시킵니다. 화학적 마찰열로 인해 산화 마모가 발생하며, 무게 손실 또는 마모 흔적 깊이를 측정하여 마모율을 계산합니다. 하중과 회전 속도는 다양한 작업 조건을 모사하기 위해 조절할 수 있습니다. 건식 마찰 시험은 접촉 마모를 중점적으로 살펴보는 반면, 윤활 시험은 연마 입자의 영향을 분석합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



연삭 휠 마모 시험은 표준 연삭 휠을 사용하여 시편 표면을 연삭하고 단위 시간당 무게 감소량을 측정합니다. 화학적으로, 연마 입자의 박힘으로 인해 절삭 마모가 발생하며, 이는 고경도 텅스텐 합금판에 적합합니다. 시험 규격은 연삭 휠의 입자 크기와 압력을 제어하여 반복성을 확보합니다. 왕복 마찰 시험은 선형 운동을 모사하며, 볼 또는 핀이 시편 위에서 앞뒤로 미끄러집니다. 센서는 마찰력을 실시간으로 기록하고 평균 마찰 계수를 계산합니다. 화학적으로, 표면 피로는 박리를 유발하며, 마모 흔적의 미세 구조를 관찰하여 그 메커니즘을 분석합니다. 레이저 공초점 현미경 또는 프로파일 측정법을 사용하여 마모 흔적의 부피를 정량화합니다. 시험 규격에 따라 균일한 시료 표면 연마와 이방성 평가를 위한 다방향 시험이 요구됩니다. 습도가 산화 마모에 미치는 영향 등 여러 요인을 고려하여 시험 환경을 제어해야 합니다. 화학 세척을 통해 마모 잔해를 제거함으로써 높은 무게 측정 정확도를 확보합니다. 주사 전자 현미경(SEM)을 사용하여 마모된 표면을 분석하고, 에너지 분산 분광법(EDS)으로 전이막을 식별합니다. 핀-디스크 시험을 통한 부피 손실 정량화 및 왕복 운동 계수 측정 등 다양한 방법을 조합하여 사용합니다. 분진 흡입을 방지하기 위한 집진 장치 설치 등 안전 조치도 시행합니다.

### 5.3.5 텅스텐 합금판의 강도 시험 방법

텅스텐 합금 시트의 시험에는 인장 시험, 굽힘 시험 및 압축 시험이 포함됩니다. 이러한 방법은 재료의 인장 강도, 항복 강도 및 파괴 거동을 측정하여 기계적 신뢰성과 가공 적합성을 평가하는 데 도움이 됩니다. 인장 시험은 가장 일반적으로 사용되는 방법입니다. 시편은 표준 아령형 또는 직사각형 스트립으로 가공하여 만능 시험기에서 단축 인장력을 가합니다. 하중-변위 곡선을 기록하고, 화학적 전위 슬립이 소성 변형의 주요 원인임을 확인합니다. 인장 강도와 연신율을 계산합니다. 클램핑으로 인한 손상을 방지하기 위해 비접촉식 신장계를 사용하여 시트 시험을 수행합니다. 준정적 거동을 포착하기 위해 변형률 속도를 천천히 제어합니다.

굽힘 시험은 얇은 판재에 적합하며, 3 점 또는 4 점 굽힘 하중을 가하여 굽힘 강도와 처짐을 측정합니다. 화학 분석을 통해 표면 압축 및 내부층의 인장 적합성을 평가하고 층간 결함을 분석합니다. 압축 시험은 두꺼운 판재 또는 블록에 적용하며, 짧은 원통형 시편의 축 방향 압축을 통해 응력-변형률 곡선을 기록합니다. 텅스텐 합금 판재는 고밀도에서 소성이 제한적입니다. 시험 규격에는 표준화된 시편 치수와 결함 없는 표면이 요구됩니다. 고온 강도 저하를 조사하기 위해 주변 온도를 조절할 수 있습니다. 균열 전파는 음향 방출을 이용하여 시험 중 실시간으로 모니터링합니다. 파괴면의 화학 분석과 주사 전자 현미경을 이용한 딥플 또는 벽개 특징 관찰을 통해 파괴 모드를 구분합니다.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 제 6 장: 텅스텐 합금판의 제조 공정

### 6.1 텅스텐 합금 시트의 제조 공정 및 분류

텅스텐 합금 시트는 주로 분말 야금법을 기반으로 제조됩니다. 이 공정은 원료 분말에서 완제품 시트에 이르기까지 분말 혼합, 압축, 소결, 열기계 가공 및 후처리 등 여러 단위 공정을 포함합니다. 분류는 합금계, 목표 물성 및 두께 사양에 따라 이루어집니다. 주요 제조 공정은 액상 소결이며, 고상 소결 또는 활성 소결과 같은 변형 공정이 보조적으로 사용됩니다. 공정 설계는 텅스텐의 내화성 및 고밀도 특성을 고려하여 치밀화 및 균일한 미세 구조를 확보하도록 합니다. 일반적인 공정은 고순도 텅스텐 분말과 바인더 분말을 균일하게 혼합하는 것으로 시작하여, 냉간 등방압 성형을 통해 빌릿을 형성하고, 고온 소결을 통해 입자 재배열 및 결합을 달성한 후, 열간 압연, 온간 압연, 냉간 압연을 통해 점진적으로 박막화하고, 중간에 어닐링을 통해 응력을 해소한 후, 최종적으로 표면 처리를 합니다. 분류 측면에서 고밀도 시트는 텅스텐 함량과 밀도를 강조하는 반면, 비고밀도 시트는 유사 합금이나 복합 구조를 포함할 수 있습니다. 두께 범위는 공정 선택에 영향을 미치는데, 얇은 시트는 정밀 압연이 필요하고, 두꺼운 시트는 초기 블랭킹에 중점을 둡니다.

제조 공정의 유연성 덕분에 적용 분야에 따라 조정할 수 있습니다. 예를 들어, 의료용 차폐 시트는 균일성을 강조하는 반면, 산업용 내마모 시트는 경질상 강화에 중점을 둡니다. 화학적 원리는 전체 공정에 적용됩니다. 액상 습윤은 소결 과정에서 치밀화를 유도하고, 가공 중 변형 조정은 결합재의 가소성에 의존합니다. 산화 방지를 위한 수소 분위기 사용과 같은 환경 제어 및 불순물로 인한 결합 발생 방지를 위한 순도 관리 또한 매우 중요합니다. 특히 최근에는 고온 등방압 성형(HIP)과 스파크 플라즈마 소결(SPS)의 통합을 통한 공정 최적화가 이루어져 초기 원료의 품질이 향상되고 후속 가공의 난이도가 낮아졌습니다. 소결 방법에 따라 전통적인 수소로 소결과 진공 소결로 분류할 수도 있습니다. 전자는 비용이 저렴하고, 후자는 불순물 제어 측면에서 우수합니다.

#### 6.1.1 텅스텐 합금 시트의 주요 제조 경로

텅스텐 합금 시트는 분말 야금법을 기반으로 하며, 전통적인 액상 소결, 활성 소결, 용융 침투 복합 공정의 세 가지 유형으로 나눌 수 있습니다. 이러한 공정은 합금 시스템과 성능 목표에 따라 선택되며, 분말에서 시트로의 완전한 변환을 보장합니다. 전통적인 액상 소결 공정은 가장 성숙한 방식입니다. 먼저, 텅스텐 분말을 니켈, 철 또는 구리 분말과 특정 비율로 기계적 혼합 또는 볼 밀링합니다. 그런 다음 혼합물을 냉간 등방압 성형하여 대형 빌릿으로 만듭니다. 이어서 수소 보호 하에 온도를 액상 발생 온도 이상으로 올리고 유지하여 결합재의 용융 및 습윤과 텅스텐 입자의 치밀화를 촉진하고 재배열 및 용해-재침전을 유도합니다. 소결 후, 빌릿을 고온에서 단조하거나 열간 압연하여 두께를 중간 수준으로 점진적으로 줄인 다음, 온간 압연 및 냉간 압연을 거치고 여러 차례 진공 어닐링 공정을 통해 응력을 완화합니다. 마지막으로, 산세척을 하거나 연마하여 판 형태로 만듭니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

활성 소결법은 치밀화가 어려운 시스템에 적용하기 위해 고안되었습니다. 팔라듐이나 니켈과 같은 소량의 활성제를 분말에 미리 첨가하여 소결 온도를 낮추고 고상 확산을 촉진합니다. 화학적으로 활성제는 계면에서 응집되어 표면 에너지를 감소시킵니다. 이 방법은 텅스텐-구리 또는 고함량 텅스텐 시트에 적합합니다. 낮은 에너지 소비와 미세한 미세구조를 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 활성제 잔류물로 인해 후속 처리가 필요합니다. 용융 침투 복합재법은 먼저 다공성 텅스텐 골격을 가압 및 소결한 후, 구리 또는 은 액체를 진공 침투시킵니다. 화학적으로 액체 금속은 기공을 채워 유사 합금 구조를 형성합니다. 후속 압연 공정을 통해 초박막화를 구현할 수 있어 열전도성 및 전기전도성 시트 제조에 적합합니다.

생산 공정 선택 시 확장성과 비용을 고려해야 합니다. 전통적인 공정은 니켈-철 및 니켈-구리 계열의 대량 생산에 적합하며, 용융 침투 공정은 텅스텐-구리 계열에 맞게 설계되었습니다. 고온 등방압 성형과 같은 보조 공정을 모든 공정에 적용하여 초기 밀도를 향상시키고 압연 균열을 줄일 수 있습니다. 공정 전반에 걸쳐 화학적 제어가 이루어지며, 대기 중 이슬점 관리를 통해 산화를 방지하고, 분말 입자 크기 조절을 통해 혼합 균일성을 확보합니다. 화학 도금과 같은 표면 처리는 공정 말단에 적용하여 내식성을 향상시킵니다. 환경적 요인을 고려하여 재활용 스크랩 재료를 분쇄하여 재사용합니다.

### 6.1.2 고밀도 텅스텐 합금 시트와 비고밀도 시트의 공정 차이

고밀도 텅스텐 합금 시트와 일반 시트는 조성 설계, 소결 조건 및 가공 경로에 따라 구분됩니다. 고밀도 시트는 텅스텐 함량과 밀도를 극대화하는 것을 목표로 하는 반면, 일반 시트는 열전도율이나 저밀도 평형과 같은 특정 기능에 중점을 둡니다. 고밀도 시트는 일반적으로 텅스텐 함량이 높고 결합재의 비율이 낮습니다. 이 공정은 기공을 최소화하고 연질상의 부피를 화학적으로 감소시켜 이론적 밀도에 근접하게 만들기 위해 장시간 액상 유지 및 2 차 고온 등방압 성형을 사용합니다. 소결 온도는 과도한 유동으로 인한 파손을 방지하기 위해 적절한 액상 범위 내에서 정밀하게 제어됩니다. 가공 경로는 균일한 미세 구조와 높은 두께 균일성을 최종 제품에 유지하기 위해 고감축 열간 압연 후 엄격한 중간 열처리를 강조합니다.

텅스텐-구리 유사합금과 같은 비고밀도 판재의 경우, 텅스텐 함량을 줄이고 용융 침투 공정을 사용할 수 있습니다. 먼저 텅스텐 골격을 소결하여 의도적인 기공을 만든 다음, 구리를 침투시켜 기공을 채웁니다. 화학적으로 구리상은 고용체를 형성하지 않으므로 높은 열전도도를 갖는 통로 역할을 합니다. 소결 온도가 낮아지고, 공정은 냉간 압연에 대한 적응성을 더욱 중요시합니다. 구리는 가소성이 우수하여 잦은 열처리 없이도 초박형을 쉽게 구현할 수 있습니다. 비고밀도 판재에서는 저온 치밀화를 촉진하는 첨가제를 사용하는 활성 소결 방식이 흔히 사용되며, 이는 텅스텐- 은 또는 복합 시스템에 적합합니다. 표면 처리 방식에서도 차이가 있습니다. 고밀도 판재는 결합재 보호를 위해 니켈 도금을 하는 경우가 많지만, 비고밀도 판재는 구리의 내식성을 직접 활용합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또한, 공정 차이는 에너지 소비와 수율에 영향을 미칩니다. 고밀도 공정은 정교한 장비가 필요하고 리드 타임이 길지만 안정적인 성능을 제공하는 반면, 비고밀도 공정은 유연성이 뛰어나 소량 기능성 웨이퍼 생산에 적합합니다. 고밀도 공정에서는 불순물이 기공을 쉽게 증폭시킬 수 있으므로 화학적 순도 관리가 더욱 엄격합니다. 환경 제어 측면에서 고밀도 공정은 고순도 수소를 필요로 하는 반면, 비고밀도 공정은 산화 방지를 위해 진공 용융 침투법을 사용합니다.

### 6.1.3 일반적인 두께 범위 및 해당 공정 선택 (0.05mm ~ 50mm)

텅스텐 합금 시트는 일반적으로 0.05mm 의 초박막 포일부터 50mm 두께의 판재까지 다양한 두께로 생산됩니다. 이에 맞는 공정 선택은 가공 난이도와 미세구조 제어 사이의 균형을 고려해야 합니다. 박막 시트는 정밀 압연이 중요하고, 후막 시트는 빌릿 준비 및 단조에 중점을 둡니다. 0.05mm 에서 0.5mm 두께의 초박막 시트의 경우, 다중 패스 냉간 압연이 주요 공정으로 사용되어 높은 전체 가공 수율을 얻을 수 있습니다. 결합재 상의 비율을 약간 높여 연성을 향상시키고 모서리 균열을 방지합니다. 응력 해소를 위해 고진공 상태에서 중간 열처리를 자주 수행하며, 표면 손상을 줄이기 위해 윤활제를 사용합니다. 마지막으로 화학적 연마 또는 전해 정련을 통해 매끄러운 표면을 얻습니다.

두께 0.5mm~10mm 판재의 경우, 열간압연에서 냉간압연 마무리까지 공정이 가장 성숙 단계에 있습니다. 열간압연은 매 패스마다 큰 감축률을 보이며, 온간압연 전환 및 최적화된 어닐링 공정을 통해 섬유질 미세구조를 형성합니다. 두께 10mm~50mm 판재의 경우, 초기 성형 후 열간단조 또는 열간압연을 통해 얇고 큰 크기의 냉간등방압 성형 빌릿을 만듭니다. 탈탄을 방지하기 위해 고온 보호 분위기를 사용하며, 강도 유지를 위해 가공 속도를 낮춥니다. 표면의 산화층은 주로 밀링으로 제거합니다.

공정 선택 시 장비 성능을 고려해야 합니다. 얇은 판재는 고정밀 압연기와 장력 제어가 필요하고, 두꺼운 판재는 대형 단조 프레스가 필요합니다. 두께는 화학적 특성에 영향을 미칩니다. 얇은 판재는 열을 빠르게 발산하고 가공 경화가 심하게 나타나는 반면, 두꺼운 판재는 열 누적 효과가 발생하여 온도 구배 제어가 필수적입니다. 두께가 두꺼워질수록 균일성 관리가 어려워지므로, 두꺼운 판재의 경우 다지점 밀도 측정이 필요합니다. 환경적 요인 또한 중요한 역할을 합니다. 얇은 판재는 산화되기 쉬우므로 불활성 가스 포장에 필요합니다.

## 6.2 원료 분말의 준비

원료 분말 준비는 텅스텐 합금 시트 생산의 핵심 단계이며, 소결 구조의 균일성, 밀도 및 최종 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 준비 과정에는 텅스텐 분말의 환원 및 정제, 합금 원소 분말의 선택 및 전처리, 그리고 혼합을 통한 균질화가 포함됩니다. 주 원료인 텅스텐 분말은 액상 소결 과정에서 습윤 및 재배열이 원활하게 이루어지도록 높은 순도와 적절한 입자 크기를 가져야 합니다. 니켈, 철, 구리 등의 합금 원소 분말은 결합재 역할을 하며, 텅스텐 분말의 입자 크기와 활성에 적합해야 합니다. 준비 과정에서는 취성상이나 기공에 불순물이 혼입되는 것을 방지하기 위해 화학적 순도와 물리적 특성을 철저히

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

관리하는 것이 중요합니다. 일반적인 공정은 텅스텐산암모늄의 수소 환원으로 시작하여 합금 분말 분무 또는 카르보닐 분해를 거쳐 체질 및 혼합을 통해 균일한 배합을 달성하는 순서로 진행됩니다. 입자 크기 분포 및 피서 체 분석법은 분말의 유동성과 압축 성능을 확보하는 데 중요한 품질 관리 요소입니다.

제조 화학적 원리는 환원 반응과 표면 에너지 조절에 있습니다. 고순도 수소를 사용하여 산소를 환원 및 제거하고, 합금 분말은 산화 방지를 위해 전처리됩니다. 최신 공정에서는 분무 건조 또는 기계적 합금화 공정을 도입하여 혼합 효율을 높이고 미세 구조를 개선합니다. 환경적 요인으로 인해 분말은 수분 흡수를 방지하기 위해 건조하고 불활성인 환경에서 보관해야 합니다. 원료의 품질은 완제품의 두께 균일성과 불량률에 직접적인 영향을 미칩니다. 미세 분말은 박판 생산에 유리하고, 조립 분말은 후판 생산에 적합합니다.

### 6.2.1 고순도 텅스텐 분말의 제조 및 품질 요구사항

고순도 텅스텐 분말의 제조는 주로 텅스텐산암모늄 또는 산화텅스텐의 수소 환원법을 이용합니다. 이 방법은 다단계 환원을 통해 텅스텐의 고순도 및 입자 크기 제어를 달성하여 합금 시트 소결 시 분말의 활성 및 청정성을 보장합니다. 제조 공정은 텅스텐산암모늄의 용해 및 재결정 정제로 시작하여 소성 과정을 거쳐 황색 텅스텐 또는 청색 산화텅스텐을 생성합니다. 그 후, 관로 또는 푸시 보트로에서 단계별 수소 환원을 진행합니다. 1 단계는 저온 환원을 통해 결정수와 일부 산소를 제거하고, 2 단계는 고온 환원을 통해 금속 텅스텐 분말을 생성합니다. 화학적으로 환원 반응은  $WO_3$  가  $H_2$  와 반응하여 W 와  $H_2O$  를 생성하는 것입니다. 텅스텐 분말의 재산화 방지를 위해 이슬점 제어를 통해 수증기를 신속하게 제거합니다. 보트 속도, 수소 유량, 온도 구배와 같은 공정 변수는 분말 입자 크기를 조절하며, 낮은 온도와 느린 속도는 더 미세한 분말 형성에 유리합니다.

품질 요구사항은 순도, 입자 크기 및 형태에 중점을 둡니다. 순도는 소결 결함을 방지하기 위해 낮은 산소 함량과 미량의 알칼리 금속 및 인/황 함량을 요구합니다. 입자 크기는 일반적으로 피서법(Fisher method)을 사용하여 측정하며, 미세 분말은 치밀화를 촉진하는 반면, 조대 분말은 강도를 제공합니다. 형태는 혼합 및 유동성을 용이하게 하기 위해 깨끗하고 응집된 표면을 가진 거의 구형 또는 다면체 모양이어야 합니다. 시험에는 불순물에 대한 화학 분석, 주사 전자 현미경을 이용한 형태 관찰 및 레이저 입자 크기 분포 분석이 포함됩니다. 제조 과정에서 원료인 텅스텐산암모늄은 나트륨과 칼슘을 제거하기 위해 여러 차례 재결정 과정을 거치고 고순도 수소로 건조됩니다. 플라즈마 환원 또는 아연 용융과 같은 변형 공정을 사용하여 텅스텐을 회수함으로써 순도를 더욱 향상시킬 수 있습니다.

이 제제의 품질 요구 사항은 합금 시트의 용도와 관련이 있습니다. 의료용 차폐 시트는 방사선 산란을 방지하기 위해 불순물 함량이 극히 낮아야 하는 반면, 산업용 내마모 시트는 경도 향상을 위해 입자가 약간 더 굵어도 무방합니다. 보관 시에는 습기와 산화를 방지하기 위해 진공 또는 불활성 가스 포장에 필요합니다. 화학적 안정성은 핵심 요구

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



사항입니다. 분말은 공기 중에서 쉽게 부동태화되어 얇은 산화막을 형성하고 습윤성에 영향을 미치므로 사전 환원 활성화가 필요합니다.

### 6.2.2 합금 원소 분말(Ni, Fe, Cu, Co, Mo 등)의 선택 및 전처리

분말은 텅스텐 합금 시트 제조에 필수적입니다. 원소 선택은 상평형도상의 습윤성 및 기능적 적합성을 기반으로 하며, 전처리를 통해 분말의 활성화와 순도를 확보하여 불균일한 소결을 방지합니다. 니켈 분말은 일반적으로 카르보닐 분해법으로 제조되어 미세한 입자 크기, 높은 활성화 및 우수한 연성을 갖습니다. 철 분말은 전해 또는 환원법으로 제조되어 혼합을 용이하게 하는 적당한 자기적 특성을 제공합니다. 구리 분말은 분무 또는 전해법으로 제조되어 비자성 시스템에서 우수한 열전도율을 제공합니다. 코발트 분말은 결합제 상을 강화하고, 몰리브덴 분말은 텅스텐을 부분적으로 대체하여 팽창을 조절합니다. 선택 기준에는 높은 순도, 낮은 산소 함량, 그리고 텅스텐 분말과의 입자 크기 적합성이 포함되며, 일반적으로 분리를 방지하기 위해 유사한 피서 입자 크기를 가져야 합니다.

전처리에는 표면 산화층을 제거하기 위한 수소 환원 공정이 포함됩니다. 화학적으로 H<sub>2</sub>는 산화물과 반응하여 물을 생성하고, 이 물을 배출함으로써 접촉각을 증가시킵니다. 진공 탈기 공정을 통해 기체 불순물을 더욱 줄이고, 체질 공정을 통해 응집체와 이물질을 제거합니다. 볼 밀링 또는 기계적 활성화 공정을 통해 니켈-철과 같은 특정 원소를 미리 혼합하여 고용체 분말을 형성함으로써 균일성을 향상시킵니다. 분말 소결을 방지하기 위해 처리 온도는 부드럽게 제어됩니다. 산세척과 같은 화학 세척을 통해 기름때를 제거하지만, 텅스텐 합금 분말은 부식 방지를 위해 건식 세척법을 사용하는 경우가 많습니다.

또한, 선택 및 전처리 방식의 차이는 시스템 요구 사항을 반영합니다. 니켈-철 시스템의 철 분말은 녹 방지가 필요하고, 니켈-구리 시스템의 구리 분말은 강력한 산화 저항성이 요구됩니다. 고순도 몰리브덴 분말은 텅스텐의 밀도와 일치하도록 분무 공정에 사용됩니다. 품질 검사에는 산소, 탄소의 화학 분석 및 입자 크기 분포 분석이 포함됩니다.

### 6.2.3 분말 입자 크기 분포 제어 및 피서 입자 크기 검출

텅스텐 합금 시트 원료 제조의 핵심 품질 관리 방법은 다음 과 같습니다. 환원 매개변수 및 체질을 조정하여 분포를 최적화하고, 피서법을 사용하여 평균 입자 크기를 평가함으로써 프레스 및 소결 성능을 보장합니다. 입자 크기 분포 제어는 텅스텐 분말의 환원 조건에 따라 달라지는데, 고온 및 고속 교반은 조분말을 생성하고, 저온 및 저속 교반은 미분말을 생성합니다. 화학적으로 환원 속도는 결정핵 성장에 영향을 미치며, 수소 유량 및 수증기 농도를 조절하여 비정상적인 조분말 생성을 억제할 수 있습니다. 합금 분말의 분무 또는 분쇄는 분포를 좁히는 데 도움이 되며, 극미세 분말로 인한 응집이나 조분말로 인한 기공 발생을 방지합니다. 레이저 입자 크기 분석기 또는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

체질법을 사용하여 분포 곡선을 모니터링하는데, 이상적으로는 로그 정규 분포를 따라야 하며, 넓은 분포는 분포 좁히기 및 치밀화를 용이하게 합니다.

피서 입자 크기 분포 측정법은 공기 투과 원리를 기반으로 합니다. 분말층 저항은 평균 입자 크기를 반영하며, 기체의 화학적 표면 흡착이 투과에 영향을 미치지만 표준 조건에서는 재현성이 우수합니다. 시험 시료는 건조 후 균일하게 다져지고, 압력 차이를 이용하여 하위 체 직경을 계산합니다. 이 방법은 간단하고 신속하여 생산 관리에 적합하며, 미세 분말부터 조립 분말까지 다양한 두께 요구 사항에 맞는 일반적인 텅스텐 분말 범위를 포괄합니다. 관리는 혼합 조정과 함께 이루어지며, 미세 텅스텐 분말과 조립 합금 분말을 혼합하여 유동성을 최적화합니다.

