

## 텅스텐 구리 합금이란 무엇입니까

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](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. 1997 년 [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) 을 시작점으로 설립된 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 중국 최초의 최고급 텅스텐 제품 웹사이트로, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업에 중점을 둔 중국을 선도하는 전자상거래 기업입니다. CTIA 그룹은 텅스텐과 몰리브덴 분야에서 30 년 가까이 쌓아온 심층적인 경험을 활용하여 모회사의 탁월한 설계 및 제조 역량, 우수한 서비스, 글로벌 비즈니스 명성을 계승하여 텅스텐 화학물질, 텅스텐 금속, 시멘트 카바이드, 고밀도 합금, 몰리브덴 및 몰리브덴 합금 분야에서 포괄적인 애플리케이션 솔루션 제공업체가 되었습니다.

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

- 1.1 텅스텐 구리 합금 개요
  - 1.1.1 텅스텐 구리 합금의 정의
  - 1.1.2 합금 성분
- 1.2 텅스텐 구리 합금의 역사적 기원과 발전 과정
  - 1.2.1 초기 탐색
  - 1.2.2 핵심 기술 혁신 로드
  - 1.2.3 현대적 발전 추세

### 제 2 장 텅스텐 구리 합금의 특성

- 2.1 텅스텐 구리 합금의 특성 분석
  - 2.1.1 고경도 형성 메커니즘과 장점
    - 2.1.1.1 미세 구조 메커니즘
    - 2.1.1.2 내마모성 응용의 장점
    - 2.1.1.3 다른 합금과의 경도 비교 및 장점
  - 2.1.2 아크 침식 저항의 원리와 성능
    - 2.1.2.1 아크 침식 메커니즘
    - 2.1.2.2 아크 침식 저항의 본질적 원리
    - 2.1.2.3 다양한 사용 환경에서의 성능 차이
    - 2.1.2.4 성능 향상 방법
  - 2.1.3 항접착 및 항용접 능력 분석
    - 2.1.3.1 접착과 용접의 원인
    - 2.1.3.2 항접착 성능
    - 2.1.3.3 항접착 및 항용접 능력에 영향을 미치는 요인
  - 2.1.4 우수한 전도성의 원리와 응용
    - 2.1.4.1 전도성의 물리적 성질과 전도 메커니즘
    - 2.1.4.2 다양한 성분 비율에서의 전도성 변화
    - 2.1.4.3 전기 기기에서의 전도성 응용 장점
  - 2.1.5 우수한 열전도성
    - 2.1.5.1 열전도성의 기본 원리와 열전도 메커니즘
    - 2.1.5.2 열전도성과 방열 효과의 관계
    - 2.1.5.3 고온 작업 환경에서의 열전도성 응용 가치
  - 2.1.6 내식성과 메커니즘
    - 2.1.6.1 다양한 부식 환경의 영향
    - 2.1.6.2 내식성의 내부 메커니즘
    - 2.1.6.3 내식성 향상을 위한 기술적 수단
- 2.2 성분 비율이 텅스텐 구리 합금의 특성에 미치는 영향
  - 2.2.1 기계적 특성에 미치는 영향
    - 2.2.1.1 경도에 미치는 영향
    - 2.2.1.2 강도에 미치는 영향

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.2.1.3 인성에 미치는 영향
- 2.2.2 물리적 특성에 미치는 영향
  - 2.2.2.1 밀도에 미치는 영향
  - 2.2.2.2 녹는점에 미치는 영향
  - 2.2.2.3 열팽창 계수에 미치는 영향
  - 2.2.2.4 전도성에 미치는 영향
  - 2.2.2.5 열전도성에 미치는 영향
- 2.2.3 화학적 특성에 미치는 영향
  - 2.2.3.1 내식성에 미치는 영향
  - 2.2.3.2 고온 산화 저항성에 미치는 영향
- 2.3 CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금 MSDS

### 제 3 장 텅스텐 구리 합금의 미세 구조와 특성의 상관 관계

- 3.1 텅스텐 구리 합금의 미세 구조 특성에 대한 통찰
  - 3.1.1 결정립 형태와 크기
  - 3.1.2 상 분포와 계면
  - 3.1.3 기공률과 결함 현상
  - 3.1.4 다양한 제조 공정에서의 구조적 차이
- 3.2 텅스텐 구리 합금의 미세 구조와 성능의 본질적 관계
  - 3.2.1 결정립 구조가 강도에 미치는 영향 메커니즘
  - 3.2.2 결정립 구조가 인성에 미치는 영향 메커니즘
  - 3.2.3 상 분포와 전도성의 상관 관계
  - 3.2.4 상 분포와 열전도성의 상관 관계
  - 3.2.5 기공과 결함이 경도에 미치는 영향
  - 3.2.6 기공과 결함이 내식성에 미치는 영향
- 3.3 텅스텐 구리 합금의 미세 구조 진화
  - 3.3.1 성분 비율 변화로 인한 진화
  - 3.3.2 열처리 중의 구조 변환
  - 3.3.3 사용 환경의 구조에 대한 피드백
  - 3.3.4 사용 환경의 성능에 대한 피드백
- 3.4 텅스텐 구리 합금 미세 구조의 제어 전략
  - 3.4.1 제조 공정 기반의 제어 방법
  - 3.4.2 합금 원소 첨가의 최적화 방법
  - 3.4.3 구조 조절과 성능의 관계

### 제 4 장 텅스텐 구리 합금의 제조 기술

- 4.1 진공 침투에 의한 텅스텐 구리 합금 제조
  - 4.1.1 용융 침투 원리와 장비 요구 사항
  - 4.1.2 공정 단계와 매개변수 최적화
  - 4.1.3 공정의 장점과 한계

### 제 5 장 텅스텐 구리 합금의 성능 테스트 및 특성화 방법

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1 텅스텐 구리 합금의 물리적 특성 테스트
  - 5.1.1 밀도 테스트 방법
  - 5.1.2 경도 테스트 표준 및 운영
  - 5.1.3 전도성 테스트 방법
  - 5.1.4 열전도성 테스트 방법
- 5.2 텅스텐 구리 합금의 화학적 특성 평가
  - 5.2.1 내식성 테스트 환경과 방법
  - 5.2.2 항산화 성능 테스트 방법
- 5.3 텅스텐 구리 합금 미세 구조의 특성화 기술
  - 5.3.1 금속 현미경 관찰 방법
  - 5.3.2 주사 전자 현미경 분석 응용
  - 5.3.3 X선 회절 구조 분석

## 제 6 장 텅스텐 구리 합금의 다양한 응용 분야

- 6.1 전기 분야에서의 텅스텐 구리 합금 응용
  - 6.1.1 저압 전력 스위치에서의 응용
    - 6.1.1.1 저압 전력 스위치 핵심 구성요소의 재료 성능 요구 사항
    - 6.1.1.2 접촉 구성요소에서의 텅스텐 구리 합금 응용
    - 6.1.1.3 응용이 저압 전력 스위치의 수명에 미치는 영향
  - 6.1.2 고압 스위치에서의 응용
    - 6.1.2.1 고압 스위치 작업 환경과 핵심 구성요소의 재료 허용 기준
    - 6.1.2.2 텅스텐 구리 합금은 고압 스위치의 성능 요구 사항을 충족시킴
    - 6.1.2.3 다양한 전압 수준의 고압 스위치에서의 텅스텐 구리 합금 응용 차이
  - 6.1.3 릴레이와 공기 차단기의 응용
    - 6.1.3.1 릴레이 재료의 내마모성 요구 사항과 텅스텐 구리 합금의 적합성
    - 6.1.3.2 릴레이에서의 텅스텐 구리 합금의 설치 위치와 기능 실현
    - 6.1.3.3 공기 차단기 아크 소멸 시스템에 대한 재료 성능 요구 사항
    - 6.1.3.4 공기 차단기 아크 소멸 챔버에서의 텅스텐 구리 합금 응용 원리
    - 6.1.3.5 릴레이와 공기 차단기에서의 텅스텐 구리 합금 선택 기준
  - 6.1.4 개폐기와 접지 스위치에서의 응용
    - 6.1.4.1 장기 노출 환경에서의 개폐기 재료의 내후성 요구 사항
    - 6.1.4.2 개폐기의 전도성 접촉 부분에서의 텅스텐 구리 합금 응용 설계
    - 6.1.4.3 단락 전류를 받을 때 접지 스위치에 대한 재료 강도와 전도성 요구 사항
    - 6.1.4.4 텅스텐 구리 합금이 접지 스위치의 안전 운영을 보장하는 메커니즘
    - 6.1.4.5 개폐기와 접지 스위치에서의 텅스텐 구리 합금 선택 기준
- 6.2 전자 분야에서의 텅스텐 구리 합금 응용
  - 6.2.1 EDM 전극의 성능 요구 사항과 텅스텐 구리 합금의 장점
    - 6.2.1.1 EDM 공정에 대한 전극 재료의 성능 지표 요구 사항
    - 6.2.1.2 다양한 가공 시나리오에서의 다른 전극 성능 요구 사항
    - 6.2.1.3 전도성과 내마모성 측면에서의 텅스텐 구리 합금의 호환성 분석
    - 6.2.1.4 기존 전극 재료와 비교한 성능 장점
    - 6.2.1.5 일반적인 EDM 장비에서의 텅스텐 구리 합금 전극 선택 기준

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2.2 마이크로전자에서의 역할

6.2.2.1 마이크로전자 장치에 대한 재료의 정밀도와 안정성 요구 사항

6.2.2.2 마이크로전자 패키징에서의 텅스텐 구리 합금 응용

6.2.2.3 마이크로전자 장치의 방열 효율과 수명 향상을 위한 메커니즘

6.2.2.4 칩 패키징 모듈에서의 장착 구조 설계

6.2.2.5 마이크로전자 분야에서의 텅스텐 구리 합금의 순도와 미세 구조 요구 사항

## 6.2.3 센서 분야에서의 응용

6.2.3.1 센서 작업 환경에 대한 재료 성능 요구 사항

6.2.3.2 센서 감지 요소에서의 텅스텐 구리 합금의 잠재적 응용

6.2.3.3 고열전도성을 기반으로 한 센서 방열 구성요소의 응용 설계

## 6.3 항공우주 분야에서의 텅스텐 구리 합금 응용

6.3.1 고체 로켓 노즐 목 라이닝의 응용

6.3.1.1 고체 로켓 노즐 목 라이너의 작업 환경

6.3.1.2 노즐 목 라이닝의 재료 특성 요구 사항

6.3.1.3 노즐 목 라이닝의 요구 사항을 충족시키는 텅스텐 구리 합금의 성능

6.3.1.4 노즐 목 라이닝에서의 텅스텐 구리 합금의 성형 공정과 구조 설계

6.3.1.5 텅스텐 구리 합금 사용 후 노즐 목 라이닝 수명의 향상

6.3.2 항공기 엔진 구성요소에서의 잠재적 응용

6.3.2.1 항공기 엔진 핵심 구성요소의 작업 환경 특성

6.3.2.2 항공기 엔진 구성요소의 재료 특성 요구 사항

6.3.2.3 항공기 엔진의 고온 부분에서의 텅스텐 구리 합금 응용

6.3.2.4 항공 엔진 응용을 위한 텅스텐 구리 합금의 성능 최적화 방향

6.3.3 우주선 전기 시스템에서의 응용

6.3.3.1 우주선 전기 시스템의 작업 환경과 신뢰성 요구 사항

6.3.3.2 우주선 전기 시스템 핵심 구성요소의 재료 특성 요구 사항

6.3.3.3 우주선 접촉기 접점에서의 텅스텐 구리 합금 응용

6.3.3.4 우주선 차단기의 아크 소멸 구성요소에서의 텅스텐 구리 합금 응용

6.3.3.5 텅스텐 구리 합금은 우주선 전기 시스템의 안정성과 수명을 보장하는 데 중요한 역할을 함

6.3.3.6 우주선 응용에서의 텅스텐 구리 합금의 재료 선택 기준과 품질 관리 요구 사항

## 6.4 기타 분야에서의 응용

6.4.1 제철 산업에서의 응용 시나리오

6.4.2 스포츠 장비에서의 사용 사례

6.4.3 의료 기기 분야에서의 탐색

6.4.4 원자력 분야에서의 응용 전망

## 제 7 장 텅스텐 구리 합금의 미래 발전 추세

7.1 텅스텐 구리 합금의 새로운 제조 기술 탐색

7.1.1 적층 제조 기술의 잠재적 응용

7.1.2 기타 첨단 제조 기술의 전망

7.2 텅스텐 구리 합금의 성능 최적화 연구 방향

7.2.1 종합 성능 향상을 위한 연구 방향

### 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)



## 7.2.2 특정 응용 시나리오에서의 성능 강화

### 부록

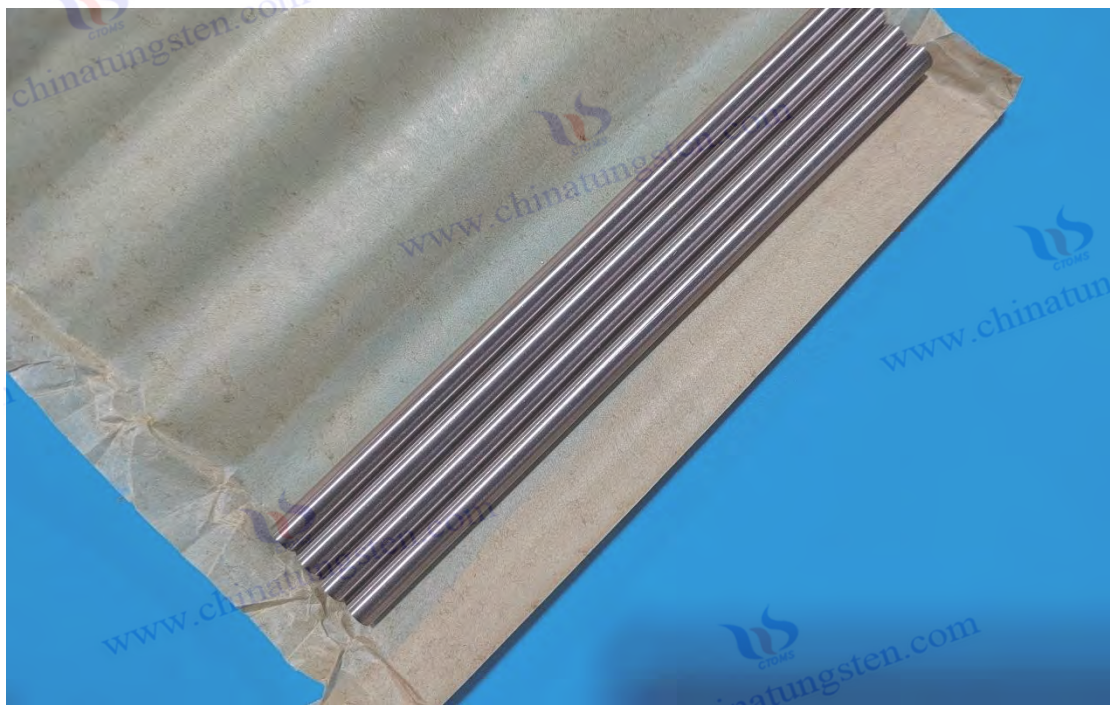
부록 A 중국 텅스텐 구리 합금 국가 표준

부록 B 국제 텅스텐 구리 합금 표준

부록 C 유럽, 미국, 일본, 한국 등 국가의 텅스텐 구리 합금 표준

부록 D 텅스텐 구리 합금 용어의 상세 설명

### 참고 문헌



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

#### 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

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

| Product Name         | Chemical Composition (%) |                    |         | Physical and Mechanical Properties |               |                     |                        |
|----------------------|--------------------------|--------------------|---------|------------------------------------|---------------|---------------------|------------------------|
|                      | Cu                       | Total Impurities ≤ | W       | Density (g/cm³)                    | Hardness (HB) | Resistivity (MΩ·cm) | Tensile Strength (MPa) |
| Tungsten Copper (50) | 50±2.0                   | 0.5                | Balance | 11.85                              | 115           | 3.2                 | —                      |
| Tungsten Copper (60) | 40±2.0                   | 0.5                | Balance | 12.75                              | 140           | 3.7                 | —                      |
| Tungsten Copper (70) | 30±2.0                   | 0.5                | Balance | 13.8                               | 175           | 4.1                 | 790                    |
| Tungsten Copper (80) | 20±2.0                   | 0.5                | Balance | 15.15                              | 220           | 5                   | 980                    |
| Tungsten Copper (90) | 10±2.0                   | 0.5                | Balance | 16.75                              | 260           | 6.5                 | 1160                   |

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.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 서론

### 1.1 텅스텐 구리 합금 개요

구리 로 구성된 복합 소재인 텅스텐-구리 합금은 두 금속의 핵심 장점을 결합하여 산업 분야에서 대체할 수 없는 위치를 차지하고 있습니다. 텅스텐의 높은 용점(3422°C), 고강도, 고경도, 그리고 뛰어난 내마모성은 구리의 높은 전기 전도성, 열 전도성, 그리고 우수한 가소성을 보완하여, 고온 환경 시험을 견뎌내고 안정적인 전기 및 열 전도성을 유지합니다. 따라서 전자, 전기, 항공우주, 국방 등 여러 핵심 분야에서 널리 사용되고 있습니다.

재료 특성 측면에서 텅스텐-구리 합금의 성능은 단순히 "텅스텐 + 구리"의 중첩이 아니라, 합리적인 조성비와 제조 공정을 통해 최적화되고 균형 잡힌 성능을 발휘합니다. 예를 들어, 고온 환경에서 텅스텐의 골격 구조는 합금을 지지하고 고온 변형을 방지할 수 있으며, 구리는 자체 열전도도를 통해 열을 빠르게 전달하여 국부적인 과열을 방지합니다. 전도성 환경에서는 구리의 전도성 장점을 활용할 수 있으며, 텅스텐을 첨가하면 합금의 전반적인 강도가 향상되어 순수 구리의 마모 및 변형 문제를 해결할 수 있습니다. 이러한 "강력한 조합" 특성 덕분에 텅스텐-구리 합금은 복잡한 작업 조건을 처리하는 데 이상적인 소재입니다.

산업 기술의 지속적인 발전에 따라 재료의 성능 요구가 점점 더 엄격해지고 있으며, 텅스텐 구리 합금의 연구 및 응용 분야 또한 심화되고 있습니다. 초기 기본 모델부터 다양한 상황에 맞춰 맞춤 제작된 특수 비율 합금에 이르기까지, 그 적용 범위는 끊임없이 확대되고 있으며, 그 성능은 다양한 산업적 요구를 더욱 정확하게 충족하고 있습니다. 다음으로, 이 특수 합금을 정의와 조성이라는 두 가지 측면에서 심도 있게 살펴보겠습니다.

#### 1.1.1 텅스텐 구리 합금의 정의

텅스텐-구리 합금은 텅스텐(W)과 구리(Cu)를 주성분으로 하여 분말 야금 등의 공정을 통해 제조된 유사 합금(고체 상태에서 서로 섞이지 않는 두 금속이 기계적으로 결합된 복합 재료)을 말합니다. 기존의 단일 금속이나 완전히 혼합되는 합금과 달리, 텅스텐-구리 합금은 텅스텐과 구리가 물리적 혼합물 형태로 존재합니다. 즉, 텅스텐은 연속적인 골격 구조를 형성하고 구리는 텅스텐 골격의 기공을 채웁니다. 이 둘은 계면을 통해 결합하여 하나의 전체를 형성합니다. 따라서 텅스텐의 높은 용점, 높은 강도, 높은 경도 및 내마모성을 유지하면서 구리의 높은 전기 전도성, 높은 열 전도성 및 우수한 가소성을 가지므로 "고온 저항성 및 전기 및 열 전도성"과 "고강도와 용이한 가공의 균형"이라는 특성을 달성합니다. 정의의 핵심은 "복합재의 장점"과 "공정 의존성"에 있습니다. 한편으로, 텅스텐 과 구리의 시너지 효과에 의해 성능이 결정됩니다. 예를 들어, 전기 스파크 가공에서 텅스텐 구리 합금의 높은 전도성은 전극의 효율적인 전류 전달을 보장하고, 텅스텐의 높은 용점은 고온 스파크 방전에서 전극의 용융을 방지합니다. 방열 부품에서 구리의 열전도도는 빠른 방열을 담당하고, 텅스텐의 높은 강도는 부품이 설치

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

및 사용 중 쉽게 변형되지 않도록 합니다. 한편, 텅스텐-구리 합금의 정의에는 제조 공정의 방향도 포함됩니다. 텅스텐과 구리는 고체 상태에서 혼합되지 않기 때문에 제련으로 생산할 수 없으며, 분말 야금(프레스, 소결, 함침 등)을 사용해야 합니다. 이는 텅스텐 구리 합금을 다른 합금과 구별하는 중요한 특성 중 하나가 되었습니다.

이 정의는 텅스텐-구리 합금의 조성과 구조를 명확히 할 뿐만 아니라, "맞춤형" 특성도 드러냅니다. 텅스텐과 구리의 함량 비율을 조절함으로써 다양한 특성을 가진 합금(고온 저항성과 고강도에 중점을 둔 고텅스텐 합금, 전기 전도성과 열 전도성에 중점을 둔 고구리 합금 등)을 제조할 수 있으며, 이를 통해 전자 패키징, 고전압 스위치, 항공우주 엔진 등 다양한 분야의 맞춤형 요구를 충족할 수 있습니다. 따라서 텅스텐-구리 합금의 정의는 단순히 재료 조성을 설명하는 것이 아니라, "구조가 성능을 결정하고, 성능은 현장에 적응한다"는 핵심 특징을 요약한 것입니다.

### 1.1.2 합금 조성

(Cu)를 기반으로 하며, 텅스텐 함량은 일반적으로 50%에서 90%(질량 분율) 사이이고 구리 함량은 10%에서 50% 사이입니다. 구체적인 비율은 적용 시나리오의 성능 요구 사항에 따라 결정되어야 합니다. 일부 특수 용도의 텅스텐-구리 합금은 텅스텐과 구리의 두 가지 주요 성분 외에도 재료의 성형 성능이나 특정 기능을 최적화하기 위해 미량의 다른 원소를 보조 성분으로 첨가하지만, 이러한 보조 원소의 함량은 일반적으로 1%를 초과하지 않으므로 "텅스텐-구리"의 핵심 구성 요소 구조에는 영향을 미치지 않습니다.

주요 구성 요소의 역할 측면에서 볼 때, 텅스텐은 고용점 금속(용점 3422°C)으로서 합금 강도, 경도, 고온 저항성 및 내마모성을 제공하는 주요 요소입니다. 텅스텐 함량이 높을수록 합금의 용점이 높아져 강도와 경도가 높아지고 고온 저항성이 향상됩니다. 예를 들어, 텅스텐 함량이 90%인 텅스텐-구리 합금은 800MPa 이상의 압축 강도를 가질 수 있으며, 1000°C 이상의 고온 환경에서 구조적 안정성을 유지할 수 있어 항공우주 엔진의 고온 부품에 적합합니다. 구리는 높은 전도성과 열전도성을 가진 금속으로서 합금에 전기 전도성, 열 전도성 및 특정 가소성을 부여하는 주요 역할을 합니다. 구리 함량이 높을수록 합금의 전기 및 열 전도성이 향상되고 가공 성능이 향상됩니다. 예를 들어, 구리 함량이 50%인 텅스텐 구리 합금은 전도도가  $40 \times 10^6$  S/m 이상으로 전자 패키징의 방열 전극으로 적합합니다. 보조 성분의 첨가는 공정 성능을 개선하거나 주성분의 부족분을 보충하기 위한 것입니다. 예를 들어, 미량의 니켈(Ni)을 첨가하면 텅스텐 입자와 구리 상 사이의 결합력을 강화하여 합금에 힘을 가할 때 텅스텐 골격과 구리 상이 분리되는 문제를 방지할 수 있습니다. 소량의 철(Fe)이나 코발트(Co)를 첨가하면 텅스텐 분말의 가압 성능을 개선하여 성형 공정에서 합금이 치밀한 구조를 얻기 쉽게 합니다. 그러나 보조 성분의 첨가는 비례적으로 엄격하게 제어해야 하며, 그렇지 않으면 주성분의 성능에 영향을 미칠 수 있습니다. 예를 들어, 과도한 니켈은 합금의 전기 및 열 전도성을 감소시키고 과도한 철은 합금의 취성을 증가시킬 수 있습니다.

일반적으로 텅스텐-구리 합금의 조성은 "주성분이 핵심 성능을 결정하고, 보조성분이 공정 및 세부 사항을 최적화한다"는 전형적인 예입니다. 텅스텐-구리 비율을 조절함으로써

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

합금의 강도, 전기 및 열 전도도, 그리고 고온 저항성을 정밀하게 제어할 수 있어 전자 패키징부터 국방 및 군수 산업에 이르기까지 다양한 분야에 적합합니다. 또한, 미량 보조 원소를 첨가하면 합금의 실용성과 안정성이 더욱 향상되어 복잡한 산업 요구에 더욱 효과적으로 대응할 수 있습니다.

## 1.2 텅스텐 구리 합금의 역사적 기원 및 개발 과정

### 1.2.1 초기 탐색

텅스텐-구리 합금의 기원은 19 세기 후반과 20 세기 초로 거슬러 올라갑니다. 이 시기의 연구는 "텅스텐-구리 합금"을 목표로 한 것이 아니라, 텅스텐과 구리 금속의 특성에 대한 개별 연구와 복합 재료 개발 초기 시도에서 시작되었습니다. 당시 산업 혁명은 고강도 및 고전도성 재료에 대한 수요를 촉진했습니다. 텅스텐은 높은 녹는점과 높은 강도(특히 백열등 필라멘트 분야에서)로 주목을 받았고, 구리는 뛰어난 전기 및 열 전도성으로 전기 산업의 핵심 소재가 되었습니다. 그러나 두 금속의 단점이 점차 드러났습니다. 순수 텅스텐은 취성이 강하고 가공이 어려웠으며, 순수 구리는 강도가 낮고 고온 내성이 약했습니다. 사람들은 "두 금속의 장점을 복합화하여 결합할 수 있을까?"라는 고민을 하기 시작했습니다.

초기 연구는 주로 소규모 실험실 실험이었으며, 기술적 수단은 비교적 원시적이었습니다. 1900 년경, 독일과 미국의 재료 연구자들은 최초로 텅스텐 분말과 구리 분말을 기계적으로 혼합하고, 간단한 압착 및 소결을 통해 최초의 "텅스텐-구리 복합 블록"을 만들었습니다. 안정적인 공정은 형성되지 않았지만, "텅스텐-구리 복합 블록"의 실현 가능성은 검증되었습니다. 그러나 이 단계에서 제품 성능은 매우 열악했습니다. 텅스텐과 구리의 결합이 느슨했고, 기계적 강도가 부족했으며, 전기 및 열 전도도가 기대에 미치지 못했습니다. 또한, 분말 입자 크기와 소결 온도의 정밀한 제어가 부족하여 수율이 매우 낮았고, 이론적인 검증 수준에 머물렀을 뿐 실제 응용에는 이르지 못했습니다.

초기 연구를 응용 분야로 이끌었던 것은 군사 및 전기 산업의 요구였습니다. 1920 년대 무선 기술과 포병 제조의 발전과 함께, 순간적인 고온을 견디면서 동시에 전기를 전도할 수 있는 재료(예: 포병 전기 점화 장치의 전극)가 필요했습니다. 순수 구리는 고온에서 쉽게 녹고, 순수 텅스텐은 전도성이 부족했습니다. 연구자들은 다시 텅스텐-구리 복합재에 관심을 돌렸습니다. 1925 년경, 미국의 제너럴 일렉트릭(GE)은 분말 혼합 공정(예: 분말 정제를 위한 볼 밀링 시간 증가)을 개선하여 간단한 전극에 사용할 수 있는 최초의 텅스텐-구리 제품을 생산했습니다. 성능은 여전히 불안정했지만, "특정 상황에서 순수 텅스텐이나 순수 구리를 대체"한 최초의 사례였으며, 텅스텐-구리 합금이 실험실에서 실제 사용으로 이어지는 시발점이 되었습니다. 이 단계의 탐색은 체계적인 기술 체계를 형성하지는 못했지만, 후속 연구를 위한 두 가지 기초를 마련했습니다.

### 1.2.2 핵심 기술 혁신 노드

텅스텐-구리 합금은 여러 가지 핵심적인 기술적 혁신과 분리할 수 없으며, 이러한

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

혁신으로 인해 "실험실 샘플"에서 "산업용 소재"로의 전환이 이루어졌습니다.

첫 번째 핵심 노드는 1940 년대에 등장했습니다. 용침 공정의 발전은 "텅스텐과 구리의 느슨한 결합"이라는 핵심 문제를 해결했습니다. 이전의 소결 공정은 텅스텐과 구리를 완전히 결합시키기 어려웠지만, 용침 공정(텅스텐 골격을 예비 소결한 후 용융 구리를 기공에 용침시키는 공정)은 재료의 밀도를 크게 향상시켰습니다. 1943 년, 미군은 항공기 기관총 점화 전극의 고온 저항 문제를 해결하기 위해 과학 연구 기관과 공동으로 용침 공정을 최적화했습니다. 텅스텐 골격의 기공률(20%~30%로 조정)과 구리의 용융 온도(1100~1200°C까지 정확도)를 제어함으로써 텅스텐-구리 합금의 밀도를 95% 이상으로 높이고 강도와 전도성을 이전보다 40% 향상시켰습니다. 이 합금은 항공기 기관총의 점화 시스템에 성공적으로 사용되었습니다. 이는 텅스텐-구리 합금이 대규모로 실용화된 최초의 사례였습니다.

두 번째 핵심은 1960 년대 분말 야금 기술의 발전이었습니다. 전자 현미경과 정밀 온도 제어 장비의 등장으로 연구자들은 텅스텐 분말과 구리 분말의 입자 크기(초기 100 메시에서 500 메시 이상으로)와 소결 분위기(산화 방지를 위한 불활성 가스 보호 도입)를 정밀하게 제어할 수 있게 되었습니다. 1962 년, 일본 스미토모 금속은 "초미분 분말 + 진공 소결" 공정을 개발하여 텅스텐-구리 합금의 텅스텐 입자를 더욱 균일하게 분포시키고 구리 상(phase)을 더욱 완벽하게 채웠습니다. 기계적 특성(압축 강도 600MPa 이상)과 전기 전도도(순수 구리의 60% 이상에 도달)가 안정되었을 뿐만 아니라, 박판이나 특수 형상 전극과 같은 복잡한 형상의 제품 가공이 가능해져 군사 분야에서 전자 산업(초기 트랜지스터의 방열판 등)으로의 확장을 촉진했습니다.

세 번째 핵심 요소는 1980 년대에 도입된 "기능적 맞춤화" 개념입니다. 이전에는 텅스텐-구리 합금이 주로 단일 비율에 기반했으며, 각 분야의 요구는 매우 다양했습니다. 항공우주 분야에서는 텅스텐 함량이 높은(80% 이상) 고온 내열형이 필요했고, 전자 분야에서는 구리 함량이 높은(50% 이상) 고전도형이 필요했습니다. 1985 년 중국 베이징 비철금속 연구소는 수요에 따른 맞춤형 조성을 달성하기 위해 "텅스텐-구리 비율-성능 대응 모델"을 구축했습니다. 텅스텐 함량의 기울기 비율을 50%에서 90%까지 조절하고 해당 공정 매개변수를 적용함으로써 합금의 강도, 전도성, 내열성을 정확하게 제어할 수 있습니다. 이러한 획기적인 기술 발전으로 텅스텐-구리 합금은 '일반 재료'에서 '시나리오 적응형 재료'로 전환되었으며, 그 적용 범위가 급속히 확대되었습니다.

### 1.2.3 현대 개발 동향

21 세기에 접어들면서 텅스텐-구리 합금의 개발은 "극한 성능, 다각화된 응용 분야, 지능화된 공정"이라는 세 가지 주요 추세를 보이며 고급 제조 분야의 핵심 소재 중 하나로 자리 잡았습니다. 극한 성능은 현대 발전의 핵심 방향입니다. 칩, 항공우주, 신에너지 분야의 소재 요구 사항이 "기본적인 요구 충족"에서 "성능 한계 돌파"로 전환됨에 따라 텅스텐-구리 합금의 성능 지표는 끊임없이 개선되고 있습니다. 나노분말 제조 기술(예: 플라즈마 불 밀링)을 통해 텅스텐 분말의 입자 크기를 100 나노미터 이내로 제어할 수 있게 되었고, 구리와의 계면이 더욱 밀접해졌습니다. 최신 제품의 전도도는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



순수 구리의 85% 이상에 도달했으며, 압축 강도는 1000MPa 를 넘어 20 세기 수준을 크게 넘어섰습니다. 고온 내구성 측면에서 텅스텐 함량이 높은(90%) 텅스텐-구리 합금은 1200°C 에서 구조적 안정성을 유지할 수 있으며, 그래핀과 같은 강화상을 추가함으로써 내마모성이 30% 이상 증가하여 5 세대 이동통신 기지국, 항공우주 엔진 연소실과 같은 극한 상황의 요구를 충족합니다.