이러한 제어 및 검출은 최종 제품의 균일성과 관련이 있습니다. 분포가 좁으면 결함 없는 얇은 판재를 얻는 데 유리하고, 분포가 넓으면 강도가 높은 두꺼운 판재를 얻을 수 있습니다. 화학적 순도는 검출에 영향을 미치는데, 산소 함량이 높거나 분말이 응집되면 측정값이 커집니다. 시료가 수분을 흡수하는 것을 방지하기 위해 환경 습도 제어가 매우 중요합니다.

#### 6.2.4 분말 혼합 및 합금 방법

분말 혼합 및 합금화는 텅스텐 합금 시트 제조에서 균질화 단계입니다. 소결 편석을 방지하기 위해 기계적 혼합, 볼 밀링 또는 분무 건조를 통해 균일한 원소 분포를 얻습니다. 기계적 혼합에는 일반적으로 분리를 방지하기 위해 저속 회전하는 V 형 또는 이중 원뿔형 믹서가 사용됩니다. 화학적으로는 분말 표면의 정전기력 또는 반 데르 발스력이 균일성에 영향을 미치며, 알코올과 같은 첨가제는 분산을 돕습니다. 무작위 혼합을 보장하기 위해 혼합 시간은 수 시간까지 연장될 수 있습니다. 볼 밀링 합금화는 고에너지 볼 밀링을 이용하는데, 이때 충격이 기계화학적 반응을 유도하여 일부 원소를 사전 합금화하고, 입자 크기를 미세화하며, 활성을 향상시킵니다. 그러나 산화를 방지하기 위해 불활성 가스 보호가 필요합니다.

분무 건조는 분말 현탁액을 미립화하고 건조하여 구형 입자를 만들고, 화학적 결합제로 일시적으로 결합시켜 유동성과 압축성을 향상시키는 방법입니다. 이 방법의 장점은 복합 분말의 균일성으로, 대규모 생산에 적합하다는 점입니다. 혼합 후, 시료를 채취하여 화학 분석 또는 전자 현미경 검사를 통해 분포를 확인합니다. 균일성은 낮은 원소 편차로 정의됩니다. 이러한 방법들의 차이는 생산 규모를 반영합니다. 기계적 혼합은 간단하고 저렴하며, 볼 밀링은 미세 구조 정제에 적합하고, 분무 건조는 고품질의 균일성을 달성합니다. 화학적 원리는 확산과 흡착을 포함하며, 혼합은 표면 접촉을 촉진합니다. 분리를 방지하기 위해서는 보관이 중요하며, 진동은 피해야 합니다.

#### 6.3 분말 성형 공정

분말 성형은 텅스텐 합금 시트 생산에서 원료 분말과 소결 블랭크를 연결하는 중요한 단계입니다. 이 공정은 압력을 가하거나 보조 매체를 사용하여 느슨한 분말을 특정 형상,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

강도 및 밀도를 가진 성형체로 변환합니다. 이 과정은 후속 소결 시 수축 균일성과 완제품 미세구조의 일관성에 직접적인 영향을 미칩니다. 성형 방법에는 냉간 등방압 성형, 압축 성형 및 사출 성형이 있으며, 분말 특성, 블랭크 크기 및 목표 두께에 따라 선택됩니다. 텅스텐 합금 분말은 유동성과 압축성이 낮기 때문에 성형 시 텅스텐의 높은 밀도와 바인더 상의 습윤 효과를 고려해야 합니다. 이 공정의 원리는 입자 재배열, 소성 변형 및 마찰 효과를 포함하며, 압력 분포의 균일성이 성형체의 밀도 구배를 결정합니다. 취급 및 탈바인더 과정에서 균열이나 변형을 방지하려면 충분한 성형체 강도가 필요합니다. 파라핀이나 폴리머와 같은 화학 첨가제는 결합을 일시적으로 강화한 후 제거됩니다.

최근 몇 년 동안 성형 공정 최적화는 친환경화와 자동화에 중점을 두고 있습니다. 냉간 등방압 성형(CIP)은 대형 블랭크에 적합하고, 압축 성형은 소형 및 중형 부품에 적합하며, 사출 성형은 복잡한 형상의 박형 블랭크까지 적용 범위가 확대되었습니다. 분말 산화를 방지하기 위한 건조 분위기 조성 및 스프링백을 방지하기 위한 느린 압력 해제와 같은 환경 제어는 매우 중요합니다. 성형 후 미성형 블랭크의 밀도는 일반적으로 이론값의 일정 비율에 해당하며, 최적화를 통해 소결 수축률의 차이를 줄일 수 있습니다. 결합 제어는 박리 및 밀도 불균일성에 중점을 두고 있으며, 이는 공정 변수 조정을 통해 완화할 수 있습니다.

### 6.3.1 냉간 등압 프레스

냉간 등방압 성형(COP)은 텅스텐 합금 판재를 제조하는 방법입니다. 이 방법은 액체 매체를 이용하여 균일한 압력을 전달하고, 분말을 유연한 금형에 압축하여 고밀도 성형체를 만듭니다. 이 방법은 대형 또는 복잡한 형상의 성형체에 적합하며, 등방성 압력을 보장합니다. 공정은 고무 또는 플라스틱 금형에 혼합 분말을 채우고 밀봉한 후 고압 용기에 넣는 것으로 시작됩니다. 압력 전달 매체로는 물 또는 오일을 사용하며, 압력을 원하는 수준까지 점진적으로 증가시킵니다. 일정 시간 동안 이 압력을 유지한 후, 성형체의 압력을 낮추고 용기에서 꺼냅니다. 화학적으로, 균일한 압력은 입자의 치밀한 재배열을 촉진하여 마찰로 인한 밀도 구배를 감소시킵니다. 텅스텐 분말의 높은 경도는 등방압 성형 과정에서 발생하는 틈을 효과적으로 메우고, 결합제 역할을 하는 분말은 균일한 변형을 돕습니다.

이 성형 공정의 장점은 성형체의 밀도 분포가 균일하여 후속 시트 롤링에 적합하고, 기존 성형에서 흔히 발생하는 가장자리 부분의 저밀도 영역을 방지할 수 있다는 점입니다. 유연한 금형 설계로 원통형, 판형 또는 불규칙한 형상의 성형체를 생산할 수 있으며, 소량의 윤활제를 첨가하면 충전 흐름이 개선됩니다. 느린 압력 해제 제어는 탄성 반동으로 인한 미세 균열 발생을 방지합니다. 분말 입자 크기를 균일하게 함으로써 성형체의 강도를 향상시킬 수 있습니다. 미세한 분말일수록 충전성이 우수하지만 응집을 방지해야 합니다. 공정 변수 최적화에는 가압 속도와 유지 시간이 포함되며, 유지 시간이 길어질수록 입자 고착이 촉진됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이 성형 공정은 고밀도 텅스텐 합금 시트 생산에 널리 사용됩니다. 대형 빌릿은 냉간 등방압 성형 후 열간 압연을 통해 높은 효율을 얻습니다. 화학적 순도 관리가 매우 중요하며, 오염을 방지하기 위해 깨끗한 환경이 필수적입니다. 성형된 빌릿의 표면은 탈형 후 매끄러워 후속 가공 여유를 줄여줍니다. 건식 백 방식과 같은 변형 방식은 작업을 간소화하는 반면, 습식 백 방식은 더 큰 유연성을 제공합니다. 환경적인 측면에서 금형 재료를 재활용하면 비용을 절감할 수 있습니다.

### 6.3.2 압축 성형 및 압력 매개변수 최적화

압축 성형 및 압력 매개변수 최적화는 소형 텅스텐 합금 시트 블랭크를 생산하는 전통적인 방법입니다. 이 방법은 강철 금형을 통해 단방향 또는 양방향 압력을 가하여 분말을 압축하여 형상을 만듭니다. 장비가 간단하여 대량 생산에 적합합니다. 최적화는 압력 분포 및 원활한 탈형에 중점을 둡니다. 이 공정은 단단한 금형에 분말을 채우고 유압 프레스로 압력을 가하여 금형 벽과의 마찰로 인해 입자가 재배열 및 변형되어 그린 블랭크가 형성되는 과정을 포함합니다. 화학적으로 텅스텐 분말은 압축성이 제한적이므로 파라핀 왁스와 같은 임시 결합제를 첨가하여 입자 간 결합을 강화하고 그린 블랭크의 강도를 향상시킵니다. 단방향 압축은 마찰을 줄이기 위해 금형 벽에 윤활유를 도포해야 하며, 양방향 압축은 밀도 균일성을 향상시킵니다.

압력 매개변수 최적화는 하중 크기, 가압 속도 및 유지 시간을 포함합니다. 고압은 밀도를 증가시키지만 박리 현상이 발생하기 쉽고, 저압은 다공성을 증가시킵니다. 최적화는 응력 집중을 방지하기 위해 점진적인 가압을 통해 실험적으로 결정됩니다. 아연 스테아레이트 화학 코팅과 같은 이형제는 마찰을 줄이고 점착을 방지합니다. 성형 전 밀도 기를기는 플로팅 다이 또는 멀티펀치 설계를 통해 완화할 수 있습니다.

표준 두께의 텅스텐 합금 시트 블랭크를 사용한 후, 더 작은 블랭크를 단조 또는 압연합니다. 최적화된 화학 첨가제 비율은 강도와 철저한 탈지 사이의 균형을 유지합니다. 단계적 압력 해제 제어는 스프링백 균열을 줄입니다. 열간 다이 프레스링과 같은 변형 공정은 유동성을 향상시키지만, 텅스텐 합금은 일반적으로 상온에서 가공됩니다. 환경 제어를 통해 분말이 건조한 상태를 유지하여 수분 흡수를 방지합니다.

### 6.3.3 박판 프리폼에 대한 사출 성형의 적용

사출 성형은 얇은 판형 예비 성형품 생산에 사용됩니다. 텅스텐 합금 분말을 유기 결합제와 혼합하여 원료를 만든 다음, 고압으로 금형에 주입하여 복잡하거나 얇은 벽의 성형체를 만듭니다. 이 방법은 분말 야금의 형상 자유도를 확장하며 정밀한 얇은 판형 예비 성형에 적합합니다. 공정은 원료 준비로 시작됩니다. 분말을 고온에서 왁스계 또는 고분자 결합제와 혼합하면 결합제가 입자를 화학적으로 캡슐화하여 유동성을 향상시킵니다. 과립화 후, 원료를 가열된 금형에 주입하면 압력에 의해 금형 내부가 채워집니다. 냉각 및 응고 과정을 거쳐 성형체를 탈형합니다. 화학적 탈지는 결합제를 제거하고, 용매 또는 열 탈지는 유기물을 분해하여 다공성 예비 성형체를 남깁니다. 이 성형체를 소결하여 밀도를 높입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



이 응용 분야의 장점은 거의 최종 형상에 가까운 성형, 박판 블랭크의 균일한 두께, 그리고 가공을 줄이는 매끄러운 표면에 있습니다. 높은 텅스텐 함량의 공급 원료는 분리 현상을 방지하기 위해 최적화된 점도를 필요로 합니다. 온도 및 압력과 같은 사출 매개변수는 분말의 특성과 일치해야 하며, 벽 두께 제어를 위해서는 정밀한 금형 설계가 필수적입니다.

이 기술은 초박형 텅스텐 합금 시트 프리폼에 적용되어 천공 시트와 같은 복잡한 형상 제작에 큰 잠재력을 지니고 있습니다. 화학 결합체는 탄화물 취성을 방지하기 위해 잔류 탄소 함량이 낮은 것을 선택했습니다. 느린 탈결합 공정은 기포 발생 및 균열을 방지합니다. 후속 소결 수축률 또한 제어 가능합니다. 또한, 결합체는 환경적으로 재활용 가능하여 오염을 줄입니다.

#### 6.3.4 그린바디 강도 강화 및 탈지 공정

성형체 강도 향상과 탈바인더 공정은 매우 중요합니다. 성형체 강도는 첨가제 또는 예비 소결을 통해 향상되며, 탈바인더 공정은 임시 바인더를 제거하여 후속 소결 공정의 결합을 방지합니다. 강도 향상 방법에는 바인더 비율 증가, 저온 예비 소결, 바인더 입자의 화학적 가교, 예비 소결 중 미세 확산을 통한 넥 결합 형성 등이 있습니다. 성형체의 강도는 압력에 따라 달라지지만, 사출 성형 원료는 고유 강도가 높습니다.

탈지 공정은 용매 탈지와 열 탈지로 나뉩니다. 용매 탈지는 재료를 유기 용매에 담가 왁스 기반 물질을 용해시키는 방식이고, 열 탈지는 가열을 통해 고분자를 분해하는 방식입니다. 가열 속도를 화학적으로 제어하면 급격한 증발과 기포 발생을 방지할 수 있습니다. 용매 탈지 후 열 탈지를 결합한 공정은 효율이 매우 높고 잔류물이 적게 남습니다. 최적화된 공정 변수는 균열 발생을 방지하고, 보조 재료는 빌릿 제조를 돕습니다. 이 공정은 사출 성형 빌릿에 특히 중요하며, 철저한 탈지는 소결 순도에 영향을 미칩니다. 강도 향상과 탈지 사이에는 균형을 맞춰야 하는데, 결합력이 지나치게 강하면 탈지가 어려워집니다. 잔류 탄소 분석을 통해 탈지 효과를 모니터링할 수 있습니다. 용매는 환경 폐가스 처리 과정을 통해 회수됩니다.

#### 6.4 소결 공정

소결은 텅스텐 합금 시트 제조의 핵심 단계입니다. 고온 처리를 통해 성형된 그린 빌릿은 고밀도의 벌크 소재로 변환되며, 기공이 제거되고 안정적인 2상 미세구조가 형성됩니다. 이 공정은 재료의 밀도, 상 분포 및 계면 결합 강도를 직접적으로 결정합니다. 소결 방법에는 수소 분위기에서의 수직 소결, 진공 소결, 그리고 소결-고온 등방압 성형(HIP) 통합 공정이 있습니다. 수소 소결은 기존의 액상 시스템에 적합하고, 진공 소결은 불순물 제어에 중점을 두며, 통합 공정은 복잡한 빌릿의 품질을 향상시킵니다. 이러한 공정의 원리는 고상 확산, 액상 재배열 및 용해-재침전 메커니즘을 포함합니다. 텅스텐 입자는 결합체의 습윤 작용 하에서 구형화되어 계면 화학 결합을 강화합니다. 온도, 분위기 및 유지 조건은 과소결(조대화) 또는 불완전소결(다공성)을 방지하기 위해 합금 시스템에 정확하게 맞춰야 합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

최근 소결 공정 최적화는 균일성과 에너지 효율을 향상시키기 위해 연속로와 지능형 제어 시스템을 도입하는 방향으로 발전해 왔습니다. 화학적 분위기는 중요한 역할을 하는데, 수소는 산화물을 환원시키고 진공은 휘발성 불순물을 제거합니다. 빌릿 적재 방식은 온도 분포에 영향을 미치며, 수직 현수 또는 보트 적재 방식은 변형을 줄여줍니다. 냉각 속도는 석출상을 조절하며, 느린 냉각은 균일성을 향상시킵니다. 결합 방지는 기포 발생 및 균열 방지에 중점을 두고 있으며, 사전 탈기 및 단계적 가열을 통해 이를 완화할 수 있습니다.

#### 6.4.1 수소 분위기에서의 수직 소결 기술

수소 분위기에서의 수직 소결은 텅스텐 합금 판재를 치밀화하는 고전적인 방법입니다. 폴리브덴 보트에 담거나 매달아 놓은 상태로 수소 보호로에서 가열하면 액상 소결이 일어나고 불순물이 감소합니다. 이 기술은 니켈-철 및 니켈-구리 시스템의 대량 생산에 적합합니다. 이 공정은 성형된 판재를 수직으로 세우거나 보트에 넣은 상태에서 수소를 지속적으로 흘려보내는 방식으로 진행됩니다. 온도를 액상선 온도 이상으로 올리고 유지함으로써 환원 반응을 통해 표면 산화물을 제거하고, 가스 흐름과 함께 수증기를 배출합니다. 화학적으로 수소는 산소와 반응하여 물을 생성하므로 판재를 깨끗하게 유지하고, 결합제 상에 의한 텅스텐 입자의 습윤을 촉진하며, 재배열 및 치밀화를 용이하게 합니다. 수직 배치는 판재와 보트 사이의 접촉을 줄여 접착 및 국부적인 오염을 방지합니다.

기술적 이점은 환원 분위기의 이중 효과에 있는데, 이는 불순물을 줄이는 동시에 텅스텐의 산화 및 휘발을 방지합니다. 용광로는 주로 연속식 푸시보트형 용광로 또는 벨자형 용광로를 사용하며, 전자는 높은 자동화 수준을 제공하고 후자는 보다 균일한 온도를 유지합니다. 가열 곡선은 여러 단계로 나뉘는데, 저온 탈기 단계에서는 잔류 바인더가 제거되고, 중온 단계에서는 고체상 확산이 일어나며, 고온 단계에서는 액체상 유지가 진행됩니다. 유지 기간 동안 텅스텐 입자는 구상화되고, 용해-재침전 메커니즘을 통해 계면이 미세화됩니다. 냉각은 열응력 균열을 방지하기 위해 수소 분위기에서 제어됩니다.

이 기술은 고밀도 텅스텐 합금 시트의 소결에 이미 성숙하게 적용되고 있습니다. 수소 이슬점의 엄격한 관리를 통해 낮은 이슬점에서는 충분한 환원이 이루어지고 높은 이슬점에서는 과환원이 방지됩니다. 최적화된 빌릿 간격은 균일한 공기 흐름을 보장하고 온도 구배를 줄입니다. 다단계 수소 여과를 통해 화학적 순도를 향상시킵니다. 습식 수소와 같은 변형 공정은 수분을 제어하고 산소 제거를 촉진합니다. 환경 친화적인 폐가스 처리 공정은 수분을 중화합니다.

#### 6.4.2 액상 소결 온도 범위 및 유지 시간 제어

텅스텐 합금 시트의 소결 공정에서 액상 소결 온도 범위와 유지 시간 제어는 핵심적인 매개변수로, 액상량, 입자 재배열 및 미세구조 변화에 직접적인 영향을 미칩니다. 이러한 제어를 통해 적절한 치밀화를 확보하는 동시에 비정상적인 성장을 방지할 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

온도 범위는 결합재의 용점 이상에 위치합니다. 액상이 나타나면 적절한 양의 액상이 흐르면서 텅스텐 입자를 적시고, 화학적 수준에서 감소된 표면 에너지를 재배열을 유도하여 작은 입자를 용해시키고 큰 입자의 표면에 석출시킵니다. 온도 범위가 좁으면 액상이 부족하여 밀도가 낮아지고, 액상이 과도하면 성형체 붕괴 또는 편석이 발생할 수 있습니다. 니켈-철계에서는 온도 범위가 넓고 니켈-구리계에서는 좁으므로 상평형도를 기반으로 조정해야 합니다.

유지 시간은 액상에서의 반응 정도를 조절합니다. 유지 시간이 짧으면 재배열 반응이 주로 일어나고, 유지 시간이 길면 용해-재침전 및 구상화 반응이 주로 일어납니다. 최적의 유지 시간은 초기 단계에서는 빠른 치밀화가, 후기 단계에서는 느린 미세화가 일어나는 것을 실험적으로 확인했습니다. 가열 속도는 윈도우 진입점에 영향을 미치며, 느린 가열 속도는 국부적인 과열을 방지합니다. 분위기 제어도 함께 사용됩니다. 수소 기류는 휘발성 물질을 제거하여 윈도우의 안정성을 유지합니다.

이 제어 방식은 빌릿 두께에 따라 달라집니다. 두꺼운 빌릿은 변형을 방지하기 위해 보다 보수적인 열처리 범위를 가지는 반면, 얇은 빌릿은 균일성을 높이기 위해 열 보존 시간을 연장할 수 있습니다. 코발트와 같은 화학 첨가제는 열처리 범위를 넓히고 유동성을 향상시킵니다. 열전대를 이용한 다지점 온도 측정으로 용광로 내부의 일정한 온도를 유지하며 모니터링합니다. 냉각은 천천히 진행되며 열처리 범위를 통해 배출되어 미세구조를 고정합니다. 열 보존 방식을 세분화하여 고온에서 저온으로 단계적으로 온도를 낮추는 방식을 통해 열 보존을 최적화할 수 있습니다. 환경 에너지 관리를 통해 열 보존 시간을 단축합니다.

#### 6.4.3 진공 소결 및 소결-고온 등방압 성형 통합 공정

진공 소결과 고온 등방압 소결(HIP)은 고품질 텅스텐 합금 판재를 생산하는 첨단 기술입니다. 진공 소결은 고진공을 이용하여 기체 불순물을 제거하고, 고온 등방압 소결은 소결과 압력 치밀화를 결합하여 복잡하거나 높은 품질 기준을 요구하는 판재의 품질을 향상시킵니다. 이 공정은 텅스텐-구리 유사 합금 또는 고순도 시스템에 적합합니다. 진공 소결은 진공로에서 가열하는 방식으로 진행되며, 이때 음압을 이용하여 기공 내 기체와 휘발성 불순물을 제거하고, 화학적으로 수소 잔류물을 방지하며, 계면 청결도를 유지하고, 고상 또는 저액상 확산을 촉진합니다. 액상 흐름이 부족한 것을 보완하기 위해 기존 소결 방식보다 높은 온도에서 소결합니다.

통합 소결-고온 등방압 성형(HIP) 공정은 단일 장비에서 완료됩니다. 먼저 진공 소결 예비 치밀화를 수행한 후, 아르곤 충전 가압 고온 등방압 성형을 실시하여 모든 방향에서 균일한 압력을 가함으로써 단힌 기공을 제거합니다. 화학적으로 고온 고압은 확산을 촉진하여 텅스텐 입자 간의 긴밀한 접촉과 향상된 계면 결합을 유도합니다. 이 공정의 장점은 단일 용광로 적재로 오염을 줄일 수 있다는 점이며, 피복된 빌릿과 피복되지 않은 빌릿 모두에 적용 가능합니다. 이 공정은 초박형 판재 빌릿의 전처리에 큰 잠재력을 가지고 있으며, 통합을 통해 중간 결합을 감소시킵니다. 진공 관리가 매우 중요하며, 저진공은 휘발 손실을 방지합니다. 온도 및 압력 곡선은 연동되어 소결이 가압에 앞서

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

진행됩니다. 높은 화학적 순도로 인해 회토류가 도핑된 합금에도 적합합니다. 진공 하에서의 서냉은 응력 발생을 방지합니다. 급속 고온 성형과 같은 변형 공정도 가능합니다. 환경 친화적인 진공 펌프 오일 회수 시스템이 적용되었습니다.

#### 6.4.4 소결 변형 제어 및 지원 툴링 설계

텅스텐 합금 판재 빌릿 소결 공정에서 소결 변형 제어 및 지지 지그 설계는 매우 중요합니다. 적절한 지지 및 공정 매개변수 조정을 통해 고온 연화로 인한 중력 변형 및 뒤틀림을 줄여 빌릿의 치수 정확도와 균일한 미세 구조를 확보할 수 있습니다. 소결 중 액상 생성은 빌릿 강도를 저하시키고, 중력에 의해 쉽게 가라앉거나 휘어지게 합니다. 화학적으로는 바인더 상의 유동이 변형을 더욱 악화시킵니다. 따라서 지지 방식과 용광로 적재 자세부터 제어해야 합니다. 고순도 알루미늄 또는 폴리브덴 판은 고온에 강하고 변형이 적어 지지 지그 설계에 일반적으로 사용됩니다. 표면 코팅은 접착을 방지하고, 질화붕소와 같은 화학 코팅은 마찰과 반응을 감소시킵니다.

다양한 툴링 옵션을 사용할 수 있습니다. 평판 빌릿은 다점 지지 또는 모래층 충전 방식을 사용하며, 모래 입자가 응력을 분산시킵니다. 화학적으로 고순도 석영 모래는 우수한 불활성을 나타냅니다. 수직 현수 방식은 긴 빌릿에 적합하며, 클램프로 양쪽 끝을 고정하여 굽힘을 줄입니다. 설계 시 열팽창 계수를 고려하여 열응력 균열을 방지합니다. 변형 제어에는 느린 가열 속도, 저온에서의 철저한 탈기, 액상 단계에서의 짧은 유지 시간 등이 포함되어 유동 시간을 단축합니다. 중력 균형을 맞추기 위한 기울임과 같은 빌릿 자세 최적화도 적용됩니다.