응용 분야의 다각화는 기존 분야에서 첨단 신형 분야로의 확장을 통해 나타납니다. 전통적으로 텅스텐 구리 합금은 전기 접점, 전극 등에 주로 사용되었지만, 현재는 칩 패키징(고전력 칩의 방열 기판으로, 높은 열전도도를 활용하여 열을 빠르게 제거), 신에너지 자동차(고전류 및 아크 부식을 견딜 수 있는 차량용 고전압 릴레이의 전도성 접점), 핵융합 실험 장치(고온 플라즈마 부식을 방지하는 다이버터 소재) 등으로 확장되었습니다. 업계 데이터에 따르면, 2020 년 이후 반도체 분야에서 텅스텐 구리 합금에 대한 글로벌 수요는 연평균 25%를 돌파하며 새로운 성장 동력으로 자리 잡았습니다.

지능형 기술은 현대 발전을 뒷받침하는 기술적 기반입니다. 기존의 텅스텐-구리 합금 생산은 수작업에 의존했지만, 이제 "디지털 트윈"과 자동화된 생산 라인을 통해 전체 공정을 제어할 수 있습니다. 분말 혼합 단계의 온라인 입자 크기 모니터링부터 소결 공정의 실시간 온도-압력 조절, 완제품 성능의 비파괴 검사까지 모든 것이 지능형 시스템을 통해 완료됩니다. 3D 프린팅 기술의 도입은 성형의 한계를 극복했습니다. 2022 년 독일 프라운호퍼 연구소는 금속 3D 프린팅 기술을 사용하여 복잡한 내부 유동 채널을 가진 텅스텐-구리 방열 부품을 직접 프린팅했습니다. 기존 공정으로는 구현할 수 없었던 구조도 대량 생산할 수 있어 특수 형상 및 통합 부품에 대한 새로운 솔루션을 제공합니다.

동시에 현대 발전은 여러 과제에 직면하고 있습니다. 전략적 자원인 텅스텐은 가격 변동성이 커서 "텅스텐-구리 합금 재활용 및 재사용" 기술 개발이 촉진되었고, 현재 재활용률은 80%를 넘어섰습니다. 탄화규소 세라믹 및 구리-알루미늄 복합 재료와 같은 대체 소재와의 경쟁 또한 텅스텐-구리 합금이 성능 향상을 통해 기존 장점을 유지하도록 강요하고 있습니다. 전반적으로 고급 제조 수요 증가에 따라 텅스텐-구리 합금은 "보조 소재"에서 "핵심 소재"로 전환되고 있으며, 그 발전은 최첨단 과학기술 혁신과 깊이 연관되어 있어 미래에도 획기적인 발전의 여지가 많습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

#### 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 구리 합금의 특성

### 2.1 텅스텐 구리 합금의 특성 분석

텅스텐-구리 합금은 고유한 복합 구조와 조성에서 비롯됩니다. 단순히 텅스텐과 구리의 단일 특성을 계승하는 것이 아니라, 두 합금의 시너지 효과를 통해 균형 잡히고 실용적인 일련의 특성을 형성합니다. 거시적인 관점에서 볼 때, 텅스텐-구리 합금은 금속과 유사한 우수한 전기 및 열 전도성과 복잡한 작업 조건에도 견딜 수 있는 충분한 기계적 강도를 가지고 있습니다. 응용 측면에서 볼 때, 그 핵심 특성은 "균형"에 있습니다. 즉, 경도와 인성, 고온 저항, 전기 및 열 전도성 사이의 임계점을 찾아 산업적 요구에 맞춰 적용하는 것입니다. 이를 통해 까다로운 재료 특성을 가진 다양한 상황에서 텅스텐-구리 합금은 그 역할을 수행할 수 있습니다. 잦은 마찰이 필요한 기계 부품이든, 고온과 전류 충격에 동시에 노출되는 전기 장비이든, 텅스텐-구리 합금의 특성은 구체적으로 반영될 수 있습니다.

#### 2.1.1 고경도 형성 메커니즘 및 장점

텅스텐 구리 합금은 순수 구리 및 대부분의 구리 합금과 구별되는 독특한 특징을 가지고 있습니다. 이러한 특성은 내부 구조의 시너지 효과와 밀접한 관련이 있으며, 내마모성 소재 적용의 기반을 제공합니다. 순수 구리의 연성과 달리, 텅스텐 구리 합금의 경도는 단일 부품의 강화가 아닌 구조 설계를 통한 성능 최적화를 통해 얻어집니다. 이를 통해 외부 마찰 및 압출로 인한 변형에 저항하면서도 일정한 가소성을 유지할 수 있어, 실용적이면서도 내구성이 뛰어난 소재입니다.

##### 2.1.1.1 미세구조 메커니즘

텅스텐-구리 합금은 "골격 충전" 미세 구조에서 비롯됩니다. 합금 내부에서 텅스텐은 높은 고유 경도를 가진 연속적인 골격 형태로 존재합니다. 이러한 텅스텐 입자들은 건물의 철골 구조처럼 재료 전체에 걸쳐 서로 연결되어 견고한 지지망을 형성하여 합금의 기본적인 경도를 지지합니다. 충전재인 구리는 텅스텐 골격의 기공에 고르게 분포되어 있습니다. 구리 자체는 경도가 낮지만, 텅스텐 골격의 무결성을 약화시키지 않습니다. 오히려 구리는 텅스텐 입자 사이의 틈을 채워 골격 구조의 "약점"을 줄이고, 외부 압력이 구리 상을 통해 텅스텐 골격으로 전달되도록 하여 국부적인 응력 집중으로 인한 구조적 손상을 방지합니다.

또한, 텅스텐과 구리 사이의 계면 결합 또한 경도에 중요한 영향을 미칩니다. 제조 과정에서 적절한 공정 처리를 거치면 텅스텐 입자와 구리 상 사이에 안정적인 결합 계면이 형성됩니다. 이 결합은 텅스텐 입자가 힘을 받을 때 서로 미끄러지는 것을 방지하여 전체 구조의 강성을 더욱 강화합니다. 따라서 텅스텐-구리 합금의 높은 경도는 단일 성분의 작용이 아니라 텅스텐의 강성 골격, 구리의 충전 보강재, 그리고 계면 결합의 복합적인 작용의 결과입니다. 이러한 미세 구조는 외부 마찰이나 압출 시에도 구조적 무결성을 유지할 수 있도록 합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.1.1.2 내마모성 응용 분야의 장점

텅스텐 구리 합금은 내마모성 분야에서 탁월한 장점을 보여줍니다. 핵심은 장기적인 마찰로 인한 표면 손상을 방지하고 부품의 수명을 연장할 수 있다는 것입니다. 잦은 접촉이나 상대적인 움직임이 필요한 환경에서는 마찰로 인해 소재 표면이 점진적으로 마모되기 쉽고, 이는 결국 부품 크기 변화 또는 기능적 고장으로 이어집니다. 텅스텐 구리 합금의 높은 경도는 이러한 마모를 줄여줍니다. 다른 물체와 접촉할 때 표면이 쉽게 긁히거나 움푹 들어가지 않고, 원래 형태와 치수 안정성을 오랫동안 유지할 수 있습니다. 동시에, 내마모성의 장점은 "마찰 조건의 변동"에 대한 적응성에서도 드러납니다. 실제 적용에서 마찰 환경은 일정하지 않으며, 하중 변화, 온도 변화 등이 발생할 수 있습니다. 텅스텐 구리 합금은 온도의 미세한 상승이나 하중 변화로 인해 경도가 크게 감소하지 않으며, 복잡한 조건에서도 내마모성을 지속적으로 유지할 수 있습니다. 예를 들어, 일부 기계식 변속기 부품은 장시간 다양한 마찰 충격에 노출되더라도 표면이 평평하게 유지되고 과도한 마모로 인한 변속기 정확도 저하를 방지하여 관련 장비의 유지 보수 주기를 연장하고 부품 교체로 인한 비용 및 가동 중단 손실을 줄여줍니다.

### 2.1.1.3 다른 합금과의 경도 비교 및 장점

순수 구리 및 일반 구리 합금과 비교할 때, 텅스텐 구리 합금의 경도 이점은 매우 분명합니다. 순수 구리는 질감이 부드럽고 약간의 외부 마찰에도 표면 변형이 발생하기 쉽습니다. 대부분의 구리 합금은 다른 원소를 첨가하여 경도를 높이지만, 전체 경도는 여전히 "중간에서 낮음" 수준이며 고강도 마찰에는 대처하기 어렵습니다. 텅스텐 구리 합금은 텅스텐 골격을 포함하고 있어 이러한 재료보다 경도가 훨씬 높으며, 동일한 마찰 조건에서 표면 마모도는 현저히 낮습니다. 순수 텅스텐에 비해 텅스텐-구리 합금의 경도는 약간 낮지만, 실제 적용에서는 더 많은 장점을 가지고 있습니다. 순수 텅스텐은 매우 높은 경도를 가지고 있지만, 취성이 있습니다. 마찰 시 약간의 충격을 받으면 쉽게 깨지거나 벗겨져 내마모성에 영향을 미칩니다. 텅스텐-구리 합금의 구리 상은 일종의 "완충" 역할을 합니다. 높은 경도를 유지하면서도 충격 에너지의 일부를 흡수하여 취성 파괴 위험을 줄일 수 있습니다. 따라서 실제 작업 조건에서 발생할 수 있는 "마찰 + 충격" 복합 상황에 더 적합합니다.

일부 철 기반 합금과 비교했을 때, 텅스텐 구리 합금의 경도는 반드시 절대적인 우위를 가지는 것은 아니지만, 경도 외의 성능 면에서는 경쟁력이 있습니다. 철 기반 합금은 전기 및 열 전도성이 낮은 경향이 있는 반면, 텅스텐 구리 합금은 높은 경도를 유지하면서도 우수한 전기 및 열 전도성을 유지할 수 있어 내마모성과 전기 전도성(또는 열 전도성)이 모두 필요한 상황에서 대체할 수 없는 선택입니다. 예를 들어, 접촉 마찰을 견뎌내고 전류를 흐르게 해야 하는 일부 전기 부품의 경우, 철 기반 합금은 전기 전도성 요건을 충족할 수 없지만, 텅스텐 구리 합금은 두 가지 모두를 충족할 수 있습니다.

### 2.1.2 아크 침식 저항의 원리 및 성능

아크 내식성은 전기 분야에서 널리 사용되는 텅스텐 구리 합금의 핵심 특성 중

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

하나입니다. 고전압 스위치, 릴레이 및 기타 장비에서는 전류를 켜고 끌 때 필연적으로 아크가 발생합니다. 아크의 고온과 에너지는 점점 재료를 부식시켜 부품 고장을 유발합니다. 텅스텐 구리 합금은 고유한 조성구로 인해 이러한 부식에 효과적으로 저항하고 부품의 장기적 안정적 작동을 유지할 수 있습니다. 텅스텐 구리 합금의 아크 내식성은 단일 요인의 결과가 아니라 재료 조성, 미세 구조, 그리고 아크 작용 메커니즘의 복합적인 영향으로 나타납니다. 또한 사용 환경의 차이로 인해 성능이 다르게 나타나므로, 성능 최적화를 위한 명확한 방향이 존재합니다.

#### 2.1.2.1 아크 침식 메커니즘

아크 침식은 아크 작용으로 인해 표면이 손상되고 재료가 손실되는 과정을 말합니다. 아크 침식의 핵심 동력은 아크에서 방출되는 고온과 에너지입니다. 아크가 발생하면 국부 온도가 급격히 상승하여 재료 표면이 녹거나 증발할 수 있습니다. 동시에 아크에서 발생하는 전기력은 용융된 재료 입자를 표면에서 밀어내어 스프래시 손실을 발생시킵니다. 또한, 고온 환경에서는 재료가 주변 매질(예: 공기 중 산소)과 화학적으로 반응하여 산화물과 같은 취성 물질을 생성할 수 있으며, 이러한 물질은 후속 아크 또는 기계적 작용으로 쉽게 벗겨져 침식을 더욱 악화시킵니다.

공정 관점에서 아크 침식은 "열 손상-기계적 박리-화학적 분해"의 복합적인 효과입니다. 고온은 먼저 재료 표면의 무결성을 파괴하여 표면 재료를 불안정하게 만듭니다. 전기력과 기류는 이러한 불안정한 물질을 벗겨냅니다. 그리고 화학 반응은 재료 표면의 결합력을 약화시켜 침식이 지속될 가능성을 높입니다. 이러한 메커니즘은 재료 표면 에 점진적으로 구멍, 균열 또는 변형을 유발하여 궁극적으로 부품의 전도성과 구조적 안정성에 영향을 미칩니다.

#### 2.1.2.2 아크 침식 저항의 본질적인 원리

텅스텐-구리 합금은 텅스텐과 구리의 시너지 효과에서 비롯됩니다. 그 내부 원리는 "고온 내성 골격 + 효율적인 방열 + 자가 복구 버퍼"의 삼중 메커니즘에 기인합니다.

텅스텐은 고용점 성분으로 합금의 견고한 골격을 형성합니다. 텅스텐은 고온 아크에도 쉽게 녹지 않습니다. 아크 작용 시 구조의 무결성을 유지하고 표면의 대규모 손상을 방지할 수 있습니다. 텅스텐은 재료의 전체 증발 속도를 감소시키고 고온으로 인한 재료 손실을 줄여줍니다.

뛰어난 열전도도를 가진 구리는 아크에서 발생하는 열을 작용 영역에서 빠르게 방출하여 과도한 국부 온도 상승을 방지하고, 이로 인해 용융 및 증발 정도를 줄입니다. 더 중요한 것은 아크 온도가 매우 높을 때 구리가 텅스텐보다 먼저 용융되고, 용융된 구리가 표면의 작은 구멍을 메워 아크 에너지의 일부를 흡수하고 아크에 직접 노출되는 텅스텐 골격의 면적을 줄여 보호 역할을 하는 임시 "완충층"을 형성한다는 것입니다.

또한, 텅스텐과 구리의 계면 접합 강도가 비교적 높아 아크의 전기력에 의한 인열 현상을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



억제하고 재료 입자의 비산 손실을 줄일 수 있습니다. "텅스텐의 용융 저항성, 구리 방열, 그리고 시너지 효과에 의한 박리 방지"라는 이러한 내부 메커니즘 덕분에 텅스텐-구리 합금은 반복적인 아크 작용에도 우수한 표면 강도를 유지할 수 있습니다.

#### 2.1.2.3 사용 환경에 따른 성능 차이

텅스텐 구리 합금은 고정되어 있지 않으며 사용 환경에 따라 크게 달라집니다. 주로 주변 온도, 분위기 조성, 아크 에너지 밀도, 기계적 부하 등의 요인에 영향을 받습니다.

고온 환경에서는 주변 환경의 기저 온도가 이미 비교적 높아 구리의 방열 효율이 약해져 아크 작용 영역의 열이 빠르게 확산되기 어려워지고, 이로 인해 재료의 용해와 증발이 심화되어 침식 속도가 빨라질 수 있습니다.

산소 함량이 높거나 부식성 가스(예: 이산화황, 황화수소)가 있는 환경에서는 아크의 고온으로 인해 재료와 가스 사이에 더욱 격렬한 화학 반응이 발생하여, 더 부서지기 쉬운 산화물이나 황화물이 생성되고, 이러한 산화물이나 황화물은 쉽게 벗겨져 부식을 가속화합니다. 불활성 가스로 보호된 환경에서는 화학 반응이 억제되고, 부식은 주로 물리적 손실(용융, 비산)로 발생하며, 성능도 더욱 안정적입니다.

아크 에너지 밀도가 높을 경우(예: 고전류 스위칭), 텅스텐의 높은 용융점조차도 순간적인 고온을 완전히 견뎌낼 수 없어 텅스텐 골격이 부분적으로 용융될 수 있습니다. 이때 구리의 완충 효과는 향상되지만, 전반적인 침식 정도는 저에너지 아크 조건보다 여전히 높습니다. 동시에 기계적 진동이나 압력이 가해지면 재료 표면의 침식 생성물(예: 용융 후 응고층)이 외부 힘에 의해 박리될 가능성이 높아져 손상 영역이 더욱 확대되고 아크 침식 저항성이 저하됩니다.

#### 2.1.2.4 성능 향상 방법

합금의 아크 침식 저항성은 재료 설계, 공정 최적화, 기능 향상의 세 가지 측면에서 시작하여 목표 개선을 통해 아크 손상 저항 능력을 향상시킬 수 있습니다. 재료 설계에서 텅스텐-구리 비율을 조정하여 성능 균형을 최적화할 수 있습니다. 텅스텐 함량을 적절히 높이면 고온 내성 골격의 안정성을 높이고 고온 용융을 줄일 수 있습니다. 합리적인 구리 함량은 방열 효율을 보장하고 국부 과열을 방지할 수 있습니다. 특정 고에너지 아크 시나리오의 경우, 소량의 고용점 산화 방지 원소를 추가하여 텅스텐 골격에 통합하여 구리의 열전도도를 크게 감소시키지 않고 용융 및 산화에 대한 저항성을 향상시킬 수도 있습니다.

공정 최적화는 성능 향상의 핵심 수단입니다. 텅스텐 분말과 구리 분말의 입자 크기를 미세화함으로써 미세 구조에 더욱 균일하게 분포시켜 국부적인 성분 편석으로 인한 취약성을 줄일 수 있습니다. 진공 소결 또는 대기 보호 소결 공정을 사용하면 소재 내부의 기공을 줄이고, 텅스텐-구리 계면의 접합 강도를 높이며, 아크 작용 시 입자가 튀는 현상을 줄일 수 있습니다. 또한, 완제품의 표면 강화 처리(예: 내마모성 코팅의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

플라즈마 용사)를 통해 표면에 추가적인 보호막을 형성하여 아크에 의한 기관의 침식을 지연시킬 수 있습니다.

기능 향상 측면에서, 실제 아크 작업 조건을 시뮬레이션하여 "구배 구조"를 갖는 텅스텐-구리 합금을 설계할 수 있습니다. 표면 텅스텐 함량을 높여 용융 저항성을 향상시키고, 내부 구리 함량을 높여 열 발산을 확보함으로써 소재가 다양한 깊이에서 목표한 역할을 수행할 수 있도록 합니다. 동시에, 침식된 표면을 수리하여 부품의 수명을 연장하는 합금 재활용 및 재사용 기술을 개발하고 있으며, 이는 전체 수명 주기에 걸쳐 소재의 아크 침식 저항성을 간접적으로 향상시킵니다.

### 2.1.3 접착 방지 및 용접 방지 성능 분석

텅스텐 구리 합금은 기계적 접촉 및 전기적 연결에서 접착 방지 및 용접 방지 기능을 갖춘 중요한 특성을 가지고 있습니다. 접착은 두 접촉 표면이 부분적으로 결합되어 압력이나 온도의 작용으로 분리되기 어려운 현상을 말합니다. 용접은 더 심각한 접착으로, 접촉 표면이 고온에서 용융되었다가 냉각 및 응고되어 영구적인 연결을 형성하는 것을 의미합니다. 이러한 두 가지 상황 모두 부품의 고착 및 고장을 유발하며, 텅스텐 구리 합금은 고유한 특성을 통해 이러한 문제에 대한 탁월한 저항성을 보여줍니다. 텅스텐 구리 합금의 핵심은 접촉 표면의 "계면 결합 경향"을 줄이는 데 있으며, 이는 압력으로 인한 기계적 접착을 방지할 뿐만 아니라 고온으로 인한 용융 용접을 방지합니다.

#### 2.1.3.1 접착 및 용착의 원인

접착의 원인은 주로 "표면 접촉 상태"와 "기계적 작용"과 관련이 있습니다. 두 부품의 표면이 밀착되어 압력을 받으면 접촉 표면의 미세한 돌기가 서로 파고듭니다. 재료 자체가 강한 가소성을 가지고 있다면 돌기가 국부적으로 변형되어 서로 맞물릴 수 있습니다. 동시에 표면 산화막이나 불순물이 압착되어 파괴되면 새로운 금속 표면이 직접 접촉하여 원자 간 확산으로 인해 흡착력이 발생하고, 결국 접촉 표면의 국부적인 접착으로 이어집니다. 이러한 상황은 장기간의 압력이나 저속 상대 운동이 있는 상황에서 발생할 가능성이 더 높습니다.

용접은 "고온 용융"과 "냉각 및 응고"의 복합적인 효과로 이루어집니다. 접촉면에 전기 아크와 같은 열원이나 높은 마찰열이 있을 경우, 재료 표면이 용융 상태로 가열되어 두 접촉면의 용융 금속이 서로 혼합됩니다. 온도가 낮아짐에 따라 혼합된 용융 금속이 응고되어 접촉면에 용접과 유사한 접합을 형성합니다. 또한, 접촉면에 불순물(예: 연소 중인 기름의 잔여물)이 있는 경우, 고온에서 저융점 공정이 형성되어 용융 금속의 접합을 더욱 촉진하고 용접 현상을 심화시킬 수 있습니다.

#### 2.1.3.2 접착 방지 성능

텅스텐-구리 합금은 접촉 상태에서 다른 부품과 안정적인 접합을 형성하기 어렵다는 점에서 주요한 특징을 보입니다. 짧은 접촉이 발생하더라도 분리 시 표면 손상을 줄일 수

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있습니다. 기계적 접촉 상황에서 텅스텐으로 형성된 강성 골격은 재료 표면의 변형 저항성을 향상시키고, 접촉 표면의 미세한 돌기가 쉽게 찌그러지거나 박히지 않아 기계적 물림으로 인한 접착 기반을 줄입니다. 동시에 구리의 존재는 표면이 (순수 텅스텐 대비) 일정한 윤활성을 유지하도록 하고, 접촉 시 마찰 계수를 줄이며, 마찰열로 인한 표면 흡착 악화를 방지합니다. 따라서 장기간 압력 접촉이 발생하는 부품에서 텅스텐-구리 합금 표면은 상대 재료와 접촉 흔적을 형성하기 어렵고, 분리에 필요한 힘이 작아 접촉 표면의 무결성을 유지할 수 있습니다.

전기 접촉 상황에서는 국소적인 온도 상승을 유발하는 미세한 아크가 발생하더라도 텅스텐 구리 합금은 표면 용융으로 인한 접착이 발생하지 않습니다. 이는 구리의 열전도도가 열을 빠르게 분산시켜 표면이 더 이상 용융되지 않기 때문입니다. 반면 텅스텐의 높은 용융점은 넓은 면적의 용융을 방지하여 접촉 표면에 안정적인 접합층을 형성하기 어렵게 하고, 분리 시 "찢어짐" 손상이 발생하지 않습니다.

### 2.1.3.3 접착 방지 및 용접 방지 성능에 영향을 미치는 요인

텅스텐 구리 합금은 고정되어 있지 않으며 재료 자체의 상태, 접촉 조건 및 환경 요인의 영향을 받습니다.

재료 자체의 표면 상태는 중요한 요소입니다. 표면에 산화막이나 기름 얼룩과 같은 불순물이 있으면 표면 마감이 저하됩니다. 불순물은 압력이나 고온에서 접착의 "접합점"이 되어 접착 방지 성능을 약화시킬 수 있습니다. 반대로, 연마된 매끄러운 표면은 미세한 돌기가 적고 접촉 면적이 작아 접착 방지 성능이 더 우수합니다. 또한, 텅스텐 구리 합금의 밀도도 영향을 미칩니다. 내부 기공이 많은 재료는 표면에 작은 구멍이 생기기 쉽고, 불순물이 쉽게 침전되며, 국부 접착이 발생할 가능성이 더 높습니다.

접촉 조건의 영향은 주로 압력, 온도, 그리고 상대 운동에 반영됩니다. 과도한 압력은 접촉 표면의 미세한 접촉면을 증가시켜 접착력을 증진시킵니다. 과도한 온도(용융점에 도달하지 않더라도)는 원자 확산 속도를 증가시켜 표면 흡착력을 증가시킵니다. 윤활 없이 고속 상대 운동하면 마찰열 발생으로 인한 표면 손상을 심화시켜 접착 위험을 간접적으로 증가시킬 수 있습니다.

환경 요인 중 습도와 매질 구성이 더 중요합니다. 습도가 높은 환경은 표면 산화를 촉진하여 접촉 시 쉽게 벗겨지는 느슨한 산화막을 형성하여 접착 매질이 됩니다. 환경에 부식성 가스가 있는 경우, 표면에 취성 화합물이 형성되어 벗겨질 때 표면 금속을 벗겨 접착력을 저하시킬 수 있습니다. 또한 표면의 무결성을 손상시키고 용접 저항에 간접적인 영향을 미칩니다.

### 2.1.4 우수한 전도도의 원리 및 응용

텅스텐-구리 합금의 탁월한 전기 전도성은 순수 텅스텐 및 대부분의 고온 내성 합금과 차별화되는 핵심 장점 중 하나입니다. 이러한 성능은 부품 자체의 특성에서 비롯되며,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

복합 구조의 시너지 효과에서도 이점을 얻습니다. 텅스텐-구리 합금은 단일의 "극한의 전도성"을 추구하는 것이 아니라, 일정한 기계적 강도와 고온 내성을 유지함으로써 "충분하고 안정적인" 전기 전도성을 달성합니다. 이를 통해 전류 전도와 복잡한 작업 조건을 동시에 처리해야 하는 상황에서 뛰어난 성능을 발휘합니다. 원칙적으로 전도성은 금속 내부 전자의 이동에 의해 결정되며, 이러한 특성은 응용 측면에서 "전기적 기능"과 "구조적 지지"를 연결하는 핵심 소재입니다.

#### 2.1.4.1 전도도의 물리적 특성 및 전도 메커니즘

전도성의 물리적 본질은 물질 내 자유 전자가 전기장의 작용 하에서 방향성을 가지고 이동할 수 있는 능력입니다. 외부 전기장이 존재하면 물질 내 자유 전자는 원자핵의 구속에서 벗어나 전기장 방향으로 이동하여 전류를 형성합니다. 전자의 이동을 방해하는 요소(예: 원자 진동, 불순물 산란 등)가 적을수록 전도성이 더 좋습니다.

텅스텐-구리 합금은 주로 구리 상의 역할에 의존합니다. 구리는 내부에 많은 자유 전자를 포함하고 원자들이 규칙적으로 배열된 전형적인 좋은 도체입니다. 전자의 이동 중 산란 효과가 약하기 때문에 전류를 효율적으로 전도할 수 있습니다. 텅스텐-구리 합금에서 구리는 텅스텐 골격의 기공에 연속 또는 반연속 형태로 채워져 관통하는 "전도 채널"을 형성합니다. 전류가 합금을 통과할 때 전자는 주로 구리 상의 채널을 통해 흐릅니다. 텅스텐 자체는 구리보다 전도도가 훨씬 낮지만, 골격으로서 구리 상의 연속성을 방해하지 않고 지지 구조를 통해 구리 상의 채널의 안정성을 유지합니다. 또한, 텅스텐과 구리의 계면은 단단히 결합되어 계면에서 전자의 산란 손실을 줄이고 전도 효율을 더욱 향상시킵니다. "구리상이 지배하는 전도성과 텅스텐상이 안정화된 구조"의 메커니즘 덕분에 합금은 기계적 특성을 유지하면서도 우수한 전도성을 유지할 수 있습니다.

#### 2.1.4.2 다양한 구성 요소 비율에서의 전도도 변화

텅스텐-구리 합금의 전도도는 텅스텐과 구리의 조성비 변화에 따라 뚜렷한 규칙성을 보입니다. 핵심 추세는 "구리 함량이 높을수록 전도도가 좋아지고, 텅스텐 함량이 높을수록 전도도가 약해진다"는 것입니다. 이러한 변화는 두 재료의 전도도에 존재하는 근본적인 차이에서 비롯됩니다.

구리 함량이 높을수록 합금 내 구리상에 의해 형성되는 전도 채널이 더욱 완전하고 조밀해지며, 전자 흐름 경로가 더욱 매끄럽고 방해가 적어 전체 전도도가 순수 구리 수준에 가까워집니다. 이때 텅스텐상은 분산된 입자 형태로 존재하여 구리상의 연속성에 약간의 영향을 미치지만, 함량이 낮기 때문에 전도 채널을 막을 정도는 아니므로 전도도는 여전히 높은 수준을 유지할 수 있습니다.

텅스텐 함량이 증가함에 따라 텅스텐 골격의 비율이 점차 증가하여 구리 상의 분포가 텅스텐 입자에 의해 나뉘게 되고, 일부 전도성 채널이 끊어지거나 좁아질 수 있으며, 전자가 흐를 때 텅스텐 입자를 우회해야 하므로 경로가 길어지고 산란이 증가하여 전도성이 감소합니다. 텅스텐 함량이 너무 높으면 구리 상이 연속적인 채널을 형성하지

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



못하고 고립된 작은 영역에만 존재할 수 있습니다. 이때 전자가 합금 내부에서 자유롭게 이동하기 어려워 전도성이 크게 약화됩니다.

이러한 변화는 선형적인 "단조적 감소"가 아니며 구리 상의 연속성과 밀접한 관련이 있습니다. 텅스텐 함량이 증가하더라도 구리 상이 기본적으로 연속성을 유지할 수 있는 한 전도도의 감소는 비교적 완만합니다. 구리 상이 완전히 분할되면 전도도가 상당히 감소합니다.

#### 2.1.4.3 전기 장비에서 전도성 응용 분야의 장점

전기 장비에서 텅스텐-구리 합금의 전도성 응용 장점은 주로 "전도성과 작업 조건에 대한 적응성을 모두 고려"하는 데 반영되며, 특정 시나리오에서 순수 구리와 순수 텅스텐 간의 성능 격차를 메울 수 있습니다.

고전압 스위치, 릴레이 등 전류를 빈번하게 켜고 끄는 장비에서 점점 재질은 전류를 잘 흐르게 하고 스위칭 중 아크 온도와 기계적 충격을 견뎌야 합니다. 순수 구리는 전도성이 우수하지만 고온에서 쉽게 녹고 기계적 강도가 부족하여 장기간 사용 시 변형이나 삭마(ablation) 불량이 발생하기 쉽습니다. 순수 텅스텐은 고온에 강하고 강도가 높지만 전도성이 낮아 대전류 전도 요건을 충족하기 어렵습니다. 텅스텐-구리 합금은 이 두 가지 요건을 모두 충족합니다. 구리는 효율적인 전류 흐름을 보장하고 점점의 과열을 방지하며, 텅스텐은 아크 온도와 기계적 충격에 강하고 점점 수명을 연장하며 장비 고장을 줄여줍니다.

모터 브러시나 전도성 슬라이더와 같이 슬라이딩 접촉이 필요한 부품의 경우, 재료는 전류를 전도하는 동안 마찰과 마모에 대한 저항성을 가져야 합니다. 순수 구리는 내마모성이 낮으며, 장기간 슬라이딩하면 마모로 인해 전도성이 불안정해집니다. 일반 구리 합금은 내마모성이 제한적이고 첨가된 원소로 인해 전도성이 저하될 수 있습니다. 텅스텐-구리 합금의 텅스텐상은 표면 내마모성을 향상시키고 슬라이딩 중 손실을 줄입니다. 구리상은 안정적인 전도성을 유지합니다. 표면에 약간의 마모가 발생하더라도 내부 구리상의 연속성은 전류 전도를 보장하고 장비 작동의 안정성을 보장합니다. 또한, "전도성 + 방열"의 이중 기능이 필요한 일부 부품(예: 고출력 장치의 전극)에서는 텅스텐-구리 합금의 전도성과 구리상의 열전도성이 시너지 효과를 발휘합니다. 전류를 전도할 뿐만 아니라 장치 작동 시 발생하는 열을 제거하여 국부 과열을 방지하고 성능에 영향을 미치지 않습니다. "하나의 소재로 다양한 용도로 사용 가능"이라는 장점은 전기 장비에서의 적용 가치를 더욱 높여줍니다.