상호 보완적인 화학적 분위기는 균일한 수소 흐름을 보장하고 국부적인 연화를 감소시킵니다. 냉각 단계에서는 지지대가 저온을 유지하여 열 응력 방출로 인한 변형을 방지합니다. 재사용 가능한 금형은 잔류물 제거를 위해 세척이 필요합니다. 유연한 세라믹 섬유 지지대와 같은 변형 제품은 다양한 형상에 적용할 수 있습니다. 환경 친화적인 재료 재활용을 통해 비용을 절감할 수 있습니다.

#### 6.4.5 대형 슬래브 소결 시 온도 균일성 확보

대형 슬래브 소결 시 균일한 온도 분포는 일관된 미세 구조와 밀도를 얻는 데 매우 중요합니다. 이는 용광로 설계, 적재 방식 및 가열 제어를 통해 온도 구배를 최소화하고 국부적인 과열 또는 과소열을 방지함으로써 달성됩니다. 대형 슬래브는 열용량이 높아 용광로 내부의 온도 분포가 불균일해지기 쉽습니다. 화학적으로 온도 차이는 액상 출현 시점에 영향을 미쳐 불규칙한 재배열을 초래합니다. 이러한 문제를 해결하기 위해 용광로 구조를 최적화하여 여러 가열 영역에 독립적인 온도 제어를 적용하고 다중 지점 열전대 피드백을 통해 출력을 조절합니다. 또한, 복사열 차폐판을 사용하여 열 흐름을 고르게 분산시켜 가장자리 부분의 열 손실을 줄입니다.

이 용광로의 적재 방식은 빌릿의 간격과 위치를 중요시하며, 균일한 열 전달을 위해 중앙에 보조 가열 소자를 배치하고 바닥에는 열전도율이 높은 재료를 사용합니다. 화학적

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



분위기가 순환하며, 수소는 여러 경로를 통해 교반로 내부로 유입되고 배출됩니다. 가열 곡선은 단계적으로 분할되며, 유지 시간 동안 전력 균형 조정이 이루어집니다. 모니터링 시스템은 온도 분포를 실시간으로 기록하고, 큰 편차가 발생하면 조정을 일시 중지합니다.

이러한 종류의 품질 보증은 두꺼운 슬래브 소결에서 특히 어려운 과제입니다. 다층 구조의 용광로 장입 시 균일한 가열을 위해 회전 또는 뒤집기가 필요하기 때문입니다. 고온도 용광로 내벽은 열 복사에 영향을 미치는 오염을 줄여줍니다. 균일한 냉각은 열 응력 구매 발생을 방지합니다. 변형 방식으로는 국부 보상 기능을 갖춘 유도 가열 방식이 있습니다. 환경 친화적인 에너지 관리 시스템은 다중 구역 제어를 통해 에너지를 절약합니다.

## 6.5 열가공 및 열처리

열간 가공 및 열처리는 소결 빌릿에서 완제품 시트에 이르기까지 텅스텐 합금 시트의 변형 및 미세구조 제어 단계입니다. 고온 단조, 열간 압연, 온간 압연 및 어닐링을 통해 두께 감소 및 성능 최적화가 이루어집니다. 이 공정은 소결 빌릿의 취성을 해결하고 섬유질 구조를 도입하여 강도와 인성을 향상시킵니다. 열간 가공의 원리는 동적 회복 및 재결정을 포함합니다. 화학적으로 고온은 슬립 시스템을 활성화하고, 결합상은 텅스텐 입자의 변형을 조절합니다. 단조는 주조 구조를 파괴하고, 열간 압연은 큰 변형을 통해 두께를 감소시키며, 중간 단계인 어닐링은 응력을 해소하고 소성을 회복시킵니다. 열처리에는 진공 어닐링 및 시효 처리가 포함되며, 이를 통해 결정립 크기와 석출물을 조절할 수 있습니다.

공정 최적화는 온도 범위와 변형량을 일치시키는 데 중점을 둡니다. 고온 가공은 용이하지만 산화 방지가 필요하며, 저온 경화는 빠르지만 균열 발생 위험이 있습니다. 분위기 제어는 탈탄이나 산화를 방지하기 위해 수소 또는 진공을 사용합니다. 압연 공정 설계는 점진적인 감압을 포함하며, 윤활은 표면 손상을 줄입니다. 열처리 중 균일한 노온도 유지는 냉각 속도가 미세 구조에 영향을 미치기 때문에 매우 중요합니다. 결합 방지는 모서리 균열 및 박리에 중점을 두고, 클래딩 또는 측면 압력을 통해 완화합니다. 요약하자면, 열간 가공 및 열처리는 고온 소성을 활용한 공학적 기술로서, 텅스텐 합금 시트를 벌크에서 박막으로 변형시키는 경로를 제공합니다.

### 6.5.1 단조 및 열간압연 공정

단조와 열간 압연은 텅스텐 합금 시트의 열간 가공 초기 단계입니다. 고온에서 큰 변형을 가하면 소결된 빌릿이 사각형 모양으로 되거나 얇게 만들어지고, 조대한 구조가 파괴되고 변형 조직이 형성되어 후속 냉간 압연을 위한 기반이 마련됩니다. 단조에는 일반적으로 자유 단조 또는 금형 단조가 사용됩니다. 빌릿을 고온으로 가열한 후 수소 보호 하에서 해머링 또는 프레스 가공을 합니다. 화학적으로 고온은 변형 저항을 감소시키고, 결합상이 녹아 텅스텐 입자를 감싸 파손을 방지합니다. 교대 방향으로 다방향 단조를 하면 균일한 변형이 촉진되고 미세 구조의 초기 섬유질 형성이 이루어집니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

단조 후 열간 압연을 통해 여러 번의 압연 패스를 거쳐 빌릿을 더욱 얇게 만듭니다. 각 패스마다 상당한 압연 감소가 발생하며, 롤은 가열되거나 빌릿은 일정한 온도로 유지됩니다. 화학적으로 열간 압연은 활발한 동적 회복을 유발하여 전위 재배열을 통해 경화 축적을 감소시킵니다. 보호 분위기 또는 코팅은 산화를 방지하고 윤활유는 마찰을 줄입니다. 패스 사이의 재가열은 소성을 회복시켜 줍니다. 매개변수 최적화는 점진적인 온도 하강을 통해 이루어집니다. 고온 초기 압연은 변형이 발생하기 쉽지만, 저온 마무리는 매끄러운 표면을 보장합니다.

이 공정은 특히 두꺼운 텅스텐 합금 시트 생산에서 두드러지게 나타납니다. 단조 과정에서 발생하는 높은 총 변형률은 소결 기공을 분해하고, 열간 압연은 판형을 구현합니다. 화학적 온도 관리가 매우 중요하며, 낮은 대기 이슬점은 수소 취성을 방지합니다. 모서리 균열 제어는 둥근 모서리 롤이나 측면 가이드를 통해 이루어집니다. 표면 보호를 위해 클래딩 열간 압연을 적용하는 변형 공정도 있습니다. 환경적으로 중요한 폐열 회수는 에너지 절감에 기여합니다.

### 6.5.2 다방향 단조는 미세구조 균일성을 향상시킵니다.

다방향 단조는 텅스텐 합금 판재의 열간 가공에서 미세구조 균일성을 향상시키는 효과적인 방법입니다. 변형 방향을 반복적으로 변경함으로써 빌릿 내부의 응력과 미세구조가 균형 있게 분포되어 소결 후 발생하는 편석 및 기공을 줄일 수 있습니다. 이 단조 방법은 빌릿 준비 단계에서 널리 사용됩니다. 빌릿을 고온으로 가열한 후 여러 축을 따라 교대로 단조합니다. 고온은 화학적으로 텅스텐 입자의 협동 변형을 활성화시키고, 결합상이 유동하여 간극을 채우면서 입자 재배열을 촉진하고 조대 응집체를 분해합니다. 단방향 단조는 방향성 조직과 밀도 구배를 형성하는 경향이 있는 반면, 다방향 단조는 교차 응력장을 통해 편석을 분산시켜 미세구조를 더욱 등방성으로 만듭니다.

단조 공정은 일반적으로 여러 단계로 구성되며, 각 단계마다 방향이 바뀝니다(예: XYZ 축 순서). 전체 변형량은 점진적으로 누적되며, 반복적인 화학적 변형은 동적 회복을 유도하고, 전위 재배열을 통해 국부적인 경화를 감소시킵니다. 방향 전환 사이에 용광로에서 재가열하면 소성이 회복되고 냉간 가공 균열이 방지됩니다. 이 공정의 장점은 대형 빌릿의 중심부 균일성을 향상시키고 가장자리와 중심부 사이의 밀도 차이를 줄이는데 있습니다. 지지 고정 장치는 위치 지정을 돕고 비대칭 변형을 방지합니다. 이 단조 공정은 고밀도 텅스텐 합금 시트 생산에 중요한 역할을 하며, 미세 구조 개선, 텅스텐 입자 구상화 증가, 계면 결합력 강화 등의 결과를 가져옵니다. 화학적 온도 관리가 매우 중요하며, 산화 방지 및 적절한 변형 조정을 위해서는 보호 분위기 조성이 필수적입니다. 단조 빈도와 감축량을 적절히 조절함으로써 내부 파손을 유발할 수 있는 과속을 방지할 수 있습니다.

### 6.5.3 중간 어닐링 및 응력 제거 열처리

텅스텐 합금 판재의 열간 가공 공정에서 중간 어닐링 및 응력 완화 열처리는 필수적인 단계입니다. 진공 또는 보호 분위기 하에서 수행되는 이러한 공정은 압연 과정에서

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

축적된 잔류 응력과 가공 경화를 해소하여 재료의 소성을 회복시키고 다음 가공 공정을 위한 준비를 갖추게 합니다. 이 열처리는 열간 압연 후 또는 냉간 압연 공정 사이에 수행되며, 온도는 재결정 임계 온도 이하 또는 약간 높은 온도로 제어됩니다. 화학적으로 고온 확산은 전위 이동 및 소멸을 유도하고, 결합상 연화는 텅스텐 입자로부터의 응력 해소를 촉진합니다. 진공 어닐링은 산화를 방지하고, 수소 기반 공정은 표면의 추가적인 환원 작용을 수행합니다.

어닐링 공정은 가열, 유지, 냉각 단계로 구성됩니다. 유지 시간 동안에는 충분한 응력 완화가 이루어지고, 결정립계 이동을 통해 미세 구조가 화학적으로 미세화되며, 석출상이 용해되거나 균질화됩니다. 서서히 냉각하면 새로운 응력이 발생하는 것을 방지할 수 있습니다. 이 공정의 장점은 누적 경화로 인한 모서리 균열이나 박리를 방지하는 데 있으며, 이는 다중 패스 압연에서 회복력을 높이는 데 매우 중요합니다. 온도 범위는 합금 시스템에 따라 조정되며, 니켈-철 합금의 경우 회복력을 향상시키기 위해 더 높은 온도 범위가 사용됩니다.

이 열처리 공정은 박판 생산에 자주 사용되며, 냉간 압연으로 인한 큰 변형 후 여러 번의 어닐링 사이클을 거쳐 최적의 전체 공정 효율을 확보합니다. 화학적 분위기의 순도가 매우 중요하며, 낮은 이슬점은 수소 취성을 방지합니다. 균일한 용광로 온도는 여러 빌릿에 걸쳐 일관된 결과를 보장합니다. 경사 어닐링과 같은 변형 공정은 표면과 중심부의 차이를 최적화합니다. 환경 친화적인 진공 펌프 유지 관리는 오염을 줄입니다.

#### 6.5.4 고온 용액 처리 및 급속 냉각

고온 용체화 처리 및 급속 냉각은 텅스텐 합금판의 열처리에서 강도를 향상시키는 방법입니다. 고온에서 합금 원소를 용해시키고 과포화 상태로 빠르게 고정시킴으로써 재료의 강도와 고온 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 이 처리는 최종 열간 가공 후 또는 특정 성능 요구 사항을 충족할 때 주로 적용됩니다. 용체화 처리는 판재를 결합상이 완전히 용해되는 온도 이상으로 가열하고 그 온도에서 유지하는 과정을 포함합니다. 화학적으로, 텅스텐 원자는 결합상에 제한적으로 용해되어 과포화 고용체를 형성합니다. 계면 원소의 확산은 결합력을 강화합니다. 유지 시간은 균일한 용해를 가능하게 하여 국부적인 편식을 방지합니다.

수냉이나 가스냉과 같은 급속 냉각은 재료를 고온 상태로 고정시켜 화학적으로 석출을 억제하고 미세 분산상 또는 고용체 강화 효과를 보존합니다. 냉각 매체의 선택은 담금질 응력과 산화 위험 사이의 균형을 고려해야 하며, 불활성 가스 담금질은 비교적 온화합니다. 이 공정의 장점은 경도와 내열성이 향상되고, 과포화 결합상이 전위를 고정시켜 강도를 증가시킨다는 점입니다.

이 처리는 내마모성 또는 방열성이 뛰어난 텅스텐 합금 시트에 적용되어 용체화 처리 후 강도를 향상시키지만, 인성 모니터링이 필요합니다. 화학적 진공 분위기는 탈탄을 방지합니다. 정밀한 온도 제어는 과열 및 조대화를 방지합니다. 단계적 냉각과 같은

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다양한 방법을 통해 응력 분포를 최적화할 수 있습니다. 환경 친화적인 매체 재활용을 통해 소비량을 줄입니다.

## 6.6 판재 준비를 위한 냉간 압연 및 온간 압연

냉간 압연과 온간 압연은 텅스텐 합금 판재 생산의 마무리 공정입니다. 상온 또는 중온에서 다중 패스 압연을 통해 열간 가공된 빌릿을 목표 두께까지 점진적으로 얇게 만들어 미세 구조와 우수한 표면 품질을 얻습니다. 이 공정은 밀리미터에서 마이크로미터 크기의 판재를 제조하는 데 적합합니다. 상온에서 수행되는 냉간 압연은 상당한 가공 경화와 큰 총 변형률을 유발합니다. 반면, 온간 압연은 중온 범위에서 회복을 촉진하여 균열 발생 위험을 줄입니다. 이 공정의 원리는 전위 증식, 동적 회복 및 조직 형성과 관련이 있습니다. 화학적으로, 결합상은 변형 과정에서 텅스텐 입자를 배위시켜 취성 파괴를 방지합니다. 패스당 압연 감소율 분포는 점진적이어야 하며, 초기 성형 단계에서는 큰 감소율을, 후기 마무리 단계에서는 작은 감소율을 적용해야 합니다. 압연 방향과 조직 제어는 이방성에 영향을 미치며, 모서리 관리를 통해 균열을 방지합니다.

공정 최적화는 윤활 및 장력 제어에 중점을 둡니다. 냉간 압연에서는 마찰을 줄이기 위해 오일 윤활을 사용하고, 온간 압연에서는 산화를 방지하기 위해 불활성 가스 보호를 사용합니다. 중간 어닐링 공정은 응력을 해소하고 소성을 회복시켜 줍니다. 박판 생산에서는 두께 변동을 방지하기 위해 제철소의 정밀도와 고강성 압연 시스템을 강조합니다. 결함 방지는 균열 및 오렌지필 현상에 중점을 두고 있으며, 트리밍 및 표면 검사를 통해 이를 완화합니다.

### 6.6.1 냉간 압연 총 변형 분포 및 패스 감소 사양

텅스텐 합금 판재 박판화 공정에서 핵심적인 계획 요소는 전체 냉간 압연 변형량 배분과 패스 감축 스케줄입니다. 전체 가공 속도와 단일 패스 감축량을 합리적으로 배분함으로써 균일한 변형과 제어 가능한 응력을 확보하여 균열 및 뒤틀림을 방지할 수 있습니다. 이 스케줄은 열간 압연 빌릿에서 시작하는데, 이때 미세 결정립 강화 및 두께 정밀도 확보를 위해 전체 변형량이 높은 경우가 많습니다. 배분 원칙은 초기에는 각 패스에서 더 큰 감축량을 사용하여 잔류 열가소성을 활용해 형상을 형성하고, 이후 패스에서는 점차 감축량을 줄여 표면을 미세화하는 것입니다. 화학적으로, 큰 감축량은 다중 슬립 시스템을 활성화시켜 바인더 상이 완전히 유동하고 텅스텐 입자를 감싸 입자 파손을 줄입니다. 스케줄 설계는 재료의 상태를 고려합니다. 초기 냉간 가공 경화는 느리게 진행되므로 더 큰 감축량이 가능하지만, 후기 경화 축적에는 더 작은 감축량과 더 긴 어닐링 간격이 필요합니다. 패스 사이에 윤활유를 균일하게 도포하면 롤 마찰을 줄이고 롤 점착을 방지하여 표면 굽힘을 예방할 수 있습니다. 장력 제어는 판재의 형상을 안정화하고 중앙이나 가장자리의 파열을 방지하는 데 도움이 됩니다. 총 변형량은 목표 두께를 기준으로 계산되며, 초박형 판재는 여러 번의 압연 및 어닐링 공정을 거쳐야 합니다. 이 공정은 표준 두께에서 얇은 판재로 전환하는 동안 유연한 조정을 가능하게 하며, 고텅스텐 합금은 모서리 균열을 방지하기 위해 보수적인 압연 과정을 거칩니다. 화학적 분위기 관리는 압연된 판재의 산화를 방지합니다. 이 공정은 통과 두께를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



기록하고 편차를 실시간으로 조정합니다. 비대칭 압연과 같은 변형을 통해 판재 형상을 최적화할 수 있습니다. 환경 친화적인 윤활유 재활용은 오염을 줄입니다.

### 6.6.2 고텅스텐 합량 합금에 대한 온간 압연의 적용

고텅스텐 합금에 열간 압연을 적용하면 상온 냉간 압연에서 발생하는 취성 위험을 중간 온도 범위에서 압연함으로써 완화할 수 있습니다. 이 공정은 적절한 가열을 통해 회복 메커니즘을 활성화하여 큰 변형률로 더 얇은 프로파일을 얻을 수 있습니다. 특히 텅스텐 함량이 높은 합금계에 적합합니다. 열간 압연 온도는 회복 재결정 온도보다 낮게 제어됩니다. 화학적 가열은 변형 저항을 감소시키고, 결합상을 연화시켜 배위 결합을 강화하며, 텅스텐 입자의 미끄럼 저항을 감소시켜 냉간 압연에서 흔히 발생하는 모서리 균열을 방지합니다. 압연기는 가열 장치를 갖추거나 빌릿을 예열하며, 불활성 가스 보호로 산화를 방지합니다.

온간 압연의 장점은 균형 잡힌 경화 및 회복력, 냉간 압연에 비해 더 큰 패스당 감소율, 더 높은 전체 가공 효율, 그리고 어닐링 시간 단축에 있습니다. 화학적으로, 온간 압연은 더욱 활발한 동적 회복을 보여 전위 재배열 및 축적을 감소시켜 순수 냉간 압연보다 우수한 표면 품질을 제공합니다. 이 공정은 열간 압연 전환과 냉간 압연 마무리를 결합한 하이브리드 공정입니다. 고텅스텐 합금은 결합상이 적고, 온간 압연은 변형 범위를 넓혀줍니다.

이 장비는 초박형 고밀도 텅스텐 합금 시트 제조에 상당한 잠재력을 보여주며, 열간 압연 후 강도와 인성이 균형 잡힌 미세 섬유 구조를 구현합니다. 화학 윤활은 고온 적응성을 보장하고, 흑연 또는 특수 오일은 점착을 방지합니다. 온도 균일성이 매우 중요하며, 유도 가열을 통해 빠른 반응 속도를 제공합니다. 물 가열 보조 기능을 포함한 다양한 변형 모델도 제공됩니다. 환경 친화적인 배기가스 배출 시스템을 통해 안전성을 확보했습니다.

### 6.6.3 롤링 방향 제어 및 텍스처 최적화

압연 방향 제어 및 조직 최적화는 텅스텐 합금 시트의 냉간 및 온간 압연 공정에서 미세구조를 제어하는 방법입니다. 단방향, 교차방향 또는 다방향 압연 경로를 통해 변형 조직과 결정 배향을 조절함으로써 재료의 이방성과 성능 균형에 영향을 줄 수 있습니다. 이러한 최적화를 통해 강도, 인성 및 열팽창의 방향 제어를 달성할 수 있습니다. 단방향 압연은 강한 섬유질 조직을 형성하고, 압연 방향을 따라 텅스텐 입자를 길게 늘이며, 화학적 전위의 평면 적층으로 인해 우선 배향을 생성하여 종방향 강도를 증가시키지만 횡방향 인성을 감소시킵니다. 교차 압연은 각 패스에서 90 도 회전하여 배향을 분산시키고 조직을 보다 무작위적인 상태로 약화시킵니다.

최적화 원칙은 적용 분야에 따라 선택됩니다. 차폐판에는 등방성 횡방향 압연이 필요하지만, 종방향 강도가 요구되는 구조 부품에는 단방향 압연이 필요합니다. 진자 압연과 같은 다방향 압연 변형은 재료의 균질성을 더욱 향상시킵니다. 화학적으로 조직은 계면 응력 분포에 영향을 미치며, 최적화를 통해 잔류 열처리량을 줄일 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

어닐링은 다른 방법과 함께 조직의 강도를 제어하는 데 사용되며, 고온 어닐링은 조직 강도를 약화시키는 반면 저온 어닐링은 유지합니다. 이러한 제어 및 최적화는 판재 생산에 상당한 영향을 미칩니다. 강한 질감을 가진 초박형 포일은 굽힘 및 균열에 취약한데, 교차 최적화를 통해 이러한 문제를 개선할 수 있습니다. X선 회절 극점 도표를 이용한 화학 분석을 통해 배향 밀도를 평가합니다. 배향 표시는 완제품의 후속 가공을 용이하게 합니다. 특수 질감을 위한 경사 압연과 같은 다양한 변형 공정도 적용됩니다. 환경 친화적인 롤러 시스템은 세척 및 굽힘 방지에 사용됩니다.

#### 6.6.4 모서리 균열 방지 및 다듬질 공정

텅스텐 합금 판재 압연에서 모서리 균열 방지 및 트리밍은 매우 중요한 결합 관리 요소입니다. 압연 매개변수 조정, 모서리 보호, 그리고 정기적인 트리밍은 균열 발생 및 전파를 줄여 판재의 건전성과 수율을 확보하는 데 도움이 됩니다. 모서리 균열은 응력 집중으로 인해 발생하며, 화학적으로는 텅스텐 입자의 높은 모서리 전단력과 불충분한 결합상 조정으로 인해 발생합니다. 예방 조치로는 페스당 압연 압력을 점진적으로 감소시키고, 모서리 전환을 매끄럽게 하며, 측면 가이드 롤을 사용하여 판재 형상을 고정하고 모서리 굴곡으로 인한 인장 응력 발생을 방지하는 방법 등이 있습니다.

트리밍 공정에서는 전단기나 휠 커터를 사용하여 주기적으로 균열이 생긴 모서리를 제거하고, 절단면을 화학적으로 세척하여 2 차 균열 발생을 방지합니다. 또한 균일한 윤활과 모서리에 추가 코팅을 적용하여 건조 마찰을 방지합니다. 온간 압연은 균열 발생 가능성을 줄여주고, 냉간 압연은 경화 축적을 모니터링하고 신속하게 어닐링합니다.

이러한 균열 방지 및 트리밍 공정은 초박형 판재 압연에서 균열이 쉽게 확산되어 트리밍 간격을 짧게 해야 하는 경우에 자주 사용됩니다. 형광 침투 검사를 통해 화학적 표면 검사를 보완합니다. 트리밍 과정에서 발생하는 폐기물은 재활용 및 분쇄됩니다. 레이저 트리밍과 같은 변형 공정은 정밀하고 버(burr)가 없는 마감を提供합니다. 환경 친화적인 절삭유 여과 시스템은 안전을 보장합니다.