#### 2.1.5 좋은 열전도도

텅스텐-구리 합금은 고온 및 고출력 환경에서 핵심적인 역할을 수행하는 지지체 중 하나입니다. 이러한 성능은 특정 부품에만 의존하는 것이 아니라, 텅스텐과 구리의 구조 및 특성 시너지 효과의 결과입니다. 텅스텐-구리 합금은 구리의 효율적인 열전도도를 유지할 뿐만 아니라, 텅스텐의 골격 구조를 통해 열전도 과정의 안정성을 보장합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

순수 구리와 비교했을 때 열전도도는 약간 저하되지만, 그 대가로 더 강력한 기계적 지지력을 제공합니다. 순수 텅스텐과 비교했을 때 열전도 효율이 크게 향상되어 열 축적 문제를 해결할 수 있습니다. 이러한 "균형 잡힌" 열전도 특성은 열 전달과 구조적 하중 지지를 동시에 처리해야 하는 환경에서 텅스텐-구리 합금을 대체할 수 없습니다.

#### 2.1.5.1 열전도도의 기본 원리 및 열전도 메커니즘

열전도도의 기본 원리는 물질 내부의 미세한 움직임을 통해 고온 영역에서 저온 영역으로 열이 전달되는 능력입니다. 열전도도의 핵심은 분자, 원자 또는 전자의 운동 에너지 전달입니다. 고온 영역의 입자는 더욱 격렬하게 진동하고, 충돌을 통해 저온 영역의 입자로 에너지를 전달하며, 점진적으로 열 확산이 이루어집니다.

텅스텐-구리 합금의 열전도 메커니즘은 주로 구리 상의 "전자 열전도도"에 기반하며, 텅스텐 상의 "포논 열전도도"가 이를 보완합니다. 금속인 구리는 내부에 많은 자유 전자를 가지고 있습니다. 이 전자들이 고온 영역에서 에너지를 얻으면 운동이 활발해지고, 충돌을 통해 저온 영역으로 빠르게 열을 전달합니다. 이는 효율적인 열전도 방식입니다. 반면 텅스텐의 열전도도는 주로 격자 진동(즉, "포논")에 의존하며, 평형 위치 근처 원자의 진동이 격자를 통해 열을 전달합니다. 효율은 구리의 전자 열전도도보다 낮지만 더 안정적입니다. 합금 구조에서 구리 상은 연속적인 열전도 채널을 형성하고, 열은 먼저 구리 상을 통해 빠르게 확산됩니다. 텅스텐 골격은 "열전달 보조 경로" 역할을 하는 동시에 구리 상 채널의 무결성을 유지하여 고온 변형으로 인한 열전도 경로의 파손을 방지합니다. 이 "구리 상 지배, 텅스텐 상 보조" 메커니즘은 합금이 열을 효율적으로 전달하고 열충격 시 열전도 구조의 안정성을 유지할 수 있도록 합니다.

#### 2.1.5.2 열전도도와 방열효과의 관계

열전도율은 방열 효과의 핵심 기반이며, 이 둘은 "양의 상관관계"를 보입니다. 즉, 재료의 열전도율이 높을수록 열이 열원에서 외부로 더 빨리 전달되어 방열 효과가 커집니다. 그러나 방열 효과는 열전도율뿐만 아니라 재료의 방열 면적, 방열 매체와의 접촉 상태 등과도 관련이 있습니다. 텅스텐 구리 합금의 장점은 "효율적인 열전도율을 통해 다른 방열 조건의 효과를 증폭시킨다"는 것입니다. 열원에서 열이 발생하면, 열전도율이 좋은 텅스텐 구리 합금은 열원 표면에서 열을 빠르게 전도하여 국부적인 열 축적을 방지합니다. 전도된 열은 재료 표면을 통해 공기 및 냉각수와 같은 방열 매체로 전달됩니다. 이때 재료 자체의 열전도도가 부족하면 방열 면적이 크더라도 열이 표면에 도달하기 어려워 방열 효과가 크게 저하됩니다. 또한, 텅스텐 구리 합금의 열전도도가 우수하여 재료 내부에 열이 "핫스팟"(국부적으로 고온 영역)으로 형성되는 것을 방지할 수 있습니다. 핫스팟은 과열로 인한 부품 고장의 주요 원인입니다. 따라서 균일한 열전도도는 전체 방열의 신뢰성을 간접적으로 향상시킵니다.

#### 2.1.5.3 고온 작업 환경에서 열전도도의 적용 값

고온 작업 환경에서 재료의 열전도도는 "효율적"일 뿐만 아니라 "안정적"이어야 합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

즉, 주변 온도 상승으로 인해 열전도도가 크게 감소해서는 안 됩니다. 텅스텐 구리 합금의 열전도도 적용 가치는 이 점에 반영됩니다. 항공우주 엔진의 연소실 근처 부품은 주변 온도가 매우 높으며, 작업으로 인해 추가 열이 발생합니다. 열전도도가 불안정하면 열 축적으로 인해 부품이 허용 온도를 초과할 수 있습니다. 텅스텐 구리 합금의 구리 상은 고온에서 연화될 수 있지만, 녹는점에 도달하지 않는 한 열전도도는 크게 감소하지 않습니다. 텅스텐 골격은 구조적 안정성을 유지하고 고온으로 인한 구리 상 변형 및 열전도 경로 차단을 방지하여 열을 지속적으로 전달하고 고온에서 부품의 안전한 작동을 보장합니다.

고전력 반도체 소자의 방열 기관은 소자 작동 시 다량의 열이 발생하며, 작동 시간에 따라 주변 온도가 상승합니다. 일반 열전도성 재료(예: 순수 알루미늄)의 온도가 일정 범위를 초과하면 열전도도가 크게 떨어져 방열 불량이 발생합니다. 텅스텐 구리 합금은 고온에서도 안정적인 열전도도를 유지하여 소자에서 발생하는 열을 방열 소자로 지속적으로 전달하고, 과열로 인한 소자의 성능 저하 또는 손상을 방지합니다.

또한, 아크 용접의 전극 부분에서 전극은 전류를 잘 통할 뿐만 아니라 아크에서 발생하는 순간적인 고온을 견뎌야 합니다. 열전도도가 낮으면 열을 발산하지 못해 전극 자체가 빠르게 타버립니다. 텅스텐 구리 합금은 효율적인 열전도도를 통해 아크의 열을 적시에 전달하여 전극 자체의 온도를 낮추고 수명을 연장하며 용접 공정의 안정성을 보장합니다. "고온에서 열전도 효율을 유지한다"는 이러한 특성은 고온 환경에서 "발열"과 "방열"을 연결하는 핵심 소재입니다.

## 2.1.6 내식성 및 메커니즘

텅스텐- 구리 합금은 가장 뛰어난 특성은 아니지만 , 부식성이 약한 매체가 있는 습한 환경에서 실용적인 가치를 발휘합니다. 내식성은 단일 성분만으로 달성되는 것이 아니라, 텅스텐과 구리의 구조적 시너지 효과와 부식 과정에 대한 "수동적 저항성"의 결과입니다. 특정 환경에서 순수 구리의 급속한 산화를 방지할 뿐만 아니라, 복잡한 매체에서 순수 텅스텐의 국부적인 부식 결함을 보완하고 다양한 산업 환경에서 구조 및 성능의 안정성을 유지할 수 있습니다.

### 2.1.6.1 다양한 부식 환경의 영향

부식 환경의 차이는 텅스텐 구리 합금의 부식 정도에 영향을 미치며 , 이는 주로 매체 유형, 습도 및 온도의 세 가지 측면에 반영됩니다. 습한 대기 환경에서 수증기는 합금 표면에 수막을 형성합니다. 공기 중에 소량의 오염 물질(예: 이산화황 및 소금)이 있는 경우 수막 은 약한 전해질이 되어 약간의 전기화학적 부식을 유발합니다. 구리 상은 산화되어 표면에 산화막을 형성할 수 있지만, 이 산화막은 치밀하여 부식이 더 확산되는 것을 어느 정도 방지할 수 있습니다. 텅스텐은 이러한 환경에 더 잘 견디며 거의 부식되지 않으므로 전반적인 부식 속도가 느립니다.

산성 또는 알칼리성 매체에서는 부식 정도가 상당히 악화됩니다. 산성 환경은 구리

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면의 산화막을 파괴하여 구리 상이 계속 용해되도록 합니다. 알칼리성 환경은 구리와 화학적으로 반응하여 가용성 물질을 생성하여 구리 상의 손실을 가속화할 수 있습니다. 이 때 텅스텐 상은 산 및 알칼리 부식에 저항할 수 있지만 구리 상이 계속 손실됨에 따라 합금 구조가 점차 느슨해져 궁극적으로 전체 성능에 영향을 미칩니다. 고온 건조 환경에서 부식은 주로 산화입니다. 고온은 구리의 산화 반응을 가속화하여 표면에 더 두꺼운 산화층을 형성할 수 있습니다. 산화층이 떨어지면 새로운 구리 표면이 노출되어 계속 산화됩니다. 텅스텐은 고온에서 천천히 산화되고 생성된 산화층은 표면에 부착되어 내부를 보호할 수 있으므로 전체 부식 수준은 습하거나 산성 또는 알칼리성 환경보다 낮습니다.

#### 2.1.6.2 내부식성 메커니즘

텅스텐-구리 합금은 "텅스텐상 내식성 골격 + 구리상 산화 자체 보호 + 구조적 밀도 차단"의 상승효과로 요약될 수 있습니다.

텅스텐 상 자체는 화학적 안정성이 높으며, 대부분의 일반적인 부식성 환경에서는 매질과 반응하기 어렵습니다. 텅스텐 상이 형성하는 연속적인 골격은 합금의 내식성을 위한 기본적인 지지력을 제공합니다. 구리 상이 약간 부식되더라도 텅스텐 골격은 구조적 무결성을 유지하고 합금의 전반적인 손상을 방지할 수 있습니다.

습도가 높거나 산화가 약한 환경에서는 구리 표면에 산화막이 형성됩니다. 이 산화막은 표면의 색상을 변화시키지만, 그 질감이 비교적 조밀하여 매체가 내부 구리와 더 이상 접촉하는 것을 방지할 수 있습니다. 이는 부식의 지속적인 확산을 늦추는 "자연적인 장벽"을 형성하는 것과 같습니다.

또한, 합금의 치밀한 구조는 내식성을 향상시킬 수 있습니다. 제조 공정을 최적화함으로써 텅스텐-구리 합금 내부의 기공률을 낮춰 부식성 매체가 내부로 침투할 수 있는 통로를 줄입니다. 동시에 텅스텐과 구리의 계면이 단단히 결합되어 매체가 계면에 모여 국부적인 부식 지점을 형성하는 것을 방지하여 부식 위험을 더욱 감소시킵니다. 이러한 "골격 내식성, 산화 자가 보호, 구조적 내관통성" 메커니즘은 합금이 극한이 아닌 부식 환경에서도 우수한 안정성을 유지할 수 있도록 합니다.

#### 2.1.6.3 내식성을 향상시키기 위한 기술적 수단

합금의 내식성을 향상시키려면 "부식 경로 차단", "표면 보호 강화", "내부 구조 최적화"의 세 가지 측면에서 시작하여, 특정 기술적 수단을 통해 부식성 매체가 재료에 미치는 영향을 줄여야 합니다. 표면 처리는 가장 직접적인 기술적 수단입니다. 전기 도금(크롬 및 니켈 도금 등)을 통해 합금 표면에 내식성 코팅을 형성합니다. 이 코팅은 높은 화학적 안정성을 가지고 있어 합금 매트릭스를 부식성 매체로부터 완전히 분리할 수 있습니다. 동시에 코팅 자체는 쉽게 산화되거나 용해되지 않아 부식 가능성을 크게 줄입니다. 화학적 부동태화 처리를 통해 특정 용액을 통해 구리 상 표면에 더욱 조밀하고 안정적인 산화막을 형성하여 전도성과 같은 합금의 핵심 특성에 영향을 미치지 않으면서 "자체

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



보호" 능력을 향상시킬 수도 있습니다.

내부 구조 최적화는 내식성을 근본적으로 향상시킬 수 있습니다. 텅스텐 분말과 구리 분말의 입자 크기를 미세화하고 혼합 균일성을 향상시킴으로써 합금 내부의 성분 편석 및 기공을 줄이고 부식성 매질이 국부적으로 모이는 것을 방지할 수 있습니다. 고급 소결 공정(예: 열간 등방성 가압 성형)을 사용하면 합금의 밀도를 높이고, 내부 미세 균열 및 기공을 제거하며, 부식성 매질이 내부로 침투하는 통로를 차단하고, 구조적 관점에서 내식성을 향상시킬 수 있습니다. 내식성 보조 원소를 첨가하는 것도 효과적인 기술 경로입니다. 합금에 내식성이 강한 원소(예: 크롬, 구소)를 소량 첨가하면 구리상 또는 텅스텐-구리 계면에 이러한 원소가 풍부해져 구리의 전도성 및 텅스텐의 골격 효과에 영향을 미치지 않으면서 구리상의 내산화성을 향상시키거나 계면 접합 강도를 향상시키고 국부 부식 발생을 줄일 수 있습니다.

## 2.2 텅스텐 구리 합금의 특성에 대한 조성비의 영향

텅스텐-구리 합금은 텅스텐(고경도, 고용점, 취성)과 구리(우수한 가소성, 전기 전도성, 열 전도성)로 구성됩니다. 두 합금의 조성비(일반적으로 텅스텐 함량으로 표시, 예: W70Cu30은 텅스텐이 70%, 구리가 30%를 차지함을 의미)가 합금의 성능을 결정하는 핵심 요소입니다. 텅스텐과 구리는 기계적 및 물리적 특성에 상당한 차이가 있기 때문에 조성비의 변화는 합금의 기계적 특성(경도, 강도, 인성)의 규칙적인 변화로 직접 이어집니다. 이러한 변화는 "텅스텐 상 골격 지지"와 "구리 상 소성 완충"의 상승 효과에 의한 것입니다.

### 2.2.1 기계적 성질에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금은 텅스텐의 고강도 및 경도와 구리의 가소성 및 인성 간의 균형을 구현한 합금입니다. 텅스텐 함량이 증가함에 따라 합금은 "구리를 기지로, 텅스텐을 보강재로"에서 "텅스텐을 골격으로, 구리를 충전재로"로 점진적으로 변화하며, 기계적 성질 또한 "가소성 우세"에서 "강성 우세"로 전이됩니다. 반대로 구리 함량이 증가하면 합금의 가소성과 인성은 크게 증가하지만 경도와 강도는 감소합니다.

#### 2.2.1.1 경도에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금은 구성 성분의 비율과 밀접한 관련이 있으며, 그중 텅스텐 원소는 경도 향상에 주도적인 역할을 합니다. 합금 내 텅스텐 함량이 낮으면 구리 상이 우세한 위치를 차지하여 소량의 분산된 텅스텐 입자가 매립된 연속적인 매트릭스를 형성합니다. 이때 합금은 전체적으로 더 부드러워지고 경도는 순수 구리에 가깝습니다. 이는 구리가 조직이 비교적 부드럽고 압입이나 굽힘과 같은 외부 변형에 대한 저항력이 제한적이기 때문입니다. 예를 들어, 10%~20%의 텅스텐을 함유하는 텅스텐-구리 합금은 약 80~120HB의 브리넬 경도를 가지며, 이는 높은 경도가 필요하지 않지만 우수한 가공 성능 및 기타 특성(예: 전도성)이 필요한 일부 시나리오에 더 적합합니다. 텅스텐 함량이 점차 증가함에 따라, 예를 들어 약 50%까지 증가하면 합금의 내부 구조가 크게 변합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 입자들이 서로 접근하여 일정 수준의 골격 구조를 형성하기 시작합니다. 구리 상은 여전히 존재하여 텅스텐 골격의 빈틈을 메우지만, 이때 텅스텐 상의 지지 역할이 두드러지기 시작합니다. 텅스텐 자체는 매우 높은 경도를 가지고 있기 때문에, 텅스텐이 형성하는 골격은 합금의 변형 저항성을 크게 향상시키고 합금의 경도는 최대 200~250HB 까지 크게 증가합니다. 이 정도 수준은 합금이 적당한 마찰 및 마모 환경에서도 표면 무결성을 효과적으로 유지할 수 있도록 하며, 기계식 변속기 부품과 같이 특정 마찰이 발생하는 부품에 적합합니다.

텅스텐 함량이 70~80% 또는 그 이상으로 증가하면 텅스텐 상은 연속적이고 견고한 골격을 형성하고, 구리 상은 텅스텐 골격의 미세한 기공에만 채워집니다. 이때 합금의 경도는 순수 텅스텐 경도에 가까워지며, 300HB 를 초과할 수 있습니다. 텅스텐 함량이 높은 텅스텐-구리 합금은 고응력과 고마모가 발생하는 극한의 작업 조건에서도 우수한 성능을 발휘합니다. 예를 들어, EDM 전극은 작동 중 방전으로 인해 발생하는 고온 및 고압 충격에 자주 노출되므로 전극의 형상 정밀도와 수명을 보장하기 위해 재료의 경도가 매우 높아야 합니다. 고전압 방전 점점 또한 잦은 개폐 시 발생하는 아크 침식 및 기계적 마모에 강한 고경도 재료가 필요합니다. 텅스텐 함량이 높은 텅스텐-구리 합금은 이러한 요구를 충족할 수 있습니다.

#### 2.2.1.2 강도에 미치는 영향

강도 측면에서 텅스텐-구리 합금의 인장강도와 압축강도는 조성비의 영향으로 서로 다른 변화를 보입니다. 인장강도의 경우, 텅스텐 함량이 낮을 때(예:  $\leq 50\%$ ) 구리 상이 연속적인 매트릭스 형태로 주요 인장력을 지닙니다. 이 때 합금의 인장강도는 주로 구리의 소성 지지력에 의존합니다. 구리의 강도가 상대적으로 낮고, 구리에 분산된 텅스텐 입자의 보강 효과가 제한적이기 때문에 합금의 인장강도는 느리게 증가합니다. 예를 들어, 텅스텐 함량이 30%인 텅스텐-구리 합금의 인장강도는 약 300~350MPa 입니다.

텅스텐 함량이 50~80%로 증가함에 따라, 텅스텐 상은 점차 반연속적 또는 심지어 연속적인 골격 구조를 형성하고, 구리 상은 텅스텐 골격의 빈틈을 채워 결합 및 응력 전달에 역할을 합니다. 이 시점에서 합금에 응력이 가해지면 응력이 텅스텐 골격을 통해 더욱 효과적으로 전달되고 분산되어 인장 강도가 크게 향상됩니다. 텅스텐 자체는 고강도이기 때문에 골격 구조는 합금의 전반적인 지지력을 크게 향상시킵니다. 동시에 구리 상은 국부 응력 집중 문제를 완화합니다. 예를 들어, 텅스텐이 60% 함유된 텅스텐-구리 합금의 인장 강도는 450~550MPa 에 도달할 수 있습니다. 텅스텐이 70~80% 함유되면 인장 강도는 약 600~700MPa 로 더욱 증가합니다.

그러나 텅스텐 함량이 계속 증가하면( $\geq 80\%$ ), 인장 강도는 최대값에 도달한 후 약간 감소합니다. 이는 구리 상이 차지하는 비율이 너무 낮아 텅스텐 입자 사이의 틈을 완전히 메우지 못해 텅스텐-텅스텐 계면 결합이 약화되기 때문입니다. 인장력이 가해지면 이러한 약한 계면에 먼저 균열이 발생하기 쉽고, 이는 결국 전체적인 파괴를 초래하여 합금의 인장 강도를 감소시킵니다. 예를 들어, 텅스텐 함량이 90%인 텅스텐-구리 합금의 인장 강도는 약 600~650MPa 로, 텅스텐 함량이 80%인 합금보다 약간 낮습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

압축 강도 측면에서 규칙은 비교적 간단하고 직접적입니다. 텅스텐 함량이 증가함에 따라 압축 강도는 계속 증가합니다. 압축 과정에서 합금은 압축 변형에 저항하기 위해 주로 텅스텐 상이 형성하는 골격 구조에 의존하기 때문입니다. 텅스텐 함량이 높을수록 골격이 더 강해지고 더 큰 압력을 견딜 수 있습니다. 예를 들어, 텅스텐 90%를 함유한 텅스텐-구리 합금은 1000MPa 이상의 압축 강도를 갖는 반면, 텅스텐 50%를 함유한 합금은 약 600~700MPa의 압축 강도를 갖습니다.

### 2.2.1.3 인성에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금의 인성은 주로 구리 상에 의해 결정되며 텅스텐 함량과 유의하게 음의 상관관계를 보입니다. 텅스텐 함량이 낮으면( $\leq 50\%$ ) 구리 상이 연속적인 매트릭스 형태로 존재하여 합금에 우수한 인성을 부여합니다. 충격이나 외력이 가해지면 구리 상은 소성 변형을 통해 많은 에너지를 흡수하고 응력을 분산시키며 균열 발생 및 팽창 가능성을 줄일 수 있습니다. 이 때 소량의 분산된 텅스텐 입자가 구리 상의 연속성에 어느 정도 영향을 미치지 만 합금의 전반적인 에너지 흡수 모드, 즉 주로 소성 변형에는 영향을 미치지 않습니다. 합금은 우수한 충격 인성을 갖습니다. 예를 들어, 30%의 텅스텐을 함유한 텅스텐-구리 합금의 충격 인성은 약  $15\text{--}20\text{J}/\text{cm}^2$ 로 순수 구리의 인성 수준에 가깝습니다. 특정 충격이 가해지는 환경에서도 구조적 무결성을 유지할 수 있으며, 특정 충격 저항성이 필요한 일부 구조 부품에 적합합니다.

합금의 내부 구조에 골격을 형성 하고 구리 상은 텅스텐 골격의 틈을 채우는 분산 상으로 변합니다. 이 구조적 변화로 인해 구리 상의 소성 변형 공간이 크게 감소합니다. 외부 힘의 충격을 받으면 구리 상이 에너지를 흡수하기 위해 이전처럼 완전히 변형되기 어렵습니다. 응력은 텅스텐-구리 계면에 쉽게 집중되어 계면 균열을 일으킵니다. 따라서 텅스텐 함량이 증가함에 따라 합금의 인성이 크게 감소합니다. 예를 들어 텅스텐이 60% 함유된 텅스텐-구리 합금의 충격 인성은  $5\text{--}10\text{J}/\text{cm}^2$ 로 떨어지며, 이 지점에서 합금은 충격을 받을 때 손상되기 쉽습니다.

텅스텐 함량이  $\geq 80\%$ 로 증가하면 연속 텅스텐 골격은 소성 변형 능력이 거의 없고, 구리 상은 미세한 틈만 메워 응력 집중을 효과적으로 완화할 수 없습니다. 충격 하중을 받으면 텅스텐 골격은 직접 파괴되기 매우 쉽고, 합금은 에너지 흡수율이 매우 낮아 뚜렷한 취성을 보이며, 충격 인성은 매우 낮습니다. 예를 들어, 텅스텐 함량이 90%인 텅스텐-구리 합금의 충격 인성은  $1\text{--}3\text{J}/\text{cm}^2$ 에 불과하여 순수 텅스텐의 취성 상태에 가깝습니다. 이러한 고텅스텐 함량 합금은 사용 중 큰 충격을 피해야 하며, 경도와 강도는 높지만 인성은 낮은 분야에 주로 사용됩니다.

### 2.2.2 물리적 특성에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금은 고정되어 있지 않고 텅스텐과 구리의 조성비 변화에 따라 정기적으로 변화합니다. 이는 텅스텐과 구리 자체의 물리적 특성이 현저히 다르기 때문입니다. 합금에서 두 금속의 비율이 증가하거나 감소하면 합금은 두 금속의 특성을 결합하여 새로운 물리적 특성을 형성합니다. 밀도, 녹는점과 같은 재료 고유의 특성

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열팽창 계수와 같은 온도 변화와 관련된 특성인 조성비의 영향을 명확하게 알 수 있으며, 이러한 영향을 통해 텅스텐-구리 합금은 조성을 조정하여 다양한 시나리오의 물리적 성능 요구 사항에 적응할 수 있습니다.

### 2.2.2.1 밀도에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금은 구성 요소의 비율과 밀접한 관련이 있으며 명확한 변화 패턴을 보여줍니다. 고밀도 금속인 텅스텐은 원자량이 크고 원자 배열이 조밀하여 매우 높은 밀도 특성을 갖습니다. 구리의 밀도는 금속 중에서 중간 수준이지만 텅스텐보다 훨씬 낮습니다. 합금 시스템의 텅스텐 함량이 낮은 경우 구리 상은 합금 구조에서 주요 위치를 차지하고 연속적인 분포 상태를 나타냅니다. 이때 합금의 밀도 특성은 주로 구리 상의 영향을 받으며 전체 밀도는 순수 구리의 밀도 값에 가깝습니다. 이 경우 합금은 무게에 민감하고 다른 재료 특성(예: 우수한 전도성, 특정 처리 성능 등)을 갖는 일부 시나리오에서 장점이 있습니다. 예를 들어, 엄격한 무게 제한이 있는 전자 장비의 일부 내부 연결 구성 요소에서 텅스텐 함량이 낮은 텅스텐-구리 합금은 전체 무게를 최대한 줄이는 동시에 전기적 성능 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

합금 내 텅스텐 함량이 점차 증가함에 따라 합금 내부 구조에서 고밀도 텅스텐 상의 비율이 계속 증가하고, 합금 전체 밀도에 대한 기여도가 점점 더 두드러집니다. 이 과정에서 구리 상이 지배하던 연속적인 구조가 점차 깨지고, 텅스텐 입자들이 서로 접근하여 점차 골격 구조를 형성하며, 구리 상이 텅스텐 골격의 빈틈을 채웁니다. 텅스텐 상의 밀도가 구리 상보다 훨씬 높기 때문에 텅스텐 함량이 증가함에 따라 합금의 밀도는 꾸준히 증가합니다. 이러한 점진적인 밀도 증가 특성 덕분에 합금은 더 큰 충격력을 견뎌야 하거나 안정적인 균형추가 필요한 응용 분야에서 중요한 역할을 할 수 있습니다. 예를 들어, 복잡한 진동 환경을 갖춘 일부 기계 장비의 경우, 텅스텐-구리 합금의 텅스텐 함량을 적절히 늘리고 밀도를 증가시키면 진동 환경에서 구성품의 안정성을 향상시키고 진동으로 인한 변위나 손상 위험을 줄일 수 있습니다.

합금의 텅스텐 함량이 높은 비율에 도달하면 텅스텐 상은 합금에서 연속적이고 안정적인 골격 구조를 형성하고 구리 상은 텅스텐 골격의 작은 기공에만 채워집니다. 이때 합금의 밀도 특성은 거의 완전히 텅스텐 상에 의해 지배되며 합금 밀도는 순수 텅스텐의 밀도에 가깝습니다. 텅스텐 함량이 높은 텅스텐-구리 합금은 일부 특수 분야에서 고유한 가치를 보여줍니다. 예를 들어, 항공 우주 분야의 특정 부품을 제조할 때 재료는 극한 압력과 고속 기류 충격을 받을 때 구조적 무결성을 유지해야 합니다. 고밀도 텅스텐-구리 합금은 높은 밀도와 텅스텐 상이 가져오는 높은 강도와 경도로 이러한 극한 작업 조건에 효과적으로 대처할 수 있습니다. 고에너지 입자 충격을 흡수하거나 고에너지 충격에 저항해야 하는 일부 핵 산업 관련 시나리오에서 텅스텐 함량이 높고 밀도가 높은 텅스텐-구리 합금도 핵심적인 역할을 할 수 있습니다.

### 2.2.2.2 녹는점에 미치는 영향

합금 융점의 변화 양상은 복잡하며 성분 비율과 밀접한 관련이 있습니다. 텅스텐은 매우

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



높은 용점을 가지고 있으며, 일반 금속 중 가장 높은 용점에 속합니다. 이는 원자 간의 강력한 결합력과 복잡한 결정 구조 때문입니다. 구리의 용점은 텅스텐보다 훨씬 낮으며, 두 용점의 차이는 상당합니다. 합금 내 텅스텐 함량이 낮을 경우, 합금의 미세 구조는 구리상을 연속적인 매트릭스로 합니다. 이 경우, 합금의 용점은 주로 구리상의 특성에 의해 결정되며, 전체 용점은 순수 구리의 용점에 가깝습니다. 그러나 합금 내에 소량의 텅스텐 입자가 분산되어 있기 때문에, 이러한 고용점 텅스텐 입자는 합금의 용점을 어느 정도 증가시킵니다. 이러한 개선 효과는 저텅스텐 함량 단계에서는 그다지 크지 않지만, 순수 구리에 비해 합금의 용점을 어느 정도 증가시켰습니다. 이러한 용점 특성 덕분에 텅스텐 함량이 낮은 텅스텐-구리 합금은 특별히 높은 용점은 필요하지 않지만 일정 수준의 고온 저항성과 우수한 전기 전도성 및 열 전도성과 같은 다른 특성이 요구되는 일부 경우에 사용될 수 있습니다. 예를 들어, 일부 전자 장비의 방열 부품 제조 시, 이러한 합금은 장비의 정상 작동 중 일정량의 열이 발생하는 환경에서도 구조적 안정성을 유지하고 우수한 방열 기능을 수행할 수 있습니다.

합금의 텅스텐 함량이 점차 증가함에 따라 합금의 내부 구조가 크게 변하고 텅스텐 상은 점차 골격 구조를 형성하기 시작합니다. 이때 고용점 텅스텐 상이 합금 시스템의 용점에 미치는 영향이 점점 더 명확해집니다. 텅스텐 상의 용점은 구리 상의 용점보다 훨씬 높기 때문에 형성되는 골격 구조는 가열 과정에서 구리 상의 유동성과 원자 확산을 어느 정도 제한하여 합금 전체가 용융 상태에 도달하기 위해 더 많은 에너지를 흡수 해야 하므로 합금의 용점이 크게 증가합니다. 이 단계에서 합금의 용점 증가는 텅스텐 함량의 증가에 따라 점차 증가하여 비교적 뚜렷한 상승 추세를 보입니다. 이러한 특성은 중온 및 고온 환경에서 작동하는 일부 부품 제조에 합금에 이점을 제공합니다. 예를 들어, 일부 산업용 용광로의 내부 연결 부품이나 고온 센서의 보호 셸을 제조할 때, 텅스텐 구리 합금의 텅스텐 함량을 적절히 높이고 용점을 높이면 부품이 고온 환경에서 온도 상승으로 인한 용융 및 변형 없이 장시간 안정적으로 작동하여 장비의 정상 작동을 보장할 수 있습니다. 합금의 텅스텐 함량이 높아지면 연속적이고 안정적인 텅스텐 골격 구조가 우세해지고, 구리 상은 텅스텐 골격의 미세 기공만 채웁니다. 이 시점에서 합금의 용점은 크게 상승하여 텅스텐의 용점에 근접합니다. 이 경우, 합금은 초고온 환경에서 뛰어난 안정성을 보입니다. 예를 들어, 항공기 엔진의 연소실 부품이나 우주선 재진입용 방열 부품을 제조할 때 이러한 부품은 작동 중 수천 도의 고온 환경에 노출됩니다. 고텅스텐 함량의 텅스텐-구리 합금은 높은 용융점 특성 덕분에 이러한 극한의 고온을 견딜 수 있어 고온에서 부품의 용융 및 변형을 효과적으로 방지하고 항공기 또는 엔진의 안전한 작동을 보장합니다. 동시에, 구리 상은 합금에 일정 수준의 우수한 열전도도를 부여하여 고온에서 발생하는 열을 발산하는 데 도움을 주고, 고온 환경에서 합금의 신뢰성을 더욱 향상시킵니다.