#### 6.7 표면 처리 및 마감

표면 처리 및 마감 공정은 텅스텐 합금 시트 생산의 최종 단계입니다. 화학 세척, 기계 가공, 열 평탄화와 같은 방법을 통해 표면 결함을 제거하고 평탄도와 매끄러움을 개선하며, 재료의 외관, 내식성 및 기능적 적응성을 향상시킵니다. 이 공정은 정밀 응용 분야에서 시트의 표면 품질과 접착 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 표면 처리는 압연이나 열처리 후 남은 산화층, 농축상, 거친 표면을 제거하는 데 중점을 두고, 마감 공정은 치수 정확도와 모서리 품질을 확보합니다. 이러한 공정의 원리는 화학적 용해, 기계적 제거, 열 응력 해소를 포함합니다. 화학적 처리는 높은 선택성을 제공하고, 기계적 처리는 높은 효율성을 제공하며, 열 평탄화는 이 두 가지 장점을 모두 결합합니다. 일반적인 공정 순서는 세척 및 오염 제거를 먼저 수행한 후 연마하고 마지막으로 절단하는 것입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

최종 가공 공정은 비파괴 및 청결을 최우선으로 합니다. 화학 세척은 잔류 부식을 방지하고, 기계적 연마는 입자 박힘을 제어하며, 진공 열 평탄화는 재산화 방지합니다. 레이저 또는 워터젯 절단은 복잡한 형상을 구현하고 열영향부를 최소화합니다. 품질 관리에는 표면 거칠기 측정 및 육안 검사를 통해 Ra 값과 균열 유무를 확인합니다. 환경적 고려 사항으로는 폐액 중화 및 재활용, 안전한 분진 포집 등이 있습니다.

#### 6.7.1 산화층 제거를 위한 화학 세척 및 산세척

산화층을 제거하기 위한 화학 세척 및 산세척은 텅스텐 합금판 표면 처리의 주요 단계입니다. 산성 용액은 압연 또는 열처리 과정에서 생성된 산화 스케일과 오염 물질을 용해 및 제거하여 금속 광택을 복원하고 후속 공정을 위한 깨끗한 기판을 제공합니다. 이 방법은 기판 손상을 최소화하면서 산화물을 선택적으로 용해합니다. 세척 공정은 오일을 제거하기 위한 알칼리 세척으로 시작하여, 주로 산화물을 제거하기 위한 산세척으로 이어집니다. 화학적으로 산화층은 주로 텅스텐 산화물과 결합제 산화물로 구성되며, 질산, 불산 또는 황산 혼합물에 의해 효과적으로 용해되어 텅스텐이 용액에 용해되는 복합체를 형성하게 됩니다. 산세척 시간과 온도는 과도한 에칭을 방지하기 위해 신중하게 제어해야 하며, 과도한 에칭은 표면 피팅이나 수소 취성을 유발할 수 있습니다.

이 공정의 장점은 얇은 산화막을 효율적으로 제거할 수 있고, 다양한 두께의 판재에 적용 가능하며, 합금계에 따라 화학적 조성을 조절할 수 있다는 점입니다. 니켈-구리 합금계에서는 낮은 산 농도로 인해 구리가 과도하게 용해되는 것을 방지할 수 있습니다. 세척 후 물로 헹구고 중화시킨 다음, 부동태화 처리를 통해 일시적인 보호막을 형성합니다. 폐액 처리는 중화 및 불소 이온 또는 질산염 회수 과정을 포함합니다. 이 세척 방법은 열연 강판에 널리 사용됩니다. 두꺼운 산화막을 제거하면 표면 활성이 향상되어 연마 또는 도금이 용이해집니다. pH 및 농도에 대한 화학적 모니터링을 통해 배치 일관성을 보장합니다. 초음파 보조 용해와 같은 변형 공정은 공정 속도를 높입니다. 폐쇄형 환경 시스템은 배출물을 줄입니다.

#### 6.7.2 알칼리 세척은 결합상 표면의 농축물을 제거합니다.

알칼리 세척은 텅스텐 합금 시트의 표면에서 결합제 상의 농축물을 제거하는 효과적인 표면 처리 방법입니다. 이 방법은 압연이나 열처리로 인해 표면에 농축된 결합제 상을 알칼리 용액을 이용하여 선택적으로 용해시켜 표면 조성의 균형을 맞추고 내식성을 향상시킵니다. 특히 결합제 상 함량이 높은 합금에서 농축층의 우선적인 부식을 방지하기 위해 이 방법을 적용합니다. 세척 과정은 고온의 수산화나트륨 또는 탄산나트륨 용액에 시트를 담그는 방식으로 진행됩니다. 화학적으로 알칼리는 니켈 또는 구리 산화물과 반응하여 가용성 염을 형성하는 반면, 불활성인 텅스텐 상은 대부분 불용성 상태로 남아 있습니다. 이렇게 농축된 표면층이 얇게 제거되어 균형 잡힌 기판이 드러납니다.

이 공정은 높은 선택성, 텅스텐 골격 손상 최소화, 비자성 또는 열전도성 시트에 적합성 등의 장점을 제공합니다. 정밀한 온도 및 시간 제어를 통해 용해 속도를 높이는 동시에 과도한 부식을 방지합니다. 세척 후 잔류 알칼리는 산으로 중화시킨 다음 헹굼 및 건조

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

과정을 거칩니다. 보조 교반 또는 초음파 처리를 통해 균일성을 향상시킬 수 있습니다. 이 알칼리 세척은 특히 니켈-구리계 시트에 효과적이며, 구리가 압연 표면에 축적되는 경향이 있는 경우 세척 후 균일한 전도성을 얻을 수 있습니다. 표면 조성에 대한 화학 분석을 통해 제거 효과를 검증할 수 있습니다. 전해 알칼리 세척과 같은 변형 공정을 통해 공정 속도를 더욱 높일 수 있습니다. 또한, 친환경적인 알칼리 용액 재생 및 재활용도 가능합니다.

### 6.7.3 기계적 연삭 및 연마

기계적 연삭 및 연마는 텅스텐 합금판 표면 마감의 핵심 방법입니다. 연마 벨트, 연삭 휠 또는 연마 페이스트를 사용하여 표면 거칠기와 결함을 점진적으로 제거하여 높은 평활도와 낮은 조도를 얻습니다. 이 방법은 다양한 두께의 판재에 적합하며 외관 및 기능적 표면 품질을 모두 향상시킵니다. 연삭은 산화 흔적과 요철을 제거하는 거친 연삭으로 시작하여 연마 벨트 또는 연삭 휠을 사용하여 점진적으로 미세 연삭합니다. 화학적 및 기계적 전단 작용을 통해 재료가 제거되며, 텅스텐의 높은 경도 때문에 다이아몬드 또는 탄화붕소 연마재가 필요합니다. 연마는 연마 페이스트가 도포된 부드러운 천 휠을 사용하여 미세한 마찰을 통해 거울처럼 매끄러운 표면을 만듭니다.

이 공정은 평면 및 곡면 모두에 적합하며, Ra 값이 점진적으로 감소하는 제어 가능한 정밀도를 제공합니다. 건식 또는 습식 연삭이 가능하며, 습식 연삭 시에는 냉각 장치를 사용하여 열 손상을 방지합니다. 연마는 거친 표면에서 미세한 표면으로 진행되며, 중간 세척 과정을 통해 입자 박힘을 방지합니다. 이 연삭 및 연마 기술은 고정밀 의료용 콜리메이터 플레이트에 이상적이며, 거울처럼 매끄러운 표면에서 산란을 줄여줍니다. 화학 세척 후 연마를 통해 잔류물 축적을 방지합니다. 복잡한 형상을 균일하게 연마하기 위한 진동 연마와 같은 변형 공정도 가능합니다. 환경 집진 시스템을 사용하여 안전하게 분진을 포집할 수 있습니다.

### 6.7.4 진공/수소 보호 열 평탄화 공정

얇은 텅스텐 합금 판재를 평탄화하는 공정입니다. 보호 분위기 하에서 고온 인장 또는 압연을 통해 잔류 응력을 제거하여 판재의 평탄도와 치수 안정성을 향상시킵니다. 이 공정은 변형이 쉽게 발생하는 얇은 판재에 적합합니다. 공정은 진공 또는 수소로에서 판재를 응력 제거 온도까지 가열하거나, 약한 인장을 가하거나, 평탄화 물리를 통과시키는 방식으로 진행됩니다. 화학적으로는 고온 확산으로 인해 전위가 완화되고, 결함상이 연화되어 변형이 촉진됩니다. 진공은 산화를 방지하고, 수소는 표면을 환원시킵니다.

이 공정의 장점은 비접촉 또는 최소 접촉 방식으로, 흠집 없는 표면과 높은 평탄도를 얻을 수 있다는 점입니다. 재결정 온도 이하의 온도는 구조 변화를 방지하며, 균일한 장력 제어는 국부적인 늘어짐을 막아줍니다. 이 공정은 초박형 텅스텐 합금 시트에 널리 사용되는데, 냉간 압연 후 발생하는 뒤틀림을 열간 평탄화 공정을 통해 교정할 수 있습니다. 화학적 순도가 매우 중요하며, 낮은 이슬점은 수소 취성을 방지합니다. 연속로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



장력 평탄화와 같은 변형 공정도 있습니다. 이 공정은 밀폐되고 에너지 효율적인 환경을 제공합니다.

#### 6.7.5 정밀 전단, 레이저 절단 및 워터젯 절단

정밀 전단, 레이저 절단 및 워터젯 절단은 치수형 및 불규칙한 형상을 포함하여 텅스텐 합금 판재를 정밀 가공하는 방법입니다. 이러한 방법은 기계식 블레이드, 레이저 빔 또는 고압 워터젯을 사용하여 깨끗한 모서리와 복잡한 형상을 구현하고 다양한 후처리 크기 요구 사항을 충족합니다. 정밀 전단은 날카로운 절삭날을 가진 고정밀 전단기를 사용하여 화학적으로 집중된 전단력으로 파괴를 일으킵니다. 직선 모서리의 직사각형 판재에 적합하며, 조절 가능한 간격을 통해 버(burr) 발생을 방지합니다.

레이저 절단은 고에너지 레이저를 사용하여 재료를 녹이고 기화시킨 후 불활성 가스로 슬래그를 제거하는 방식입니다. 화학적으로 열영향부가 작아 복잡한 윤곽이나 구멍 가공에 적합합니다. 출력 밀도 제어를 통해 좁은 절단 폭을 구현할 수 있습니다. 워터젯 절단은 고압의 물과 연마제가 혼합된 제트를 사용하여 열 변형 없이 순수 기계적 마모만으로 냉간 절단을 수행하므로 두꺼운 판재나 열전 도성 합금에 적합합니다. 이 절단 방식은 맞춤형 텅스텐 합금 판재 가공에 유연하게 적용 가능하며, 정밀한 레이저 홀과 응력 없는 워터젯 절단면을 제공합니다. 절단 후 화학 세척을 통해 오염을 방지합니다. 파이버 레이저와 같은 변형 방식을 사용하면 절단 속도를 높일 수 있습니다. 발생하는 폐기물은 안전하게 재활용할 수 있습니다.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

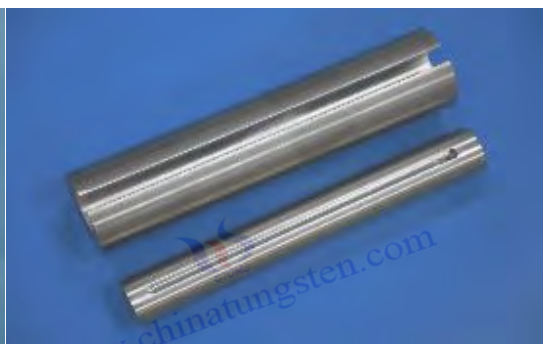
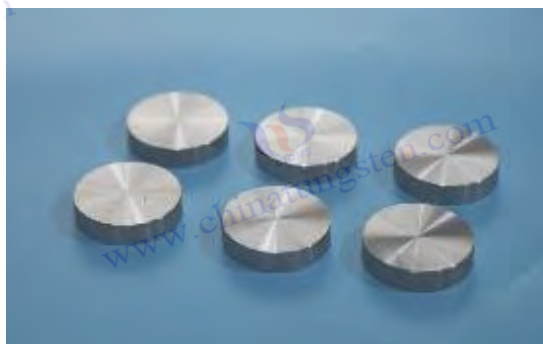
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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)

## 제 7 장 텅스텐 합금판의 응용

### 7.1 국방 및 군수 산업에서 텅스텐 합금 시트의 응용

텅스텐 합금 시트는 주로 국방 및 군사 산업에서 고밀도, 고강도 및 우수한 인성이 요구되는 부품에 사용됩니다. 높은 용점과 내마모성 덕분에 가혹한 환경에서도 안정적인 성능을 발휘합니다. 응용 분야로는 카운터웨이트 및 보호 구조물 등이 있으며, 가공을 통해 기능적 통합이 가능합니다.

#### 7.1.1 철갑탄용 텅스텐 합금 시트

철갑탄 부품에 사용되는 텅스텐 합금 시트는 높은 밀도와 자체 연마 특성을 활용하여 운동 에너지를 집중시키고 관통력을 향상시킵니다. 이 합금은 경도와 인성의 균형을 이루도록 설계되었으며, 표면 처리가 잘 되어 고속에서도 안정성을 유지합니다.

#### 7.1.2 카운터웨이트용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 높은 밀도를 활용하여 제한된 공간 내에서 무게 조정을 가능하게 함으로써 관성 균형을 유지하고 진동을 제어하는 카운터웨이트 소재로 사용됩니다. 균일한 두께는 정확성을 보장하며, 표면 처리는 내구성을 향상시킵니다.

#### 7.1.3 보호용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 보호 구조물에서 방사선 감쇠 및 충격 흡수 역할을 하며, 고밀도, 막막, 고효율 차폐를 제공합니다. 복합 소재 설계는 전체적인 강도를 향상시키며 다층 보호 시스템에 적합합니다.

### 7.2 고급 제조 분야에서 텅스텐 합금 시트의 응용

고급 제조 분야에서 텅스텐 합금 시트는 고밀도, 고경도, 우수한 가공성이라는 여러 특성이 결합되어 널리 사용됩니다. 금형 제작, 절삭 공구, 정밀 기계 부품 등에 적용되어 소형화, 고신뢰성, 긴 수명이라는 설계 목표 달성에 기여합니다. 텅스텐 합금 시트는 분말 야금 및 정밀 압연을 통해 균일한 미세 구조를 구현하여 금형 인서트에서 내마모성 및 고온 연화 저항성을 제공하고, 절삭 공구에서 견고한 지지력을 제공하며, 밀도의 이점을 활용하여 기계식 카운터웨이트의 질량 분포를 조절할 수 있습니다. 또한, 텅스텐 합금 시트는 응용 분야에서 다른 재료와 결합되거나 표면 처리를 통해 기능적 범위를 더욱 확장하는 데 사용됩니다.

고급 제조 공정에서는 재료 특성의 균형이 매우 중요하며, 텅스텐 합금 시트는 높은 탄성 계수와 열 안정성 덕분에 고응력, 고온 또는 고정밀 응용 분야에 탁월한 성능을 발휘합니다. 제조 공정이 지능화되고 경량화되는 추세에 따라 텅스텐 합금 시트의 적용 범위는 기존 금형에서 적층 제조 지지대 및 정밀 기기 부품으로 확대되고 있습니다. 표면

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



코팅이나 열처리를 통해 내식성과 접착 특성을 더욱 최적화하여 복잡한 작동 조건을 충족할 수 있습니다. 텅스텐 합금 시트는 다양한 두께로 제공되며, 얇은 시트는 정밀 상감에 사용되고 두꺼운 시트는 구조적 지지대에 적합합니다.

### 7.2.1 금형 인서트용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 높은 경도, 내마모성 및 고온 연화 저항성에서 비롯됩니다. 이러한 특성은 플라스틱 사출 금형, 다이캐스팅 금형, 유리 열압착 금형 등에 널리 적용되어 금형 수명 연장 및 제품 품질 향상에 기여합니다. 금형의 핵심 작동 부품인 금형 인서트는 반복적인 고온, 고압 및 마모에 견뎌야 합니다. 금형 본체에 내장된 텅스텐 합금 시트는 국부적으로 높은 내마모성을 제공하여 금형 재료 소모량을 줄여줍니다. 텅스텐 합금 시트의 2상 구조는 인서트에서 중요한 역할을 합니다. 텅스텐 입자는 경질상 역할을 하여 마모에 저항하고, 결합상은 일정 수준의 인성을 제공하여 취성 파괴를 방지합니다.

플라스틱 사출 금형에서 텅스텐 합금 시트는 용융 플라스틱의 충격과 열 변동을 견디기 위해 캐비티 가장자리 또는 게이트 영역에 일반적으로 사용됩니다. 표면 연마 처리는 금형에 달라붙는 경향을 줄이고 탈형 효율을 향상시킵니다. 다이캐스팅 금형에서 인서트는 용융 금속으로 인한 고속 충격과 고온 부식에 노출되는데, 텅스텐 합금 시트의 열 안정성은 치수 정확도를 유지하고 열 피로 균열을 줄이는 데 도움이 됩니다. 유리 열압착 금형에서는 낮은 열팽창률과 높은 경도로 인해 정밀 광학 부품 성형 시 형상 정확도를 보장합니다. 인서트 설계에서 텅스텐 합금 시트는 브레이징, 상감 또는 나사 고정을 통해 금형 강에 접합되며, 니켈 도금과 같은 계면 처리로 접착력을 향상시킵니다.

텅스텐 합금 인서트는 고정밀 스탬핑 금형으로 응용 분야가 확대되었습니다. 휴대폰 프레임이나 전자 커넥터 성형 시 스테인리스강이나 티타늄 합금 시트의 반복적인 스탬핑에 대한 내구성을 확보하기 위해 사용됩니다. 표면 경도 구배 설계는 내마모성과 내파손 성능을 균형 있게 제공합니다. 최근 전기 자동차와 가전제품의 급속한 발전으로 수명이 긴 금형에 대한 수요가 증가함에 따라 텅스텐 합금 인서트도 나노결정질 또는 분산 강화 소재로 개발되어 내피로성이 더욱 향상되었습니다. DLC 또는 TiAlN 과 같은 표면 코팅은 화학 기상 증착을 통해 단단한 막을 형성하여 기관과 시너지 효과를 내어 내마모성을 향상시키는 데 일반적으로 사용됩니다. 텅스텐 합금 인서트의 두께는 금형 크기에 따라 선택되며, 마이크로 금형에는 얇은 인서트가 사용되고, 큰 하중을 지지하는 금형에는 두꺼운 인서트가 사용됩니다.

가공 기술은 적용 효과에 영향을 미칩니다. 정밀 연삭은 인서트의 평탄도를 보장하고, 열처리는 경도 분포를 조절합니다. 금형 유지 보수 시 텅스텐 합금 시트는 부분적으로 쉽게 교체할 수 있어 전체 비용을 절감할 수 있습니다. 환경 적응성 측면에서, 인서트는 고온 오일 윤활 또는 수성 냉각수 환경에서 안정적인 성능을 유지합니다. 또한 텅스텐 합금 시트의 적용은 모듈식 금형 설계를 촉진하고, 표준화된 인서트 사양은 재고 관리를 용이하게 합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 7.2.2 절삭 공구용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 높은 경도와 열 안정성을 활용하여 절삭 공구의 기관 또는 인서트 소재로 주로 사용됩니다. 이러한 특성은 특정 특수 절삭 공구 및 내마모성 인서트에 적용되어 가공하기 어려운 소재나 고온 조건에서의 가공을 지원합니다. 공구 설계에서 텅스텐 합금 시트는 종종 초경합금이나 세라믹과 결합하여 하이브리드 구조를 형성합니다. 텅스텐 합금은 견고한 바탕재를 제공하고, 표면에는 단단한 층이 용접 또는 브레이징되어 공구의 수명을 향상시킵니다. 텅스텐 합금 시트의 높은 밀도는 회전하는 공구의 진동을 줄이고 균형을 유지하는 데 도움을 줍니다.

선삭 또는 밀링 공구에서 텅스텐 합금 인서트는 절삭력과 열 부하를 견디기 위해 공구 홀더 또는 공구 지지대에 사용됩니다. 결합된 상은 변형을 조절하고 충격을 흡수하여 공구 끝단의 파손을 방지합니다. 화학적 안정성으로 인해 냉각수 환경에서 부식에 강하며, 무전해 도금과 같은 표면 처리는 추가적인 보호 기능을 제공합니다. 텅스텐 합금 인서트는 목재 가공이나 복합 재료 가공 공구에도 적용되며, 섬유 마모에 강하고 날카로운 절삭날을 유지하는 데 도움이 됩니다.

텅스텐 합금 시트는 특정 와이어 드로잉 다이 또는 압출 공구의 부싱에도 사용되는데, 금속 유동 마모를 방지하기 위해 내부 구멍에 텅스텐 합금 링이나 시트를 삽입합니다. 두께는 공구 본체 형상에 따라 선택되며, 얇은 시트는 경부하 정밀 공구에 사용되고 두꺼운 시트는 중부하 절삭에 사용됩니다. 레이저 미세 구조 가공과 같은 표면 텍스처링은 칩 제거 성능을 향상시킵니다. 절삭 공구에서 텅스텐 합금 시트의 역할은 다중 재료 복합 설계에 기여하며, 브레이징 계면은 접합 강도를 최적화합니다.

최근 절삭이 어려운 소재의 증가에 따라 텅스텐 합금 시트는 표면은 단단하고 내부는 인성이 뛰어난 그라디언트 구조로 발전해 왔습니다. 열처리를 통해 절삭 공구의 경도 분포를 조절하고, 용체화 강화를 통해 내열성을 향상시킵니다. 공구 재연삭 시 텅스텐 합금 매트릭스는 여러 번의 연마 작업을 견딜 수 있습니다. 환경 적응성 측면에서도 건식 절삭이나 최소 윤활 조건에서도 안정적인 성능을 유지합니다.

### 7.2.3 기계식 평형추용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 높은 밀도를 활용하여 제한된 공간 내에 질량을 집중시킴으로써 정밀 기계의 무게중심을 조정하고 관성 균형을 유지하며 진동을 줄이는 데 도움을 줍니다. 이러한 기술은 분석 기기, 관성 항법 장치 및 광학 플랫폼에서 흔히 찾아볼 수 있습니다. 평형추 시트는 특정 형상으로 정밀 가공되어 기계 구조물에 내장되거나 접촉됩니다. 텅스텐 합금 시트의 균일한 밀도는 제어 가능한 질량 분포를 보장하여 국부적인 편차가 시스템 안정성에 영향을 미치는 것을 방지합니다.

분석 저울이나 원심분리기에서는 텅스텐 합금판이 추 또는 평형추로 사용됩니다. 균일한 두께 덕분에 정밀 조정이 가능하며, 표면 코팅으로 산화로 인한 질량 변화를 방지할 수 있습니다. 관성 계측기에서는 평형추가 회전 관성을 조절하는 데 사용되며, 텅스텐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

합금판의 우수한 가공성 덕분에 복잡한 형상 제작이 가능하며 소형화 요구 사항을 충족합니다. 광학 계측기 플랫폼에서는 평형추가 진동 감쇠에 사용되며, 고밀도 텅스텐판은 무게중심을 낮추고 충격 저항성을 향상시킵니다.

텅스텐 합금 시트는 자이로스코프나 모터 로터와 같은 고속 회전 기계에도 적용되어, 카운터웨이트 밸런싱을 통해 편심 진동을 줄이고 베어링 수명을 연장합니다. 마이크로 기기용 얇은 시트부터 대규모 질량 조정용 두꺼운 시트까지 다양한 두께로 제공됩니다. 금 도금과 같은 표면 처리는 외관과 내식성을 향상시키며, 화학적 안정성은 장기간에 걸쳐 일관된 품질을 보장합니다.

가공 기술은 적용 정확도에 영향을 미칩니다. 정밀 진단 가공은 매끄러운 모서리를 보장하고, 열 평탄 가공은 평탄도를 유지합니다. 카운터웨이트에 사용되는 텅스텐 합금 시트는 소형화된 기계 설계를 가능하게 하며, 고밀도 소재를 기존 소재 대신 사용함으로써 부피를 줄입니다. 환경 적응성 측면에서는 온도 변화에도 치수 안정성을 보여 광범위한 온도 범위에서 작동할 수 있습니다.

### 7.3 원자력 및 의료 분야에서의 텅스텐 합금 시트의 응용

텅스텐 합금 시트는 높은 밀도, 우수한 방사선 감쇠 능력 및 생체 적합성이라는 장점을 활용하여 주로 사용됩니다. 이러한 응용 분야는 원자력 시설 차폐, 의료 방사선 치료 장비 및 원자력 환경 구성 요소를 포함하며, 방사선 방호 및 치료 정밀도 향상에 기여합니다. 텅스텐 합금 시트는 높은 텅스텐 함량으로 인해 효과적인 차폐 두께를 제공하며, 기존 재료에 비해 부피가 작아 공간 제약이 있는 응용 분야에 적합합니다. 원자력 차폐 분야에서는 텅스텐 합금 시트가 용기 내부 라이닝이나 콜리메이션 구조에 사용되며, 의료 분야에서는 다엽 콜리메이터 및 보호 장비에 널리 사용됩니다. 원자력 환경 구성 요소에서는 텅스텐 합금 시트의 열 안정성과 방사선 내성이 활용됩니다.

응용 분야 설계에서는 두께 균일성과 표면 평활도가 중점적으로 고려됩니다. 얇은 판은 정밀한 콜리메이션에 사용되고, 두꺼운 판은 구조물을 지지하는 데 사용됩니다. 코팅과 같은 표면 처리는 내식성을 향상시키고, 폴리머와 결합된 복합 구조는 유연한 차폐 기능을 제공합니다. 텅스텐 합금 판은 가공성이 뛰어나 복잡한 성형이 가능하여 맞춤형 요구 사항을 충족합니다. 핵의학 및 방사선 치료 기술의 발전과 함께 텅스텐 합금 판의 적용 범위는 기존의 차폐에서 센서 또는 냉각 채널과의 결합과 같은 기능적 통합으로 확대되고 있습니다. 생체 적합성은 의료 응용 분야에서 안전성을 보장하며, 방사선 조사 하에서의 조직 안정성은 장기간 사용을 뒷받침합니다.

#### 7.3.1 핵 차폐용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 감마선과 중성자에 대한 높은 감쇠 능력에서 비롯됩니다. 이러한 특성은 원자력 시설의 용기 내부, 운송 용기의 내벽, 실험 장비의 차폐 등에 흔히 적용되어 방사선 누출을 줄이고 작업 환경을 보호하는 데 기여합니다. 텅스텐 합금 시트는 밀도가 높아 얇은 두께로도 효과적인 차폐가 가능하므로 다른 재료에 비해 부피를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

크게 줄일 수 있고 모듈식 설계에 적합합니다. 차폐 구조물에서 텅스텐 합금 시트는 적층 또는 미러 마운팅 방식으로 고정되며, 표면 처리를 통해 방사선 산화 저항성을 향상시킵니다.

핵폐기물 저장 용기에서 텅스텐 합금판은 고에너지 방사선을 흡수하는 내장재로 사용되며, 장기간 열 안정성을 유지합니다. 원자로 외벽 차폐와 같은 실험 설비에는 방사선 강도에 따라 두께를 조절한 텅스텐 합금판이 사용되며, 균일한 미세 구조는 일관된 방사선 감쇠를 보장합니다. 텅스텐 합금판은 가공성이 뛰어나 불규칙한 절단이 가능하여 복잡한 형상에도 적용할 수 있습니다. 복합재 응용 분야에서는 봉화물 소재와 결합하여 중성자 흡수율을 향상시키고, 우수한 화학적 호환성을 보이며 유해한 반응을 일으키지 않습니다. 응용 분야는 핵연료 처리 장비까지 확장되어, 텅스텐 합금판은 작동 창이나 로봇 팔 부품을 차폐하여 반복적인 방사선 노출에도 견딜 수 있는 내방사선성을 제공합니다. 니켈과 같은 표면 코팅은 접합면을 보호하여 수명을 연장합니다. 핵 차폐 분야에서 텅스텐 합금판의 역할은 시설의 소형화, 경량화 및 운송 용이성을 촉진합니다. 환경 적응성 측면에서 텅스텐 합금판은 고온 방사선 환경에서도 치수 안정성을 나타냅니다.

### 7.3.2 의료용 차폐재용 텅스텐 합금 시트

의료용 차폐에 사용되는 텅스텐 합금 시트는 주로 방사선 치료 장비와 보호 장비에서 볼 수 있습니다. X 선과 감마선에 대한 감쇠 특성을 활용하여 정밀한 방사선 형상 제어와 인체 보호 기능을 제공함으로써 치료 위치 설정 및 안전성을 향상시킵니다. 의료용 차폐의 가장 대표적인 예는 선형 가속기의 다엽 콜리메이터 블레이드입니다. 텅스텐 합금 시트 여러 층이 쌓여 독립적으로 움직이며 빔 형상을 형성합니다. 균일한 두께는 날카로운 모서리를 보장하고 반응성을 감소시킵니다.

CT 스캐너와 같은 방사선 진단 장비에서 텅스텐 합금 시트는 검출기 콜리메이션 그리드 또는 산란 방지판에 사용되어 산란 방사선을 흡수하고 영상 선명도를 향상시킵니다. 방사선 전문의용 앞치마나 차폐 커튼과 같은 보호 장비에서는 텅스텐 합금 시트를 고분자와 복합하여 유연하고 가벼운 소재를 만들어 기존의 무거운 소재를 대체합니다. 텅스텐 합금 시트는 생체 적합성이 뛰어나고 독성이 없어 의료 현장에서 안전하게 사용할 수 있습니다. 이 제품은 정밀도를 최우선으로 고려하여 설계되었으며, 날 표면은 매끄럽게 연마되어 마찰을 줄이고 부드러운 움직임을 보장합니다. 텅스텐 합금 시트는 열 안정성이 뛰어나 고선량 방사선에도 형태를 유지할 수 있으며, 화학적 불활성으로 냉각제 부식을 방지합니다. 다양한 방사선 에너지에 맞춰 두께를 맞춤 제작할 수 있는데, 저에너지 X 선에는 얇은 시트를, 고에너지 감마선에는 두꺼운 시트를 사용합니다. 이러한 복합 구조는 웨어러블 보호 장비에도 적용되어, 균일하게 분포된 텅스텐 합금 마이크로 시트가 완벽한 보호 기능을 제공합니다.

### 7.3.3 원자력 환경용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 방사선 저항성과 열기계적 안정성을 활용하여 사용됩니다. 이러한 소재는 방열판, 지지 구조물, 국부 차폐재와 같은 원자력 시설의 내부 부품에 적용되어

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

방사선 및 고온 조건에서도 장비의 안정적인 작동을 유지하는 데 도움을 줍니다. 원자력 환경 부품은 중성자 및 감마선 조사와 온도 변화에 노출되는데, 텅스텐 합금 시트의 미세구조 안정성은 팽창 및 취성을 감소시키고, 결합재는 응력 분포를 균일하게 합니다.

원자로나 가속기에서 텅스텐 합금 시트는 표적 후판이나 냉각 채널 라이너로 사용되는데, 높은 열전도율 덕분에 열 방출이 용이하고 방사선 조사 하에서도 치수 안정성을 유지합니다. 장착 브래킷과 같은 지지 구조물은 높은 강도를 활용하여 진동 및 열 하중을 견뎌냅니다. 텅스텐 합금 시트는 가공성이 뛰어나 정밀 성형이 가능하므로 협소한 공간에도 설치하기에 적합합니다. 텅스텐 합금 시트는 원자력 계측기 부품에 적용되어 방사선 흡수체 또는 집속창으로 사용되며, 방사선 감쇠와 열 관리를 동시에 수행합니다. 표면 처리를 통해 산화 저항성을 향상시키고, 코팅 처리를 통해 장기간 노출로부터 보호합니다. 원자력 환경에서 텅스텐 합금 시트는 장비의 내구성을 높이고 유지보수 빈도를 줄여줍니다. 또한, 화학적 안정성으로 매체와의 반응으로부터 보호합니다.

#### 7.4 전자 및 신에너지 분야에서의 텅스텐 합금 시트의 응용

텅스텐 합금 시트는 우수한 열전도율 및 전기전도율, 적절한 열팽창 계수, 높은 밀도 등의 특성에 크게 의존합니다. 이러한 응용 분야는 전력 소자의 방열, 전자 패키징, 전극 재료 등을 포괄하며, 소자의 소형화, 고신뢰성, 효율적인 에너지 변환을 가능하게 합니다. 텅스텐-구리 또는 텅스텐-니켈-구리 시스템을 통해 텅스텐 합금 시트는 반도체 재료와 유사한 열팽창 특성을 보여 열응력으로 인한 파손을 줄여줍니다. 방열 기관에서는 방열관 역할을 하여 열을 분산시키고, 패키징에서는 외피 또는 전이층으로 사용되며, 전극에서는 아크 침식에 대한 저항성을 제공합니다. 5G 통신, 고출력 전자 기기, 신에너지 배터리 기술의 급속한 발전과 함께 텅스텐 합금 시트의 응용 분야는 기존의 진공 소자에서 고주파 모듈 및 에너지 저장 시스템으로 확대되고 있습니다.

전자 산업에서는 엄격한 열 관리가 요구됩니다. 높은 열전도율을 가진 텅스텐 합금 시트는 열 확산을 촉진하고, 표면 코팅은 납땜성을 향상시킵니다. 신에너지 응용 분야에서는 고온 또는 반복적인 작동 조건에서도 안정적인 성능을 발휘합니다. 텅스텐 합금 시트는 다양한 두께 옵션을 제공하며, 얇은 시트는 마이크로 전자 분야에 사용되고 두꺼운 시트는 고출력에 적합합니다. 세라믹이나 다이아몬드와 결합하여 성능을 향상시키는 복합 구조도 흔히 사용됩니다. 또한, 텅스텐 합금 시트는 열 인터페이스 재료를 사용하여 접촉 열 저항을 줄임으로써 소자 집적화를 촉진합니다. 환경 적응성 측면에서도 텅스텐 합금 시트는 넓은 온도 범위에서 안정적인 성능을 유지합니다. 요약하자면, 본 사례는 전자 신에너지 분야에서 텅스텐 합금 시트의 열전 기능을 입증하고, 성능 조합을 통해 소자 효율과 수명 향상을 도모하며, 산업의 지속적인 기술 발전을 뒷받침합니다.

##### 7.4.1 열 방출 기관용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 주로 텅스텐-구리 시스템의 높은 열전도율과 반도체 재료의 열팽창과의 호환성을 활용합니다. 이러한 특성은 고출력 LED, 레이저 및 RF 모듈에 널리

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



적용되어 열을 신속하게 방출하고 열 응력 균열을 줄이는 데 도움을 줍니다. 칩과 방열관 사이의 중간층으로 사용되는 텅스텐 합금 시트는 평평한 지지면을 제공하며, 니켈-금 도금은 납땜성을 향상시키고 높은 화학적 결합 강도를 제공합니다. 텅스텐-구리 유사 합금 구조에서 구리상은 연속적인 열 채널을 형성하고, 텅스텐 골격은 실리콘 또는 갈륨비소 기판과 호환되도록 열팽창을 제어합니다.

전력 증폭기 모듈에서 텅스텐 합금 기판은 칩을 지지하며, 높은 열전도율로 고주파 동작 중 열 축적 및 분산을 지원하고, 균일한 두께로 평탄도를 확보하고 뒤틀림을 줄입니다. 레이저 다이오드 응용 분야에서는 기판이 펄스열을 흡수하고, 텅스텐 합금 시트의 열용량이 순간적인 최대 열값을 완충합니다. 고출력 조명 분야로 확장되고 있는 LED 패키징에서 텅스텐 합금 시트는 기존의 구리-몰리브덴 시트를 대체하여 탁월한 체적 열 관리 성능을 제공합니다.

응용 설계에서는 칩 연결에 브레이징 또는 소결을 사용하는 인터페이스 처리와 반응성 증형성을 방지하기 위한 화학적 호환성에 중점을 둡니다. 표면 미세 구조의 레이저 가공은 접촉 면적을 증가시키고 열전도율을 향상시킵니다. 열 방출 기판에 텅스텐 합금 시트를 사용함으로써 소자 소형화와 고출력 밀도에서의 안정적인 작동이 가능해집니다. 다이아몬드 입자를 함유한 복합재는 열전도율을 더욱 향상시켜 한계를 확장합니다. 환경 적응성 측면에서 고온 및 저온 사이클링 조건에서도 안정적인 성능을 나타냅니다.

#### 7.4.2 전자 패키징용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 열팽창 계수가 유사하고 고밀도 특성을 활용하여 전자 패키징에 사용되며, 하우징, 커버 또는 전이층 역할을 하여 밀폐 보호 및 열 전달 경로를 제공합니다. 이러한 응용 분야는 고신뢰성 마이크로파 장치 및 센서 패키징에서 볼 수 있으며, 내부 진공 또는 불활성 가스 환경을 유지하는 데 도움이 됩니다. 텅스텐 합금 시트는 세라믹 또는 유리 밀봉재와 호환되며, 화학적 안정성으로 고온 브레이징이 가능하고, 열팽창 계수가 유사하여 밀봉 응력을 줄입니다.

전력 반도체 패키징에서 텅스텐 합금 시트는 베이스 또는 리드프레임 트랜지션으로 사용되어 접합부에서 발생하는 열을 효과적으로 방출하는 동시에 높은 밀도 덕분에 전체 무게를 줄여줍니다. 마이크로파 튜브 패키징에서는 텅스텐 합금 커버 플레이트가 전자기 차폐를 제공하며, 높은 밀도로 인해 구조적 강성이 향상됩니다. 센서 하우징에는 환경 부식 저항성을 위해 텅스텐 합금 시트가 사용되며, 표면 코팅을 통해 납땜성을 개선합니다.

#### 7.4.3 전극용 텅스텐 합금 시트

텅스텐 합금 시트는 주로 아크 침식에 대한 저항성과 높은 전도성을 활용합니다. 이러한 특성은 고전압 스위치, 저항 용접 전극 및 특정 방전관에 적용되어 접촉 수명을 연장하고 안정적인 전도성을 유지하는 데 도움을 줍니다. 접촉면 또는 삽입재로서 텅스텐 부분은

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

용접에 대한 저항성을 제공하고, 구리 또는 은 부분은 전도성 경로를 제공합니다. 화학적으로, 산마 생성물은 휘발되어 열 손상을 제거합니다.

점 용접 충격을 견딜 수 있도록 구리 기판에 내장됩니다. 높은 경도로 인해 변형이 적고, 전도성이 뛰어나 고전류를 처리할 수 있습니다. 진공 스위치 응용 분야에서 텅스텐 합금 전극은 전기 아크에 직접 접촉하며, 내삭성이 우수하여 매끄러운 접촉면을 유지하고 재료 이동을 줄입니다. 방전 가공 전극에까지 응용 분야가 확대되었습니다. 텅스텐 합금 시트는 마모를 줄이고 가공 효율을 향상시키며, 최적화된 표면 질감은 균일한 방전을 보장합니다. 방전관 전극은 고전압 절연 파괴를 견딜 수 있는 텅스텐 합금을 사용하며, 그 안정성 덕분에 반복적인 방전에도 견딜 수 있습니다.

텅스텐 합금 시트는 접촉 신뢰성과 수명을 향상시키며, 복합 소재 설계는 전도성과 내마모성의 균형을 맞춰줍니다. 시트 두께는 전류 수준에 따라 결정되는데, 얇은 시트는 정밀한 접촉을 제공하고 두꺼운 시트는 견고한 지지력을 제공합니다. 표면 연마 처리는 초기 저항을 감소시킵니다.

## 7.5 카드 제작에 텅스텐 합금 시트를 적용하는 방법

텅스텐 합금 시트는 주로 높은 밀도를 활용하여 견고한 촉감과 금속성 광택을 제공하며, 뛰어난 가공성과 내마모성을 자랑합니다. 이러한 소재는 기능성을 일상용품과 결합하여 카드에 독특한 질감과 내구성을 부여합니다. 텅스텐 합금 시트는 정밀하게 압연되어 얇은 포일 또는 복합층으로 만들어진 후 플라스틱이나 금속 기판과 접합됩니다. 두께 제어를 통해 표준 카드 크기와 호환성을 보장합니다. 은행 결제 카드, 반려동물 인식표, 기념 명절 카드 등 다양한 분야에 적용되어 고급스럽고 개인 맞춤형이며 오래 사용할 수 있는 제품에 대한 소비자 수요를 충족합니다.

텅스텐 합금 시트는 카드에 위조 방지 질감과 시각적 효과를 제공합니다. 광택 또는 브러싱 처리된 표면은 미적 감각을 향상시키고, 금이나 블랙 티타늄 도금과 같은 코팅은 색상 다양성을 더합니다. 화학적 안정성 덕분에 일상적인 마모와 부식에 강하여 오랫동안 광택을 유지합니다. 복합 공정에서 텅스텐 합금층은 PVC 또는 PC 기판에 열압착되며, 접착제를 사용하여 층간 강도를 확보합니다. 텅스텐 합금의 적용은 또한 고밀도 박막 구조를 통해 부피 증가 없이 무게감을 구현하여 경량 카드 디자인을 가능하게 합니다. 소비 수준 향상에 따라 텅스텐 합금 카드는 고급 제품을 넘어 맞춤형 선물로까지 활용 범위가 확대되었으며, 레이저 각인과 같은 가공 기술을 통해 맞춤형 디자인이 가능해졌습니다. 환경 적응성 측면에서 텅스텐 합금 카드는 굽힘과 고온에 대한 저항성을 갖추고 있습니다.

### 7.5.1 텅스텐 합금 은행 카드 및 결제 카드

텅스텐 합금 은행 카드 및 결제 카드는 카드 본체에 얇은 텅스텐 합금 시트를 통합한 고급 결제 수단입니다. 이 카드는 텅스텐 합금층을 통해 금속 특유의 무게감과 시원한 촉감을 제공하여 기존 플라스틱 카드와 차별화되며, 소지자의 정체성과 사용 경험을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

향상시킵니다. 텅스텐 합금 시트는 일반적으로 매우 얇은 호일로 말아 여러 겹의 플라스틱 기판과 함께 열압착한 후 투명 보호층으로 덮습니다. 텅스텐 합금의 화학적 불활성 덕분에 카드는 일상적인 마찰과 굽힘에도 변색되거나 변형되지 않습니다. 표준 카드 크기는 기존 카드 판독기와 호환되며, 내장된 칩과 마그네틱 스트라이프는 기능에 영향을 미치지 않습니다.

텅스텐 합금 신용카드는 금융기관에서 고급 회원 카드 또는 블랙 카드로 자주 발행됩니다. 묵직한 무게감은 카드를 꺼낼 때 특별한 느낌을 더해주고, 금속성 광택은 시각적인 매력을 높여줍니다. 브러시드 질감이나 미러 폴리싱 등 다양한 표면 처리가 가능하며, 카드 번호와 디자인은 레이저로 각인되어 위조 방지 기능이 뛰어납니다. 텅스텐 합금층의 두께는 무게와 유연성의 균형을 맞추기 위해 정밀하게 조정되었으며, 굽힘 테스트를 통해 박리 현상이 발생하지 않도록 보장합니다. 로즈 골드나 건메탈과 같은 화학 도금 옵션을 통해 개인 취향에 맞는 색상을 선택할 수 있습니다.

결제 카드 애플리케이션이 비접촉식 결제로 확대되고 있습니다. 텅스텐 합금은 무선 주파수 신호를 방해하지 않으며 안테나 레이어 설계와도 호환됩니다. 내마모성이 뛰어나 지갑과의 마찰에도 새것처럼 오래 유지되며, 수명이 길어 교체 빈도를 줄여줍니다. 텅스텐 합금 카드 가공 기술은 성숙 단계에 접어들어 라미네이션 후 매끄럽고 버(burr)가 없는 정밀 절단면을 구현할 수 있습니다. 환경 적응성 측면에서도 고온 및 화학 세척제에 대한 내성이 뛰어나 전 세계적으로 사용하기에 적합합니다. 또한 텅스텐 합금의 적용은 카드 위조 방지 기술을 한 단계 끌어올립니다. 특유의 밀도로 인해 위조가 어렵기 때문입니다.

### 7.5.2 텅스텐 합금 애완동물 식별 태그

텅스텐 합금 반려동물 인식표는 얇은 텅스텐 합금판으로 만든 작은 인식표로, 반려동물의 목걸이에 부착하여 신원을 확인할 수 있습니다. 이 인식표는 높은 밀도와 금속성 질감 덕분에 내구성과 미적인 아름다움을 동시에 갖추고 있으며, 반려동물의 활동으로 인한 마모와 부식에도 강합니다. 텅스텐 합금판을 얇게 압연한 후 뼈 모양, 원형, 하트 모양 등 다양한 형태로 성형합니다. 표면에는 소유자 정보와 반려동물의 이름이 레이저로 각인됩니다. 텅스텐 합금의 높은 경도 덕분에 각인은 깊고 선명하며, 쉽게 번지지 않습니다.

반려 동물 식별 태그에 사용되는 텅스텐 합금은 적당한 무게로 반려동물에게 부담을 최소화하며, 잠금장치 디자인은 안전한 고정을 보장하고 탈착을 방지합니다. 광택 또는 무광 마감 처리된 표면은 빛을 반사하여 시인성을 높이고, 블랙 로듐이나 금 도금과 같은 다양한 색상 옵션을 제공합니다. 화학적 안정성 덕분에 비, 진흙, 반려동물의 핏물에도 녹슬거나 변색되지 않고 오랫동안 제 기능을 유지합니다. 또한, 정밀하게 조절된 두께는 얇으면서도 견고하여 구부러지거나 갈라지는 것을 방지합니다.

이 기술은 고급 애완동물용품 시장으로 확장되어 텅스텐 합금 플레이트가 고급 액세서리로 활용되고 있습니다. 이 플레이트는 가족 목걸이와 함께 사용되며 반려동물의 사진

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

윤곽선이나 QR 코드 링크 등 맞춤형 디자인을 적용할 수 있습니다. 내구성이 뛰어나 활동적인 반려동물도 오랫동안 착용할 수 있으며, 선명한 정보 덕분에 분실 시에도 쉽게 찾을 수 있습니다. 텅스텐 합금 플레이트는 가공성이 우수하여 소량 맞춤형 제작이 가능하고, 모서리가 둥글게 처리되어 반려동물의 피부에 상처를 입히지 않습니다.

### 7.5.3 텅스텐 합금 휴일 및 기념 맞춤형 카드

텅스텐 합금으로 만든 특별한 기념일 카드는 얇은 텅스텐 합금판으로 제작되어 명절 선물이나 기념품으로 인기가 높습니다. 이 카드는 금속 특유의 무게감과 변치 않는 광택으로 특별한 감성을 전달하며, 종이나 플라스틱 카드와는 차별화된 소장 가치를 지닙니다. 복합재 또는 순수 금속 텅스텐 합금판으로 제작되며, 표면에는 레이저로 인사말, 날짜, 디자인 등을 새겨 넣을 수 있습니다. 텅스텐 합금의 화학적 안정성 덕분에 새겨진 정보는 절대 변색되지 않아 장기간 보관에 적합합니다.

생일, 기념일, 연말연시 인사 카드와 같은 명절 카드에는 텅스텐 합금 소재가 견고한 느낌을 주며, 벗겼을 때 기분 좋은 놀라움을 선사합니다. 금색이나 은색 도금은 명절 분위기와 잘 어울립니다. 기념 카드는 결혼식, 졸업식, 기업 기념일 등에 사용되며, 하트 모양이나 책갈피 모양과 같은 맞춤형 디자인에 보석을 박거나 양각 무늬를 넣어 예술적인 매력을 더합니다. 얇으면서도 튼튼하여 우편으로 보내거나 휴대하기 편리합니다.

이 카드는 레이저 기술로 섬세한 질감을 표현하고 화학적 연마 공법으로 거울처럼 반사되는 표면을 구현하여 시각적 매력을 극대화하는 등 개인 맞춤형 디자인을 강조합니다. 실크나 가죽을 결합한 복합 소재 구조는 선물의 고급스러움을 더합니다. 텅스텐 합금의 내마모성 덕분에 반복적인 사용에도 카드는 처음과 같은 깨끗한 외관을 유지하여 높은 소장 가치를 지닙니다.

### 7.5.4 텅스텐 합금 산업 및 자산 관리 안내 표지판

텅스텐 합금 산업 및 자산 관리 표지판은 얇은 텅스텐 합금 시트를 가공하여 장비, 공구 또는 자산에 영구적으로 표시할 수 있는 내구성 있는 표지판으로 제작됩니다. 이러한 표지판은 높은 경도와 화학적 안정성 덕분에 산업 환경에서 마모, 부식 및 고온에 강하며, 정보의 가독성을 장기간 보장합니다. 텅스텐 합금 시트는 얇은 판으로 압연된 후 레이저 각인 또는 스탬핑을 통해 숫자, 바코드 또는 QR 코드를 새깁니다. 표면 연마 또는 브러싱 처리를 통해 내후성을 향상시킵니다. 텅스텐 합금의 화학적 불활성은 산, 알칼리 또는 오일에 의한 부식을 방지하므로 옥외 또는 화학 환경에 적합합니다.