### 2.2.2.3 열팽창계수에 미치는 영향

열팽창 계수는 온도 변화에 따른 재료의 치수 안정성을 측정하는 중요한 지표입니다. 텅스텐-구리 합금의 열팽창 계수와 합금 성분의 비율 사이에는 밀접한 관계가 있습니다. 구리는 비교적 큰 열팽창 계수를 가지고 있는데, 이는 온도가 변하면 구리 원자의 열 운동이 심해지고 원자 간 거리가 멀어져 구리 재료의 전체 크기가 더욱 뚜렷하게 팽창

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또는 수축됨을 의미합니다. 텅스텐의 열팽창 계수는 비교적 작고, 원자 구조가 비교적 안정적이며, 온도 변화에 따른 원자 간 거리 변화도 비교적 적습니다. 합금 내 텅스텐 함량이 낮을 때는 구리 상이 합금 구조를 지배하며 연속적인 분포 상태를 나타냅니다. 이때 합금의 열팽창 특성은 주로 구리 상에 의해 결정되며, 합금의 열팽창 계수는 순수 구리의 열팽창 계수 값에 가깝습니다. 이 경우 합금의 주변 온도가 변하면 합금의 부피 변화가 커집니다. 예를 들어, 일부 전자 장비의 초기 설계에서 텅스텐 함량이 낮은 텅스텐 구리 합금을 연결 부품으로 사용할 경우, 장비를 장시간 작동시키고 가열하거나 주변 온도 변동이 클 경우 합금의 큰 열팽창 계수로 인해 열팽창 및 수축으로 인해 연결 부품이 느슨해질 수 있으며, 이는 장비의 전기적 연결 안정성 및 전반적인 성능에 영향을 미칩니다.

합금 내 텅스텐 함량이 점차 증가함에 따라, 합금 내부 구조에서 열팽창계수 텅스텐 상의 비율이 지속적으로 증가하고, 합금의 전체 열팽창에 대한 억제 효과가 점차 두드러지게 됩니다. 이 과정에서 구리 상이 지배하던 연속적인 구조가 점차 깨지고, 텅스텐 상이 일정한 골격 구조를 형성하기 시작하며, 구리 상이 텅스텐 골격의 빈틈을 채웁니다. 텅스텐 상의 열팽창 계수는 구리 상의 열팽창 계수보다 훨씬 작기 때문에 구조를 안정화하고 합금의 전체 열팽창을 제한하는 역할을 합니다. 텅스텐 함량이 더욱 증가함에 따라 합금의 열팽창 계수는 점차 감소합니다. 텅스텐 함량에 따른 열팽창 계수 변화의 이러한 특성은 열팽창 계수 정합에 대한 높은 요구 조건이 요구되는 일부 시나리오에서 합금이 광범위한 적용 가능성을 갖도록 합니다. 예를 들어, 전자 패키징 분야에서 다양한 전자 부품은 종종 다양한 재료로 구성되며, 각 재료의 열팽창 계수는 다릅니다.

장비 작동 중 온도 변화에 따른 열팽창 및 수축 차이로 인해 서로 다른 부품 간의 연결 부위에 응력 집중이 발생하여 연결 불량이나 손상을 유발하지 않도록 하려면 다른 부품 재료와 동일한 열팽창 계수를 가진 패키징 재료를 선택해야 합니다. 텅스텐-구리 합금의 텅스텐 함량을 조절함으로써 열팽창 계수를 일정 범위 내에서 정밀하게 조절할 수 있습니다. 이를 통해 다양한 전자 부품 재료(예: 세라믹 기판, 반도체 칩 등)의 열팽창 계수 일치 요건을 충족하고, 전자 장비가 다양한 온도 환경에서 안정적이고 신뢰성 있게 작동할 수 있도록 보장합니다.

합금 내 텅스텐 함량이 높아지면, 연속적이고 안정적인 텅스텐 골격 구조가 합금 전체를 지배하게 되고, 구리 상은 텅스텐 골격의 미세한 기공에만 채워집니다. 이때 합금의 열팽창 계수는 텅스텐에 근접합니다. 온도 변화에 따라 합금의 치수 안정성이 크게 향상되고 열팽창 및 수축의 진폭이 매우 작아집니다. 이러한 특성으로 인해 고텅스텐 함량의 텅스텐-구리 합금은 정밀 기기 제조 및 항공우주 산업과 같이 매우 높은 치수 안정성이 요구되는 고정밀 분야에서 대체 불가능한 역할을 수행합니다. 예를 들어, 우주선용 광학 기기 부품을 제조할 때, 이러한 기기는 우주의 매우 차갑고 깊은 우주 공간부터 태양 근처의 고온 환경까지 매우 복잡하고 급격하게 변화하는 온도 환경에 직면하게 되며, 온도 범위는 섭씨 수백도에 달할 수 있습니다. 높은 텅스텐 함량과 낮은 열팽창 계수를 지닌 텅스텐 구리 합금은 극한 온도 변화에서도 광학 기기의 구조적 치수가 거의 변하지 않도록 보장하여 광학 기기의 고정밀 광학 성능에 영향을 미치지 않도록 보장하고 우주 탐사 임무에 안정적이고 신뢰할 수 있는 관측 데이터 지원을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제공합니다.

#### 2.2.2.4 전도도에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금은 조성비와 밀접한 관련이 있습니다. 구리는 높은 전기 전도도를 가진 우수한 전도성 금속인 반면, 텅스텐은 상대적으로 낮은 전기 전도도를 보입니다. 합금 내 텅스텐 함량이 증가함에 따라 전기 전도도는 점차 감소합니다. 이는 텅스텐이 원자 간 거리가 길고 전자 구름 밀도가 낮기 때문입니다. 텅스텐이 구리 매트릭스에 첨가되면 분산상과 적층 구조를 형성하여 결정립계와 결정립 내부에서 전자의 흐름을 방해하고, 더 많은 이온 결합과 불순물 원자를 생성하여 격자 내 전자의 자유로운 이동을 방해합니다. 텅스텐 함량이 일정 비율을 초과하면 전도도 감소 속도가 느려지기 시작하는데, 이는 텅스텐 함량 증가로 인해 형성된 전자 장벽이 상호 작용하여 더 많은 전자의 흐름을 제한하기 때문일 수 있습니다. 반대로, 구리 함량을 증가시키면 구리의 높은 전기 전도도 특성으로 인해 전류가 더 잘 흐르기 때문에 합금의 전도도가 증가합니다.

#### 2.2.2.5 열전도도에 미치는 영향

열전도도 측면에서 구리는 텅스텐보다 훨씬 높은 열전도도를 가지고 있습니다. 따라서 일반적으로 텅스텐-구리 합금의 구리 함량이 높을수록 열전도도가 높아집니다. 이는 순수 금속이 주로 자유 전자를 통해 열을 전도하고 구리는 열을 더 효율적으로 전달할 수 있는 비교적 높은 자유 전자 농도를 가지고 있기 때문입니다. 그러나 구리 함량이 너무 높으면 텅스텐 함량이 감소하여 열팽창 계수가 증가하는 등 합금의 다른 특성에 부정적인 영향을 미칠 수 있습니다. 동시에 합금의 열전도도는 밀도와 같은 다른 요인의 영향을 받습니다. 가스에는 열이 잘 전달되지 않습니다. 재료에 기공이 있는 경우 기공률이 증가함에 따라 열전도도가 감소하므로 밀도가 높은 텅스텐-구리 합금은 일반적으로 열전도도가 더 높습니다.

#### 2.2.3 화학적 특성에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금은 화학적 안정성이 우수합니다. 내산화성 측면에서 텅스텐은 용점이 높고 내산화성이 우수합니다. 텅스텐 함량이 증가할수록 합금의 내산화성은 어느 정도 향상됩니다. 그러나 합금 내 구리는 고온에서 쉽게 산화되므로 합금의 내산화성은 텅스텐 대 구리 비율 및 사용 환경과 같은 요소를 종합적으로 고려해야 합니다. 내식성 측면에서 텅스텐과 구리 자체는 일정한 내식성을 가지고 있으며, 텅스텐-구리 합금은 일부 일반적인 화학 물질 및 환경에 대한 우수한 내성을 가지고 있습니다. 그러나 강산화성 산과 같은 특정 화학 매체에서는 구리가 부식 반응을 일으킬 수 있습니다. 이 경우 텅스텐 함량을 증가시키면 합금의 내식성을 어느 정도 향상시킬 수 있습니다. 또한, 불순물 함량과 제조 공정 또한 텅스텐-구리 합금의 화학적 특성에 영향을 미칩니다.

##### 2.2.3.1 내식성에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금은 조성비에 따라 상당한 영향을 받으며, 다양한 부식 환경에서 다양한

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

성능을 보입니다. 텅스텐 자체는 우수한 화학적 안정성을 가지고 있어 여러 일반적인 부식성 매질에서 구조가 쉽게 부식되지 않도록 유지할 수 있습니다. 합금 내 텅스텐 함량이 비교적 높으면, 텅스텐 상으로 형성된 골격 구조가 합금이 어느 정도 부식에 저항할 수 있는 기반을 제공할 수 있습니다. 예를 들어, 일부 약산성 환경에서 텅스텐 함량이 높은 텅스텐-구리 합금은 텅스텐의 화학적 안정성으로 인해 전체 합금의 부식 속도를 효과적으로 늦출 수 있습니다. 이는 부식성 매질이 합금 표면을 관통하여 내부로 도달하려면 먼저 텅스텐 상으로 형성된 비교적 안정적인 "장벽"을 통과해야 하기 때문입니다. 텅스텐 원자 사이의 강력한 결합력과 비교적 안정적인 전자 구조는 부식성 매질 내의 이온이 화학적으로 반응하기 어렵게 만들어 부식의 추가 침투를 방해합니다.

그러나 구리는 특정 부식성 환경에서 비교적 활성이 높습니다. 질산과 같은 고산화성 산 용액에서 구리는 질산과 쉽게 산화환원 반응을 일으켜 구리염을 생성하고 질소산화물 가스를 방출합니다. 합금 내 구리 함량이 높으면 이러한 활성이 합금의 내식성에 미치는 부정적인 영향이 두드러집니다. 이러한 환경에서 구리 상은 합금 부식의 주요 "돌과구"가 되고, 부식성 매질은 구리와 우선적으로 반응하여 합금 표면에 부식 피트, 녹 반점 등의 현상을 발생시켜 합금의 전체 구조를 파괴하고 성능을 저하시킵니다.

그러나 일부 중성 또는 약알칼리성 수용액 환경에서는 상황이 다릅니다. 이때 구리 함량이 특정 범위 내에 있으면 구리는 합금 표면에 얇은 부동태화 피막을 형성할 수 있습니다. 이 부동태화 피막의 주요 구성 요소는 일부 구리 산화물 또는 수산화물입니다. 이는 특정 밀도를 가지며 용액에 용해된 산소 및 기타 부식성 이온이 합금 내부로 더 이상 접촉하는 것을 방지하여 합금의 내식성을 어느 정도 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어 일부 산업용 수도관의 라이닝 재료를 선택할 때 적당한 구리 함량의 텅스텐-구리 합금을 사용하면 구리의 이러한 부동태화 특성을 활용하여 물과 장기간 접촉하는 동안 파이프 라이닝의 무결성을 유지하고 부식 천공과 같은 문제 발생을 줄일 수 있습니다. 동시에 텅스텐상이 존재하면 합금의 전반적인 구조적 강도도 향상되어, 물의 흐름 충격 등 외부 힘을 받아도 부동태화막이 쉽게 파괴되지 않아 합금의 내식성이 더욱 보장됩니다.

### 2.2.3.2 고온 산화 저항성에 미치는 영향

고온 내산화성은 고온 산소 환경에서 텅스텐 구리 합금의 성능을 측정하는 핵심 지표이며, 조성비와 밀접한 관련이 있습니다. 텅스텐은 3410°C의 매우 높은 녹는점을 가지고 있으며, 고온에서 표면에 비교적 안정적인 산화 피막을 형성할 수 있습니다. 이 산화 피막의 주요 구성 요소는  $WO_3$ 와 같은 산화물로, 밀도와 안정성이 좋으며 산소가 합금 내부로 더 이상 확산되는 것을 방지하여 합금을 보호할 수 있습니다. 합금의 텅스텐 함량이 높으면 고온 산소 환경에서 산화텅스텐을 주성분으로 하는 산화 피막이 합금 표면에 우선적으로 형성됩니다. 온도가 상승하고 시간이 지남에 따라 이 산화 피막은 계속 두꺼워지고, 안정적인 구조로 인해 산소와 합금 내부 사이의 추가 반응을 효과적으로 방지하여 합금의 고온 내산화성을 크게 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어, 일부 고온로의 내부 구조 부품에 텅스텐 함량이 높은 텅스텐-구리 합금을 사용하면 1000°C 이상의 온도에서도 장시간 작동할 수 있습니다. 합금 표면에 형성된 안정적인 산화막은 구조 부품이 장기간 과산화되지 않도록 하여 기계적 특성과 구조적 무결성을 유지합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



대조적으로 구리는 1080°C 의 비교적 낮은 녹는점을 가지고 있으며 구리는 고온에서 비교적 빨리 산화됩니다. 합금의 구리 함량이 높으면 구리는 고온 호기성 환경에서  $\text{Cu}_2\text{O}$  또는  $\text{CuO}$  와 같은 산화물로 더 빨리 산화됩니다. 텅스텐 산화물과 비교할 때 이러한 구리 산화물은 비교적 느슨한 구조를 가지고 있어 텅스텐 산화막과 같은 효과적인 차단층을 형성할 수 없습니다. 산화 과정이 계속됨에 따라 구리 산화물이 계속 축적되어 합금의 구리 원소를 소모할 뿐만 아니라 산화막에 균열과 박리가 발생하여 산소가 산화막에 침투하여 합금 내부의 다른 구성 요소와 반응하기 쉬워져 합금의 고온 산화 저항성이 감소합니다. 고온 호기성 환경에서 장시간 안정적으로 작동해야 하는 일부 전기 접점 재료의 경우, 구리 함량이 너무 높은 텅스텐-구리 합금을 사용할 경우, 잦은 전원 켜고 끄기 시 온도 상승으로 인해 접점이 빠르게 산화됩니다. 표면에 형성된 느슨한 구리 산화막은 접점의 전도성과 접촉 안정성에 영향을 미치며, 심한 경우 접점이 고착되어 고장을 일으킬 수도 있습니다.

그러나 특정 조성비와 온도 범위 내에서 텅스텐과 구리 산화물 사이에 일부 상호작용이 발생할 수 있으며, 이는 합금의 고온 내산화성에 복잡한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 일부 중온 범위(800°C~1200°C)에서 합금 내 텅스텐과 구리의 함량 비율이 적절할 경우, 산화구리는 산화텅스텐과 어느 정도 결합하여 비교적 안정적인 복합 산화막 구조를 형성할 수 있습니다. 이 복합 산화막은 일정한 밀도와 유연성을 가지고 있습니다. 텅스텐 산화물의 배리어 특성을 활용할 뿐만 아니라, 산화구리를 사용하여 산화막의 미세 균열을 어느 정도 메워 이 온도 범위에서 합금의 고온 내산화성을 어느 정도 향상시킬 수 있습니다. 그러나 이러한 상승 효과는 조성비에 대한 요구 조건이 비교적 까다로우며, 최상의 고온 내산화 효과를 달성하기 위해서는 텅스텐과 구리의 함량을 정밀하게 제어해야 합니다.

### 2.3 CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금 MSDS

분말 야금 공정을 통해 텅스텐(W)과 구리 (Cu) 를 혼합하여 만든 복합 소재로, 일반적으로 텅스텐 70~90%, 구리 10~30%를 함유하며 전기 접점, 고전압 스위치, 전기가공 전극 등에 널리 사용됩니다. 제품 용도는 과학 연구 및 산업 생산이며, 특정 용도로는 방열판, 전극 등이 포함될 수 있습니다. MSDS 는 작업자와 응급 구조대원에게 화학 성분, 잠재적 위험 및 취급 권장 사항을 포함한 안전한 사용 지침을 제공하는 것을 목적으로 합니다.

일반 텅스텐 구리 합금 MSDS 에 따르면, 텅스텐 구리 합금은 일반적으로 위험 물질로 분류되지 않으므로(OSHA 29 CFR 1910.1200 에 따라) 구체적인 신호어나 위험 설명은 없습니다.

텅스텐 구리 합금에는 텅스텐(CAS 번호: 7440-33-7, 함량 70%-90%)과 구리 (CAS 번호: 7440-50-8, 함량 10%-30%)가 포함됩니다.

텅스텐 구리 합금은 정상적인 조건에서는 쉽게 연소되지 않지만, 가공 중 발생하는 분진은 화재를 유발할 수 있습니다. 건조 분말, 포말 또는 이산화탄소 소화제를 사용하는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

것이 좋습니다. 금속 분말 화재를 진압할 때 물을 직접 분사하면 반응이 심해질 수 있으므로 절대 사용하지 마십시오. 가열 중 금속 산화물 증기가 발생할 수 있습니다. 소방관은 유독 가스 흡입을 방지하기 위해 자급식 호흡 장비를 착용해야 합니다.

텅스텐 구리 합금은 TSCA 목록 요건을 충족하며 중대한 생태학적 위험은 없지만, 처리 폐기물은 환경에 경미한 영향을 미칠 수 있습니다. 화학 물질 안전성 평가는 아직 완전히 완료되지 않았으므로 주의와 지역 규정 준수가 권장됩니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

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

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

| Product Name         | Chemical Composition (%) |                    |         | Physical and Mechanical Properties |               |                     |                        |
|----------------------|--------------------------|--------------------|---------|------------------------------------|---------------|---------------------|------------------------|
|                      | Cu                       | Total Impurities ≤ | W       | Density (g/cm³)                    | Hardness (HB) | Resistivity (MΩ·cm) | Tensile Strength (MPa) |
| Tungsten Copper (50) | 50±2.0                   | 0.5                | Balance | 11.85                              | 115           | 3.2                 | —                      |
| Tungsten Copper (60) | 40±2.0                   | 0.5                | Balance | 12.75                              | 140           | 3.7                 | —                      |
| Tungsten Copper (70) | 30±2.0                   | 0.5                | Balance | 13.8                               | 175           | 4.1                 | 790                    |
| Tungsten Copper (80) | 20±2.0                   | 0.5                | Balance | 15.15                              | 220           | 5                   | 980                    |
| Tungsten Copper (90) | 10±2.0                   | 0.5                | Balance | 16.75                              | 260           | 6.5                 | 1160                   |

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.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 구리 합금의 미세조직과 특성의 상관관계

텅스텐- 구리 합금은 뛰어난 전기 전도성, 열 전도성, 고온 저항성, 아크 부식 저항성을 갖춰 전기, 전자, 방위 및 산업 분야에서 폭넓은 응용 가능성을 가지고 있습니다. 본 합금은 분말 야금 공정으로 제조되며, 텅스텐(W)을 기지상 또는 강화상으로 사용하여 높은 용점과 경도를 제공하고, 구리(Cu)를 결합상으로 사용하여 높은 전기 전도성 및 열 전도성을 제공하여 고전류, 고온 또는 고마모 환경과 같은 까다로운 요구 조건을 충족할 수 있습니다. 텅스텐-구리 합금의 성능은 미세 구조와 밀접한 관련이 있습니다. 결정립 형태, 상 분포 및 계면 특성은 기계적 특성, 전기 전도성 및 내구성에 직접적인 영향을 미칩니다.

#### 3.1 텅스텐-구리 합금의 미세 구조적 특성에 대한 통찰력

텅스텐 -구리 합금은 분말 야금 공정의 혼합, 압착, 소결 및 후가공 공정을 반영하여 그 성능을 좌우합니다. 미세 조직 특성에는 결정립 형태 및 크기, 상 분포 및 계면이 포함되며, 이는 주사 전자 현미경(SEM) 및 투과 전자 현미경(TEM)과 같은 현미경을 통해 분석됩니다. 텅스텐의 높은 용점(3422°C)은 소결 시 고체 상태를 유지하는 반면, 구리의 낮은 용점(1085°C)은 액상을 형성하여 텅스텐 입자를 적시고 틈을 메워 독특한 복합 구조를 형성합니다. 이러한 구조는 합금의 전기 전도도, 열 전도도, 경도 및 아크 침식 저항성에 직접적인 영향을 미칩니다. 아래에서는 결정립 형태 및 크기, 상 분포 및 계면에 대해 자세히 분석합니다.

##### 3.1.1 입자 형태 및 크기

텅스텐- 구리 합금은 합금의 기계적 및 열적 특성을 결정하는 미세조직적 특성의 핵심입니다. 결정립 형태는 주로 텅스텐 입자로 구성됩니다. 텅스텐은 소결 과정에서 고체 상태를 유지하기 때문에 초기 분말의 특성을 유지하며 일반적으로 다면체 또는 거의 구형입니다. 액체 결합상인 구리상은 고온에서 텅스텐 입자 사이의 틈을 관통하여 냉각 후 불규칙한 네트워크 구조 또는 충전상을 형성합니다. 결정립 형태의 균일성은 성능의 일관성에 직접적인 영향을 미칩니다. 텅스텐 입자의 규칙적인 분포는 응력 분산에 도움이 되지만, 불규칙한 형태는 국부적인 취약성을 초래할 수 있습니다.

입자 크기는 제조 공정에 따라 상당한 영향을 받습니다. 초기 텅스텐 분말의 입자 크기는 일반적으로 1~10 마이크론이며, 고에너지 볼 밀링을 통해 나노미터 크기로 더욱 미세화할 수 있습니다. 소결 온도와 시간은 입자 크기에 중요한 역할을 하는데, 온도가 낮을수록 입자 크기가 작아지고, 온도가 높을수록 입자 성장이 촉진될 수 있습니다. 액상 소결 공정에서 구리 액상의 유동성은 텅스텐 입자의 재배열 및 성장을 촉진하며, 입자 크기는 일반적으로 텅스텐 함량 및 공정 변수에 따라 5~20 마이크론입니다. 나노 크기의 텅스텐 분말을 사용하면 입자 크기를 서브마이크론 수준으로 제어하여 성능을 크게 향상시킬 수 있습니다.

결정립 형태와 크기는 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 결정립 크기가 작을수록 홀-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



페이지 효과를 통해 합금의 강도와 경도가 향상되고, 미세 결정립은 결정립계 밀도를 증가시키고 전위 이동을 차단하며 변형 저항성을 향상시킵니다. 예를 들어, 텅스텐 입자 크기를 나노미터 수준으로 줄이면 경도가 20~30% 증가하여 전기 기계 전극과 같은 고마모 응용 분야에 적합합니다. 결정립 크기는 전기 전도도와 열 전도도에도 영향을 미칩니다. 너무 작은 결정립은 결정립계 저항성을 증가시키고 전자 및 열 전달 효율을 저하시킬 수 있지만, 구리 상의 네트워크 구조는 이러한 단점을 보완할 수 있습니다. 균일한 결정립 형태는 응력 집중점을 줄이고 피로 저항성을 향상시키며, 특히 열 사이클링이나 기계적 충격 환경에서 더욱 효과적입니다.

준비 공정 최적화는 결정립 형태와 크기를 제어하는 핵심 요소입니다. 스파크 플라즈마 소결(SPS)은 급속 가열과 고압을 통해 과도한 결정립 성장을 억제하고 미세한 결정립 구조를 유지합니다. 열간 등방성 가압(HIP)은 다방향 압력을 통해 기공을 제거하고 결정립 분포의 일관성을 개선합니다. 미량 원소(예: 니켈 또는 철)를 첨가하면 결정립계 에너지를 조절하고 미세 구조를 안정화할 수 있습니다. 결정립 크기 감소는 합금의 아크 침식 저항성도 향상시킵니다. 미세 텅스텐 입자는 아크 에너지를 분산시키고 표면 용융 위험을 줄입니다. 최적화 방향에는 초미세 나노분말 개발 또는 적층 제조 기술을 사용하여 더욱 정밀한 결정립 제어가 포함됩니다. 간단히 말해, 텅스텐-구리 합금의 결정립 형태와 크기는 특히 강도와 전도성을 모두 고려해야 하는 상황에서 합금의 성능을 뒷받침하는 기본적인 요소입니다.

### 3.1.2 위상 분포 및 인터페이스

텅스텐-구리 합금은 미세조직 특성의 중요한 구성 요소이며, 이는 합금의 기계적 특성과 기능적 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 상 분포는 합금 내 텅스텐 상과 구리 상의 공간적 배열을 의미하며, 계면은 두 상 사이의 결합 영역을 의미합니다. 고용점 상인 텅스텐은 분산된 입자 형태로 분포하고, 저용점 상인 구리는 연속 또는 반연속 결합 네트워크를 형성합니다. 상 분포의 균일성은 성능의 일관성을 결정하며, 계면의 품질은 하중 전달 및 열 확산에 영향을 미칩니다.

상 분포의 형성은 소결 공정에 따라 달라집니다. 액상 소결이 핵심 단계입니다. 구리는 1085°C 이상에서 용융되어 텅스텐 입자를 적시고 모세관 현상으로 틈을 채웁니다. 텅스텐 함량이 높으면(예: W80/Cu20) 구리 상은 분리된 텅스텐 입자를 둘러싸며 불연속적으로 분포합니다. 구리 함량이 높으면(예: W60/Cu40) 구리 상은 텅스텐 입자가 매립된 연속적인 네트워크를 형성합니다. 상 분포의 균일성은 고에너지 볼 밀링 및 분말 혼합 공정을 통해 제어됩니다. 볼 밀링 시간이 너무 짧으면 텅스텐 응집이 발생할 수 있으며, 볼 밀링 시간이 너무 길면 불순물이 유입될 수 있습니다. 소결 후 구리 상의 냉각 및 응고는 상 분포 구조를 고정하며, 열간 등방성 가압 성형을 통해 균일성을 더욱 최적화할 수 있습니다.

계면의 품질은 상 분포와 성능 간의 상관관계에 핵심적인 요소입니다. 텅스텐과 구리의 계면은 액상 소결을 통해 화학적 및 기계적으로 결합됩니다. 액상 구리가 텅스텐 입자 표면을 관통하여 계면의 접착력을 향상시킵니다. 계면의 금속 결합은 기공과 결함을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

줄이고 하중 전달 효율을 향상시킵니다. 또한 계면은 전기 및 열 전도도에도 영향을 미치는데, 계면을 통해 텅스텐과 연결된 연속적인 구리 네트워크가 효율적인 전자 및 열 전달 경로를 형성하기 때문입니다. 니켈과 같은 미량 원소를 첨가하면 젖음성을 개선하고 계면 결합력을 강화하여 계면 강도를 향상시킬 수 있습니다. 약한 계면은 특히 아크 또는 열 응력 하에서 박리 또는 균열을 유발할 수 있습니다.

상 분포와 계면은 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 균일한 상 분포는 합금의 종합적인 특성을 개선하고, 텅스텐 상은 경도와 고온 저항성을 제공하며, 구리 상은 전기 및 열 전도성을 보장합니다. 계면 품질은 아크 침식 저항성에 직접적인 영향을 미치며, 강한 계면은 상 경계에서 아크 에너지의 집중적인 제거를 줄여줍니다. 구리 함량이 높은 합금(예: W70/Cu30)은 구리 상의 연속성이 우수하고 전기 전도성 과 열 전도성이 뛰어나 방열 기관에 적합합니다. 텅스텐 함량이 높은 합금(예: W90/Cu10)은 텅스텐 상이 우세하고 경도가 높으며 내마모성이 우수하여 전극 응용 분야에 적합합니다. 공극이나 비습윤 영역과 같은 계면 결함은 성능을 저하시킬 수 있으며 공정 최적화를 통해 제거해야 합니다.

상 분포와 계면을 최적화하는 데는 제조 공정 개선이 핵심입니다. 진공 소결은 산화를 줄이고 계면을 순수하게 유지하며, 단계적 가열은 구리 액상의 흐름을 제어하고 상 분포를 개선합니다. 나노스케일 분말을 적용하면 계면 접촉 면적이 넓어지고 접합 강도가 향상됩니다. 최적화 방향에는 기능성 구배 재료 개발, 텅스텐 및 구리 상의 분포를 점진적으로 전환, 또는 지능형 모니터링 기술을 사용하여 계면 품질을 실시간으로 평가하는 것이 포함됩니다. 간단히 말해, 텅스텐-구리 합금의 상 분포와 계면은 특히 전도성, 고온 저항성, 기계적 강도를 고려해야 하는 상황에서 성능에 중요한 역할을 합니다.

### 3.1.3 기공 및 결함 발현

텅스텐 -구리 합금은 미세 구조의 핵심적인 특징으로, 합금의 기계적 특성, 전도성 및 내구성에 직접적인 영향을 미칩니다. 기공률은 소결 공정 중 구리 액상으로 완전히 채워지지 않은 미세한 틈을 의미하며, 결함에는 균열, 찌지 않은 입자 또는 불순물 응집이 포함됩니다. 이러한 구조적 결함은 일반적으로 현미경 관찰이나 밀도 시험(예: 아르키메데스법)을 통해 확인됩니다. 기공률은 제조 공정과 밀접한 관련이 있습니다. 과도한 기공률은 밀도를 감소시키고 성능의 일관성에 영향을 미칠 수 있습니다.

기공 형성 메커니즘은 주로 분말 특성, 분말 혼합 균일성 및 소결 조건과 관련이 있습니다. 초기 텅스텐 분말의 입자 크기가 불균일하거나 응집되면 국소적인 구리 액상이 불충분해져 미세 기공이 남을 수 있습니다. 가압 중 압력이 부족하거나 분말 유동성이 좋지 않으면 초기 기공이 발생할 수 있으며, 너무 낮은 온도(예: 1100°C 미만)에서 소결하거나 소결 시간이 부족하면 이러한 기공을 완전히 제거하지 못할 수 있습니다. 구리 액상의 습윤성 또한 중요한 역할을 합니다. 구리와 텅스텐의 습윤각은 비교적 높습니다(약 30°-40°). 소결 분위기(예: 산화 환경)에 불순물이 유입되면 습윤 효과가 약해지고 기공률이 증가합니다. 일반적인 기공 크기는 1~10 마이크론이며, 불균일한

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분포는 거대 기공(>20 마이크론)을 형성하여 성능을 크게 저하시킬 수 있습니다.

결합은 다양한 형태로 나타날 수 있습니다. 균열은 프레스 또는 냉각 중 열응력이나 상변화 응력으로 인해 발생할 수 있습니다. 특히 텅스텐 함량이 높을 경우, 구리 상의 불균일한 수축으로 인해 계면 균열이 쉽게 발생할 수 있습니다. 비습윤 입자는 표면에 구리 액상이 완전히 침투하지 못한 텅스텐 입자를 말하며, 이는 일반적으로 소결 온도가 부족하거나 구리 함량이 너무 낮아 발생하며, 고립된 텅스텐 입자로 나타납니다. 불순물 응집물(산화물이나 탄화물 등)은 원료 또는 가공 공정에서 발생할 수 있으며, 결정립계 또는 계면에 집중되어 하중 전달 및 열 확산에 영향을 미칩니다. 기공과 결합의 밀도는 열간 등방성 프레스(HIP) 또는 스파크 플라즈마 소결(SPS)을 통해 크게 줄일 수 있으며, 밀도는 98% 이상에 도달할 수 있습니다.

기공률과 결합은 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 높은 기공률은 합금의 굽힘 강도와 경도를 감소시키는데, 이는 기공이 응력 집중점이 되어 특히 전극과 같은 고마모 응용 분야에서 파손을 쉽게 유발할 수 있기 때문입니다. 또한, 기공이 전기 및 열 저항을 증가시켜 전류 및 열 전달 효율을 저하시켜 전기 및 열 전도성을 저하시킵니다. 아크 내식성 또한 감소하고, 기공이 아크 에너지 집중점이 되어 표면 용융을 가속화하는 경향이 있습니다. 균열과 같은 결합은 열 사이클링이나 기계적 충격으로 인해 확산되어 수명을 단축시킬 수 있습니다. 최적화 방향에는 나노 크기의 분말을 사용하여 입자 균일성을 개선하거나, 소결 매개변수(예: 단계적 가열)를 최적화하여 기공률을 줄이거나, 표면 코팅을 통해 결합을 채우는 것이 포함됩니다. 간단히 말해, 기공과 결합을 제어하는 것이 텅스텐-구리 합금의 성능을 향상시키는 핵심입니다.

### 3.1.4 다양한 제조 공정에 따른 구조적 차이

텅스텐-구리 합금은 제조 공정의 차이로 인해 상당한 차이를 보입니다. 일반적인 공정으로는 전통적인 분말 야금, 구리 함침, 스파크 플라즈마 소결(SPS), 그리고 적층 제조(3D 프린팅)가 있습니다. 각 공정은 결정립 형태, 상 분포, 기공률, 그리고 계면 품질에 고유한 영향을 미칩니다. 공정 선택은 합금의 성능을 직접적으로 결정하며, 적용 분야의 요구 사항에 따라 최적화되어야 합니다.

기존 분말 야금은 분말 혼합, 압착, 소결을 포함하는 널리 사용되는 공정입니다. 텅스텐 분말과 구리 분말을 고에너지 볼 밀링으로 혼합하고, 성형한 후 소결합니다. 구조적 특징은 텅스텐 입자의 다면체 분포, 구리 상의 불연속적인 네트워크, 그리고 일반적으로 5%에서 10% 사이의 기공률을 포함합니다. 계면 결합은 구리 액상의 습윤성에 따라 달라지며, 소결 온도와 시간에 따라 품질이 결정됩니다. 고온은 입자 성장을 유발하고 균일성을 저하시킬 수 있습니다. 전기 전도성 및 열 전도성이 높은 방열 기관에 적합합니다.

구리 함침법은 텅스텐 골격을 먼저 소결한 후 액상 구리를 함침시켜 합금을 제조합니다. 텅스텐 골격은 고온에서 다공성 구조를 형성하고, 구리는 이 구조를 함침시켜 채웁니다. 구조적 특징은 텅스텐 상이 연속적인 골격을 이루고, 구리 상이 고르게 분포되어 있으며,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기공률을 2~5%까지 줄일 수 있다는 것입니다. 계면 결합이 강하여 비습윤 입자의 수를 줄일 수 있지만, 공정이 복잡하고 에너지 소비가 높습니다. 고밀도가 요구되는 전극 응용 분야에 적합합니다. 스파크 플라즈마 소결(SPS)은 펄스 전류와 기계적 압력을 사용하며, 소결 시간이 짧습니다(수 분). 구조적 특징은 미세한 텅스텐 입자, 균일한 구리 상 분포, 2% 미만의 기공률, 그리고 명확한 결정립계를 특징으로 합니다. 급속 가열은 결정립 성장을 억제하고 계면 결합력이 강하여 접점과 같은 고경도 및 아크 침식 저항성 응용 분야에 적합합니다. 단점은 장비 비용이 높고 적용 범위가 제한적이라는 것입니다.

선택적 레이저 용융(SLM)과 같은 적층 제조는 분말을 층층이 증착하여 합금을 제조합니다. 구조적 특징은 텅스텐과 구리 상의 기율기 분포, 제어 가능한 입자 크기, 그리고 레이저 매개변수에 따라 달라지는 기공률이며, 최적화된 조건에서는 3% 미만까지 가능합니다. 계면 품질이 높고 복잡한 형상도 가능하지만, 열 응력으로 인해 미세 균열이 발생할 수 있습니다. 맞춤형 항공우주 부품에 적합합니다. 공정 차이는 성능에 영향을 미칩니다. 기존 분말 야금은 경제적이지만 기공률이 높고 대량 생산에 적합합니다. 구리 함침은 밀도는 좋지만 비용이 높습니다. SPS는 고성능을 제공하지만 소량 생산에 적합합니다. 적층 제조는 유연하지만 열 응력 최적화가 필요합니다. 최적화 방향에는 여러 공정(예: SPS+구리 함침)을 결합하여 밀도를 향상시키거나, 지능형 모니터링 기술을 사용하여 실시간으로 매개변수를 조정하는 것이 포함됩니다. 간단히 말해, 제조 공정의 구조적 차이는 성능 최적화를 위한 다양한 옵션을 제공합니다.

### 3.2 텅스텐 구리 합금의 미세구조와 성능 간의 본질적 관계

텅스텐 구리 합금의 미세 구조와 성능 사이에는 본질적인 관계가 있습니다. 결정립 형태, 상 분포, 기공률, 결합, 그리고 제조 공정은 전기 전도도, 열 전도도, 기계적 강도 및 내구성을 결정합니다. 미세 구조 최적화는 계면 결합 강화, 결합 감소, 그리고 다양한 응용 분야 요건 충족을 위한 상비 제어를 통해 달성됩니다.

입자 크기가 성능에 미치는 영향은 홀-페이지 효과를 통해 나타납니다. 미세 입자는 입계 밀도를 증가시키고 강도와 경도를 향상시키지만, 저항은 증가하고 전도도는 감소할 수 있습니다. 상 분포는 전기 및 열 전도 경로를 결정하고, 구리 상의 연속적인 네트워크는 성능을 향상시키며, 텅스텐 상은 고온 저항을 강화합니다. 기공과 결합은 밀도를 감소시켜 굽힘 강도와 아크 침식 저항성에 영향을 미치며, 치밀한 구조는 성능을 크게 향상시킵니다. 계면 품질은 하중 전달 및 열 확산에 영향을 미치며, 견고한 계면은 전반적인 성능을 향상시킵니다. 미세 구조 최적화는 응용 시나리오와 결합되어야 합니다. 방열 기관은 높은 구리 상 연속성을 요구하고, 전극은 높은 텅스텐 상 밀도를 요구합니다. 향후 연구에서는 나노복합 구조 또는 기능적 경사 설계를 통해 미세 구조와 성능 간의 본질적인 연관성을 더욱 명확히 규명할 수 있을 것입니다.

#### 3.2.1 입자 구조가 강도에 미치는 영향의 메커니즘

결정립 구조는 주로 결정립계의 장벽 효과와 응력 분산 능력에 반영됩니다. 강도는 합금이 변형이나 파괴에 저항하는 능력이며, 결정립 크기 및 형태와 직접적인 관련이

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



있습니다. 결정립이 작을수록 결정립계의 밀도가 증가하여 전위의 이동이 제한되는데, 이는 핵심 강화 메커니즘입니다. 결정립계는 전위에 대한 장벽 역할을 하여 전위가 쌓이거나 엉키게 하고, 이동을 지속하는 데 더 많은 에너지를 소모하게 하므로 합금의 변형 저항성이 크게 향상됩니다. 균일한 결정립 분포는 이러한 효과를 더욱 최적화하고, 국부적인 응력 집중점을 줄이며, 전체 구조의 지지력을 향상시킵니다.

결정립 형태 또한 강도에 중요한 영향을 미칩니다. 규칙적인 다면체 또는 거의 구형에 가까운 결정립은 가해지는 하중을 더욱 효과적으로 분산시키고 특정 방향으로 과도한 응력 축적을 방지할 수 있습니다. 반대로, 불규칙하거나 편평한 결정립은 응력 분포를 불균일하게 만들고 파괴 위험을 증가시킬 수 있습니다. 소결 과정에서 결정립의 재배열 및 성장은 온도와 압력에 의해 조절되며, 미세 결정립 형성은 급속 냉각 또는 단시간 소결 공정에 의존하며, 이러한 공정은 결정립계의 조밀한 분포를 유지합니다. 텅스텐 상은 고강도 골격 역할을 하며, 그 결정립 구조는 합금을 견고하게 지지하는 역할을 합니다. 또한 구리 상의 결합 효과는 결정립 간의 결합 강도를 더욱 향상시킵니다.

이러한 작용 기전 덕분에 텅스텐 구리 합금은 고강도가 요구되는 응용 분야에서 우수한 성능을 발휘합니다. 예를 들어, 기계적 충격이나 고하중 환경에서 미세 입자 구조는 변형에 효과적으로 저항하고 부품의 수명을 연장할 수 있습니다. 입계 강화 효과는 미세 구조의 밀도와도 관련이 있으며, 기공이나 결함을 줄이면 강도가 더욱 향상됩니다. 입계 구조를 최적화하려면 소결 매개변수를 제어하거나 미량 원소를 첨가하여 합금의 전반적인 기계적 특성을 향상시킴으로써 입계를 안정화해야 하며, 이를 통해 고신뢰성 환경에서 더 큰 잠재력을 발휘할 수 있습니다.

### 3.2.2 입자구조가 인성에 미치는 영향의 메커니즘

입자 구조는 주로 결정립계의 에너지 흡수 능력과 소성 변형의 배위에 반영됩니다. 인성은 합금이 에너지를 흡수하고 파괴에 저항하는 능력으로, 결정립 크기 및 계면 특성과 밀접한 관련이 있습니다. 일반적으로 결정립이 클수록 소성물이 높아지며, 전위 슬라이딩 및 쌍정 변형을 통해 에너지를 흡수하여 인성을 향상시킬 수 있습니다. 그러나 결정립이 너무 크면 강도가 감소하고 성능 불균형을 초래할 수 있습니다. 결정립이 작을수록 결정립계 밀도가 증가하여 재료의 균열 성장 저항성이 향상되지만, 소성물의 저하가 발생할 수 있으므로 강도와 인성 간의 균형을 찾아야 합니다.

결정립 형태가 인성에 미치는 영향 또한 중요합니다. 규칙적인 결정립 형태는 응력을 균일하게 전달하고 균열 발생 및 전파 위험을 줄이는 데 도움이 됩니다. 구리상은 저응점 결합상 역할을 하며, 연성은 결정립 사이에 추가적인 에너지 흡수 경로를 제공합니다. 외부 하중이 가해지면 구리상은 소성 변형을 겪어 텅스텐상의 취성 효과를 완화할 수 있습니다. 또한 결정립계에서의 미세 변형은 전위 흡수 및 재분배 메커니즘을 통해 국부적인 응력 집중을 완화합니다. 소결 공정에서 구리 액상의 유동성은 결정립 간의 긴밀한 결합을 촉진하고 인성 기반을 강화하며, 급속 냉각 과정은 미세 결정립의 소성 특성을 유지하는 데 도움이 됩니다. 이러한 작용 기전으로 인해 텅스텐 구리 합금은 동적 하중이나 충격 환경에서 우수한 인성을 나타냅니다. 예를 들어, 아크 작용이나 기계적

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

진동 상황에서 결정립 구조의 조화로운 변형 능력은 취성 파괴를 효과적으로 방지하고 부품의 수명을 연장할 수 있습니다. 인성 향상은 미세 구조의 균일성에도 영향을 받습니다. 기공이나 비습윤 영역의 감소는 하중 전달 효율을 향상시킵니다.

### 3.2.3 상분포와 전도도의 상관관계

텅스텐-구리 합금의 상 분포와 전기 전도도의 관계는 주로 구리 상의 연속성과 텅스텐 상의 분산도에 반영됩니다. 전기 전도도는 합금의 전류 전달 능력을 측정하는 척도이며, 상 분포의 균일성과 직접적인 관련이 있습니다. 구리는 높은 전도성을 가진 상이며, 구리의 연속적인 네트워크는 전기 전도도의 기초가 됩니다. 구리 상이 관통 경로를 형성하면 전자가 효율적으로 전달되어 합금의 전도성을 크게 향상시킵니다. 낮은 전도성 향상 상인 텅스텐 상의 분산 분포는 전류 흐름을 크게 방해하지 않지만, 텅스텐 함량이 너무 높으면 저항이 증가하고 전체 전도도가 감소할 수 있습니다.

상 분포의 균일성은 전기 전도도에 매우 중요합니다. 구리 상의 연속성은 액상 소결 공정 중 구리의 완전한 습윤 및 충전에 달려 있습니다. 텅스텐 입자가 응집되거나 구리 액상이 불충분하면 불연속 영역이 형성되어 접촉 저항이 증가할 수 있습니다. 텅스텐 상의 균일한 분산은 분말 혼합 공정에 의해 제어됩니다. 불 밀링 시간과 혼합 균일성은 상 분포의 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 소결 온도를 적절하게 높이면 구리 액상의 흐름을 촉진하고 상 간의 연결을 강화하며 전기 전도도를 최적화합니다. 계면 품질 또한 보조적인 역할을 합니다. 텅스텐과 구리의 좋은 조합은 전자 산란을 줄이고 높은 전도도를 유지합니다.

이러한 결합으로 인해 텅스텐 구리 합금은 높은 전도성이 요구되는 응용 분야에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 예를 들어, 전기 접점이나 방열 기관에서 구리 상의 연속적인 네트워크는 효율적인 전류 전달을 보장하고 높은 전류 밀도 요구를 충족합니다. 상 분포 최적화는 아크 내식성에도 영향을 미칩니다. 균일한 구리 상 분포는 아크 에너지 집중점을 줄이고 전도성의 안정성을 간접적으로 향상시킵니다. 상 분포를 최적화하려면 구리 함량을 조정하거나 다단계 소결 공정을 통해 구리 상의 네트워크 구조를 개선하여 전도성을 향상시키고 고성능 전기 응용 분야의 요구 사항을 충족해야 합니다.

### 3.2.4 상분포와 열전도도의 상관관계

텅스텐-구리 합금의 인 분포와 열전도도는 주로 구리 상의 연결성과 텅스텐 상의 분산에 반영됩니다. 열전도도는 합금의 열 전달 능력이며 상 분포의 균일성과 직접적인 관련이 있습니다. 구리는 열전도도가 높은 상이며, 그 연속적인 네트워크는 열전도의 기초가 됩니다. 구리 상이 관통 경로를 형성하면 열이 효율적으로 전달되어 합금의 방열 성능이 크게 향상됩니다. 열전도도가 낮은 향상 상인 텅스텐 상의 분산 분포는 열 흐름을 크게 방해하지 않지만, 텅스텐 함량이 너무 높으면 열전도도가 구리보다 낮아 전체 열전도도가 감소할 수 있습니다. 상 분포의 균일성은 열전도도에 매우 중요합니다. 구리 상의 연속성은 액상 소결 공정 중 구리의 완전한 흐름과 침투에 달려 있습니다. 텅스텐 입자가 응집되거나 구리 액상이 불균일하게 분포되면 열 저항점이 형성되어 열 전달을 방해할 수

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있습니다. 텅스텐 상의 균일한 분산은 분말 혼합 공정을 통해 달성됩니다. 적절한 혼합은 상 간의 원활한 연결을 보장하고 열전도 경로를 최적화합니다. 소결 온도를 적절하게 조절하면 구리 액상의 습윤 및 충전이 촉진되어 상 간의 열 전달 효율이 향상됩니다. 계면 품질 또한 여기에 중요한 역할을 합니다. 텅스텐과 구리의 적절한 조합은 열 산란을 줄이고 효율적인 열 확산을 유지합니다.

이러한 관계 덕분에 텅스텐 구리 합금은 높은 방열 성능이 요구되는 응용 분야에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 예를 들어, 전력 전자 장치나 고온 장비에서 구리 상(phase)의 연속적인 네트워크는 열을 빠르게 분산시켜 과열로 인한 성능 저하를 방지할 수 있습니다. 상 분포 최적화는 아크 내식성에도 영향을 미칩니다. 균일한 구리 상 분포는 열을 고르게 확산시키고 아크로 인한 국부적인 고온 손상을 줄이는 데 도움이 됩니다. 상 분포를 조정하려면 구리 함량을 최적화하거나 다단계 소결 공정을 사용하여 구리 상이 효과적인 열전도 네트워크를 형성하도록 해야 합니다. 이를 통해 열전도도를 향상시키고 고성능 열 관리 요건을 충족할 수 있습니다.

### 3.2.5 기공 및 결함이 경도에 미치는 영향

텅스텐-구리 합금의 경도에 영향을 미치는 기공과 결함은 주로 구조적 밀도와 응력 분포에 반영됩니다. 경도는 합금이 표면 압입이나 마모에 저항하는 능력으로, 미세 구조의 건전성과 직접적인 관련이 있습니다. 미세한 틈인 기공은 재료의 전체 밀도를 감소시키고 변형 저항력을 약화시킵니다. 균열이나 찌지 않은 입자와 같은 결함은 응력 집중점이 되어 국부적인 파손을 유발하고 경도를 저하시킬 수 있습니다. 미세 구조의 균일성은 경도 성능에 중요한 역할을 하며, 기공과 결함의 존재는 합금의 기계적 강도를 직접적으로 약화시킵니다.

기공 형성은 일반적으로 소결 중 충전 부족이나 재료 수축과 관련이 있습니다. 구리 액상이 텅스텐 입자 사이의 틈을 완전히 관통하지 못하면 잔류 기공이 합금 내부에 분산됩니다. 이러한 기공은 외부 하중 하에서 응력 집중을 유발하여 재료가 낮은 압력에서 변형되거나 파손되기 쉽습니다. 특히 상 변화 또는 큰 온도 구배 영역에서 프레스 또는 냉각 중 열 응력으로 인해 균열과 같은 결함이 발생할 수 있습니다. 균열이 확장되면 경도가 더욱 감소합니다. 찌지 않은 입자는 구리 상과의 효과적인 결합이 부족하여 고립되어 전체 구조의 지지력을 약화시킵니다. 이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 합금의 표면 저항을 감소시킵니다.

기공과 결함이 경도에 미치는 영향은 기계적 특성의 안정성에도 반영됩니다. 기공률이 높을수록 경도 분포가 불균일해지고, 국소적으로 눈에 띄는 연화가 발생할 수 있습니다. 특히 마모가 심한 환경에서는 기공이 마모의 시작점이 되기 쉽습니다. 결함의 존재는 이러한 영향을 악화시키고, 반복적인 하중 하에서 균열이 확산되어 재료 파손을 가속화할 수 있습니다. 미세 구조 최적화는 기공을 제거하고 결함을 수정하여 경도를 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어, 소결 공정을 개선하거나 후처리 기술을 사용하여 재료의 밀도를 높이는 방법이 있습니다. 미세 구조를 최적화하면 기계적 충격이나 표면 접촉 조건에서 합금의 내구성이 크게 향상되어 전극이나 절삭 공구와 같이 높은 경도가 요구되는 용도에

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

더욱 적합합니다.

### 3.2.6 기공 및 결합이 내식성에 미치는 영향

기공 과 결합은 주로 표면 보호 및 매체 침투에 영향을 받습니다. 내식성은 합금이 산소, 습기 또는 화학 물질과 같은 환경 매체에 의한 침식에 저항하는 능력으로, 미세 구조의 건전성과 직접적인 관련이 있습니다. 기공은 개방형 또는 폐쇄형 틈으로, 부식성 매체가 내부로 유입되는 통로를 제공하여 재료의 열화를 가속화합니다. 균열이나 불순물과 같은 결합은 부식의 시작점이 되며, 국부 부식이나 응력 부식 균열을 쉽게 유발하여 내식성을 저하시킵니다. 미세 구조의 치밀성은 내식성에 결정적인 역할을 합니다.

기공의 존재는 부식성 매질이 합금 내부로 침투할 수 있게 하며, 특히 습하거나 산성 환경에서는 기공에 축적된 액체가 전기화학적 부식을 유발할 수 있습니다. 결합상인 구리상은 부식성 매질에 취약하며, 기공의 존재는 구리의 산화 또는 용해를 심화시켜 합금의 전반적인 안정성을 약화시킵니다. 균열과 같은 결합은 부식의 확장 경로를 제공하며, 균열 선단의 높은 응력 상태는 부식 반응을 가속화합니다. 특히 고온이나 아크 작용 시 이러한 결합은 심각한 손상으로 빠르게 발전할 수 있습니다. 불순물 응집은 또한 추가적인 전기화학적 활성 부위를 유발하여 내식성을 더욱 저하시킬 수 있습니다.

기공과 결합이 내식성에 미치는 영향은 장기 사용 시 성능에도 반영됩니다. 기공률이 높을수록 표면 보호 성능이 저하되며, 특히 부식성 가스나 액체에 노출될 경우 더욱 그렇습니다. 기공 내 부식 생성물은 통로를 막을 수는 있지만 추가적인 침식을 막을 수는 없습니다. 결합이 존재하면 국소적인 부식 속도가 전체 부식 속도보다 높아집니다. 특히 응력 부식이나 피로 부식 상황에서는 결합이 재료 균열을 유발할 수 있습니다. 미세 구조 최적화는 진공 소결을 통한 산화 감소 또는 표면 코팅을 통한 부식성 매체 차단과 같은 기공과 결합을 줄임으로써 내식성을 향상시킵니다. 최적화된 합금은 혹독한 환경에서도 장기적인 안정성을 유지할 수 있으며, 해양 장비 또는 화학 처리 부품과 같이 높은 내식성이 요구되는 분야에 적합합니다 .

### 3.3 텅스텐-구리 합금 미세구조의 진화

텅스텐 -구리 합금은 제조 및 사용 과정에서 역동적인 변화를 겪습니다. 이러한 변화 법칙은 여러 요인에 의해 결정되며 합금의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 미세구조의 변화는 다양한 조건에서 재료의 적응성과 안정성을 반영하며, 결정립 형태, 상 분포 및 결합 특성의 조정을 포함합니다. 아래에서는 성분비 변화, 열처리 중 구조 변형, 그리고 사용 환경으로부터의 피드백이 구조에 미치는 변화에 대해 자세히 설명합니다. 본문에서는 변화 메커니즘, 공정 특성 및 성능 영향을 강조하여 합금 적용 최적화에 있어 이러한 변화의 중요성을 강조합니다.

#### 3.3.1 구성비의 변화로 인한 진화

조성비의 변화는 텅스텐-구리 합금의 미세구조 진화에 중요한 원동력이다. 텅스텐과

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



구리의 비율을 조절함으로써 결정립 분포, 상 계면 및 기공 특성에 영향을 미친다. 텅스텐 함량이 증가하면 텅스텐 입자가 합금을 지배하고 더 조밀한 골격 구조를 나타내는 반면 구리 상은 점차 연속적인 네트워크에서 분산된 충전 상으로 변한다. 이 변화로 인해 결정립 형태가 규칙적으로 되고, 계면 면적이 감소하며, 구리 액상이 부족하여 기공률이 증가한다. 반대로 구리 함량이 증가하면 구리 액상의 유동성이 증가하여 텅스텐 입자를 적시고 틈을 메워 상 분포가 더 균일해지고, 결정립계가 점차 흐릿해지고, 구리의 충전 효과로 인해 기공률이 감소한다.

조성비의 조절은 상 계면의 변화를 유발합니다. 텅스텐 함량이 높으면 계면은 주로 텅스텐 입자 간의 직접 접촉으로 나타나며, 결합 강도는 소결 조건에 따라 달라집니다. 구리 함량이 증가하면 계면은 구리 상이 지배적이 되어 습윤 효과가 향상되고 계면 결합력이 향상되지만 열응력이 발생할 수 있습니다. 결정립 크기 또한 비율의 변화에 따라 조절됩니다. 텅스텐 비율이 높으면 결정립 크기가 더 크게 유지되고, 구리 비율이 높으면 액상 재배열로 인해 결정립이 미세화됩니다. 이러한 변화는 미세 구조의 밀도에 직접적인 영향을 미치고, 합금의 기계적 및 전기적 특성을 조절합니다.

이러한 진화 법칙은 텅스텐-구리 합금이 다양한 응용 분야 요건에 적응할 수 있도록 합니다. 예를 들어, 텅스텐 비율을 높이면 고온 저항성과 아크 침식 저항성이 향상되어 고마모 환경에 적합하게 됩니다. 구리 비율을 높이면 전기 전도도와 열 전도도가 향상되어 방열 기관에 적합합니다. 진화를 제어하려면 분말 혼합 공정과 소결 매개변수를 최적화하여 조성비와 미세 구조 간의 조화로운 발달을 보장해야 합니다.

### 3.3.2 열처리 중 구조 변형

열처리 공정은 텅스텐-구리 합금의 미세 구조 진화에서 중요한 단계입니다. 온도, 시간 및 분위기의 조절을 통해 결정립 성장, 상 재결합 및 결함 제거와 같은 변화를 유발합니다. 가열 초기에는 낮은 용점으로 인해 구리 상이 먼저 녹고 텅스텐 입자를 적시고 기공을 채워 상 분포가 균일해지는 경향이 있습니다. 온도가 상승함에 따라 결정립이 재배열되고 성장하기 시작합니다. 텅스텐 입자는 열 확산으로 인해 형태를 조정할 수 있으며 결정립 경계가 점차 명확해지거나 융합됩니다. 장기간 열처리하면 결정립이 너무 커지고 계면에 열 응력이 나타나며 재료 수축으로 인해 기공이 감소하거나 재분포될 수 있습니다.

열처리는 상 구조의 변화도 유발합니다. 구리 액상의 유동성은 텅스텐 입자 간의 연결을 강화하고, 일부 비습윤 영역이 채워지며, 계면 결합력이 향상됩니다. 그러나 온도가 너무 높으면 구리가 휘발되거나 산화되어 상 분포의 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 균열이나 불순물 응집과 같은 결함은 열처리 중, 특히 압력 보조 조건에서 사라지거나 이동할 수 있으며, 미세 구조가 치밀해지는 경향이 있습니다. 냉각 과정은 이러한 변화를 고정합니다. 급속 냉각은 미세 입자를 유지하고, 완냉은 입자 성장과 상 안정화를 촉진합니다.

이러한 구조적 변형을 통해 텅스텐 구리 합금의 특성을 조절할 수 있습니다. 예를 들어, 적절한 열처리는 재료의 균일성과 강도를 향상시켜 높은 신뢰성이 요구되는 접촉 응용

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분야에 적합합니다. 과열은 인성을 저하시킬 수 있으므로, 매개변수를 신중하게 제어해야 합니다. 미세 구조의 이상적인 변화를 달성하기 위해서는 열처리 최적화와 단계적 가열 또는 불활성 분위기 보호와 같은 특정 공정을 병행해야 합니다.

### 3.3.3 구조물에 대한 사용환경 피드백

텅스텐-구리 합금의 미세 구조에 대한 사용 환경은 온도, 습도, 전류 및 기계적 응력과 같은 외부 조건에 의해 발생하는 구조적 변형 및 열화에 반영됩니다. 고온 환경에서는 구리 상이 연화되거나 부분적으로 용융될 수 있으며, 텅스텐 입자 간의 결합은 열 응력의 영향을 받고 계면에 미세 균열이나 박리가 발생할 수 있습니다. 습하거나 부식성 환경에 장기간 노출되면 구리 상이 산화 또는 침식되기 쉽고, 기공이 부식성 매체의 진입 통로가 되어 구조적 열화를 가속화합니다. 아크 작용으로 인해 고온 삭마로 인해 표면 입자가 재형성될 수 있으며, 기공과 결합의 확장은 미세 구조의 파괴를 심화시킵니다.

기계적 응력 환경은 구조에 상당한 피드백을 제공합니다. 반복적인 하중은 결정립 변형이나 파괴를 유발하고, 계면에 새로운 균열이 형성되며, 응력 집중으로 인해 기공이 확장될 수 있습니다. 전류가 흐르면 국부적인 고온이 상 재결합을 유도하여 구리 상이 이동하거나 휘발될 수 있으며, 텅스텐 골격 구조가 점차 노출됩니다. 열 사이클링이나 아크 스위칭과 같은 사용 환경의 주기적인 변화는 미세 구조가 점진적으로 적응하거나 악화되도록 하며, 결정립계와 상 분포가 동적으로 조정되어 장기 성능에 영향을 미칠 수 있습니다.

이러한 피드백은 텅스텐-구리 합금이 환경에 따라 다른 내구성을 나타내도록 합니다. 예를 들어, 고온 아크 환경에서는 구조 조정을 통해 내식성이 향상되지만, 습한 환경에서는 열화가 수명 단축을 가속화합니다. 환경 피드백은 설계 최적화의 기반을 제공하며, 표면 코팅이나 환경 제어를 통해 구조적 열화를 완화할 수 있습니다.

## 3.4 텅스텐-구리 합금 미세구조의 제어 전략

텅스텐-구리 합금은 다양한 기술적 수단을 통해 결정립 형태, 상 분포, 기공 특성 및 계면 품질을 최적화하여 합금의 전기 전도도, 열 전도도, 기계적 강도 및 내구성을 향상시키는 것을 목표로 합니다. 고성능 응용 분야를 달성하기 위해서는 미세 구조 제어가 핵심이며, 여기에는 제조 공정 개선, 합금 원소 첨가 최적화, 그리고 구조와 성능 간의 관계에 대한 심층적인 연구가 포함됩니다. 이러한 전략은 공정 변수 조정 및 재료 조성 설계를 통해 전기 접점, 용접 전극 및 고신뢰성 부품의 다양한 요구에 부응합니다.

### 3.4.1 제조공정에 따른 관리방법

제조 공정에 기반한 제어 방법은 텅스텐-구리 합금의 미세 구조를 조절하는 기초입니다. 혼합, 압축, 소결 및 후처리 링크를 최적화하여 미세 특성을 정밀하게 조정할 수 있습니다. 분말 혼합 공정은 조절의 시작점입니다. 텅스텐 분말과 구리 분말의 균일한 혼합은 고에너지 볼 밀링이나 기계적 합금 기술을 통해 달성됩니다. 우수한 분말 혼합 효과는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

입자 응집을 줄이고 텅스텐과 구리 상의 균일한 분포를 보장하며 후속 성능을 위한 기초를 마련 할 수 있습니다. 분쇄 시간 및 매체 선택과 같은 분말 혼합 공정 중 매개변수 조정은 분말 입자 크기와 형태에 영향을 미칩니다. 미세 입자는 강도를 높이는 데 도움이 되는 반면 큰 입자는 인성을 향상시킬 수 있습니다. 적절한 분말 입자 크기 범위를 선택하는 것은 입자 크기를 제어하는 데 중요하며, 공정 설계는 목표 성능에 따라 맞춤화해야 합니다.

프레스 공정은 압력을 가하여 분말을 형성하고, 입자 배열과 기공 분포를 미리 결정합니다. 압력의 균일성은 그린 바디의 치밀성에 직접적인 영향을 미칩니다. 압력이 너무 낮으면 구조가 느슨해지고 기공률이 증가할 수 있으며, 압력이 너무 높으면 입자 파열이나 응력 집중이 발생할 수 있습니다. 프레스 다이 설계 및 공정 변수 최적화는 그린 바디의 밀도와 기하학적 정확도를 효과적으로 제어하여 소결을 위한 안정적인 기반을 제공할 수 있습니다. 프레스 후 그린 바디의 미세 구조는 텅스텐과 구리의 분포 특성을 미리 반영하며, 구리 상은 습윤성을 나타내기 시작하여 액상 소결을 준비합니다. 프레스 공정의 미세화는 초기 결함을 줄이고 이후 구조 최적화를 위한 좋은 기반을 마련하는 데 도움이 됩니다.

소결 공정은 미세 구조 조절의 핵심 단계입니다. 고온 처리는 상 결함을 달성하고 기공률을 줄이는 데 사용됩니다. 액상 소결이 일반적인 방법입니다. 구리는 고온에서 용융되어 텅스텐 입자를 적시고 틈을 메워 계면 결함을 강화합니다. 소결 온도와 시간 제어가 중요합니다. 낮은 온도는 미세 입자를 유지하는 데 도움이 되며, 높은 온도는 구리 액상의 완전한 흐름을 촉진하고 젖지 않은 부분을 줄입니다. 진공 또는 불활성 가스 환경과 같은 소결 분위기를 선택하면 산화 불순물의 유입을 방지하고 텅스텐과 구리 의 순도를 유지하며 상 분포를 최적화할 수 있습니다. 단계적 가열 또는 압력 보조 소결 기술은 미세 구조를 더욱 개선하고 기공률을 줄이며 밀도를 향상시키며, 특히 고강도와 내식성이 요구되는 응용 분야에 적합합니다. 소결 공정을 최적화하면 미세 구조의 균일성과 안정성이 보장됩니다.

후처리 공정은 미세 구조를 미세 조정하는 보완적인 수단을 제공합니다. 열간 등압 성형은 전방향 압력을 통해 잔류 기공을 제거하고, 결정립 분포의 일관성을 개선하며, 재료의 전반적인 성능을 향상시킵니다. 연마 또는 코팅 기술과 같은 표면 처리는 결함을 복구하고 내식성과 내아크 침식성을 향상시킬 수 있습니다. 열처리 공정은 온도와 냉각 속도를 조절하여 결정립 성장과 상 안정성을 조절하고 강도와 인성의 균형을 맞춥니다. 다양한 후처리 방법의 선택은 특정 응용 분야의 요구 사항에 따라 달라집니다. 예를 들어, 고전도성 응용 분야에서는 표면 세정이 우선시될 수 있으며, 내마모성이 높은 응용 분야에서는 경화 처리가 필요할 수 있습니다. 전처리 공정에 기반한 제어 방법은 텅스텐-구리 합금의 미세 구조가 다양한 성능 요구 사항에 적응할 수 있도록 하여 고신뢰성 부품에 대한 견고한 지지력을 제공합니다.

### 3.4.2 합금 원소 첨가 최적화 방법

첨가 원소의 종류와 함량은 결정립 형태, 상 분포, 계면 결함 및 결함 특성에 직접적인

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

영향을 미치며, 전기 전도도, 열 전도도, 기계적 강도 또는 내식성을 향상시킵니다. 일반적으로 첨가되는 원소로는 니켈, 철, 코발트 등이 있으며, 이들은 화학적 친화력이나 물리적 작용을 통해 텅스텐 및 구리와 상호작용하여 미세 구조를 최적화할 수 있습니다.