산업용 안내 표지판은 기계, 파이프, 용기 등에 부착되며 진동과 세척에도 강합니다. 높은 밀도로 인해 안정감을 제공하며, 끈이나 리벳으로 단단하게 고정할 수 있습니다. 자산 관리 안내 표지판은 창고 선반이나 IT 장비에 사용되며, QR 코드를 통해 디지털 시스템과 연동하여 재고 관리 및 추적이 가능합니다. 텅스텐 합금의 내마모성 덕분에 잦은 스캔이나 마찰에도 표지판의 선명도와 정보 가독성이 유지됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



이 제품은 실용성을 최우선으로 고려하여 설계되었으며, 매끄럽고 긁힘 방지 기능이 있는 모서리와 손쉬운 장착을 위한 정밀한 구멍이 특징입니다. 얇으면서도 견고한 이 제품은 휘어짐과 균열에 강하며, 블랙 크롬 도금으로 은폐성을 높이고 지문 방지 기능을 강화했습니다. 화학적 안정성이 뛰어나 고압수 세척이나 용제 세척이 가능합니다. 텅스텐 합금 명판은 가공성이 우수하여 대량 맞춤 생산이 가능하며, 템플릿 패턴을 사용하여 비용을 절감할 수 있습니다.

#### 7.5.5 텅스텐 합금 의류 및 명품 태그

텅스텐 합금 의류 및 명품 브랜드 행택은 얇은 텅스텐 합금 시트로 만들어진 패션 태그로, 의류, 가방, 액세서리 등에 부착됩니다. 제품에 금속적인 느낌과 고급스러운 이미지를 더해주며, 무게감과 광택으로 브랜드 이미지를 향상시켜 기존의 플라스틱이나 종이 라벨과 차별화됩니다. 텅스텐 합금 시트는 브랜드 로고나 기하학적 형태로 정밀하게 절단되며, 표면은 브러싱, 미러링 또는 금도금 처리됩니다. 텅스텐 합금의 높은 경도는 마모에도 긁힘이나 변형을 방지하여 변함없는 광택을 유지 하도록 합니다 .

의류 행택에는 텅스텐 합금 태그가 얇은 체인이나 리본으로 옷에 부착되어 목직한 무게감으로 고급스러움을 더합니다. 브랜드명이나 한정판 번호를 레이저로 각인하면 더욱 특별한 느낌을 줍니다. 명품 핸드백 행택은 크기가 더 크고 양각 처리된 질감으로 입체감을 살렸으며, 제품의 색상에 맞춰 블랙 티타늄이나 로즈 골드도 도금됩니다. 주얼리 행택은 부식에 강한 텅스텐 합금을 사용하여 귀금속 주얼리와 함께 오랫동안 보존할 수 있도록 합니다. 이 제품은 미적 감각과 기능성을 모두 고려하여 디자인되었으며, 모서리는 둥글고 매끄럽게 마감되었고, 구멍은 찢어짐이나 파손을 방지하기 위해 섬세하게 제작되었습니다. 정밀하게 조절된 두께는 무게감과 부드러움의 균형을 이루며, 화학적 안정성은 향수나 땀의 부식 효과에 강합니다. 텅스텐 합금 소재의 가공성이 뛰어나 소량 생산이 가능하며, 3D 질감이나 보석 상감으로 예술적 가치를 더할 수 있습니다.

#### 7.5.6 고급 텅스텐 합금 명함 및 사회 예절 카드

텅스텐 합금 명함 및 예절 카드는 얇은 텅스텐 합금 시트를 가공하여 비즈니스 커뮤니케이션이나 사교 모임에서 사용할 수 있도록 명함이나 선물 카드 형태로 제작됩니다. 이 카드들은 금속 특유의 무게감과 정교한 장인 정신을 통해 전문성과 품격을 전달하며, 일반 종이 명함과 차별화되어 소지자의 개인적인 이미지를 향상시켜 줍니다. 텅스텐 합금 시트는 표준 명함 두께로 압연되며, 표면에는 이름, 직함, 연락처 정보가 레이저로 각인됩니다. 텅스텐 합금의 높은 경도는 지갑이나 명함 케이스에 마찰되어도 카드가 휘거나 마모되지 않고 영구적인 광택을 유지하도록 보장합니다.

고급 명함에 사용되는 텅스텐 합금은 시원하고 금속적인 느낌을 주어 꺼낼 때 시선을 사로잡습니다. 건메탈이나 실버 화이트 같은 도금은 전문적인 스타일에 어울리며, 브러시 처리된 질감은 은은한 고급스러움을 더합니다. 결혼식 청첩장, 감사 카드, 공식 초대장

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

등에 사용되는 사고용 카드는 우아한 글씨체나 디자인이 특징이며, 얇지만 견고하고 우편 발송이나 전달이 용이합니다.

이 카드는 모서리를 비스듬하게 처리하여 긁힘을 방지하고, QR 코드를 통해 개인 웹사이트나 디지털 명함으로 연결하는 등 세심한 디자인을 자랑합니다. 땀이나 알코올 얼룩에도 강한 화학적 안정성으로 정보가 선명하게 오래 유지됩니다. 텅스텐 합금 소재의 우수한 가공성 덕분에 양면 각인이 가능하여 한쪽 면에는 정보를, 다른 쪽 면에는 예술적인 디자인을 새겨 넣을 수 있어 소장 가치를 높여줍니다.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](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 8 장 텅스텐 합금판의 일반적인 문제점 및 해결책

### 8.1 텅스텐 합금 시트의 기본 재료 문제 및 해결책

텅스텐 합금 시트의 품질 저하는 주로 조성 분포, 결정 구조 및 물리적 특성의 편차에서 비롯됩니다. 이러한 문제들은 생산 및 적용 과정에서 재료의 균일성, 신뢰성 및 기능성에 영향을 미칠 수 있습니다. 조성 불균일성은 국부적인 성능 차이를 유발하고, 구조적 결함은 기계적 거동에 영향을 주며, 물리적 특성 편차는 후속 응용 분야와의 부적합성으로 이어질 수 있습니다. 해결책은 혼합 균일화, 열처리 보정 및 매개변수 조정과 같은 공정 최적화 및 제어에 중점을 둡니다. 이러한 문제의 원인은 종종 분말 특성, 소결 속도 및 가공 능력과 관련이 있으며, 체계적인 감지 및 피드백 메커니즘을 통해 효과적으로 완화할 수 있습니다.

근본적인 재료 문제를 해결하기 위해서는 예방과 수정을 결합하는 것이 중요하며, 원료 단계에서는 엄격한 순도 관리가, 성형 및 소결 단계에서는 정밀한 매개변수 설정이, 후처리 단계에서는 열기계적 제어가 필수적입니다. 화학적 원리가 해결의 방향을 제시하며, 확산은 균일성을 증진시키고 복원은 결함을 감소시킵니다. 문제 해결의 유연성은 합금 시스템에 따른 조정을 가능하게 합니다. 니켈-철 시스템에서는 강도 균형에 초점을 맞추고, 텅스텐-구리 시스템에서는 열전도율에 중점을 둡니다. 습도로 인한 불균일 산화와 같은 환경적 요인은 문제를 악화시킬 수 있으므로, 제어된 건조가 필요합니다.

#### 8.1.1 구성 및 구조 관련 문제

텅스텐 합금 시트는 주로 불균일한 원소 분포와 결정 결함이라는 문제점을 나타냅니다. 이러한 문제들은 미세구조의 2 상 평형 및 계면 결합에 영향을 미쳐 거시적인 물성에까지 영향을 미칩니다. 불균일한 조성은 분말 혼합 불량이나 소결 확산 부전에서 비롯되며, 구조적 결함에는 전위, 기공, 상 분리 등이 포함됩니다. 해결책은 화학적 확산 및 재결정 메커니즘을 활용한 균질화 방법과 복원 열처리에 중점을 둡니다. 문제점은 분광 분석 및 전자 현미경 관찰을 통해 조기에 발견하고 개입하여 폐기물을 줄일 수 있습니다.

이러한 문제를 해결하려면 전체 공정 체인의 조화로운 운영이 필수적입니다. 초기 편차를 줄이기 위해 전단계에서 분말을 최적화하고, 중간 단계 소결 과정에서 확산을 제어하며, 최종 공정에서 결함을 최소화해야 합니다. 특히 텅스텐 함량이 높은 합금의 경우, 결합재 함량이 낮을 때 균일성을 유지하기가 어려워 문제가 더욱 두드러집니다. 대기 순도와 같은 환경 제어 또한 문제의 심각성에 영향을 미칩니다.

##### 8.1.1.1 불균일한 텅스텐 합금 조성의 문제점 및 균질화 방법

텅스텐 합금의 불균일성은 주로 분말 혼합 불량, 불충분한 소결 확산, 또는 과도하게 큰 빌릿 크기로 인한 원소 편차에서 비롯됩니다. 이러한 불균일성은 결합재 상의 국부적인 농축이나 텅스텐 입자의 응집으로 나타나 밀도 분포와 기계적 평형에 영향을 미칩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



문제의 원인은 분말 입자 크기의 차이나 정전기 방전으로 인해 분리가 발생하는 혼합 단계에서 분명하게 드러납니다. 소결 과정에서는 불균일한 액상 흐름이 편석을 악화시키고, 화학적으로 결합하는 원소들의 확산 속도 차이가 이러한 기울기를 증폭시킵니다.

균질화 방법은 먼저 고에너지 볼 밀링 또는 분무 건조를 이용하여 분말 혼합을 향상시키고, 원소의 미세 분포를 촉진하는 사전 합금화를 수행합니다. 소결 과정에서는 장시간 유지 또는 부분 온도 제어를 통해 화학적 확산을 통한 원소 이동을 유도하고, 액상 유동을 최적화하여 균일성을 확보합니다. 고온 등방압 성형(HIP) 후처리는 이방성 압력을 가하여 폐쇄 기공 제거 및 확산 균질화를 가속화합니다. 어닐링은 분말을 더욱 균질화하고, 장시간 진공 유지는 용체화 처리 조정을 가능하게 합니다.

실제 적용 시, 대형 빌릿은 다중 구역 가열로와 결합하여 온도 구배를 줄이고, 소형 빌릿은 교반하여 대류를 향상시킵니다. 에너지 분산 분광법(EDS)과 같은 화학적 분석을 통해 불균일한 영역을 확인하고 매개변수 조정을 진행합니다. 예방 조치로는 응집체를 제거하기 위한 분말 전처리 및 유동성 균형을 맞추기 위한 배합비 미세 조정이 있습니다.

이 문제는 텅스텐 함량이 높은 합금에서 흔히 발생합니다. 균질화 처리를 통해 계면 결합력을 향상시키고 성능 편차를 줄일 수 있습니다. 분말은 습기 흡수 및 분리를 방지하기 위해 건조한 환경에 보관하십시오. 기계적 합금화와 같은 변형 공정을 통해 철저한 사전 균질화가 가능합니다.

#### 8.1.1.2 결정 구조 결합의 유형 및 복구 전략

텅스텐 합금 시트에는 전위, 기공, 결정립계 편석 및 비정상적인 석출물이 존재합니다. 이러한 결함은 가공 응력과 불완전한 소결에서 비롯되며 강도, 인성 및 열 안정성에 영향을 미칩니다. 전위 결함은 압연 경화로 인해 축적되고, 기공은 잔류 소결 및 불충분한 밀도로 인해 발생하며, 결정립계 편석은 불순물 농축을 초래하고, 석출물은 비정상적인 크기 또는 불균일한 분포를 나타냅니다. 화학적으로, 이러한 결함은 격자 주기를 파괴하고 결합 에너지를 감소시킵니다.

수리 전략은 주로 열처리를 활용하는데, 여기에는 전위를 제거하기 위한 진공 어닐링, 화학적 확산 소멸 또는 재배열, 그리고 슬립 시스템 복원을 위한 유지 시간 등이 포함됩니다. 기공 수리는 고온 등방압 성형을 통한 고압 폐쇄 후 가스 배출 후 치밀화를 통해 이루어집니다. 결정립계 편석은 원료를 정제하여 원인을 줄인 후 고온 균질화 및 확산 회석을 통해 해결합니다. 비정상적인 석출물은 균질성을 확보하기 위해 급속 냉각 및 응고를 하거나, 크기를 제어하기 위해 시효 처리를 합니다.

적용 전략에서 냉간 압연 결함은 중간 어닐링을 통해 단계적으로 보수하는 경우가 많으며, 소결 결함은 후가압 공정을 통해 개선합니다. 새로운 결함 발생을 방지하기 위해 화학적 진공 분위기를 사용합니다. 결함 유형을 관찰하고 개선 전략을 선택하는 데 전자 현미경을 활용합니다. 방향성 전위를 방지하기 위해 다방향 단조를 사용합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 8.1.2 텅스텐 합금 시트의 물리적 특성 편차 문제

텅스텐 합금 시트는 주로 밀도 및 경도 이상, 열전도율과 열팽창률 불일치 등의 문제를 겪습니다. 이러한 편차는 공정 변동 및 조성 차이에서 비롯되며, 적용 호환성과 신뢰성에 영향을 미칩니다. 밀도 편차는 불균일한 소결로 인해 발생하고, 경도 이상은 가공 경화 또는 어닐링 부족으로 인해 발생하며, 열전도율 저하는 액상 분리로 인해 발생하고, 열팽창률 불일치는 결합재 상 비율 불균형으로 인해 발생합니다.

이 솔루션은 매개변수 안정성과 사후 조정에 중점을 두고 있으며, 압력 보상을 통해 밀도를 보정하고, 열처리를 통해 경도를 제어하며, 열전도율 팽창률을 최적화합니다. 문제 감지는 다지점 측정 평균화를 통해 공정 단계를 추적하는 방식으로 이루어집니다.

#### 8.1.2.1 비정상적인 밀도 및 경도의 원인 및 조정 기술

텅스텐 합금 시트의 결함은 주로 불충분한 소결 또는 가공 중 불균일한 변형으로 인해 발생합니다. 낮은 밀도는 잔류 기공을 유발하고, 높은 경도는 냉간 가공 또는 과도한 어닐링 과정에서 축적됩니다. 화학적으로 이는 가공 내 연속상의 단절과 결정립계를 고정하는 전위의 경화를 초래합니다. 이러한 결함의 원인은 혼합 편식으로 인한 액상 내 국부적 차이 및 소결 온도 범위의 편차 증폭에 기인합니다.

기술적 밀도 조절은 고밀도 달성을 위한 고온 등방압 성형에 중점을 두고, 고압 폐쇄 셀 처리는 균일성을 향상시킵니다. 비정상적인 경도는 어닐링 또는 시효 강화로 해결하며, 화학적 확산 또는 석출 평형을 이용하여 회복시킵니다. 저밀도 빌릿은 2차 소결을 거치고, 고경도 빌릿은 등급 분류를 위해 중간 어닐링을 거칩니다.

기술적 응용 분야에서는 대형 빌릿의 비정상적인 밀도를 해결하기 위해 다중 압력 보수 공정이 사용되며, 소형 부품의 경도를 향상시키기 위해 압연 공정을 미세 조정합니다. 화학 분석을 통해 중량 감소 또는 압흔의 이상 정도를 평가합니다. 이러한 과정을 통해 분말 균일성 및 매개변수 안정성과 관련된 문제를 예방할 수 있습니다.

#### 8.1.2.2 열전도율과 열팽창률의 불일치에 관한 문제점 및 최적화 방안

텅스텐 합금 시트의 열전도율과 열팽창률의 불일치는 바인더 상의 분포 또는 비율 불균형에서 비롯됩니다. 낮은 열전도율은 구리 상의 불연속성을 나타내고, 높은 열팽창률은 바인더 과다를 의미합니다. 화학적으로 열전도율은 전자-포논 수송에 따라 달라지며, 이는 팽창된 상의 부피에 의해 결정됩니다. 이러한 문제는 불균일한 소결 흐름 또는 조성 불균형에서 발생합니다.

최적화된 열전도율은 구리 침투 또는 활성 소결을 통해 연속적이고 균일한 화학적 흐름 채널을 생성함으로써 향상됩니다. 열팽창 불일치는 텅스텐 결합 비율을 조정하여 해결하고, 폴리브렌 부분 치환을 통해 열팽창 계수를 미세 조정합니다. 열처리를 통해 분포를 균일화하고, 어닐링을 통해 계면에서의 확산을 촉진합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이 솔루션 적용 시, 텅스텐-구리 시스템의 열전도율은 용융 및 침투 후 최적화되고, 이어서 채널을 곧게 펴기 위한 압연 공정이 수행됩니다. 니켈-철 시스템의 팽창은 분리를 위한 어닐링을 통해 제어됩니다. 열전도율 측정기와 팽창계의 일치도는 최적화된 테스트를 통해 검증됩니다.

## 8.2 텅스텐 합금 시트의 생산 및 제조 과정에서의 문제점과 해결책

텅스텐 합금 시트 제조는 원자재부터 완제품까지 전체 공급망 최적화에 중점을 둡니다. 이러한 최적화에는 분말 야금 공정의 편차, 압연 성형의 불안정성, 품질 검사 및 관리의 어려움 등이 포함됩니다. 해결책은 공정 매개변수 조정, 장비 개선, 품질 피드백 메커니즘을 통해 얻을 수 있습니다. 제조 문제는 텅스텐의 높은 용점과 합금 원소의 확산 특성과 같은 재료 특성에서 비롯되는 경우가 많으며, 이는 불균일한 미세 구조나 성능 변동으로 이어집니다. 해결책은 예방과 사후 조치를 병행하는 데 중점을 둡니다. 분말 단계에서의 정제 제어는 초기 결함을 줄이고, 압연 단계에서의 패스 설계는 응력 축적을 완화하며, 검사 단계에서는 여러 가지 방법을 조합하여 정확도를 향상시킵니다. 제조 문제 해결에는 시스템 엔지니어링, 공정 체인 연계, 후공정에서의 진단 문제 해결, 후단에서의 피드백을 통한 진단 개선 등이 포함됩니다. 텅스텐 합금 시트는 밀도가 높기 때문에 박판 생산 시 균열이나 편차와 같은 문제가 더욱 두드러지게 나타나므로 세심한 관리가 필요합니다. 온도와 습도와 같은 환경적 요인은 제조 안정성에 영향을 미치므로 지속적인 관리가 필요합니다.

### 8.2.1 분말 야금 공정의 문제점

분말야금 공정에서 발생하는 문제는 주로 분말 준비 과정의 결함과 소결 공정의 오작동으로 나타납니다. 이러한 문제들은 빌릿의 품질과 최종 판재의 미세구조에 영향을 미치며, 원인을 파악하고 공정을 개선함으로써 해결할 수 있습니다. 분말 준비 과정의 결함은 불균일한 환원이나 불순물 혼입에서 비롯되며, 소결 공정의 오작동은 온도 제어 및 분위기 관리와 관련이 있습니다. 문제 진단에는 화학 분석과 현미경 관찰을 병행해야 하며, 개선 전략에는 매개변수 최적화 및 보조 기술 도입이 포함됩니다.

공정 문제 해결은 근본적인 단계에 집중합니다. 분말 정제는 결함 발생 원인을 줄이고, 소결 균질화는 밀도를 향상시킵니다. 텅스텐 합금의 내화성은 고온에서 문제를 악화시키므로 정밀한 제어가 필요합니다. 환경 청결 관리는 외부 오염을 방지합니다.

#### 8.2.1.1 분말 제조 과정의 결함 식별 및 관리 조치

분말 제조 과정에서 발생하는 결함의 식별 및 제어는 주로 텅스텐 분말 및 합금 원소 분말의 순도, 입자 크기, 형태를 대상으로 합니다. 응집, 불순물 과다, 넓은 입자 크기 분포와 같은 결함은 불균일한 혼합 및 소결 기공을 유발할 수 있습니다. 결함 식별은 레이저 입자 크기 분석기를 이용한 분포 측정, 주사 전자 현미경을 이용한 형태 관찰, 분광 분석을 통한 불순물 분석을 통해 이루어집니다. 화학적으로 산소나 탄소와 같은 불순물은 환원 과정에서 잔류하며, 입자 크기 불균일은 온도 변화에서 비롯됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 산화물의 수소 환원 과정에서 결함이 발견되었습니다. 저온에서 수증기 제거가 불충분하여 산소 잔류물이 생성되었고, 이는 고온에서 비정상적으로 성장하여 조대한 분말을 형성했습니다. 합금 분말 분무 과정에서 가스 혼입으로 인해 기공이 발생했습니다. 이러한 결함들을 식별 및 분류한 결과, 전자 현미경으로 관찰했을 때 응집된 입자 형태로 형태학적 결함이 명확하게 나타났으며, 불순물 스펙트럼 피크가 두드러지게 나타났습니다.

제어 조치는 먼저 단계별 온도 제어를 통해 입자 크기를 미세화하고, 수소 유량을 조절하여 수증기 농도를 제어하며, 화학적 환원제를 사용하여 산소 농도를 낮추는 등 환원 매개변수를 최적화합니다. 체질 및 공기 흐름 분류를 통해 비정상 입자를 제거하고, 불 밀링을 통해 응집체를 활성화 및 분해합니다. 전처리 수소 탈산소로를 사용하여 가스를 정화하고 불순물을 줄입니다. 분말 보관에는 건조, 불활성 가스 밀봉, 산화 및 응집 방지 조치가 포함됩니다. 본 응용 분야에서는 고순도 텅스텐 분말을 사용하여 텅스텐산암모늄 전구체의 다단계 재결정을 제어하고, 합금 분말은 카르보닐법을 이용하여 고순도 상태로 제조합니다. 입자 크기 분포를 좁힌 후 균일한 혼합을 보장하기 위해 매개변수를 반복적으로 모니터링하고 피드백을 적용합니다. 화학 세척 및 산 세척을 통해 표면 불순물을 제거하고, 건조 및 체질 과정을 거칩니다.

#### 8.2.1.2 소결 공정 결함 진단 및 공정 개선

소결 공정 결함의 진단 및 공정 개선은 주로 불충분 소결 기공, 과소결 조대화, 변형 편석과 같은 문제를 대상으로 합니다. 이러한 결함은 빌릿 구조의 밀도와 균일성에 영향을 미칩니다. 진단은 온도 기록, 밀도 측정 및 금속 조직 관찰을 통해 이루어집니다. 결함의 원인은 온도 범위 편차, 불충분 소결 시 액상 재배열 부족, 과소결 시 액상 과다로 인한 입자 성장, 높은 대기 습도로 인한 산화 개재물 생성 등에 있습니다.

진단 방법에는 용광로 온도 프로파일의 편차 분석, 금속 조직 단면에서의 기공 분포 관찰, 밀도 구배를 이용한 편석 검사 등이 포함됩니다. 휘발성 잔류물의 화학 분석을 통해 불순물 및 오작동 여부를 확인할 수 있습니다. 공정 개선은 온도 범위 조정, 분할 가열 및 유지를 통한 액상선 기간 최적화, 화학 첨가제를 사용하여 온도 범위를 확장하는 것에서 시작됩니다. 분위기 개선에는 이슬점 제어 및 유동성 향상이 포함되며, 수증기 제거를 통해 산화를 줄입니다. 고온 등방압 성형(HIP)은 소결 결함을 해결하고, 고압 밀폐형 셀 구조는 치밀화를 향상시킵니다. 용광로 적재 개선에는 변형을 줄이기 위한 수직 현수 또는 모래층 지지 방식이 포함됩니다. 실제 적용에서는 통합 고온 성형을 통해 고밀도 합금 소결을 개선하고 진단 후 매개변수를 미세 조정합니다. 화학적 순도 향상 및 사전 탈기는 가스 결함을 줄입니다. 진공 소결과 같은 변형 공정은 수소를 대체하여 수증기 문제를 해결합니다.

#### 8.2.2 압연 및 성형 관련 문제

압연 및 성형 과정에서 발생하는 주요 문제는 열간 압연 균열과 불안정한 냉간 가공 변형입니다. 이러한 문제는 판재의 건전성과 두께 균일성에 영향을 미치며, 원인 분석 및 제어 방법을 통해 해결할 수 있습니다. 열간 압연 균열은 응력 집중에서 비롯되며, 냉간

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

가공 변형은 경화 축적을 유발합니다. 진단에는 표면 및 단면 관찰, 패스 설계 개선, 어닐링 등이 포함됩니다. 문제 해결은 변형 조화, 열간 압연 중 측면 압력 방지, 냉간 가공 어닐링 중 응력 해소에 중점을 둡니다. 텅스텐 합금의 높은 경도는 박판 압연에서 이러한 문제를 더욱 두드러지게 만듭니다. 환경 온도 제어는 변형에 영향을 미칩니다.