일반적인 첨가 원소인 니켈은 구리와 텅스텐의 젖음성을 크게 향상시킬 수 있습니다. 니켈을 첨가하면 액상 소결 시 구리 액상의 유동성이 향상되어 텅스텐 입자 간의 계면이 더욱 가까워지고 젖지 않는 영역과 기공이 줄어듭니다. 이러한 젖음성 향상 효과는 상 분포의 균일성을 향상시켜 재료의 밀도와 강도를 향상시킵니다. 또한 니켈은 결정립계에서 안정적인 화합물을 형성하여 결정립 성장을 억제하고 미세한 결정립 구조를 유지하며 합금의 변형 저항성을 향상시키는 데 도움이 될 수 있습니다. 철을 첨가하면 소결 시 확산 속도가 증가하고, 텅스텐과 구리의 상호 침투가 향상되며, 계면 품질이 개선되고, 하중 전달 효율이 향상됩니다. 코발트는 연성이 뛰어나 미세 구조에서 인성을 강화하고 텅스텐 상의 취성 효과를 완화할 수 있습니다. 첨가 원소의 최적화에는 원소의 분포 및 함량 제어도 포함됩니다. 과도한 첨가는 불순물 응집이나 상분리를 유발하여 미세 구조의 안정성을 약화시킬 수 있으므로, 정확한 비율과 공정 조정을 통해 균형을 맞춰야 합니다. 첨가 원소의 도입은 일반적으로 분말 혼합 단계에서 텅스텐 및 구리 분말과 혼합하여 균일한 분산을 보장합니다. 소결 공정에서 첨가된 원소는 구리와 저융점 공정상을 형성하여 액상 형성을 촉진하고 미세 구조를 더욱 최적화할 수 있습니다. 이후 열처리 또는 표면 처리를 통해 첨가된 원소의 효과를 더욱 안정화하고 성능 향상에 기여할 수 있습니다.

이 최적화 방법을 통해 텅스텐 구리 합금의 미세 구조를 특정 응용 분야 요건에 맞게 조정할 수 있습니다. 예를 들어, 고강도가 요구되는 전극에서는 니켈을 첨가하여 계면 접합력과 밀도를 향상시키고, 높은 인성이 요구되는 접점에서는 코발트를 첨가하여 내충격성을 개선합니다. 첨가 원소의 조절은 내식성과 내아크 침식성을 향상시키고, 결함을 줄이고 상 분포를 최적화하여 수명을 연장합니다. 향후 개발 방향에는 새로운 첨가 원소 또는 복합상 탐색, 지능형 설계 기술 결합, 그리고 미세 구조의 동적 최적화를 통해 텅스텐 구리 합금의 종합적인 성능을 더욱 향상시키는 것이 포함됩니다.

### 3.4.3 구조적 규제와 성과 간의 관계

구조적 조절 및 성능은 미세 구조 최적화가 전기 전도도, 열 전도도, 기계적 강도 및 내구성에 직접적인 영향을 미친다는 사실에 반영됩니다. 이러한 관계는 결정립 형태, 상 분포, 기공 특성 및 계면 품질의 조절을 통해 달성되며, 이는 미세 구조가 거시적 성능에 결정적인 역할을 한다는 것을 보여줍니다. 결정립 구조의 미세화는 결정립계 밀도를 증가시켜 재료의 변형 저항성을 향상시키고, 강도와 경도를 향상시키며, 인성에도 어느 정도 영향을 미칠 수 있습니다. 상 분포의 균일성은 전기 및 열 전도 경로의 효율성을 결정합니다. 구리 상의 연속적인 네트워크는 전자와 열 전달을 최적화하는 반면, 텅스텐 상의 분산은 고온 저항성과 내마모성을 뒷받침합니다.

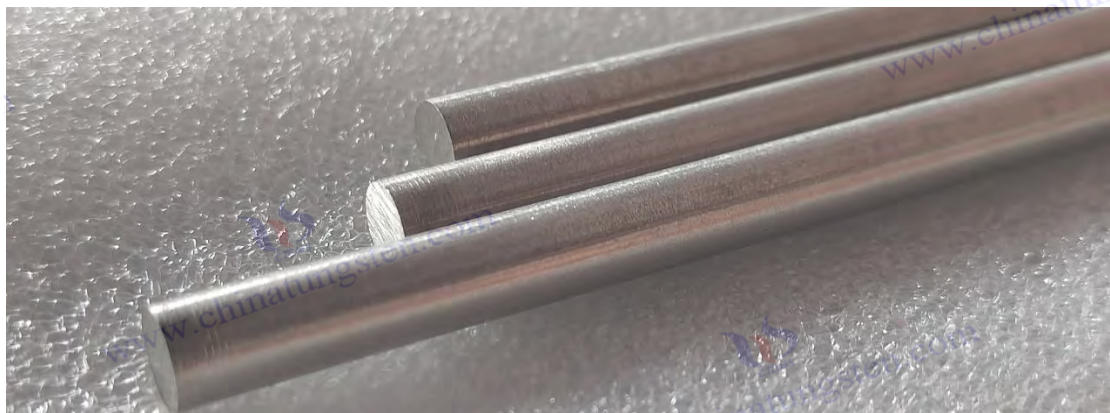
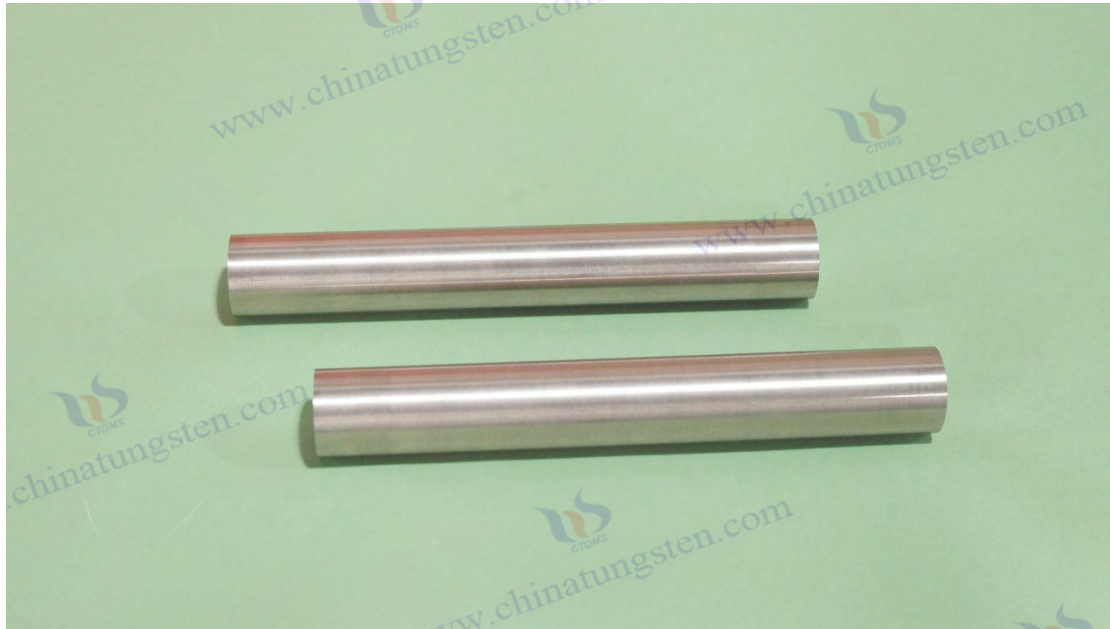
기공 및 결함 제어는 구조적 조절과 성능 간의 관계에서 핵심적인 연결 고리입니다. 기공 감소는 재료 밀도를 향상시키고, 굽힘 강도 와 표면 저항을 증가시키는 동시에 열 저항과

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



전기 저항을 감소시키고, 전기 및 열 전도성을 향상시킵니다. 균열이나 비습윤 입자와 같은 결함을 제거하면 응력 집중점이 감소하고 피로 저항성과 내식성이 향상됩니다. 계면 품질 향상은 상 간 결합력을 강화하고, 하중 전달 및 열 확산 효율을 최적화함으로써 기계적 특성과 아크 침식 저항성을 간접적으로 향상시킵니다. 구조적 조절의 포괄성은 이러한 특성들 간의 상호 제약 조건을 균형 있게 조정하여 다양한 응용 분야의 요구를 충족할 수 있는 능력에 달려 있습니다.

이러한 관계를 통해 미세 구조 조절을 통해 텅스텐-구리 합금의 특성을 최적화할 수 있습니다. 예를 들어, 높은 전도성이 요구되는 방열 기관에서는 구리 상의 연속적인 분포와 기공률 감소가 성능을 크게 향상시킵니다. 내마모성이 요구되는 전극에서는 미세 입자와 치밀한 텅스텐 골격이 내구성을 향상시킵니다. 구조적 조절 전략 또한 성능의 한계를 드러냅니다. 입자가 너무 미세하면 인성이 저하되고, 텅스텐 함량이 너무 높으면 취성이 증가할 수 있습니다. 성능의 균형을 맞추기 위해서는 포괄적인 조절이 필요합니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

#### 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 구리 합금의 제조 기술

텅스텐-구리 합금 제조 공정은 고성능 복합 소재 생산의 핵심 요소이며, 텅스텐과 구리의 균일한 조합을 달성하기 위한 다양한 기술적 방법을 포함합니다. 텅스텐-구리 합금은 뛰어난 전기 전도성, 열 전도성, 고온 저항성, 아크 부식 저항성으로 인해 전기, 전자 및 산업 분야에서 널리 사용됩니다. 제조 공정의 목표는 원료, 공정 변수 및 장비 조건을 제어하여 합금의 미세 구조와 성능을 최적화하는 것입니다. 진공 침투, 분말 야금, 구리 침투와 같은 다양한 제조 방법은 고유한 특성을 가지고 있으며 특정 응용 분야에 적합합니다.

### 4.1 진공침투법을 이용한 텅스텐-구리 합금 제조

진공 침투법을 이용한 텅스텐-구리 합금 제조는 고온에서 액상 구리를 텅스텐 골격 내부에 침투시켜 치밀하고 균일한 복합 구조를 형성하는 제조 방법입니다. 이 공정은 텅스텐의 높은 용점과 구리의 낮은 용점을 이용하여 소결을 통해 다공성 텅스텐 골격을 제조 한 후, 진공 환경에서 구리를 용융하여 침투시킵니다. 진공 환경은 이 공정의 핵심 특징으로, 공기 중의 산소와 불순물을 제거하고 산화 반응을 방지하며, 액상 구리와 텅스텐 골격 사이의 양호한 결합을 보장합니다. 이 공정은 텅스텐 골격 제조, 구리 침투, 그리고 냉각 및 응고로 구성됩니다. 각 단계의 제어는 합금의 미세 구조와 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 진공 침투법은 고밀도와 균일한 상 분포를 달성할 수 있기 때문에 고전압 회로 차단기 접점 및 저항 용접 전극과 같이 높은 전도성과 고온 저항이 요구되는 부품에 특히 적합합니다. 공정 최적화는 다양한 응용 분야 요구 사항을 충족하기 위해 침투 균일성을 개선하고, 다공성을 줄이며, 인터페이스 접합을 강화하는 데 중점을 둡니다.

#### 4.1.1 침투 원리 및 장비 요구 사항

제조 는 진공 환경에서 액상 구리의 투자율 특성을 기반으로 합니다. 고온에서 구리를 텅스텐 골격 내부로 침투시켜 균일한 복합 재료를 형성합니다. 침투 공정의 핵심은 구리의 낮은 녹는점이 가열되면 액체로 변하고, 모세관 현상과 중력 효과를 이용하여 텅스텐 다공성 골격의 미세 기공으로 침투하는 것입니다. 고녹는점 물질인 텅스텐은 고체 상태를 유지하며 안정적인 골격을 형성하여 구리 침투를 지원합니다. 진공 환경은 공기 중의 산소와 불순물을 제거하여 산화 반응을 방지하고 구리 액체가 텅스텐 표면을 완전히 적실 수 있도록 합니다. 침투 공정 중 온도와 진공도는 구리 액체의 유동성과 침투 깊이를 조절하며, 이는 합금의 미세 구조와 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 공정의 성공은 구리 액체와 텅스텐 골격 사이의 우수한 계면 결합과 침투 균일성에 달려 있습니다. 계면 품질과 기공 분포는 성능을 결정하는 중요한 요소가 됩니다. 이 공정을 달성하려면 특수 장비가 필요합니다. 핵심 장비는 고온 가열 시스템과 효율적인 진공 펌프를 갖춘 진공 침투로로, 산화 및 가스 잔류를 방지하기 위해 안정적인 진공 환경을 유지합니다. 가열 시스템은 저항 가열 또는 유도 가열 기술을 사용하며, 구리가 완전히 용융되어 텅스텐 골격의 모든 구석구석까지 침투하도록 균일하게 가열하고 온도를 정확하게 제어할 수 있어야 합니다. 진공 펌프는 저압 상태를 달성하고 불순물의 간섭을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

방지하기 위해 높은 펌핑 속도와 낮은 누설률을 가져야 합니다. 주형 또는 도가니는 텅스텐 골격을 지지하고 액체 구리를 담는 데 사용됩니다. 재료는 고온에 강해야 하며 오염이나 구조적 손상을 방지하기 위해 텅스텐 및 구리와 화학 반응을 일으키지 않아야 합니다. 온도 센서 및 압력 모니터링 시스템과 같은 보조 장비는 공정 매개변수를 실시간으로 모니터링하여 운영의 일관성을 보장합니다. 이러한 장치들은 진공 침투 공정의 효율성과 신뢰성을 보장하고 합금의 미세 구조가 예상 성능 요구 사항을 충족하도록 보장합니다.

#### 4.1.2 프로세스 단계 및 매개변수 최적화

제조는 합금의 미세 구조와 특성이 예상 목표를 충족하도록 여러 단계의 조율된 작업을 포함하는 체계적인 공정입니다. 이 공정은 텅스텐 분말의 제조 및 성형으로 시작되며, 프레스 또는 예비 소결을 통해 다공성 텅스텐 골격을 형성합니다. 이 단계에서는 후속 구리 침투에 적합한 통로를 제공하기 위해 골격의 기공률과 기계적 강도에 주의를 기울여야 합니다. 다음으로, 제조된 텅스텐 골격을 진공 침투로에 넣고, 적절한 양의 구리 재료를 첨가하고, 노 본체를 밀봉한 후 진공 시스템을 가동하여 공기 중의 산소와 불순물을 제거하여 침투를 위한 순수한 환경을 조성합니다. 가열 단계는 이 공정의 핵심입니다. 온도를 구리의 녹는점 이상으로 점진적으로 높여 구리 액체가 녹아 진공 환경에서 자연적으로 침투하도록 해야 합니다. 절연 단계는 공정 시간을 연장하고, 상 분포와 계면 결합을 최적화하여 구리 액체가 텅스텐 골격의 기공을 완전히 채우도록 합니다. 냉각 단계는 냉각 속도를 제어하여 미세 구조를 고정하고 열 응력으로 인한 결함이나 불균일성을 방지합니다. 각 단계의 원활한 진행은 최종 제품의 품질을 보장하기 위한 공정 변수의 정밀한 제어에 달려 있습니다.

매개변수 최적화의 초점은 온도, 진공, 시간의 조화에 있습니다. 온도 제어는 단계적으로 수행되어야 합니다. 저온 예열 단계는 열충격을 줄이고, 고온 단계는 구리의 완전한 용융을 보장하며, 중간 전이 단계는 열 분포의 균형을 유지하여 국부 과열을 방지합니다. 진공 조절은 구리 액체의 습윤 효과와 불순물 함량에 직접적인 영향을 미칩니다. 진공이 너무 낮으면 잔류 가스가 침투에 영향을 미칠 수 있습니다. 진공이 너무 높으면 장비 복잡성과 공정 효율성 간의 균형을 맞춰야 하며, 실제 필요에 따라 동적으로 조정해야 합니다. 시간 최적화는 가열, 단열, 냉각의 각 단계에 시간을 할당하는 것을 포함합니다. 시간이 너무 짧으면 침투가 불충분하거나 기공이 남을 수 있으며, 너무 길면 입자 크기가 커지거나 구리 휘발이 발생하여 성능에 영향을 미칠 수 있습니다. 또한, 공정 흐름은 구리의 침투력을 향상시키기 위해 표면 세정이나 기공 조정과 같은 텅스텐 골격의 전처리를 고려해야 합니다. 매개변수의 동적 조정은 공정 시뮬레이션과 실험적 검증을 통해 이루어지며, 미세 구조의 밀도와 균일성을 보장하고 성능 향상을 지원합니다.

공정 단계의 최적화는 합금의 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 균일한 온도 분포와 충분한 침투 시간은 전기 및 열 전도성을 향상시켜 방열 기관 응용 분야에 적합합니다. 안정적인 진공 환경과 적절한 냉각 속도는 기계적 강도와 내식성을 향상시켜 전극 부품에 적합합니다. 공정의 각 단계는 이전 단계와 긴밀하게 연결되어야 합니다. 어떤 연결 단계든 제어가 부족하면 결함이 증가하거나 상 분포가 불균일해질 수 있습니다. 향후

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



개발 방향에는 온도, 진공 수준 및 침투 깊이를 실시간으로 추적하여 매개변수를 동적으로 최적화하는 지능형 모니터링 시스템 도입이 포함되어 공정 효율성과 제품 품질을 향상시킵니다. 이 방법은 텅스텐-구리 합금의 산업 생산에 신뢰성 있는 품질을 제공합니다.

#### 4.1.3 프로세스의 장점 및 한계

제조 는 고유한 공정 특성으로 인해 상당한 이점을 제공하지만, 몇 가지 한계점도 있습니다. 이러한 특성은 합금의 적용 범위와 최적화 방향을 결정합니다. 장점 중 하나는 높은 밀도입니다. 진공 환경에서 구리 액체가 완전히 침투하면 기공률을 크게 줄이고 재료의 전반적인 강도와 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 이러한 치밀한 구조는 합금에 우수한 기계적 특성과 내구성을 제공하여 특히 고하중을 받는 응용 분야에 적합합니다. 또 다른 장점은 균일한 상 분포입니다. 텅스텐 골격과 구리 상의 우수한 조합은 전기 및 열 전도성을 최적화하여 합금이 고전류 및 고온 환경에서 우수한 성능을 발휘하도록 합니다. 진공 환경의 보호는 산화 불순물의 유입을 줄이고 재료의 순도를 유지하며 장기간 사용을 위한 안정적인 기반을 제공합니다. 또한, 공정 제어가 용이하여 복잡한 형상이나 대형 부품 생산이 가능하여 다양한 가공 요구를 충족하고 유연성을 입증합니다.

그러나 이 공정에는 몇 가지 한계가 있습니다. 장비의 복잡성과 운영 비용이 높고, 진공로 및 관련 보조 장비의 유지 보수 요건이 엄격하여 생산량이 증가하고 비용에 민감한 환경에서의 적용이 제한됩니다. 공정 주기가 길고 다단계 작업이 포함됩니다. 텅스텐 골격 준비부터 구리 침투까지 많은 시간이 소요되어 대량 생산 효율에 영향을 미칠 수 있습니다. 특히 텅스텐 골격의 기공률이 일치하지 않거나 진공도가 부족한 경우 특정 조건에서 구리 휘발 또는 불균일 침투 위험이 존재하여 제품 품질의 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 또한, 이 공정은 원료 순도 및 전처리에 크게 의존합니다. 원료 결함이나 불균일성은 최종 제품에 영향을 미쳐 추가적인 품질 관리 및 공정 조정이 필요할 수 있습니다.

이러한 장점과 한계는 진공 침투법으로 제조된 텅스텐 구리 합금의 적용 시나리오를 형성합니다. 이러한 장점들은 고전압 회로 차단기 접점과 같이 고성능이 요구되는 분야에서 유리하게 작용합니다. 이 합금의 높은 밀도와 전도성은 안정적인 스위칭 성능을 보장합니다. 저항 용접 전극에서는 균일한 상 분포와 고온 저항으로 장기간 사용이 가능합니다. 항공우주 분야에서는 방열판이나 전기 접점과 같은 복잡한 형상의 텅스텐 구리 부품에도 이 공정이 활용됩니다. 하지만 이러한 한계점으로 인해 비용 절감이나 효율 향상을 위해 분말 야금과 같은 다른 방법으로 보완해야 할 필요가 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

| Product Name         | Chemical Composition (%) |                    |         | Physical and Mechanical Properties |               |                     |                        |
|----------------------|--------------------------|--------------------|---------|------------------------------------|---------------|---------------------|------------------------|
|                      | Cu                       | Total Impurities ≤ | W       | Density (g/cm³)                    | Hardness (HB) | Resistivity (MΩ·cm) | Tensile Strength (MPa) |
| Tungsten Copper (50) | 50±2.0                   | 0.5                | Balance | 11.85                              | 115           | 3.2                 | —                      |
| Tungsten Copper (60) | 40±2.0                   | 0.5                | Balance | 12.75                              | 140           | 3.7                 | —                      |
| Tungsten Copper (70) | 30±2.0                   | 0.5                | Balance | 13.8                               | 175           | 4.1                 | 790                    |
| Tungsten Copper (80) | 20±2.0                   | 0.5                | Balance | 15.15                              | 220           | 5                   | 980                    |
| Tungsten Copper (90) | 10±2.0                   | 0.5                | Balance | 16.75                              | 260           | 6.5                 | 1160                   |

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.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 5 장 텅스텐 구리 합금의 성능 시험 및 특성화 방법

텅스텐 구리 합금은 전기 전도도, 열 전도도, 기계적 강도 및 내구성을 평가하는 중요한 수단으로, 전기, 전자 및 산업 분야에서의 적용 효과를 직접적으로 결정합니다. 본 시험 방법은 물리적 특성, 기계적 특성 및 전기적 특성을 측정하는 것을 포함하며, 표준화된 작업과 고급 특성 분석 기법을 통해 합금의 미세 조직과 거시적 특성 간의 관계를 규명합니다.

### 5.1 텅스텐 구리 합금의 물리적 특성 시험

텅스텐 -구리 합금은 미세 구조 및 제조 공정과 밀접한 관련이 있는 밀도, 전기 전도도, 열 전도도와 같은 기본적인 물리적 특성을 평가하는 데 중점을 둡니다. 밀도 시험은 합금의 치밀성을 반영하며, 이는 전기 전도도 및 기계적 강도에 직접적인 영향을 미칩니다. 전기 전도도 시험은 전기 접점에 적합한 전자 전달 능력을 평가합니다. 열 전도도 시험은 방열 응용 분야의 핵심인 열 분산 효율을 측정합니다. 물리적 특성 시험은 샘플의 무결성을 보장하는 동시에 신뢰할 수 있는 데이터 지원을 제공하기 위해 비파괴 또는 최소 파괴 방법으로 수행됩니다. 시험 결과는 공정 최적화 및 성능 개선의 기반을 제공합니다. 이 섹션에서는 밀도 시험 방법, 경도 시험 표준 및 운영에 중점을 둡니다.

#### 5.1.1 밀도 시험 방법

밀도 시험법은 텅스텐 구리 합금의 단위 부피 질량을 측정하는 데 사용되는데, 이는 미세 구조의 치밀성과 기공 함량을 반영하며 제조 품질을 평가하는 중요한 지표입니다. 시험 원리는 아르키메데스의 원리에 기반합니다. 공기와 액체에서 샘플의 무게 차이를 측정하여 실제 밀도를 계산합니다. 작업 프로세스에는 먼저 규칙적인 모양이나 눈에 띄는 결함이 없는 샘플을 준비한 다음 표면 불순물을 제거하기 위해 세척 및 건조가 필요합니다. 다음으로 샘플을 정밀 저울에 매달고 공기 중에서의 무게를 기록한 다음 액체에서의 부력을 측정하기 위해 알려진 밀도의 액체(예: 증류수)에 담급니다. 무게 차이를 액체의 밀도와 합산하여 샘플의 부피를 얻고 마지막으로 질량을 부피로 나누어 밀도를 계산합니다. 이 시험 방법은 정확성을 보장하기 위해 엄격한 실험 조건을 요구합니다. 액체 온도는 열 팽창이 밀도 값에 미치는 영향을 피하기 위해 일정하게 유지되어야 하며, 저울의 정확도는 작은 무게 변화도 감지하고 측정 오류를 줄일 수 있을 만큼 충분해야 합니다. 시료 표면에 기포가 부착되어서는 안 되며, 이는 진공 탈기 또는 표면 처리를 통해 달성할 수 있습니다. 시험 중 여러 번 측정하여 평균값을 구하여 우발적인 오류를 제거합니다. 밀도 시험은 제조 공정의 기공률과 균일성을 감지하는 데 적합합니다. 밀도가 낮을수록 기공률이 높음을 나타낼 수 있으며, 밀도가 높을수록 치밀성이 우수함을 나타냅니다.

#### 5.1.2 경도 시험 기준 및 작업

경도 시험 표준 및 조작은 텅스텐 구리 합금의 표면 압입 또는 마모 저항성을 평가하는 데 사용되며, 이는 기계적 특성과 내구성을 반영합니다. 시험 원리는 표준화된 압입자를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사용하여 시료 표면에 특정 하중을 가하고, 압입 깊이 또는 면적을 측정하여 재료의 변형 저항성을 간접적으로 나타내는 것입니다. 일반적인 시험 표준에는 브리넬 정도, 로크웰 정도, 비커스 정도가 있으며, 이는 다양한 정도 범위와 시료 특성에 적합합니다. 브리넬 정도는 강철 볼 압입자를 통해 큰 하중을 가하며, 연질 또는 균일한 재료에 적합합니다. 로크웰 정도는 다이아몬드 콘 또는 강철 볼을 사용하여 얇은 시료나 표면 경도를 빠르게 측정합니다. 비커스 정도는 다이아몬드 사각뿔 압입자를 사용하며, 작은 영역이나 복잡한 구조에 적합합니다.

작업 과정은 먼저 평평한 샘플 표면을 준비하고 연삭이나 연마를 통해 거칠기를 제거한 다음 압입자가 표면에 완전히 접촉하도록 해야 합니다. 적절한 시험 표준과 압입자 유형을 선택하고 샘플 크기와 예상 정도 범위에 따라 하중과 압입 시간을 결정합니다. 하중을 가한 후 압입자를 제거하고 직경이나 대각선 길이와 같은 압입의 기하학적 특성을 측정하고 정확한 판독을 위해 현미경이나 특수 기기를 사용합니다. 표면 불균일성의 영향을 제거하기 위해 여러 지점에서 시험을 반복 하고 평균값을 계산하여 대표적인 결과를 얻어야 합니다. 작업 중에는 측정 정확도를 방해하는 외부 요인을 피하기 위해 주변 온도와 습도에 주의해야 합니다. 정도 시험은 성능 평가에 매우 중요합니다. 높은 정도는 일반적으로 미세한 입자와 치밀한 구조와 관련이 있으며 이는 합금의 내마모성을 반영하며 전극이나 절삭 공구 응용 분야에 적합합니다. 시험 결과는 또한 제조 공정상의 결함(예: 기공이나 비습윤 영역)을 감지하는 데 사용될 수 있으며, 이는 국소적인 정도 감소로 이어질 수 있습니다. 표준화된 공정은 시험 결과의 비교 가능성을 보장하고 재료 선정 및 공정 개선을 위한 과학적 근거를 제공합니다.

### 5.1.3 전도도 시험 방법

전도도 시험법은 텅스텐 구리 합금의 전류 전달 능력을 평가하는 데 사용됩니다. 이 시험법은 미세 구조에서 구리 상의 연결성과 전도 경로의 효율성을 반영하며, 합금의 전기적 특성을 측정하는 핵심 지표입니다. 시험 원리는 옴의 법칙에 기반합니다. 특정 전압에서 시료의 전류를 측정하여 전도도를 계산합니다. 시험 과정은 먼저 규칙적인 모양의 시료를 준비하고, 접촉 저항의 영향을 줄이기 위해 표면을 연마해야 합니다. 측정에는 4 탐침법 또는 2 탐침법을 사용합니다. 4 탐침법은 시료 표면에 4 개의 전극을 배치하고 각각 전류를 인가하고 전압을 측정하여 접촉 저항의 간섭을 제거합니다. 2 탐침법은 양쪽 끝에서 전압과 전류를 직접 측정하므로 긴 시료에 적합합니다. 시험 장비에는 측정 정확도를 보장하기 위해 정밀 전원 공급 장치, 전류계, 전압계가 포함되어 있습니다.

시험 과정은 전도도에 영향을 미치는 환경 요인을 피하기 위해 일정한 온도와 습도 환경에서 수행되어야 합니다. 시료는 전극과 단단히 접촉해야 하며, 클램핑이나 전도성 페이스트를 사용하여 양호한 연결을 확보할 수 있습니다. 안정적인 전류를 인가한 후, 전압과 전류 값을 기록하고 저항률을 계산하여 시료의 형상에 따라 전도도로 변환합니다. 결과의 대표성을 확보하고 국부적인 불균일성을 배제하기 위해 여러 지점의 평균값을 여러 번 측정합니다. 전도도 시험은 구리 상의 분포에 대한 제조 공정의 영향을 감지하는 데 적합합니다. 높은 전도도는 일반적으로 구리 상의 연속적인 네트워크와 관련이

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있으며, 이는 양호한 미세 구조를 나타냅니다.

#### 5.1.4 열전도도 시험 방법

열전도도 시험 방법은 텅스텐 구리 합금의 열 전달 능력을 평가하는 데 사용됩니다. 이는 열 전도에 대한 미세 구조의 상 분포 및 계면 품질의 영향을 반영하며 방열 성능을 측정하는 중요한 지표입니다. 시험 원리는 푸리에의 법칙에 기반합니다. 열전도도는 샘플의 열 전달률을 측정하여 계산합니다. 작업 프로세스는 먼저 규칙적인 모양의 샘플을 준비합니다. 표면은 양호한 열 접촉을 보장하기 위해 평평해야 합니다. 일반적으로 사용되는 방법에는 정상 상태 방법과 과도 방법이 있습니다. 정상 상태 방법은 샘플의 양쪽 끝에 일정한 열 플럭스를 적용하여 온도 구배를 측정합니다. 과도 방법은 샘플 표면을 잠시 가열하고 시간에 따른 온도 변화를 기록하고 열 확산율을 추론합니다.

시험 과정은 열원과 열전대 또는 적외선 센서를 사용하여 온도 분포를 측정하는 제어된 온도 환경에서 수행되어야 합니다. 정상 상태 방법은 시료 양 끝단의 안정적인 온도와 균일한 열 흐름이 필요하며, 측면 열 발산을 줄이기 위한 단열재가 필요합니다. 과도 법칙은 온도 변화를 포착하기 위해 레이저 플래시 미터와 같은 고속 응답 장비를 필요로 합니다. 시료의 기하학적 치수와 접촉 표면은 명확한 열 전달 경로를 보장하기 위해 시험 장비와 일치해야 합니다. 실험 오차를 제거하기 위해 여러 시험의 평균값을 구합니다. 열전도도 시험은 구리 배선의 연결성에 대한 제조 공정의 영향을 평가하는 데 적합합니다. 높은 열전도도는 일반적으로 균일한 상 분포와 낮은 기공률과 관련이 있으며, 이는 방열 기관 응용 분야에 적합합니다. 시험 결과는 열 관리 성능 최적화를 위한 과학적 근거를 제공하며, 향후 열화상 기술을 결합하여 측정 정확도를 향상시킬 수 있습니다.

#### 5.2 텅스텐 구리 합금의 화학적 특성 평가

텅스텐 구리 합금은 다양한 환경에서의 내식성과 화학적 안정성을 연구하는 것을 목표로 하며, 미세 구조가 환경 적응성에 미치는 영향을 반영하여 장기적인 신뢰성 확보에 핵심적인 역할을 합니다. 평가 방법에는 침지 시험, 부식 속도 측정, 표면 분석이 있으며, 이는 합금의 화학 반응 및 열화 거동을 관찰하기 위해 사용 환경을 시뮬레이션합니다. 작업 공정은 먼저 샘플을 준비하고, 표면을 세척하여 불순물을 제거한 후, 사용 조건을 시뮬레이션하기 위해 산, 염 또는 습한 환경에 노출됩니다. 침지 시험은 샘플을 장시간 노출시켜 표면 변화를 관찰합니다. 부식 속도 측정은 무게 감소 또는 두께 감소를 통해 반응 속도를 계산합니다. 주사 전자 현미경이나 X 선 광전자 분광법과 같은 표면 분석은 부식 생성물의 구성 및 분포를 감지하는 데 사용됩니다.