#### 8.2.2.1 열간압연 균열의 원인 및 예방 방법

열간압연 균열 발생의 주요 원인은 고온 응력 집중과 불균일한 미세구조입니다. 균열은 모서리나 표면에서 시작하여 전파됩니다. 화학적으로는 약한 계면에서 응력이 높아져 텅스텐 입자의 취성을 악화시킵니다. 이러한 균열 발생 원인은 빌릿의 기공이나 편석에 있으며, 압연 감소율이 클수록 응력이 인성을 초과하게 됩니다.

예방적 방법은 우선 빌릿 소결을 최적화하여 밀도를 높이고 초기 결함을 줄이는 데 중점을 둡니다. 압연 공정은 점진적인 감압 방식으로 진행되며, 초기에는 형상 조정을 위해 소량의 감압을 실시하고 이후에는 미세 조정을 합니다. 화학적 윤활과 고온 코팅은 마찰 응력을 감소시킵니다. 측면 가이드 롤은 판재의 형상을 고정하고 가장자리 인장 응력을 방지합니다. 중간 가열은 균일한 온도를 유지하고 가소성을 회복시킵니다. 실제 적용에서는 고밀도 합금을 사용하여 예방적 클래딩 압연을 통해 공기를 차단하고 응력을 완충합니다. 균열 형상을 진단하고 관찰하여 표면 균열은 윤활을 조정하고 내부 균열은 빌릿 품질을 개선하여 해결합니다. 일부 열간 압연 공정을 온간 압연으로 대체하는 변형 방식도 있습니다.

#### 8.2.2.2 냉간 가공 변형의 분석 및 제어

냉간 가공 변형의 분석 및 제어는 주로 두께 정확도와 표면 품질에 영향을 미치는 경화 축적 및 뒤틀림 현상을 대상으로 합니다. 이러한 분석은 응력 곡선 및 금속 조직 관찰을 통해 이루어집니다. 변형의 원인은 전위 증식, 화학적으로는 결합상(binder phase)의 제한된 소성, 그리고 텅스텐 입자의 변형 저해로 인한 국부적 변형 등입니다.

변형 제어 방법에는 소량의 패스를 자주 줄이는 것, 경화를 해제하기 위한 중간 어닐링, 슬립을 복원하기 위한 화학적 확산 등이 있습니다. 윤활제를 균일하게 도포하면 마찰 변형을 줄일 수 있습니다. 인장 제어를 통해 판재 형상을 안정화하고 중간 파동 및 가장자리 파동 발생을 방지합니다. 분석 후 압연 공정을 조정하며, 경화도가 높을 경우 어닐링 시간을 늘립니다. 적용 제어에서는 균일한 응력 분포를 보장하기 위해 횡압연을 통해 박판 변형을 제어합니다. 높은 화학적 순도는 불순물과 전위 고정을 줄입니다. 다양한 방법으로는 온간 접합과 냉간 접합이 있습니다.

#### 8.2.3 품질 검사 및 관리 문제

품질 검사 및 관리의 주요 과제는 비파괴 검사(NDT)와 치수 공차 편차입니다. 이러한 문제들은 완제품의 합격 및 적용 정확도에 영향을 미칩니다. 해결책은 대체 방법과 기술 개선을 통해 얻을 수 있습니다. NDT의 어려움에는 매트릭스 간섭과 공정 변동으로 인한

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



치수 편차가 포함됩니다. 관리는 온라인 모니터링 및 피드백 조정에 중점을 둡니다. 문제 해결은 여러 방법을 결합하여 사용하고, 파괴적 샘플링을 NDT 솔루션으로 대체하며, 정밀 장비를 사용하여 치수 편차를 보정하는 데 중점을 둡니다. 텅스텐 합금의 높은 밀도로 인해 얇은 판재에 대한 검사가 어렵습니다. 환경 교정 또한 정확도에 영향을 미칩니다.

### 8.2.3.1 비파괴 검사 기술 적용의 과제 및 대안

비파괴 검사(NDT) 기법 적용의 주요 어려움은 텅스텐의 높은 밀도로 인해 X 선 투과가 저해되고 초음파가 감쇠된다는 점입니다. 이러한 어려움 때문에 기공이나 균열과 같은 내부 결함을 식별하기 어렵고, 화학적 밀도 구배가 신호를 방해합니다. 이러한 문제는 두꺼운 시편에서 더욱 두드러지며, 얇은 시편에서는 표면 간섭이 더 크게 나타납니다.

이 대안 솔루션은 X 선 컴퓨터 단층촬영(CT)을 이용하여 에너지 침투를 조절하고, 높은 화학적 순도를 통해 배경 잡음을 줄입니다. 초음파 위상 배열 기술은 빔 초점을 최적화하여 기존 프로브를 대체합니다. 와전류 검출은 표면 균열을 감지하는 데 사용되며, 자성 분말은 자성 합금 검출을 지원합니다. 이 솔루션은 X 선 내부 검사와 초음파 보정을 결합한 것입니다.

### 8.2.3.2 치수 공차 편차 처리 및 정확도 향상

치수 공차 편차의 처리 및 정밀도 향상은 주로 압연 변동 및 열 효과로 인한 두께, 폭 또는 평탄도 편차를 대상으로 합니다. 이러한 편차는 각 패스에서 불안정한 압연 압력과 불균일한 응력 해소, 그리고 화학적 관점에서 증폭된 열팽창 차이로 인해 발생합니다.

이 가공 방법에는 롤 간격 조정을 위한 온라인 측정 및 피드백, 정밀 압연기를 통한 자동 보정 등이 포함됩니다. 열간 평탄화 공정은 뒤틀림을 교정하고, 화학적 열처리 공정은 잔류 응력을 제거합니다. 고강성 롤 시스템과 장력 제어를 통해 탄성 변형을 줄여 정밀도를 향상시켰습니다.

얇은 판재의 편차를 레이저 측정으로 실시간 조정하는 응용 분야에서는 두꺼운 판재 단조를 통해 기존 공차를 보정하기 위한 연삭 작업을 수행할 수 있습니다. 높은 화학적 순도는 열 효과로 인한 편차를 줄여줍니다. CNC 롤링과 같은 변형 공정도 있습니다.

## 8.3 텅스텐 합금 시트의 적용, 성능 문제 및 해결책

텅스텐 합금 시트의 주요 관심사는 다양한 분야에서의 실제 성능입니다. 이러한 성능에는 고온 피로, 진동 및 충격, 차폐 효율, 생체 적합성, 전기 전도성 및 자성, 부식 및 산화 등이 포함됩니다. 해결책은 메커니즘 분석, 설계 최적화 및 재료 개량을 통해 얻을 수 있습니다. 응용 분야에서의 문제점은 종종 환경 조건과 재료 특성 간의 불일치에서 비롯됩니다. 고온 환경에서는 피로 파손이 흔히 발생하며, 방사선 차폐 효율 저하를 고려해야 하고, 의료 기기에서 비정상적인 전기 전도성은 기능에 영향을 미칠 수

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있습니다. 성능 문제 해결은 예방 및 수정, 설계 지침을 위한 메커니즘 연구, 적응성 향상을 위한 개량 기술에 중점을 둡니다.

체계적인 문제 해결 방식은 미세 구조 조정부부터 거시적인 보호 코팅에 이르기까지 다양한 규모의 개입에 반영됩니다. 항공우주 분야에서는 피로 저항성과 충격 저항성이 중요시되고, 방사전 차폐 분야에서는 효율 회복 및 안전성 향상이 핵심이며, 전자 및 의료 분야에서는 전도성 안정성과 내식성이 우선시됩니다. 텅스텐 합금 시트의 이중상 구조는 이러한 솔루션에서 중요한 역할을 하는데, 텅스텐 입자는 견고한 지지력을 제공하고 결합체는 인성을 조절합니다. 온도 변화나 매체 노출 증폭과 같은 환경적 요인은 맞춤형 솔루션을 요구합니다.

### 8.3.1 항공우주 분야에서 텅스텐 합금 시트의 응용 문제

텅스텐 합금 시트는 고온 환경에서 피로 및 진동/충격 하중을 받습니다. 이러한 문제들은 재료의 장기적인 안정성과 구조적 건전성에 영향을 미치며, 강화 처리 및 내충격성 설계를 통해 완화됩니다. 항공우주 부품은 반복적인 열응력과 기계적 하중을 받으며, 평형추 또는 열 관리 재료로 사용되는 텅스텐 합금 시트는 이러한 문제들을 해결해야 합니다. 문제 분석은 메커니즘 규명 및 설계 최적화에 중점을 둡니다. 고온 피로는 미세 손상의 축적에서 비롯되며, 진동/충격은 응력과 전파와 관련이 있습니다.

응용 분야 문제를 해결하는 데에는 재료 선택과 공정 개선도 포함됩니다. 텅스텐 합금은 항공우주 분야에 적합한 밀도와 탄성 계수의 균형을 제공하지만, 가혹한 환경으로 인해 맞춤형 솔루션이 필요합니다. 텅스텐-니켈-철 시스템은 항공우주 부품에 흔히 사용되며, 결합재가 변형을 조절합니다. 환경 시뮬레이션 테스트는 솔루션 개발에 도움을 주고, 가속 피로 테스트는 수명을 평가합니다.

#### 8.3.1.1 고온 피로 파괴의 메커니즘 및 강화 처리

고온 피로 파괴의 주요 메커니즘은 반복적인 열기계적 하중 하에서 발생하는 미세 손상의 진행입니다. 텅스텐 합금 시트에서 이러한 메커니즘은 결정립계 슬립, 전위 상승, 미세 균열 발생 및 전파로 나타납니다. 화학적으로는 계면에서의 원소 편석이 결합 강도를 감소시키고, 텅스텐 입자 주변의 응력 집중이 손상을 유발합니다. 이 과정은 단계적으로 진행됩니다. 초기에는 전위가 증식하여 지속적인 밴드를 형성하고, 중간 단계에서는 미세 기공이 합쳐지며, 후기에는 균열이 급속도로 전파되어 파괴에 이릅니다. 열 사이클링은 이러한 메커니즘을 악화시키는데, 불균일한 팽창으로 인해 열 응력이 발생하고, 산화층 형성은 표면을 더욱 약화시킵니다.

강화 처리에는 먼저 합금 설계, 희토류 원소 또는 탄화물 도핑을 통한 결정립계 분산 및 고정, 그리고 편석 원소의 화학적 제어를 통해 슬립률을 감소시키고 피로 한계를 높이는 과정이 포함됩니다. 열처리, 용체화 처리 및 시효 처리를 통해 미세상을 석출시켜 결합상 인성을 강화하는 동시에, 조대화를 방지하기 위해 처리 온도 범위를 제어합니다. 질소

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또는 탄소 이온 주입과 같은 표면 강화 처리는 구배층을 형성하고, 화학적 확산은 표면 경도를 향상시키고 균열 전파를 완충합니다.

가공 응용 분야에서 다중 패스 어닐링은 미세 구조를 복원하고, 화학적 순도 관리는 불순물로 인한 손상을 줄입니다. 메커니즘 검증에는 피로 시험을 통해 사이클을 모사하고 파괴 특성을 관찰하여 조정하는 과정이 포함됩니다. 표면 롤링과 같은 변형은 압축 응력을 발생시켜 인장 피로를 상쇄합니다.

### 8.3.1.2 진동 및 충격 하중과 충격 저항 설계의 문제점

진동 및 충격 하중의 주요 문제는 응력과 전파로 인한 국부적 손상에 있습니다. 텅스텐 합금판에서는 이러한 현상이 미세 균열 발생 및 전파, 화학적으로 취약한 계면에서의 응력 집중, 그리고 텅스텐 입자의 취성으로 인한 충격 효과 증폭으로 나타납니다. 이는 진동 주파수 공진과 높은 순간 충격 하중이 중첩되고, 에너지를 흡수할 만큼 충분한 재료 감쇠가 이루어지지 않아 피로가 가속화되는 것이 원인입니다.

충격 방지 설계는 우선 텅스텐 합금 시트를 폴리머와 적층하고 화학 결합제를 사용하여 충격파를 완충하는 복합 구조를 최적화합니다. 방향성 섬유를 통해 방향 강도를 향상시키는 질감 제어 기술이 설계에 통합되었습니다. 탄성 폴리머와 같은 표면 코팅은 에너지를 흡수하고, 화학적 호환성은 안정적인 접착력을 보장합니다.

설계 적용 분야에서는 모의 진동 시험을 통해 문제를 평가하고 응력 분산을 위해 두께 분포를 조정합니다. 메커니즘 분석 및 유한 요소 모델링은 손상 지점을 예측하여 두께 증가 또는 보강을 위한 지침을 제공합니다. 경사 밀도 설계와 같은 변형은 점진적인 충격 흡수를 가능하게 합니다. 요컨대, 진동 및 충격 하중과 충격 저항 설계 문제는 동적 응답 엔지니어링 전략을 구현합니다. 완충재 최적화를 통해 텅스텐 합금판의 진동 저항성을 향상시켜 항공우주 분야에서의 안정성을 확보할 수 있습니다. 설계 개선을 통해 충격 손상을 점진적으로 완화하여 진동 환경에서 재료의 신뢰성을 향상시킬 수 있습니다.

### 8.3.2 방사선 차폐에 텅스텐 합금 시트를 적용할 때 발생하는 문제점

텅스텐 합금 시트는 효율 저하 및 생체 적합성 문제를 야기합니다. 이러한 문제들은 차폐 효과와 안전한 사용에 영향을 미치며, 효율 회복 및 안전성 개선을 통해 해결할 수 있습니다. 방사선 차폐 응용 분야에서 콜리메이터 또는 보호층으로 사용되는 텅스텐 합금 시트는 장기간 방사선 노출을 견뎌야 합니다. 효율 저하는 구조적 변화에서 비롯되며, 생체 적합성 문제는 표면 반응과 관련이 있습니다.

응용 분야 문제를 해결할 때는 재료의 안정성과 최적화된 보호 기능을 중점적으로 고려해야 합니다. 텅스텐은 밀도가 높아 차폐 두께 측면에서 유리하지만, 다양한 방사선 환경에 맞는 맞춤형 솔루션이 필요합니다. 텅스텐-니켈-구리 시스템은 차폐에 널리 사용되며, 비자성 특성으로 의료 기기와의 호환성이 뛰어납니다. 환경 시뮬레이션 테스트를 통해 최적의 솔루션을 도출하고, 방사선량 테스트를 통해 변화를 평가합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.3.2.1 차폐 효율 감소 및 효율 회복의 원인

차폐 효율 저하의 주요 원인은 방사선에 의한 구조적 변화, 즉 팽창, 기공 형성 및 상전이에 있습니다. 텅스텐 합금 시트에서는 이러한 변화가 밀도 감소와 감쇠 계수 변동으로 나타납니다. 화학적으로는 방사선에 의해 변위된 원자가 공극 클러스터를 생성하고, 계면 손상은 산란을 증폭시킵니다. 이러한 원인과 과정은 방사선량에 따라 달라지는데, 낮은 방사선량에서는 미세한 결함이 발생하고, 중간에서 높은 방사선량에서는 거시적인 변형이 발생합니다.

효율 회복은 먼저 열처리를 통해 결함을 복구하고, 화학적 확산을 통해 공극을 치유하며, 제어된 어닐링 온도를 통해 이차상 석출을 방지함으로써 이루어집니다. 보호 표면 코팅은 입사 방사선을 차단하고, 화학적으로 불활성인 층은 에너지를 흡수합니다. 회복 과정 중에는 결함을 고정하고 팽창을 줄이기 위해 안정제가 첨가됩니다.

### 8.3.2.2 생체 적합성 위험 평가 및 안전성 개선

생체 적합성 위험에 대한 평가 및 안전성 개선은 주로 표면 용출 및 조직 반응에 중점을 둡니다. 텅스텐 합금 시트에서 이러한 위험은 결함 성분 제한적인 용해로 나타나며, 화학적으로는 니켈 또는 구리 이온이 알레르기를 유발할 수 있습니다. 평가는 용출 시험 및 세포 적합성 시험을 통해 수행됩니다. 이러한 위험의 원인으로는 활성상이 노출되는 표면 산화 또는 마모 등이 있습니다.

안전성 향상은 안정적인 산화막을 형성하는 표면 부동화 처리로 시작하여, 이온 이동을 차단하기 위한 화학적 양극 산화 또는 도금으로 이어집니다. 평가 기준에는 세포 부착 및 증식 속도에 대한 생물학적 시험과 활성 성분의 비율을 줄이기 위한 제형 개선이 포함됩니다.

### 8.3.3 전자 및 의료 기기 분야에서 텅스텐 합금 시트의 응용 문제

텅스텐 합금 시트는 비정상적인 전기 전도성과 자성을 나타낼 뿐만 아니라 부식 및 산화 문제도 겪습니다. 이러한 문제들은 전도성 안정성과 기기 수명에 영향을 미치며, 문제 해결, 수정 및 보호 코팅을 통해 해결할 수 있습니다. 전자 의료 기기 분야에서 방열판이나 차폐재로 사용되는 텅스텐 합금 시트는 전도성 변동과 산화 문제를 해결해야 합니다. 이러한 이상 현상은 불순물이나 표면 변화에서 비롯되며, 부식은 매체 침식과 관련이 있습니다.

응용 문제 해결은 문제 해결 메커니즘과 코팅 최적화에 중점을 둡니다. 텅스텐-구리 시스템은 우수한 열전도율과 전기전도율을 보여 전자 제품에 널리 사용됩니다. 환경 테스트는 해결책을 제시하고, 부식 테스트는 변화 평가를 가속화합니다. 요약하자면, 이 응용 문제 해결은 전기화학적 공정의 재료 안정성을 입증하고, 개선 방안을 통해 기기 내 텅스텐 합금 시트의 안정적인 성능을 보장하며, 전자 의료기기 분야의 기술 발전을 촉진합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 8.3.3.1 전기 전도도 및 자기 이상 현상 조사 및 재료 변형

전기 전도도 및 자기 이상 현상의 주요 원인은 불순물 혼입과 상 조성의 변동에 있습니다. 텅스텐 합금 시트에서는 이러한 요인들이 전도성 채널의 단절이나 우발적 자화로 나타납니다. 화학적으로 산소 불순물은 절연층을 형성하고, 철 원소의 편석은 자기 도메인을 생성합니다. 이상 현상 조사는 저항 측정 및 히스테리시스 곡선 분석을 통해 불순물 또는 편석 영역을 찾아냅니다.

재료 개질은 화학적 환원 전처리를 통해 산소와 철 함량을 줄여 원료를 정제하는 것에서 시작됩니다. 개질된 합금은 전도성을 향상시키기 위해 구리 함량을 조절하고, 몰리브덴을 첨가하여 자성을 약화시킵니다. 표면 세척을 통해 전도성을 복원하고, 화학적 연마를 통해 산화물을 제거합니다.

### 8.3.3.2 부식 및 산화 문제에 대한 보호 및 코팅 기술

부식 및 산화 방지 코팅 기술은 주로 매체 침식과 공기 산화를 대상으로 합니다. 이러한 문제는 텅스텐 합금 시트에서 표면 피팅 및 성능 저하로 나타나는데, 이는 결합상이 우선적으로 반응하여 다공성 층을 형성하기 때문입니다. 이러한 현상의 원인은 습한 환경이나 고온의 산소 노출입니다.

보호 코팅 기술은 먼저 고밀도 피막을 형성하기 위해 무전해 니켈-인 도금을 실시한 후, 균일한 코팅을 위해 화학적 자가촉매 반응을 진행합니다. 그 후, 경도와 불활성을 향상시키기 위해 크롬-질소 또는 DLC 를 이용한 진공 도금을 수행합니다. 보호 전처리로 표면을 부동태화하고, 산화막이 기판을 안정화합니다.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

#### 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

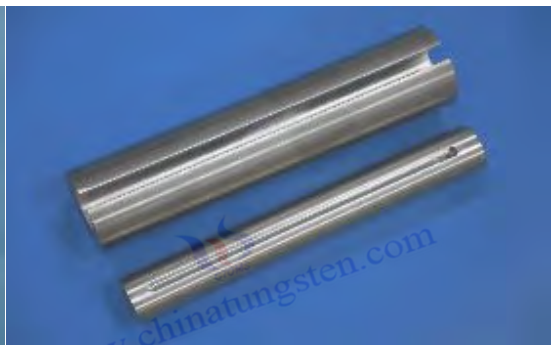
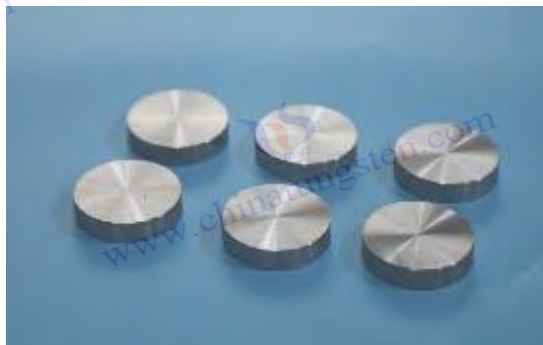
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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)

## 총수

### 부록 A: 중국 텅스텐 합금 시트 표준

중국 텅스텐 합금판 표준은 주로 국가 비철금속 표준화 기술위원회(TC243) 및 산하 위원회의 책임 하에 있으며, 텅스텐 합금의 화학 조성, 물리적 특성, 가공 기술, 품질 관리 등 다양한 측면을 포괄합니다. 이러한 표준은 국가 산업 정책 및 광물 자원 계획을 기반으로 제정되어 산업 현장에서 텅스텐 합금판의 신뢰성과 일관성을 보장합니다. 표준은 고순도 텅스텐 분말 사용, 액상 소결 공정의 표준화, 산소, 탄소, 인 등의 불순물 함량의 엄격한 제한을 강조하여 구조적 결함 및 성능 저하를 방지합니다. 표준 체계는 국가 표준(GB/T 시리즈), 산업 표준(YS/T 시리즈), 기업 표준으로 구성되며, 텅스텐-니켈, 텅스텐-니켈-구리, 텅스텐-구리 등 일반적인 합금 시스템에 적용됩니다.

일반적으로 표준에는 조성 범위, 밀도 분포, 경도 지수 및 치수 공차가 명시되어 있습니다. 소결 후, 빌릿은 균일성을 검증하기 위해 열기계적 가공을 거쳐야 합니다. 텅스텐 합금 측정의 정확성을 위한 신케린 중량 측정법과 같은 화학 분석 방법이 표준화되어 정확성을 보장합니다. 또한 표준은 환경 및 안전 요구 사항을 다루며, 원자재 조달의 합법성과 지속가능성을 강조하고 불법 광물 제품의 사용을 방지합니다. 최근 텅스텐 산업 진입 요건이 강화됨에 따라 표준에는 수출 통제 요소가 포함되어 특정 텅스텐 합금 제품의 가공 및 거래에 대한 준수 지침을 제공하고 있습니다. 텅스텐 합금 시트 표준의 시행은 분말 야금에서 완제품 시트에 이르기까지 전체 공정의 표준화를 촉진하여 고급 제조 분야에서의 응용 확대를 지원합니다.

### 국가 표준(GB/T 시리즈)

중국 국가시장감독관리총국과 중국 국가표준화관리국에서 발행한 국가표준(GB/T 시리즈)은 중국 내 텅스텐 합금 시트의 핵심 규격입니다. 이 표준은 텅스텐 합금의 일반적인 요구사항, 시험 방법 및 성능 지표를 포괄합니다. 국가표준은 텅스텐 합금 시트의 화학 조성 분석, 가공 및 품질 검사에 적용되어 밀도, 경도 및 열 안정성의 균형을 보장합니다. 텅스텐 합금 시트 국가표준은 텅스텐 분말의 순도부터 소결 온도 범위 제어에 이르기까지 분말 야금 공정의 표준화를 강조합니다. 화학적으로는 텅스텐 함량비, 결합상 비율 및 불순물 허용치를 규정하여 2 상 미세구조의 균일한 분포를 달성합니다.