평가 과정은 외부 간섭을 피하기 위해 온도, 습도, 매질 농도와 같은 환경 변수를 제어해야 합니다. 정기적으로 샘플을 채취하여 세척 및 건조하고, 무게나 표면을 관찰하고 변화 추세를 기록하십시오. 여러 번의 시험 결과를 평균하여 우발적인 요인을 제거하십시오. 화학적 성능 평가는 구리의 부식 민감도를 측정하는 데 적합합니다. 다공성과 결합은 매질 침투를 가속화하고 안정성을 저하시킬 수 있습니다. 평가 결과는 해양 장비 및 화학 처리 부품에 널리 사용되는 표면 처리 최적화 및 내식성 코팅 선정의

#### 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)



기초를 제공합니다.

### 5.2.1 내식성 시험 환경 및 방법

내식성 시험 환경 및 방법은 다양한 매질에서 텅스텐 구리 합금의 내식성을 평가하는 데 사용되며, 이는 합금의 미세 구조와 조성이 화학 환경에 적응하는 능력을 반영하며, 장기적인 안정성을 보장하는 데 핵심적인 역할을 합니다. 시험 환경은 가능한 부식 시나리오를 재현하기 위해 습도, 산성 또는 염분 환경과 같은 실제 사용 조건을 시뮬레이션해야 합니다. 작업 공정은 먼저 평평한 시료를 준비하고, 표면을 세척하여 불순물을 제거하며, 시험 결과가 오염의 영향을 받지 않도록 합니다. 일반적으로 사용되는 시험 환경으로는 염수 분무 챔버, 산성 용액 침지 탱크 또는 습열 챔버가 있습니다. 염수 분무 챔버는 해양 또는 산업 환경을 시뮬레이션하고, 황산이나 염산과 같은 산성 용액은 화학 공정 조건을 시뮬레이션하며, 습열 챔버는 높은 습도와 온도의 복합적인 영향을 시뮬레이션합니다. 시료를 이러한 환경에 놓고 일정 시간 동안 노출시킨 후 표면 변화를 정기적으로 관찰합니다.

시험 방법에는 중량 감소법과 전기화학적 방법이 있습니다. 중량 감소법은 침지 전후의 시료 중량 변화로 부식 속도를 계산하며, 정확한 계량과 시간 기록이 필요합니다. 전기화학적 방법은 전위차계를 통해 부식 전위와 전류 밀도를 측정하여 부식 과정의 동적 거동을 평가합니다. 온도, 매질 농도, 노출 시간과 같은 환경 변수는 외부 요인의 간섭을 피하기 위해 시험 중 제어되어야 합니다. 우발적인 오류를 제거하기 위해 여러 시험의 평균값을 구하고, 현미경으로 부식 형태를 관찰합니다. 내식성 시험은 구리의 상대 부식 민감도를 측정하는 데 적합합니다. 기공과 결함은 매질 침투를 가속화하고 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 시험 결과는 표면 보호를 최적화하고 내식성 적용 분야를 선택하는 데 필요한 기반을 제공합니다. 향후 시험의 실질적인 중요성을 높이기 위해 다중 요인 결합 환경이 개발될 수 있습니다.

### 5.2.2 항산화 성능 시험 방법

내산화성 시험법은 고온 또는 산소 함유 환경에서 텅스텐 구리 합금의 내산화성을 평가하는 데 사용되며, 미세 구조의 산화 저항성을 반영하며 고신뢰성 응용 분야에 중요한 지표입니다. 시험 원리는 시료를 산화 분위기에 노출시켜 표면 산화층의 형성과 재료 열화 정도를 관찰하는 것입니다. 작업 과정은 먼저 시료를 준비하고, 표면을 연마하여 산화물을 제거한 후, 초기 상태가 일정하게 유지되는지 확인하는 것입니다. 일반적인 방법으로는 고온 산화 시험과 반복 산화 시험이 있습니다. 고온 산화 시험은 시료를 고온로에 넣고 공기 또는 산소를 통과시키면서 연속 가열하여 산화 거동을 관찰합니다. 반복 산화 시험은 열 사이클 조건을 시뮬레이션하여 가열과 냉각을 번갈아 수행하며, 내산화성 안정성을 평가합니다. 시험 장비는 정밀한 온도 제어 및 가스 공급 기능을 갖추어야 합니다.

시험 중에는 가열 시간, 온도, 산화막 두께를 기록하고, 정기적으로 시료를 채취하여 세척 및 무게를 측정하고, 질량 증가량 또는 표면 변화를 계산해야 합니다. 현미경이나 X 선

#### 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)

회절 분석을 통해 산화 생성물의 구성 및 분포를 확인할 수 있습니다. 시험 환경은 다른 기체의 간섭을 피하기 위해 안정적인 산소 농도를 유지해야 합니다. 실험 오차를 줄이기 위해 여러 번의 시험 결과를 평균화해야 합니다. 산화방지제 성능 시험은 고온에서 구리 상의 산화 경향을 검출하는 데 적합합니다. 텅스텐 상의 안정성은 보호 역할을 하며, 기공은 산화를 악화시킬 수 있습니다. 시험 결과는 고온 공정 최적화 및 산화방지제 코팅 선정에 대한 지침을 제공합니다. 향후 실시간 모니터링 기술을 결합하여 시험 정확도와 적용 가치를 향상시킬 수 있습니다.

### 5.3 텅스텐 구리 합금 미세조직 특성화 기술

특성 분석 기술에는 광학 현미경, 주사 전자 현미경, 투과 전자 현미경이 있습니다. 광학 현미경은 거시적인 표면 특성을 관찰하는 데 사용되고, 주사 전자 현미경은 고해상도 형태 및 조성 분석을 제공하며, 투과 전자 현미경은 결정립계와 상 계면을 심층적으로 연구합니다. 작업 과정은 먼저 시료를 준비하여 절단, 연삭, 연마합니다. 일부 기술은 대비 향상을 위해 박층화 또는 에칭을 필요로 합니다.

시험 과정은 기술에 따라 적절한 조건의 선택이 필요합니다. 광학 현미경 관찰은 적절한 염색을, 주사 전자 현미경 관찰은 진공 환경과 전자빔 조정을, 투과 전자 현미경 관찰은 고정밀 시료 전처리를 요구합니다. 분석 결과는 이미지 처리 소프트웨어를 통해 결정립 크기와 기공 분포를 정량화하고, 에너지 스펙트럼 분석과 결합하여 상 조성을 결정합니다. 특성 분석 기술은 전처리 공정이 미세 구조에 미치는 영향을 파악하는 데 적합하며, 결정립 미세화 및 상 분포 균일성은 성능을 향상시킵니다. 이 결과는 공정 최적화 및 결합 제어를 위한 과학적 근거를 제공하며, 향후 3 차원 이미징 기술과 결합하여 미세 구조를 완벽하게 특성화할 수 있습니다.

#### 5.3.1 금속현미경 관찰 방법

금속현미경 관찰법은 텅스텐-구리 합금의 결정립 형태, 상 분포, 기공률과 같은 미세 조직적 특성을 관찰하고 미세 구조에 대한 준비 과정의 영향을 밝히는 데 사용됩니다. 시험 원리는 미세한 세부 사항을 확대하고 관찰하기 위해 샘플 표면을 통한 가시광선의 반사 또는 투과에 기초합니다. 작업 과정은 먼저 샘플 준비가 필요하며, 여기에는 평평한 표면을 얻기 위한 절단, 연삭 및 연마가 포함되고, 이어서 텅스텐과 구리 상 간의 대비를 향상시키고 결정립 경계와 상 경계를 더 잘 보이게 하기 위한 화학적 에칭 또는 전해 연마가 포함됩니다. 샘플은 스테이지에 고정되고 현미경의 초점과 광원은 다양한 배율에서 미세 구조를 관찰하도록 조정됩니다. 시험 중에는 특정 특징의 가시성을 높이기 위해 명시야 또는 암시야와 같은 적절한 조명 모드를 선택해야 합니다. 작업자는 접안렌즈 또는 디지털 이미징 시스템을 통해 이미지를 기록하여 결정립 크기, 상 분포 균일성 및 결합을 분석합니다. 대표성을 확보하고 국소적 불균질성의 영향을 배제하기 위해 여러 영역을 여러 번 관찰합니다. 금속현미경 관찰은 전처리 공정의 영향을 예비적으로 평가하는 데 적합합니다. 일반적으로 결정립 미세화 또는 상 분포 최적화는 성능 향상과 관련이 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.3.2 주사전자현미경 분석 응용

주사전자현미경 분석은 텅스텐 구리 합금의 미세구조와 조성 분포를 고해상도로 특성화하는 데 사용되며, 이를 통해 결정립 형태, 상 계면 및 결합의 미묘한 특징을 밝혀냅니다. 시험 원리는 전자빔이 시료 표면에 충돌하여 2차 전자와 후방 산란 전자를 생성하고, 이를 통해 형태 및 조성 정보를 얻는 것입니다. 작업 과정은 먼저 시료를 준비한 후, 시료를 절단, 연삭, 연마하고, 금 분무 또는 탄소 코팅과 같은 전도성 처리를 통해 대전 효과를 방지합니다. 시료를 진공 챔버에 넣고 가속 전압 및 작동 거리와 같은 전자빔 매개변수를 조정하여 시료 표면을 스캔합니다. 시험 중 2차 전자 이미지는 표면 형태학적 세부 정보를 제공하고, 후방 산란 전자 이미지는 서로 다른 상의 대비를 강조하며, 에너지 분산 스펙트럼(EDS) 분석은 원소 분포를 결정합니다. 작업자는 배율과 검출기 모드를 조정하여 결정립계, 기공 및 상 분포를 관찰할 수 있습니다. 다양한 영역을 여러 번 스캔하여 포괄성을 확보하고, 소프트웨어를 결합하여 데이터를 처리합니다. 주사전자현미경 분석은 기공 감소나 계면 개선과 같은 전처리 과정에서 발생하는 미세한 변화를 감지하는 데 적합하며, 관련 결과는 성능 최적화를 위한 지침이 됩니다.

### 5.3.3 X선 회절 구조 분석

X선 회절 구조 분석은 텅스텐-구리 합금의 결정 구조, 상 조성 및 격자 매개변수를 결정하고 미세 구조와 성능 간의 관계를 탐구하는 데 사용됩니다. 시험 원리는 재료 내부의 원자 배열을 반영하는 특징적인 스펙트럼 선을 생성하기 위해 시료 결정면에서 X선을 브래그 회절하는 것에 기반합니다. 작동 과정: 분말 또는 평판 시료를 준비하고, 적절한 입자 크기로 분쇄하거나 표면을 연마하여 질감 효과를 방지합니다. 시료를 X선 회절계에 넣고 X선 광원과 검출기 각도를 조정한 후, 특정 범위의 2 $\theta$  각도를 스캔합니다.

시험 중 회절 피크의 위치와 강도를 기록하고, 텅스텐과 구리의 결정상 특성을 분석하며, 잠재적인 불순물이나 산화물을 검출합니다. 작업자는 소프트웨어를 사용하여 피크 모양을 맞추고 결정립 크기와 변형률을 결정할 수 있습니다. 여러 번 측정한 결과는 평균화되어 기기 오류를 제거합니다. X선 회절 분석은 소결 공정이 결정상에 미치는 영향을 평가하는 데 적합합니다. 피크의 날카로움은 결정립 크기를 반영하고, 피크 오프셋은 응력 상태를 나타냅니다. 이 결과는 미세 구조 최적화 및 성능 예측의 기반을 제공하며, 향후 싱크로트론 방사선 기술을 결합하여 정확도를 향상시킬 수 있습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 제 6 장 텅스텐 구리 합금의 다양한 응용 분야

텅스텐 구리 합금은 고유한 물리적 및 화학적 특성으로 전기, 항공, 전자, 산업 제조 등 다양한 산업 분야에 활용됩니다. 뛰어난 전기 전도성, 열 전도성, 고온 저항성, 아크 침식 저항성 덕분에 고성능 부품에 이상적인 선택입니다. 저전압 전원 스위치, 고전압 회로 차단기, 방열판, EDM 전극 등 응용 분야가 지속적으로 확대되고 있습니다. 텅스텐 구리 합금은 다양한 제조 공정과 구조 설계를 통해 다양한 성능 요건을 충족합니다.

### 6.1 전기장에서의 텅스텐 구리 합금의 응용

텅스텐 구리 합금은 전기 분야, 특히 높은 전도성과 아크 부식 저항성이 요구되는 분야에서 널리 사용됩니다. 전기 분야에는 저전압 전력 스위치, 고전압 회로 차단기, 전기 접점 등이 포함됩니다. 텅스텐 구리 합금은 텅스텐의 높은 용점과 구리의 높은 전도성 덕분에 대전류, 고전압 및 빈번한 스위칭 요구 사항을 충족합니다. 합금의 미세 구조는 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 최적화되며, 상 분포와 밀도는 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 저전압 전력 스위치에서 텅스텐 구리 합금은 장비의 신뢰성과 내구성을 크게 향상시키는 핵심 부품입니다.

#### 6.1.1 저전압 전원 스위치에서의 응용

텅스텐 구리 합금은 전기 분야, 특히 접점 부품에서 텅스텐 구리 합금의 중요한 구현체입니다. 저전압 전력 스위치는 회로의 온/오프를 제어하는 데 사용됩니다. 빈번한 스위칭 동작과 아크 발생은 재료에 대한 엄격한 요건을 요구합니다. 텅스텐 구리 합금은 높은 아크 내식성과 전도성을 통해 이러한 요건을 충족하며, 가전제품, 산업용 제어 및 배전 시스템에 널리 사용됩니다. 가동 접점 및 정전 접점, 전극 부품 등 다양한 응용 분야가 있으며, 공정 최적화를 통해 성능 안정성을 보장합니다. 이 섹션에서는 핵심 부품의 성능 요건, 응용 분야, 그리고 수명 향상 효과에 대해 자세히 설명합니다.

##### 6.1.1.1 저전압 전력 스위치 핵심 부품의 재료에 대한 성능 요구 사항

저전압 전력 스위치의 핵심 부품인 접점 및 전극에 대한 재료 성능 요건은 장비의 안전성과 신뢰성을 보장하기 위해 여러 측면을 포괄합니다. 첫째, 재료는 전류를 효율적으로 전달하고 에너지 손실과 발열을 줄이기 위해 우수한 전기 전도성을 가져야 합니다. 우수한 열 전도성은 또 다른 핵심 요건으로, 아크 또는 고전류로 인해 발생하는 열을 신속하게 분산시켜 국부 과열을 방지할 수 있어야 합니다. 둘째, 재료는 스위칭 중 아크로 인한 표면 삭마를 방지하여 장기 사용 시 안정성을 확보하기 위해 아크 침식에 대한 높은 내성을 가져야 합니다. 또한, 고온 내성도 매우 중요하며, 핵심 부품은 고전류 차단 시 변형이나 용융 없이 극한의 온도를 견뎌야 합니다. 기계적 강도와 내마모성 또한 빈번한 기계적 스위칭 동작을 지원하고 마모 또는 파손을 방지하는 데 필수적입니다. 내부식성은 습한 환경이나 산업 환경에서 성능을 유지하는 데 도움이 됩니다. 마지막으로, 재료는 취성 파괴를 방지하기 위해 충분한 인성을 유지하면서 접촉 압력을 견딜 수 있는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



적절한 정도를 가져야 합니다. 이러한 요구 사항은 저전압 전원 스위치 구성 요소의 재료 선택을 결정하며, 텅스텐 구리 합금은 포괄적인 성능으로 인해 첫 번째 선택입니다.

#### 6.1.1.2 접촉부품에 텅스텐 구리 합금의 적용

저전압 전원 스위치 접점 어셈블리에 사용되는 텅스텐 구리 합금은 설계 요건 및 사용 조건에 따라 다양합니다. 일반적인 형태 중 하나는 텅스텐 구리 합금을 접점 재료로 사용하는 것입니다. 이 합금은 스위치의 가동 접점과 정지 접점에 직접 사용되며, 높은 전도성과 아크 내식성으로 잦은 개폐 동작을 견뎌냅니다. 이 합금은 일반적으로 텅스텐 함량 비율(예: WCu 70/30 또는 WCu 80/20)이 더 높은 상태로 제조됩니다. 텅스텐은 고온 내성과 내마모성을 제공하며, 구리는 전도 경로의 연속성을 보장합니다. 또 다른 형태는 텅스텐 구리 합금을 접점 표면층으로 사용하고 구리 또는 강철과 같은 다른 기판과 결합한 후 용접이나 압입으로 통합하여 비용과 성능의 균형을 최적화하는 복합 구조입니다.

응용 분야에서 텅스텐 구리 합금은 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 원형 또는 직사각형 접점과 같은 특정 모양으로 제작되어 다양한 스위치 설계에 맞게 조정할 수 있습니다. 연마 또는 코팅과 같은 표면 처리는 내식성과 아크 내성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 수요가 높은 일부 시나리오에서는 텅스텐 구리 합금을 내구성 향상을 위해 내부에 고텅스텐 함량층, 전도성 향상을 위해 외부에 고구리 함량층을 갖는 다층 구조로 가공합니다. 접점 어셈블리의 설치 형태는 일반적으로 스위치 본체와의 안정적인 접촉을 보장하기 위해 볼트로 고정되거나 매립됩니다. 이러한 응용 분야는 텅스텐 구리 합금의 특성을 최대한 활용하여 저전압 전력 스위치의 다양한 요구를 충족합니다.

#### 6.1.1.3 저전압 전력 스위치의 수명에 대한 적용의 영향

텅스텐 구리 합금은 뛰어난 성능으로 장비의 수명을 크게 향상시킵니다. 첫째, 이 합금은 아크 부식에 대한 높은 내성을 가지고 있어 접점 표면의 삭마 및 재료 손실을 줄여 스위치의 온-오프 주기를 연장합니다. 고온 내성은 고전류에서 분리 시 접점의 안정성을 보장하여 과열로 인한 기계적 고장이나 성능 저하를 줄여줍니다. 둘째, 우수한 전기 전도성과 열 전도성은 저항 열 효과를 줄이고 접점의 노화 속도를 늦추며 장기 작동 신뢰성을 향상시킵니다. 기계적 강도와 내마모성은 빈번한 스위칭 동작을 지원하여 접점 마모 또는 파손 위험을 줄여 수명을 더욱 연장합니다. 또한, 텅스텐-구리 합금의 균일한 상 분포와 낮은 기공률은 접점의 전반적인 구조적 무결성을 향상시키고 미세 결함으로 인한 조기 고장을 줄입니다. 또한, 내식성은 특히 습하거나 산업 환경에서 표면 산화 또는 침식이 수명에 미치는 부정적인 영향을 줄여 보호 역할을 합니다. 적용 후 저전압 전력 스위치의 유지보수 주기가 연장되고, 고장률이 감소하며, 전반적인 작동 효율이 향상됩니다. 실제로, 특히 산업용 제어 시스템이나 가전제품과 같이 고주파 사용 환경에서 접점 부품의 교체 주기가 크게 연장됩니다. 텅스텐-구리 합금을 적용하면 장비의 수명 연장과 경제적 이점을 얻을 수 있습니다. 향후 합금 비율 최적화 및 표면 처리를 통해 수명 연장 효과를 더욱 향상시킬 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.1.2 고전압 스위치에서의 응용

고전압 스위치 응용 분야는 전기 분야에서 텅스텐 구리 합금의 중요한 활용 사례이며, 특히 고전압 및 강한 아크를 처리해야 하는 환경에서 핵심적인 역할을 합니다. 고전압 스위치는 고전압 회로 차단기, 단로기, 접지 스위치와 같은 장비를 포함하는 전력 시스템의 회로 제어 및 보호에 사용됩니다. 이러한 장치는 고전압 전류를 스위칭할 때 강한 아크를 발생시키므로 재료 성능에 대한 요구 사항이 매우 높습니다. 텅스텐 구리 합금은 뛰어난 전도성, 고온 저항성, 그리고 아크 침식 저항성으로 인해 고전압 스위치의 핵심 부품에 이상적인 소재로 자리 잡았습니다. 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 미세 구조를 최적화하여 극한의 작동 조건에서도 안정적인 성능을 보장합니다. 텅스텐 구리 합금은 주로 접점, 이동 및 고정 전극, 그리고 아크 소호 장치에 사용되어 스위치의 신뢰성과 수명을 크게 향상시킵니다. 이 섹션에서는 고전압 스위치의 작업 환경과 핵심 부품의 재료 허용 기준, 고전압 스위치의 요구에 적응하는 텅스텐-구리 합금의 성능, 그리고 다양한 전압 레벨의 고전압 스위치에서 텅스텐-구리 합금의 적용 차이점에 대해 자세히 설명합니다.

#### 6.1.2.1 고전압 스위치 작업 환경 및 핵심 부품의 재료 허용 기준

고전압 스위치의 작동 환경은 고온, 고압, 강한 아크, 기계적 응력이 복합적으로 작용하는 매우 가혹한 환경입니다. 이는 핵심 부품의 재료 허용 기준에 많은 요건을 요구합니다. 첫째, 작동 환경의 고온은 주로 아크에 의해 발생합니다. 전류가 차단될 때 순간적으로 방출되는 에너지는 국부적인 온도를 급격히 상승시킬 수 있습니다. 재료는 뛰어난 고온 내성을 가져야 하며, 수천 도의 고온에서도 녹거나 변형되지 않아야 합니다. 접점 및 전극과 같은 핵심 부품은 구조적 무결성을 유지하면서 이러한 극한의 열 부하를 견뎌야 합니다. 둘째, 고전압 환경은 고전압을 동반합니다. 아크의 연속성과 강도는 표면 삭마나 재료 손실을 방지하고 서비스 수명을 연장하기 위해 재료가 아크 침식에 매우 높은 내성을 가져야 함을 의미합니다.

또한, 잦은 기계적 스위칭 동작은 충격과 진동을 유발합니다. 재료는 장기적인 작동 안정성을 보장하기 위해 마모 및 파손 위험을 견딜 수 있는 충분한 기계적 강도와 내마모성을 가져야 합니다. 내식성은 특히 고전압 스위치가 습기, 염분 분무 또는 화학 물질에 노출될 수 있는 실외 또는 산업 환경에서 중요한 허용 오차 기준입니다. 재료는 산화 및 부식에 강하고 전기적 성능을 유지해야 합니다. 전기 전도성과 열 전도성도 마찬가지로 중요합니다. 효율적인 전류 전달 및 방열은 저항 가열의 영향을 줄이고, 국부 과열 위험을 줄이며, 주변 부품을 보호할 수 있습니다.

재료의 경도는 과도한 취성으로 인한 균열 없이 접촉 압력을 견딜 수 있을 정도로 적당해야 합니다. 동시에 인성은 충격 에너지를 흡수할 수 있을 만큼 충분해야 합니다. 이러한 요구 사항에 따라 IEC 62271 및 ANSI/IEEE C37.04 와 같은 국제 및 산업 표준은 아크 저항 시험, 열 안정성 시험 및 기계적 내구성 평가를 포함하는 고전압 스위치 재료에 대한 성능 기준을 수립했습니다. 고전압 스위치의 복잡한 환경에서 탁월한 성능을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

보장하기 위해서는 이러한 엄격한 기준에 따라 재료가 검증되어야 합니다. 텅스텐 구리 합금은 포괄적인 성능으로 이러한 요구 사항을 충족하며, 선호되는 재료가 되었습니다.

#### 6.1.2.2 고전압 스위치 요구 사항을 충족하는 텅스텐 구리 합금의 성능

우선, 텅스텐의 높은 용점과 경도는 이 합금이 고온 및 아크 부식에 대한 우수한 내성을 갖도록 합니다. 고전압 스위치가 고전압 전류를 차단하면, 아크에서 발생하는 극심한 열이 텅스텐 상에 의해 효과적으로 흡수 및 분산되어 접점의 용융이나 심각한 용해를 방지합니다. 구리의 높은 전도성은 효율적인 전류 전달을 보장하고, 저항 열 효과를 줄이며, 아크 소호 장치에 안정적인 전도 경로를 제공합니다. 합금의 미세 구조는 분말 야금 또는 진공 합침 공정을 통해 최적화됩니다.

텅스텐 구리 합금은 고전압 스위치에 특히 중요합니다. 효율적인 방열 능력은 아크 열을 주변으로 빠르게 전달하고, 접점의 국부 온도를 낮추며, 사용 수명을 연장합니다. 기계적 강도와 내마모성은 빈번한 스위칭 동작을 지원합니다. 합금의 인성은 구리 상의 연성에 의해 향상되어 충격이나 진동으로 인한 균열 위험을 줄입니다. 내식성 측면에서 텅스텐의 화학적 안정성은 합금을 습기나 산업 오염으로부터 보호하며, 구리 상의 표면 처리는 내식성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 고전압 스위치의 실제 적용에서 텅스텐 구리 합금은 우수한 전기적 접촉 안정성을 나타내며, 접촉 저항과 발열을 줄이고 장비의 전반적인 신뢰성을 향상시킵니다. WCu 70/30 또는 WCu 80/20 과 같은 다양한 비율의 경우, 합금은 특정 요구에 따라 성능을 조정할 수 있습니다. WCu 80/20 은 고아크 상황에 더 적합한 반면, WCu 70/30 은 더 높은 전도성이 요구되는 상황에서 더 우수합니다. 이러한 성능 특성 덕분에 텅스텐 구리 합금은 고전압 스위치의 핵심 부품으로 이상적인 선택입니다.

#### 6.1.2.3 다양한 전압 레벨의 고전압 스위치에서 텅스텐-구리 합금의 적용 차이점

다양한 전압 레벨의 고전압 스위치에서 텅스텐-구리 합금은 주로 전압, 전류 및 아크 강도에 대한 다양한 요구 사항에 반영되며, 이는 합금 비율, 제조 공정 및 부품 설계에 영향을 미칩니다. 고전압 스위치의 전압 레벨은 일반적으로 중전압(1kV~35kV), 고전압(35kV~230kV), 초고전압(230kV 이상)으로 구분됩니다. 각 레벨은 텅스텐 구리 합금에 대한 적용 형태와 성능 요구 사항이 상당히 다릅니다. 중전압 스위치에서 아크 강도는 비교적 낮으며, 텅스텐 구리 합금은 일반적으로 전도성 과 내마모성을 최적화하는 데 중점을 두고 WCu 70/30 비율의 분말 야금 공정으로 제조됩니다. 접점 부품은 대부분 단순한 기하학적 모양으로 비용 효율성과 장기 안정성을 강조합니다. 합금의 아크 침식 저항성은 중전압 환경에서 스위칭 작동을 처리하기에 충분합니다.

고전압 스위치(예: 110kV~230kV)는 더 강한 아크와 열 부하에 노출됩니다. 텅스텐-구리 합금은 고온 저항성과 아크 침식 저항성을 향상시키기 위해 WCu 80/20 이상의 텅스텐 함량 비율을 사용하는 경향이 있습니다. 더 높은 밀도와 균일성을 보장하기 위해 제조 공정을 진공 침투와 결합할 수 있습니다. 접점 설계는 종종 다층 구조 또는 복합 형태를 채택하며, 내부에는 아크 저항을 위한 고텅스텐층, 외부에는 전도성을 최적화하기 위한

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고구리층이 있습니다. 부품의 크기와 무게가 증가함에 따라 기계적 강도와 열 관리도 고려해야 합니다. 내구성 향상을 위해 표면 코팅이나 열처리가 종종 사용됩니다. 초고전압 스위치는 최고 수준의 재료 성능 요건을 가지고 있으며, 아크 에너지는 매우 큼니다. 텅스텐-구리 합금은 적층 제조 또는 플라즈마 용사 기술을 통해 복잡한 형상의 접점과 아크 소호 장치를 제조하기 위해 WCu 90/10 비율을 사용할 수 있습니다. 합금은 아크 침식 저항성과 열전도도가 매우 높아야 합니다.

이러한 차이는 텅스텐 구리 합금의 적용에 대한 전압 레벨의 영향을 반영합니다. 저전압 시나리오는 비용과 전도성에 중점을 두고, 중전압 및 고전압 시나리오는 아크 저항과 열 관리를 강조하며, 초고전압 시나리오는 극한의 성능과 복잡한 구조를 추구합니다. 전처리 공정과 후처리는 전압 레벨에 따라 조정되어야 합니다. 앞으로 지능형 설계와 다중 기술 조합을 활용하여 고전압 레벨의 요구에 대응하고 적용 범위를 더욱 확장할 수 있을 것입니다.

### 6.1.3 릴레이 및 공기 회로 차단기의 적용

텅스텐 구리 합금은 전기 분야에서 텅스텐 구리 합금의 중요한 구현체이며, 특히 고신뢰성 전기 제어 및 보호가 필요한 경우에 더욱 그렇습니다. 저전력 신호 제어 장치인 릴레이는 접점을 통해 회로의 온/오프를 구현하며, 빈번한 기계적 동작은 재료의 내구성을 요구합니다. 기중 회로 차단기는 과부하 또는 단락 손상으로부터 회로를 보호하는 데 사용됩니다. 기중 회로 차단기의 아크 소호 시스템은 고전류와 강한 아크를 견뎌야 하므로 고성능 재료가 필요합니다. 텅스텐 구리 합금은 뛰어난 전도성, 내마모성, 내아크성으로 인해 릴레이 접점 및 기중 회로 차단기 아크 소호 챔버의 핵심 소재로 자리 잡았습니다.

#### 6.1.3.1 릴레이 재료 내마모성 요구 사항 및 텅스텐 구리 합금의 적합성

릴레이의 내마모성 요건은 재료의 잦은 기계적 스위칭 동작과 접점 압력으로 인해 발생하며, 이는 접점의 수명과 신뢰성에 직접적인 영향을 미칩니다. 릴레이가 저전력 신호를 스위칭할 때 접점은 반복적인 물리적 접촉과 분리를 견뎌야 하므로 내마모성은 핵심 요건입니다. 장기간 작동 시 표면 마모, 재료 이동 또는 접착이 발생할 수 있으며, 이는 접촉 저항 증가 또는 고장으로 이어질 수 있습니다. 또한, 재료는 압입에 견딜 수 있는 충분한 경도를 가져야 하며, 과도한 경화로 인한 취성 파괴를 방지하는 적절한 인성을 유지해야 합니다. 전기 전도성은 신호 전송을 지원하는 저저항 경로를 보장하는 또 다른 핵심 요건입니다. 고온 저항과 아크 침식 저항성은 간헐적인 고전류 또는 아크 조건을 처리하는 데 도움이 됩니다. 또한, 내식성은 습하거나 산업 환경에서 산화 또는 오염으로 인한 성능 저하를 방지하기 위해 특히 중요합니다.

텅스텐 구리 합금은 매우 높은 적응성을 보이며 릴레이의 내마모성 요건을 충족합니다. 텅스텐 상은 높은 경도와 내마모성을 제공하여 잦은 접촉으로 인한 표면 마모를 방지하고 접촉 수명을 연장합니다. 구리 상은 우수한 전도성을 제공하여 신호 전송의 안정성을 보장하고 저항의 열적 영향을 줄입니다. 합금의 미세 구조는 분말 야금 공정을 통해

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



최적화되었으며, 결정립 미세화는 내마모성을 향상시키고, 낮은 기공률은 마모 중 재료의 박리를 감소시킵니다. 진공 용침 공정은 밀도를 더욱 향상시키고 텅스텐과 구리 의 계면 접합을 개선하며 기계적 응력 집중점을 줄입니다. 아크 침식 저항성은 간헐적인 고에너지 스위칭을 지원하며, 텅스텐의 화학적 안정성은 내식성을 보장합니다. 실제 응용 분야에서 릴레이 접점에 텅스텐 구리 합금(예: WCu 70/30)을 사용하면 마모율을 크게 줄이고 장비의 수명을 연장할 수 있으며, 특히 고주파 작동이나 혹독한 환경에서 유용합니다. 앞으로는 표면을 경화시키거나 미량 원소를 첨가하면 내마모성이 더욱 향상될 수 있습니다.

#### 6.1.3.2 릴레이용 텅스텐 구리 합금의 설치 위치 및 기능 구현

릴레이의 텅스텐 구리 합금은 주로 접점 어셈블리에 집중되어 있으며, 특정 위치 및 기능 구현은 설계 요구 사항과 밀접한 관련이 있습니다. 접점은 릴레이의 핵심 구성 요소로, 회로의 켜짐과 꺼짐을 구현하는 역할을 합니다. 텅스텐 구리 합금은 일반적으로 기계식 구동 장치와 릴레이 베이스 사이에 설치되는 가동 접점 또는 정지 접점으로 제작됩니다. 가동 접점은 전자기 코일이나 기계식 레버로 구동되어 정지 접점과 접촉하거나 분리되어 신호 제어를 완료합니다. 설치 방식은 주로 용접 또는 프레스 방식으로 구리 또는 강철 기판에 텅스텐 구리 합금 접점을 고정하여 전기적 연결과 기계적 안정성을 보장합니다. 설치 위치는 접점 압력과 아크 분포를 고려하여 선택해야 합니다. 접점 표면은 일반적으로 접촉 면적을 최적화하고 저항을 줄이기 위해 연마됩니다.

기능 구현 측면에서, 텅스텐 구리 합금 접점은 높은 전도성을 활용하여 저전력 신호의 안정적인 전송을 보장하며, 구리 상은 연속적인 전도성 경로를 제공합니다. 텅스텐 상의 높은 경도와 내마모성은 빈번한 기계적 스위칭을 지원하고, 마모 또는 접착을 방지하며, 장기적인 접점 안정성을 유지합니다. 아크 침식 저항성은 고전압 또는 과부하 조건에서 중요한 역할을 하며, 접점의 아크 손상을 줄이고 릴레이 내부 구조를 보호합니다. 설치 위치에는 보조 전극이나 아크 절연 부품도 포함될 수 있습니다. 텅스텐 구리 합금은 고온 저항성을 통해 아크 소호 또는 열 발산에 도움을 줍니다. 일부 고수요 릴레이에서는 텅스텐 구리 합금이 다층 구조로 설계되는데, 내구성 향상을 위한 내부 고텅스텐층과 전도성 최적화를 위한 외부 고구리층이 있습니다. 기능 구현의 효율성은 용접 품질 및 표면 처리와 같은 설치 정확도 및 공정 최적화 관리에 달려 있습니다. 향후 자동 조립 기술을 통해 설치 일관성을 개선할 수 있습니다.

#### 6.1.3.3 공기 회로 차단기 아크 소호 시스템에 대한 재료 성능 요구 사항

RC 소호 시스템은 고전류 차단 시 발생하는 극한의 작동 조건에서 작동하며, 여러 측면에서 엄격한 요건을 충족해야 합니다. 첫째, 아크 소호 시스템은 아크 침식에 대한 뛰어난 내성을 가져야 합니다. 고전류 차단 시 발생하는 강력한 아크는 재료 표면을 손상시킬 수 있으며, 재료는 여러 차례의 아크 충격을 견뎌내야 하기 때문입니다. 고온 내성이 핵심입니다. 아크 온도는 수천 도에 달할 수 있습니다. 재료는 고온에서 용융이나 변형을 방지하기 위해 구조적 무결성을 유지해야 합니다. 둘째, 전기 전도성과 열 전도성이 중요합니다. 효율적인 전류 전달 및 방열은 저항성 열 효과를 줄이고, 국부

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

과열을 줄이며, 주변 부품을 보호할 수 있습니다. 기계적 강도와 내마모성은 아크 소호 그리드 또는 접점의 빈번한 움직임을 지원하고 기계적 응력과 마모에 강합니다.

내식성은 습기나 화학 물질로 인한 재료 부식을 방지하고 장기적인 성능을 유지하기 위해 실외 또는 산업 환경에서 특히 중요합니다. 재료의 경도는 과도한 취성으로 인한 균열 없이 아크와 기계적 압력을 견딜 수 있도록 적당해야 합니다. 인성은 충격 에너지를 흡수해야 합니다. 아크 소호 시스템 설계 시 재료는 아크를 신속하게 소호하고 공기 매체의 아크 송풍 효과와 협력하여 아크를 신속하게 차단할 수 있어야 합니다. IEC 60947 및 ANSI/IEEE C37.13 과 같은 국제 표준은 아크 저항 시험 및 열 안정성 시험을 포함하여 아크 소호 재료에 대한 성능 기준을 확립했습니다. 공기 회로 차단기의 복잡한 환경에서 우수한 성능을 보장하려면 이러한 표준에 따라 재료를 검증해야 합니다. 텅스텐 구리 합금은 포괄적인 성능으로 이러한 요구 사항을 충족하며 아크 소호 시스템의 주요 선택이 되었습니다.

#### 6.1.3.4 공기 차단기 아크 소호실에서의 텅스텐 구리 합금의 적용 원리

텅스텐 구리 합금은 고전류 차단 시, 특히 아크 제어 및 열 관리에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 응용 분야에서 텅스텐 구리 합금은 주로 아크 소호 그리드, 접점 및 단로기 부품에 사용됩니다. 아크 침식에 대한 높은 저항성과 고온 저항성을 갖추고 있어 극한의 차단 조건을 견딜 수 있습니다. 원리는 공기 회로 차단기가 고전류를 차단할 때 접점 간극에서 아크가 발생하고 텅스텐 상의 높은 용점과 경도가 아크 에너지를 효과적으로 흡수하여 표면 삭마 또는 재료 손실을 방지한다는 것입니다. 구리 상의 높은 전기 전도도와 열 전도도는 전류를 빠르게 전달하고 열을 분산시켜 국부 온도를 낮추고 공기 송풍과 협력하여 아크 소호를 가속화합니다.

미세 구조 최적화는 적용 원리의 핵심입니다. 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 텅스텐과 구리의 균일한 분포를 달성하여 기공률을 줄이고 밀도를 높여 아크 에너지의 균일한 분포를 보장합니다. 아크 소호실의 텅스텐-구리 합금 부품은 분할 구조로 설계되었습니다. 아크는 그리드 사이에서 분리되어 냉각 표면적을 증가시키고 아크 소호 효율을 향상시킵니다. 합금의 기계적 강도는 빈번한 개폐 동작을 지원하는 동시에, 높은 인성은 기계적 응력을 흡수하고 균열 확산을 방지합니다. 내식성은 부품을 환경적 영향으로부터 보호하고 서비스 수명을 연장합니다. 적용 원리에는 공기 매질과의 시너지 효과도 포함됩니다. 텅스텐-구리 합금 표면은 아크 작용 시 보호 산화층을 형성하여 아크 차단을 돕습니다. 산업용 배전 또는 전력 시스템과 같은 고전류 환경에서 텅스텐-구리 합금의 성능은 아크 소호실의 안정적인 작동을 보장합니다. 미래에는 기능적 경사 설계를 통해 열 관리 및 아크 소호 효과를 최적화할 수 있습니다.

#### 6.1.4 절연 스위치 및 접지 스위치에서의 응용

텅스텐 구리 합금은 전기 분야, 특히 전력 시스템의 절연 및 접지 작업에서 텅스텐 구리 합금의 중요한 구현 예입니다. 단로기는 무부하 상태에서 회로를 절연하여 우발적인 전원 켜짐을 방지하는 데 사용되는 반면, 접지 스위치는 유지보수 또는 고장 시 안전한 접지를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제공하고 단락 전류의 영향을 견뎌야 합니다. 텅스텐 구리 합금은 뛰어난 전도성, 고온 내성, 그리고 기계적 강도로 인해 이러한 스위치의 핵심 소재로 자리 잡았습니다. 텅스텐 구리 합금의 미세 구조는 분말 야금 또는 진공 함침 공정을 통해 최적화되어 장기간 노출 및 극한 전류 조건에서도 안정적인 성능을 보장합니다. 이 섹션에서는 장기 노출 하에서 단로기의 재료 내후성 요구 사항, 단로기의 전도성 접점 부분에서 텅스텐 구리 합금의 적용 설계, 단락 회로 전류에 노출될 때 접지 스위치의 재료 강도 및 전도성 요구 사항, 접지 스위치의 안전한 작동을 보장하는 텅스텐 구리 합금의 메커니즘, 단로기 및 접지 스위치에서 텅스텐 구리 합금의 선택 기준에 대해 자세히 설명합니다.

#### 6.1.4.1 장기 환경에 노출된 단로기 재료에 대한 내후성 요구 사항

단로기의 장기 노출 환경에서 재료의 내후성 요건은 일반적으로 옥외 또는 산업 환경에 설치되며 다양한 자연적 및 인적 요인의 영향을 견뎌야 한다는 사실에서 비롯됩니다. 첫째, 내후성에는 내식성이 포함되어야 합니다. 단로기는 비, 염분 분무 또는 산업 배기가스에 노출되는 경우가 많습니다. 재료는 산화, 녹 또는 화학적 침식에 강하고 전기 전도성과 기계적 무결성을 유지해야 합니다. 둘째, 자외선 노화 방지는 중요한 요건입니다. 장기간의 햇빛 노출은 재료의 표면 열화를 유발할 수 있으므로 성능 저하를 방지하기 위해 광분해 방지 특성을 가져야 합니다. 또한, 고온 및 저온 내성도 중요합니다. 주변 온도 변화는 열 응력을 유발할 수 있습니다. 재료는 여름철 고온이나 겨울철 혹독한 추위와 같은 극한의 기상 조건에서도 안정성을 유지해야 합니다. 내습성 또한 고려해야 합니다. 습한 환경은 표면 절연층의 손상이나 전기 부식을 유발하여 안전한 작동에 영향을 미칠 수 있습니다.

기계적 내구성 또한 핵심 요건입니다. 단로기의 잦은 작동이나 풍하중은 진동과 마모를 유발할 수 있습니다. 재료는 균열이나 변형을 방지하기 위해 충분한 경도와 피로 저항성을 가져야 합니다. 절연 작동의 신뢰성을 보장하기 위해 장기간 노출 시에도 전기 전도도와 열 전도도가 유지되어야 합니다. IEC 62271-102 와 같은 국제 표준은 단로기 재료에 대한 내후성 시험 요건을 정하고 있으며, 여기에는 염수 분무 시험, 자외선 노출 시험, 온도 사이클 시험 등이 포함됩니다. 재료는 이러한 시험을 통과하여 실외 환경에서의 장기적인 안정성을 입증해야 합니다.

#### 6.1.4.2 단로기 도전접점부의 텅스텐 구리 합금 적용 설계

단로기 전도성 접점부의 텅스텐 구리 합금은 무부하 절연 동작 시 성능에 중점을 둡니다. 전도성 접점부는 가동 접점, 정지 접점, 그리고 접속 단자로 구성됩니다. 텅스텐 구리 합금은 일반적으로 WCu 70/30 또는 WCu 80/20 비율로 제조되며, 분말 야금 으로 고밀도 구조를 형성합니다. 설계 시, 합금은 원통형 또는 판형 접점과 같은 특정 형상으로 가공되며, 표면은 접촉 면적을 최적화하고 저항과 열을 줄이기 위해 연마됩니다. 설치 형태는 대부분 단로기 본체와의 안정적인 전기적 연결을 보장하기 위해 볼트로 고정되거나 용접됩니다. 일부 설계에는 일정한 접촉 압력을 유지하기 위해 스프링 하중 메커니즘이 포함되기도 합니다. 애플리케이션 설계는 미세 구조의 최적화도 고려합니다. 텅스텐 상은 높은 경도와 내마모성을 제공하여 장기적인 기계적 접촉을 지원하고, 구리

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

상은 효율적인 전류 전달을 보장합니다. 합금의 아크 침식 저항성은 간헐적인 고전압 작동에서 표면 삭마를 방지하는 역할을 합니다. 텅스텐-구리 합금을 접촉층으로 사용하고 구리 또는 알루미늄 기판과 결합하는 복합 구조를 설계에 적용하여 비용을 절감하고 전반적인 전도성을 향상시킬 수 있습니다. 은 도금이나 코팅과 같은 표면 처리는 내식성과 전도성을 향상시키고 실외 환경에 적응할 수 있도록 합니다. 설계는 또한 열팽창 매칭을 고려해야 합니다.

#### 6.1.4.3 단락 전류에 노출될 때 접지 스위치의 재료 강도 및 전도도 요구 사항

단락 전류에 노출될 때 접지 스위치의 재료 강도 및 전도도 요건은 고장 조건에서 중요한 보호 역할에 기인합니다. 단락 전류는 수천 암페어에 달할 수 있으며, 순간적으로 방출되는 에너지는 재료에 매우 높은 부담을 줍니다. 첫째, 재료는 단락 전류로 인한 전자기력과 충격력을 견뎌내고 점점의 변형이나 파손을 방지할 수 있는 우수한 기계적 강도를 가져야 합니다. 또한, 접지 동작의 기계적 작용을 안정적으로 유지하여 안정적인 점점을 확보해야 합니다. 전도도는 핵심 요건이며, 효율적인 전류 전달은 단락 에너지를 지면으로 신속하게 전달하여 장비 손상 및 인명 위험을 줄일 수 있습니다. 또한 재료는 단락 열을 신속하게 분산시키고 국부 과열로 인한 용융이나 고장을 방지하기 위해 높은 열전도도를 가져야 합니다.

고온 내성은 매우 중요합니다. 단락 전류는 고온 아크를 유발할 수 있으며, 재료는 극한의 열 조건에서도 구조적 무결성을 유지해야 합니다. 아크 침식 저항성은 다중 단락 작동을 지원하고 사용 수명에 영향을 미치는 표면 침식을 줄여줍니다. 특히 실외 접지 스위치에서 내식성은 습기나 염분 분무가 전도도에 영향을 미치지 않도록 하는 데 매우 중요합니다. 경도와 인성은 균형을 이루어야 하며, 경도는 접촉 압력에 대한 저항성을, 인성은 충격 에너지를 흡수해야 합니다. IEC 62271-102 및 IEEE C37.41 과 같은 국제 표준은 단락 내성 시험 및 열 안정성 평가를 포함하여 접지 스위치 재료에 대한 강도 및 전도도 시험 요건을 규정하고 있습니다. 텅스텐 구리 합금은 높은 강도와 전도도를 갖추고 있어 이러한 요건을 충족하며, 향후 합금 비율 최적화를 통해 성능을 개선할 수 있습니다.

#### 6.1.4.4 접지 스위치의 안전한 작동을 보장하기 위한 텅스텐 구리 합금의 메커니즘

텅스텐 구리 합금은 단락 조건에서의 종합적인 성능에 기반합니다. 이러한 메커니즘은 높은 전도성에서 가장 먼저 나타납니다. 구리 상은 연속적인 전류 경로를 제공하고, 단락 에너지를 대지로 빠르게 전달하며, 시스템 전압을 낮추고 장비를 보호합니다. 텅스텐 상의 높은 용점과 아크 침식 저항성은 단락 아크 작용 시 에너지를 흡수하여 점점의 용융이나 심각한 용해를 방지하고 접지 점점의 신뢰성을 보장합니다. 합금의 미세 구조는 진공 침투 또는 분말 야금 공정을 통해 최적화되었습니다. 밀도는 기공률을 줄이고, 내충격성과 열 안정성을 향상시키며, 단락 전류의 순간적인 부하를 견뎌냅니다.

기계적 강도 및 인성 메커니즘은 접지 작업의 기계적 작용을 지원합니다. 텅스텐 상은 전자기력에 저항하는 경도를 제공하고, 구리 상은 연성을 향상시키고 충격 에너지를 흡수하며 균열 확산을 방지합니다. 열전도 메커니즘은 단락 회로 열을 빠르게 분산시키고,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



국부적인 온도를 낮추며, 주변 부품을 보호합니다. 내식성 메커니즘은 텅스텐의 화학적 안정성을 통해 환경 부식을 방지하며, 구리 상의 표면 처리는 내후성을 더욱 향상시킵니다. 응용 분야에서 텅스텐-구리 합금은 다층 구조로 설계된 접점 또는 커넥터로 제작되는 경우가 많습니다. 고텅스텐 층은 아크를 방지하고, 고구리 층은 전도성을 최적화합니다. 접지 스위치의 아크 블로잉 또는 분할 구조와 결합하면 아크가 더 빨리 소멸됩니다. 미래에는 지능형 모니터링을 사용하여 합금 성능을 실시간으로 평가하고 안전을 향상시킬 수 있습니다.

#### 6.1.4.5 단로기 및 접지 스위치용 텅스텐 구리 합금의 선택 기준

텅스텐 구리 합금은 적용 조건과 환경 조건에 대한 포괄적인 평가를 기반으로 합니다. 첫째, 전도성이 핵심 기준입니다. 합금은 효율적인 전류 전달을 보장해야 합니다. 구리 함량은 일반적으로 20%에서 40% 사이입니다. WCu 70/30 또는 WCu 80/20 이 일반적인 선택입니다. 고온 저항성과 아크 내식성도 또 다른 기준입니다. 고전압 및 단락 회로의 경우 WCu 90/10 과 같이 더 높은 텅스텐 함량이 요구되며, 제조 공정에서 밀도를 최적화해야 합니다. 기계적 강도와 내마모성을 위해서는 기계적 작동 및 장기 사용을 지원하기 위해 합금의 입자 크기가 미세하고 기공률이 낮아야 합니다.

내식성과 내후성은 선택 시 중요한 고려 사항입니다. 실외 환경에서는 표면 처리 또는 코팅 강화 합금을 선택해야 합니다. 열응력을 줄이기 위해 열팽창계수는 기판과 일치해야 합니다. 비용과 가공성 또한 선택에 영향을 미칩니다. 복잡한 부품의 경우 분말 야금 기술이 우선시될 수 있으며, 비용에 민감한 경우에는 복합재 구조물을 사용할 수 있습니다. IEC 62271-102 와 같은 국제 표준 및 산업 규격은 성능 기준을 제공하며, 내후성, 단락 회로 내성 및 전도도 시험을 통해 선택 여부를 검증해야 합니다.

### 6.2 전자 분야에서의 텅스텐 구리 합금의 응용

텅스텐 구리 합금은 전자 분야, 특히 고정밀 가공과 효율적인 열 관리가 필요한 분야에서 널리 사용됩니다. 전자 분야에는 전기 스파크 가공(EDM) 전극, 전자 패키징 방열판, 고주파 회로 커넥터 등이 포함됩니다. 텅스텐 구리 합금은 텅스텐의 높은 내마모성과 구리의 높은 전도성으로 정밀 제조 및 열 관리 요구를 충족합니다. EDM 에서 이 합금은 긴 서비스 수명을 유지하면서 공작물 재료를 효율적으로 제거하는 전극 재료로 사용됩니다. 전자 패키징에서 낮은 열팽창 계수와 열전도도는 고밀도 집적 회로의 방열을 지원합니다. 고주파 응용 분야에서 이 합금의 전도성은 신호 전송의 안정성을 보장합니다. 이 섹션에서는 EDM 전극의 성능 요구 사항과 텅스텐 구리 합금의 장점을 심층적으로 분석합니다.

#### 6.2.1 EDM 전극의 성능 요구 사항 및 텅스텐-구리 합금의 장점

EDM 전극의 성능 요건은 텅스텐 구리 합금의 장점과 밀접한 관련이 있습니다. 이 합금의 종합적인 성능은 고정밀 가공에서 중요한 위치를 차지합니다. EDM 은 전기 스파크 방전을 통해 가공물을 제거하므로 전극 재료의 전도성, 내마모성 및 고온 내성에 대한

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

엄격한 요구 사항이 적용됩니다. 텅스텐 구리 합금은 텅스텐의 높은 경도와 구리의 높은 전도성을 통해 이러한 요건을 완벽하게 충족합니다. WCu 70/30 및 WCu 80/20 비율은 일반적으로 선택되며, 각각 전도성과 내마모성 간의 균형을 이룹니다. 합금의 미세 구조는 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 최적화되어 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보장하고 가공 정밀도와 수명을 향상시킵니다. 이 섹션에서는 전극 재료에 대한 EDM 공정의 성능 지수 요구 사항, 다양한 가공 시나리오에서 전극 성능 차이에 대한 요구 사항, 전도성 및 내마모성 측면에서 텅스텐 구리 합금의 적응성 분석, 기존 전극 재료와의 성능 이점 비교, 그리고 일반적인 EDM 장비에서 텅스텐 구리 합금 전극의 선택 기준에 대해 자세히 설명합니다.

#### 6.2.1.1 EDM 공정용 전극 재료의 성능 지수 요구 사항

방전 가공(EDM) 공정에서 전극 소재의 성능 요건은 전기 스파크 방전을 통해 가공물을 제거하는 고유한 원리에서 비롯되며, 이는 여러 핵심 특성을 수반합니다. 무엇보다도, 소재는 효율적인 전류 전달, 안정적인 스파크 방전 생성, 가공 중 에너지 손실 및 불균일성 감소를 위해 우수한 전도성을 가져야 합니다. 전기 전도성은 방전 효율에 직접적인 영향을 미치며, 특히 전극이 낮은 저항 경로를 제공해야 하는 정밀 가공에서 더욱 중요합니다. 열전도도 또한 핵심 지표입니다. 우수한 방열 성능은 방전으로 발생하는 열을 전극 외부로 빠르게 전달하여 국소 과열로 인한 전극 변형이나 가공물 표면의 화상을 방지합니다. 내마모성 또한 핵심 요건입니다. 방전 가공 중 전극과 가공물 사이의 방전은 소재 손실을 유발합니다.

아크 내식성 또한 중요합니다. 잦은 방전은 전극 표면에서 용해 또는 재료 전이를 유발할 수 있습니다. 재료는 급격한 열화 없이 고에너지 아크를 견뎌야 합니다. 고온 내성도 필수적입니다. 방전 순간의 국부적인 고온은 수천 도에 달할 수 있습니다. 재료는 극한의 열 조건에서 용융이나 균열을 방지하기 위해 구조적 무결성을 유지해야 합니다. 기계적 강도와 가공성 또한 고려해야 합니다. 전극은 기계적 클램핑 및 가공 압력을 견뎌야 하는 동시에 깊은 구멍이나 미세 구조와 같은 복잡한 형상의 정밀 절단을 용이하게 해야 합니다. 내식성은 특히 화학적으로 활성인 특정 가공물을 가공할 때 중요합니다. 전극 표면 손상이나 가공물 표면 오염을 방지하기 위해 전극은 낮은 기공률과 균일한 미세 구조를 가져야 합니다. 이는 방전 균일성을 보장하고 가공 결함을 방지하기 위한 것입니다. ISO 14132 및 JIS B 6402 와 같은 국제 표준은 전도도 시험, 내마모성 시험, 열 안정성 평가를 포함하여 EDM 전극 소재에 대한 성능 기준을 확립했습니다. 텅스텐 구리 합금은 포괄적인 특성 덕분에 이러한 요건을 충족하며, EDM 에 선호되는 소재가 되었습니다.

#### 6.2.1.2 다양한 처리 시나리오에서의 다양한 전극 성능 요구 사항

다양한 가공 시나리오에서 전극 성능에 대한 요구 사항이 서로 다른 것은 가공물 소재, 가공 정확도 및 효율성에 대한 다양한 요구 사항을 반영하며, 텅스텐 구리 합금의 비율과 적용 형태 에 직접적인 영향을 미칩니다. 금형, 마이크로 기어 또는 정밀 전자 부품 가공과 같은 정밀 절삭 시나리오에서 전극은 매우 높은 가공 정확도와 표면 품질을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

가져야 하며, 방전 균일성을 보장하기 위해 낮은 기공률과 미세 입자 구조가 필요합니다. 미세 전류 제어를 지원하기 위해 전도성이 안정적이어야 하며, 전극 손실을 줄이고 서비스 수명을 연장하기 위해 내마모성이 우수해야 합니다. 일반적으로 사용되는 WCu 70/30 비율은 적당한 구리 상 비율을 가지고 있어 전도성을 보장하고 일정한 내마모성을 유지합니다. 대량의 재료를 제거하거나 거친 금형 캐비티를 여는 것과 같은 거친 가공 시나리오에서는 효율적인 방전과 빠른 재료 제거가 강조됩니다. 전도성과 고온 저항성이 더 중요하며 내마모성 요구 사항은 비교적 낮습니다. WCu 60/40 비율을 선택하여 전도성을 높이고 가공 속도를 높일 수 있습니다.

고융점 또는 고경도 재료(예: 텅스텐 강, 텅스텐 카바이드 또는 티타늄 합금)를 가공할 경우, 전극은 고온 및 아크 침식에 대한 높은 내성을 가져야 합니다. WCu 80/20 또는 텅스텐 함량이 높은 합금이 더 적합합니다. 고에너지 열을 분산시키고 가공물의 열영향부를 줄이기 위해 열전도도 또한 향상되어야 합니다. 깊은 구멍이나 복잡한 형상 가공 시, 전극은 우수한 기계적 강도와 가공성을 가져야 하며, 가느다란 구조나 복잡한 형상을 지지하고, 내마모성과 내부식성을 갖춰 다양한 용도로 사용할 수 있어야 합니다. WCu 70/30 비율은 표면 연마 공정과 함께 자주 사용됩니다. 비전도성 재료(예: 세라믹)를 가공할 때는 보조 전극 설계가 필요하며, 전도성 요구 사항은 보조 재료와 일치해야 합니다. 구리 함량이 높은 WCu 60/40 을 선택할 수 있습니다. 다양한 가공 시나리오는 처리 속도와 비용에도 영향을 미칩니다. 정밀 절삭은 고정밀 및 고내구성 소재를 사용하는 경향이 있으며, 거친 가공은 비용 최적화 및 효율성이 요구되는 경향이 있습니다. 앞으로 합금 비율과 공정 매개변수를 동적으로 조정하여 다양한 가공 요구에 대응하고 전극 성능을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

#### 6.2.1.3 텅스텐 구리 합금의 전도성 및 내마모성 측면에서의 적합성 분석

텅스텐 구리 합금의 전도성과 내마모성 측면에서의 호환성 분석은 EDM 전극으로서의 고유한 장점을 반영합니다. 전도성은 주로 구리 상에 의해 제공됩니다. 구리의 높은 전도성은 효율적인 전류 전달을 보장하고, 안정적인 전기 스파크 방전을 생성하며, 가공 중 에너지 손실과 불균일성을 줄입니다. 합금의 미세 구조는 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 최적화됩니다. 구리 상의 연속적인 네트워크는 저항을 줄이고 방전 균일성을 향상시킵니다. WCu 70/30 및 WCu 60/40 비율은 전도성에서 우수한 성능을 보이며 고효율 가공이 필요한 시나리오에 적합합니다. 열 전도성과 전기 전도성은 서로 보완합니다. 구리 상의 높은 열 전도성은 방전 열을 전극 외부로 빠르게 전달하고, 국부 온도를 낮추며, 특히 정밀 절단에서 변형이나 균열을 방지합니다.

내마모성은 주로 텅스텐 상에 기인하며, 높은 경도와 내마모 특성으로 스파크 방전으로 인한 재료 손실을 방지합니다. 미세 입자와 낮은 기공률 구조는 표면 안정성을 향상시키고 특히 고에너지 가공에서 전극 마모 및 침식을 감소시킵니다. 텅스텐 상의 고온 저항성은 고에너지 방전을 지원합니다. WCu 80/20 은 내마모성과 아크 침식 저항성이 우수하여 고경도 재료 가공에 적합합니다. 텅스텐과 구리의 계면 접합은 공정 최적화를 통해 이루어지며, 박리 위험을 줄이고 장기적인 내마모성을 유지합니다. 적합성 분석 결과, 텅스텐-구리 합금은 텅스텐-구리 비율을 조정하여 전도성과 내마모성 간의 균형을 이룰

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수 있음을 보여줍니다. WCu 70/30 은 두 가지 성능을 모두 고려한 일반적인 선택이며, WCu 80/20 은 높은 내마모성 요구 사항에 더 적합합니다.

#### 6.2.1.4 기존 전극 재료와 비교한 성능 이점

순수 구리, 순수 텅스텐, 흑연과 같은 기존 전극 재료와 비교했을 때, 텅스텐-구리 합금은 성능 상위 비교에서 상당한 우위를 보여줍니다. 첫째, 순수 구리에 비해 텅스텐-구리 합금은 고온 및 아크 침식에 대한 저항성이 더 강합니다. 순수 구리는 고에너지 방전에서 용융되거나 변형되기 쉬운 반면, 텅스텐-구리 합금의 텅스텐상은 열 안정성을 향상시키고 전극 수명을 연장합니다. 전도성 측면에서 순수 구리는 약간 더 우수하지만, 텅스텐-구리 합금은 구리 상 분포를 최적화하여 순수 구리 수준에 근접합니다. 또한 내마모성이 뛰어나고 손실을 줄여 특히 장기 가공에서 두드러집니다. 순수 텅스텐과 비교하여 텅스텐-구리 합금의 전기 전도성과 열 전도성은 크게 향상되었습니다. 순수 텅스텐의 낮은 전기 전도성은 방전 효율을 제한하는 반면, 텅스텐-구리 합금의 구리상은 이러한 단점을 보완하여 효율적인 가공에 적합합니다.

흑연 전극과 비교하여 텅스텐-구리 합금은 기계적 강도와 내마모성이 우수합니다. 흑연은 복잡한 형상 가공 시 파손되거나 마모되기 쉬운 반면, 텅스텐-구리 합금은 정밀 절삭 및 심공 가공을 지원하고 가공 정확도가 높습니다. 흑연은 높은 전도성을 가지고 있지만, 고온 및 아크 침식에 대한 내성은 텅스텐-구리 합금만큼 좋지 않습니다. 고경도 소재 가공 시 손실이 크고 표면 조도가 낮습니다. 텅스텐-구리 합금은 기공률이 낮고 미세 구조가 균일하여 가공 일관성을 보장하는 반면, 흑연은 기공률로 인해 방전이 불균일할 수 있습니다. 종합적으로 비교했을 때, 텅스텐-구리 합금은 내구성, 정밀성, 다양한 상황에 대한 적응성 면에서 우위를 점하고 있으며, 특히 고정밀, 긴 수명, 복잡한 가공이 요구되는 분야에서 순수 구리, 순수 텅스텐, 흑연과 같은 기존 소재는 따라올 수 없습니다.

#### 6.2.1.5 일반 EDM 장비의 텅스텐-구리 합금 전극 선택 기준

일반적인 EDM 장비에 사용되는 텅스텐-구리 합금 전극은 장비 특성 및 가공 요건에 대한 포괄적인 평가를 기반으로 하며, 이는 가공 품질과 효율성에 직접적인 영향을 미칩니다. 무엇보다도 전도성이 핵심 기준입니다. 합금은 장비의 방전 매개변수와 일치해야 합니다. WCu 60/40 과 WCu 80/20 의 비율은 전류 강도와 가공 정확도에 따라 선택됩니다. 안정적인 방전을 보장하기 위해 전도성은 전력 시스템과 호환되어야 합니다. 내마모성과 내아크 침식성이 핵심입니다. 고경도 재료 또는 고에너지 시나리오를 가공하려면 더 높은 텅스텐 함량이 필요합니다. WCu 80/20 또는 WCu 90/10 이 더 적합합니다. 준비 공정은 손실을 줄이기 위해 낮은 기공률을 보장해야 합니다. 고온 내성은 고에너지 방전을 지원하며, 선택 시에는 장비의 최대 방전 전력 및 펄스 매개변수를 고려해야 합니다.

기계적 강도와 가공성은 전극 형성에 영향을 미칩니다. 복잡한 형상이나 가느다란 구조는 절삭이 용이한 합금을 필요로 하며, 표면 거칠기는 가공 정밀도와 일치해야 합니다. WCu 70/30 비율은 이 두 가지 측면의 균형을 맞추기 위해 자주 사용됩니다. 화학적으로 활성인

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



가공물을 가공할 때는 내식성이 중요하며, 표면 도금 또는 코팅 강화를 포함하여 선택할 수 있습니다. 비용과 가용성 또한 고려해야 합니다. WCu 70/30 은 경제적인 선택이며 일반적인 가공에 적합합니다. 고성능 장비는 높은 내구성 요건을 충족하기 위해 높은 텅스텐 비율을 사용할 수 있습니다. 장비 제조업체는 기술 지침을 제공하며, 내마모성 시험, 전도도 검증 및 가공 시험을 통해 선택 여부를 확인해야 합니다. ISO 14132 와 같은 국제 표준은 성능 기준을 제공합니다.

## 6.2.2 마이크로 전자공학 분야의 역할

마이크로일렉트로닉스 분야는 재료 성능에 대한 매우 엄격한 요건을 가지고 있습니다. 전자 신호와 열의 효율적인 전달을 위해서는 우수한 전기 및 열 전도성과 칩과 같은 핵심 부품에 적합한 열팽창 계수가 요구됩니다. 또한 정밀 패키징 요건을 충족하기 위해서는 일정