표준 제정 과정에는 비철금속 연구 기관과 제조업체를 포함한 여러 당사자의 협력이 포함되었으며, 국제 표준을 참고하되 중국의 자원 특성을 반영했습니다. 텅스텐 합금 시트에 대한 GB/T 표준은 텅스텐 봉, 판, 합금판에 대한 일반 사양을 포함하며, 표면 마감, 두께 공차 및 어닐링 조건을 명시합니다. 삼산화텅스텐 함량 측정과 같은 화학적 시험 방법에는 정확성을 보장하기 위해 텅스텐산암모늄 중량 측정법을 사용합니다. 또한 이 표준은 열처리 요건을 다루며, 어닐링 공정에서 재결정 온도를 최적화하여 결정립 조대화가 기계적 특성에 미치는 영향을 방지합니다. 수출 지향 표준에는 국제 무역 규정

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



준수를 지원하기 위해 텅스텐-니켈-철 또는 텅스텐-니켈-구리 합금 사양에 대한 보고 요건을 명시하는 규제 조항이 포함되어 있습니다 .

판재에 이르기까지 다양한 크기의 텅스텐 합금 시트를 정밀 기기 및 열 관리 분야에 사용하는 방법을 안내합니다 . 표준 개정 주기에는 나노 강화 합금의 도입과 같은 기술 발전이 반영됩니다. 표준을 시행하는 기업은 공인 시험소의 검증을 받아야 하며, 구성 및 밀도 테스트를 위해 배치 샘플링을 수행해야 합니다. 환경 지속 가능성 또한 표준에 포함되어 있으며, 자원 소비를 줄이기 위해 텅스텐 분말의 재활용을 장려합니다.

## 산업 표준(YS/T 시리즈)

산업정보화부의 감독 하에 제정된 산업 표준(YS/T 시리즈)은 텅스텐 합금 시트의 화학 분석 및 가공에 대한 보다 상세한 기술 규격을 제공합니다. 이 표준은 텅스텐-구리 합금 및 텅스텐계 고밀도 합금 시트 생산에 적용 가능하며, 정확한 화학 조성 측정과 일관된 성능을 보장합니다. YS/T 표준은 용해 및 침전 분리를 통해 고정밀 분석을 가능하게 하는 신케르세틴 중량 측정법과 같은 텅스텐 함량 측정 방법에 중점을 두고 있으며, 이는 텅스텐-구리 합금의 텅스텐 함량 검증에 적합합니다. 또한, 시료 준비, 기기 교정 및 오차 관리에 대한 구체적인 내용을 명시하고 있으며, 화학적으로는 매트릭스 간섭 제거에 중점을 두고 있습니다.

텅스텐 합금 시트 산업 표준에는 분말 혼합부터 액상 소결을 위한 온도 프로파일, 입자 재배열을 촉진하기 위한 액상량 최적화에 이르기까지 분말 야금 공정에 대한 세부 사항이 포함됩니다. YS/T 시리즈 표준은 텅스텐-니켈-철 및 텅스텐-니켈-구리 시스템의 시트 사양을 다루며, 경도 분포 및 표면 거칠기 요구 사항을 명시하고 금형 및 차폐 용도에 대한 가공 적응성을 지원합니다. 이 표준은 국가 계획을 참조하여 개발되었으며, 원자재의 합법성과 환경 규정 준수를 보장하기 위한 자원 접근 조건을 포함합니다.

YS/T 표준은 전자 및 의료 분야에서 사용되는 텅스텐 합금 시트의 품질 관리, 치수 공차 및 열전도율 시험 방법의 표준화를 위한 지침을 제공합니다. 개정 과정에서는 사용자 의견을 반영하고 텅스텐-몰리브덴 복합재와 같은 신흥 합금에 대한 조항을 추가했습니다. 이 표준을 시행하려면 기업은 자체 실험실을 구축하고 시험 장비를 정기적으로 교정해야 합니다. 환경 관리 측면에서 이 표준은 탄소 배출량 감소를 위해 저에너지 소결 기술의 사용을 권장합니다.

## 기업 및 지역 표준

중국에서 텅스텐 합금 시트를 생산할 때 기업 및 지역 표준은 보완적인 규정입니다. 비철금속 기업이나 지역 산업 협회에서 개발한 이 표준들은 특정 합금 시스템이나 적용 시나리오에 대한 유연한 지침을 제공합니다. 이러한 표준은 국가 프레임워크를 기반으로 하지만, 대량 생산에 적합하도록 기업의 공정 경험을 반영합니다. 주저우 초경합금 그룹의 내부 규격과 같은 기업 표준은 텅스텐 합금 시트의 압연 공정 및 어닐링 조건을 규정하고, 결합재 상의 분포를 화학적으로 최적화하여 인성을 향상시킵니다. 후난성,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



장시성 등 텅스텐 생산 지역에서는 지역 표준이 일반적이며, 광물 자원 계획과 연계하여 원자재 추적성 및 불순물 관리를 강조합니다.

이러한 표준은 텅스텐-구리 합금의 화학 분석 방법을 포괄하며 미량 원소 측정까지 확장하여 수출 제품의 적합성 검증에 적용됩니다. 기업 표준은 품질 관리 시스템을 강조하고 ISO 9001 인증을 생산 공정에 통합하며 일관성을 보장하기 위한 배치 추적을 포함합니다. 지역 표준은 텅스텐 기반 고밀도 합금에 대한 표준화된 사양과 같은 지역 협력을 촉진하여 공급망 최적화를 지원합니다.

응용 분야 측면에서 기업 표준은 정밀 기기용 텅스텐 합금 시트의 맞춤 제작을 위한 지침을 제공하며, 지역 표준은 친환경 생산을 촉진합니다. 개정 사항은 시장 변화에 따라 역동적으로 반영되며 고엔트로피 합금 조항을 포함합니다. 구현 과정에서 내부 감사를 통해 표준 준수 여부를 검증합니다. 환경 지속 가능성은 재활용 및 폐분말 배출량 감소에 중점을 둡니다.

## 부록 B 텅스텐 합금 시트에 대한 국제 표준

텅스텐 합금 시트에 대한 국제 표준은 주로 ASTM International 및 SAE International과 같은 기관에서 개발합니다. 이러한 표준은 고밀도 텅스텐 합금 시트의 화학 조성, 기계적 특성 및 시험 방법을 포괄하는 전 세계적으로 통일된 규제 체계를 제공하여 항공우주, 의료 및 전자 분야에서 재료의 상호 운용성을 보장합니다. 국제 표준은 ASTM B777의 등급 시스템과 같이 텅스텐 함량 및 결합제 상 유형에 따른 사양을 정의하는 고밀도 텅스텐 기반 합금의 분류를 강조합니다. 표준 개발 과정에는 여러 국가의 전문가들이 협력하며 분말 야금 공정에 대한 일반적인 요구 사항을 참조합니다.

국제 표준의 화학 분석 부분은 텅스텐 함량 측정 및 불순물 한도를 표준화하여 글로벌 무역 인증을 지원합니다. 밀도 분포, 경도, 열전도율을 포함한 성능 지표는 판재 압연 및 열처리 검증에 적용 가능합니다. 또한, 이 표준은 ISO 9001과 같은 품질 관리 시스템을 포함하여 생산 일관성을 보장합니다. 바세나르 협정과 같은 수출 통제 기준은 텅스텐 합금의 국제 유통에 영향을 미치며, 규정 준수 보고를 강조합니다.

응용 분야에서 텅스텐 합금 시트는 방사선 차폐 및 방열판에 사용되며, 국제 표준은 치수 공차 및 표면 조도 요구 사항을 통해 정밀 가공을 지원합니다. 개정 주기에는 기술 발전이 반영되고 복합 합금에 대한 조항이 포함됩니다. 시행에는 제 3자 연구소 인증 및 배치 테스트 준수가 필수적입니다. 환경 지속 가능성을 위해 재활용이 권장됩니다.

## ASTM 국제 표준

ASTM 국제 표준은 중국에서 수출되는 텅스텐 합금 시트의 핵심 규격입니다. 미국 재료시험학회(ASTM)에서 개발한 이 표준은 ASTM B777의 텅스텐-니켈-철 및 텅스텐-니켈-구리 합금 분류와 같은 텅스텐 고분자 합금 시트에 대한 표준 규격을 다루며, 밀도 등급 및 기계적 요구 사항을 정의합니다. 이 표준은 시트의 생산 및 시험에 적용되며,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 함량 범위, 결합제 상 비율 및 불순물 허용 기준치를 화학적으로 명시하여 2 상 미세구조의 균형을 보장합니다.

ASTM B777 은 텅스텐 합금 시트의 화학적 조성 및 물리적 특성을 상세히 규정합니다. 소결 후, 시트의 균일성을 확인하기 위해 열간 압연을 실시해야 합니다. 이 표준에는 텅스텐 함량 측정을 위한 신시내티엘 중량 측정법과 같은 시험 방법이 포함되어 있으며, 정밀 관리를 지원합니다. 원래 순수 텅스텐 시트 및 포일을 규정했던 ASTM B760 은 이제 합금 시트의 압연 공정 사양까지 확장되었습니다.

응용 분야에서 ASTM 표준은 항공우주 및 의료용 차폐재에 사용되는 텅스텐 합금 시트의 사용을 안내하며, 치수 공차 및 경도 사양은 가공 적응성을 지원합니다. 개정 과정에는 전 세계적인 의견이 반영되었으며 방사선 내성 조항이 포함되었습니다. 구현 과정에서 회사 인증 연구소의 검증과 배치 샘플링을 통해 규정 준수 여부를 확인합니다. 환경 경영은 지속 가능한 생산을 강조합니다.

## SAE 국제 표준

SAE 국제 표준은 항공우주 분야에서 텅스텐 합금 시트의 적용에 관한 내용을 다룹니다. AMS 7725 와 같은 표준은 고강도 텅스텐 합금 시트의 성능 요구 사항을 명시하고 있습니다. 이러한 표준은 높은 강도와 열 안정성을 강조하여 고온 부품에 적합하도록 합니다. SAE 표준은 텅스텐-니켈-철 합금의 화학적 조성 및 미세 구조를 규정하고, 전자기 간섭을 방지하기 위해 화학적으로 자성을 제한합니다.

AMS 7725 표준은 텅스텐 합금 시트의 밀도 분포 및 어닐링 상태를 상세하게 규정합니다. 소결 후, 시트는 인성을 검증하기 위해 단조 및 압연 공정을 거쳐야 합니다. 이 표준에는 인장 강도 및 파괴 인성 측정과 같은 시험 방법이 포함되어 있으며, 기계적 평형을 지원합니다.

응용 분야에서 SAE 표준은 진동 허용 오차 및 피로 지표를 설계 기준으로 삼아 항공기 하드웨어에 텅스텐 합금 시트를 사용하는 데 지침을 제공합니다. 개정 주기에는 항공우주 기술의 발전이 반영되고 복합재 구조 관련 조항이 포함됩니다. 구현에는 AS9100 인증 및 배치 테스트 준수가 필수적입니다. 환경 지속 가능성을 위해 저에너지 공정을 권장합니다.

## ISO 국제 표준

ISO 국제 표준은 텅스텐 합금 시트에 대한 전 세계적으로 통일된 프레임워크를 제공합니다. 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 이 표준은 ISO 9001 품질경영시스템 통합과 같은 내용을 포함하여 텅스텐 고분자 합금판에 대한 일반적인 규격으로 확장되었습니다. 이 표준은 분말 야금법으로 생산되는 시트에 적용되며, 국제 무역 규정 준수를 보장하기 위해 순도 및 불순물 관리에 대한 화학적 규격을 명시합니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 표준은 텅스텐 합금판의 화학 분석 및 물리적 시험에 대한 규정을 담고 있으며, 소결 공정은 환경 요건을 충족해야 합니다. 또한, 이 표준에는 국제 인증 지침이 포함되어 있으며 수출 검증을 지원합니다.

응용 분야에서 ISO 표준은 전자 및 의료 분야에서 텅스텐 합금 시트의 사용을 안내하며, 치수 정확도 및 내식성과 같은 기능적 요구 사항을 지원합니다. 개정 과정에는 다국적 협력이 포함되며 지속 가능성 조항도 반영됩니다. 시행 과정에서 기업은 심사를 거쳐 배치 추적성과 규정 준수를 보장합니다. 환경 경영은 자원 재활용을 강조합니다. 요약하자면, ISO 국제 표준은 텅스텐 합금 시트에 대한 글로벌 품질 보증을 구현하고, 관리 시스템을 통해 생산을 표준화하며, 국제 협력 심화를 지원합니다.

### 부록 C: 유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가의 텅스텐 합금 시트 표준

미국, 유럽, 일본, 한국 등 여러 국가의 텅스텐 고분자 합금 시트 표준 체계는 다양합니다. 미국은 주로 ASTM 표준을 사용하고, 유럽은 EN 표준을, 일본은 JIS 표준을, 한국은 KS 표준을 참고합니다. 이러한 표준들은 텅스텐 고분자 합금 시트의 조성, 물성, 가공 방법을 포괄하며, 각 지역 산업의 요구를 반영합니다. 유럽과 미국의 표준은 항공우주 및 의료 분야에, 일본의 표준은 정밀화학 분야에, 한국의 표준은 전자제품 수출을 지원하는 데 중점을 둡니다. 표준 개발에는 산업 협회가 참여하여 국제 표준을 참고하는 동시에 지역 자원을 통합합니다.

이들 국가의 표준 화학 규격은 텅스텐 함량 및 불순물에 대한 제한을 명시하고 있으며, 성능 지표에는 밀도와 열전도율이 포함됩니다. 텅스텐 합금 시트는 차폐재 및 방열판으로 활용될 수 있습니다. 동적 응답 기술은 합금 혁신을 반영하여 개정되고 있습니다. 구현에는 인증된 실험실과 배치 검증 규정 준수가 필요합니다. 환경 지속가능성 측면에서는 재활용이 강조됩니다.

#### 미국 표준(ASM, AMS 시리즈)

텅스텐 합금 시트 에 대한 글로벌 표준이 있습니다 . 예를 들어, ASTM B 777 은 텅스텐 고분자 합금 시트를 분류하여 밀도 등급과 기계적 사양을 정의합니다. 이러한 표준은 분말 야금 및 시트 압연에 적용되며, 비자성 변형을 보장하기 위해 텅스텐-니켈-철 합금의 결합상 비율을 화학적으로 규정합니다. ASTM B777 은 소결 시트의 열처리 검증을 포함하여 화학적 조성 및 시험 방법을 상세하게 규정합니다. 항공우주용 텅스텐 합금 시트에 대한 AMS 7725 는 피로 강도를 강조합니다. 텅스텐 합금 시트는 항공우주 및 의료 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 개정 과정에서 전문가 검토를 거쳤으며 방사선 관련 조항이 포함되었습니다. AS9100 인증도 획득했습니다.

#### 유럽 표준(EN 시리즈)

유럽 표준(EN 시리즈)은 유럽 표준화 위원회에서 개발합니다. 예를 들어, EN 2685 는 텅스텐 합금 시트에 대한 일반 요구 사항을 규정합니다. 이러한 표준은 고함량 텅스텐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

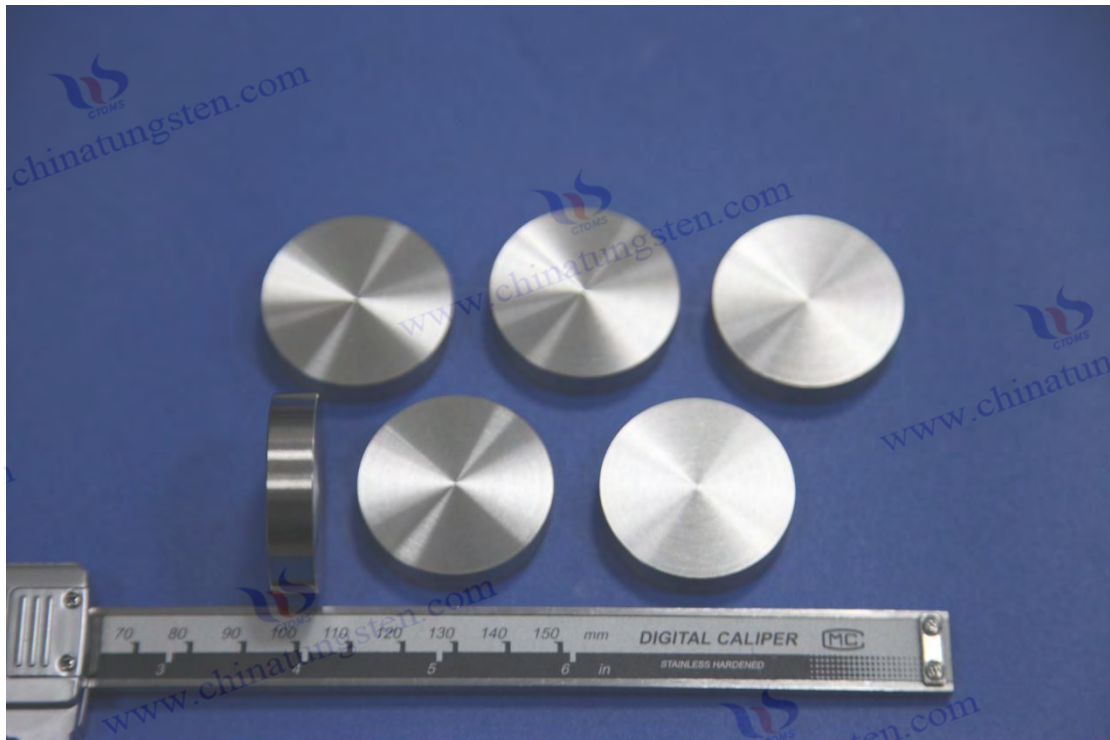
합금의 조성 및 특성에 적용되며, 환경 규정 준수를 위해 화학적 불순물 함량을 제한합니다. EN 표준은 소결 공정 및 치수 공차를 명시하여 유럽 내 시트 재료 무역을 지원합니다. 응용 분야에서는 원자력 및 전자 분야에서 텅스텐 합금 시트의 사용에 대한 지침을 제공합니다. 개정 작업은 다국적 협력을 통해 이루어지며, CE 마크는 필수 인증 사항입니다.

### 일본 규격(JIS 시리즈)

일본 산업 표준 위원회(JIS 시리즈)에서 일본 표준을 제정합니다. 예를 들어, JIS H 7804 는 텅스텐 합금 시트의 조성을 규정합니다. 이러한 표준은 전자 분야에 적용되며, 특히 정밀한 화학적 조성에 중점을 둡니다. JIS 표준은 순도와 가공 정밀도를 강조하여 일본의 텅스텐 합금 시트 산업을 지원합니다. 응용 분야에서는 반도체 분야에서 텅스텐 합금 시트의 사용을 안내하고, 기술 지침을 개정하며, JIS 인증을 시행합니다.

### 한국표준(KS 시리즈)

한국표준(KS 시리즈)은 한국산업표준원에서 제정합니다. 예를 들어, KS D 3615 는 텅스텐 합금 시트의 요구사항을 규정하고 있습니다. 이러한 표준은 전자제품 수출을 지원하고 열전도율을 화학적으로 정의합니다. 또한, 한국 내 시트 제조를 지원하기 위한 시험 방법을 명시하고 있습니다. 응용 분야에서는 신에너지원 활용을 위한 지침을 제공하며, 산업 협력을 강화하고 KS 마크를 도입하는 데에도 기여합니다.



CTIA 그룹 LTD 텅스텐 합금 시트

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

중국어 용어	간단한 설명
텅스텐 합금 시트	텅스텐을 주성분으로 하고 분말 야금법으로 제조 및 압연하여 만든 얇은 판형 소재.
고비중 텅스텐 합금	일반적으로 텅스텐 함량이 90% 이상인 고밀도 텅스텐계 합금은 균형추 또는 차폐재로 사용됩니다.
액상소결	소결 공정에는 액상이 나타나는데, 이는 입자의 재배열과 밀도 증가를 촉진합니다.
바인더 단계	합금 속의 텅스텐 입자는 가소성과 인성을 제공합니다.
용해-재침전	액상 소결 과정에서 텅스텐 원자가 결합제 상에 용해되었다가 재침전되는 메커니즘은 입자 구형화를 촉진합니다.
냉간 등방압 가압	액체 매체를 이용하여 분말 블랭크를 균일하게 압착 및 성형하는 방법.
열간 등방성 프레스	고온 고압 조건에서 기공을 제거하고 밀도를 높이는 후처리 기술.
다엽 콜리메이터	방사선 치료 장비에 사용되는 텅스텐 합금 날개로 구성된 빔 형상 조절 장치.
방열판	전자 기기의 열 방출에 사용되는 열전도성 기판은 흔히 텅스텐-구리 합금으로 만들어집니다.
유사합금	합금 과 같은 두 가지 비교체 물질은 용융 침투법으로 제조됩니다.
재결정 어닐링	고온 어닐링은 재결정을 유도하여 가공 응력을 제거하고 가소성을 회복시킵니다.
작업 경화	냉간 가공은 전위 밀도를 증가시켜 경도와 강도를 향상시킵니다.
조직	압연 변형으로 인한 결정 배향의 우선적 분포는 이방성에 영향을 미칩니다.
패시베이션 필름	표면에 자연적으로 또는 인위적으로 형성되는 보호 산화층은 부식 저항성을 향상시킵니다.
피셔 그레인 크기	분말의 평균 입자 크기는 공기 투과법으로 측정하였다.
아르키메데스	물의 치환을 이용한 물질의 밀도 측정 방법.
비커스 경도	다이아몬드 압입기로 측정한 경도 지수는 텅스텐 합금에 적용할 수 있습니다.
엑스선 감쇠	물질이 X선이나 감마선을 흡수하고 산란시키는 능력.
열팽창 계수	재료의 온도 변화에 따른 치수 팽창률은 기판과의 접합에 중요한 요소입니다.
생체적합성	이 소재는 생체 조직과 접촉해도 안전하며, 무독성이고 알레르기를 유발하지 않습니다.

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)

## 참고 자료

### 중국어 참조

- [1] Wang Xiaoming, Li Wei. 텅스텐 합금 재료의 제조 공정 및 성능 연구 [J]. 비철금속 재료 및 공학, 2020, 41(5): 45-52.
- [2] Zhang Hua, Liu Jun. 고밀도 텅스텐 합금 시트의 분말 야금 공정 최적화 [J]. 분말 야금 기술, 2019, 37(4): 278-284.
- [3] Chen Li, Zhao Ming. 텅스텐-니켈-철 합금 시트의 미세구조 및 기계적 특성 분석[J]. 재료 보고서, 2021, 35(12): 12015-12020.
- [4] Sun Wei, Yang Fan. 전자 패키징에 텅스텐 구리 복합 시트의 응용 [J]. 전자 재료 및 기술, 2022, 46(3): 89-95.
- [5] Li Na, Wang Qiang. 텅스텐 합금 박판의 압연 공정 및 표면 처리 기술 [J]. 희귀 금속 재료 및 공학, 2018, 47(8): 1567-1573.
- [6] Xu Gang, Huang Wei. 방사선 차폐에 텅스텐 합금을 적용한 연구 진행 상황 [J]. 원자력 기술, 2023, 46(2): 201-208.
- [7] Liu Yang, Zhang Lei. 열처리 공정이 텅스텐 합금 시트의 성능에 미치는 영향[J]. 열처리 기술, 2020, 49(10): 112-118.
- [8] Zhao Peng, Chen Ming. 텅스텐 합금 분말 제조 기술에 대한 연구 진행 상황 [J]. 분말 야금 산업, 2021, 31(6): 67-74.

### 영어 참조

- [1] Smith J, Johnson A. 텅스텐 중량합금의 제조 및 특성[J]. 재료과학 저널, 2019, 54(12): 8900-8915.
- [2] German R M. 텅스텐 중량합금의 액상 소결[J]. 국제 분말 야금 저널, 2020, 56(4): 45-58.
- [3] Lee KH 등. W-Ni-Fe 합금의 미세구조 및 기계적 특성[J]. 재료과학 및 공학: A, 2021, 802: 140-152.
- [4] Upadhyaya G S. 전기 응용 분야용 텅스텐-구리 복합재[J]. 재료 가공 기술 저널, 2018, 258: 123-135.
- [5] Bose A, et al. 텅스텐 합금 시트의 롤링: 공정 및 특성[J]. 분말 야금, 2022, 65(3): 210-225.
- [6] 김 Y 등. 텅스텐 합금의 방사선 차폐 성능[J]. 원자력 공학 및 기술, 2023, 55(5): 1789-1796.
- [7] Das J, et al. 텅스텐 중량합금에 대한 열처리 효과[J]. 야금 및 재료 거래 A, 2019, 50(8): 3678-3690.
- [8] Luo SD 등. 텅스텐 합금용 분말 준비 기술[J]. 국제 재료 리뷰, 2021, 66(7): 489-512.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT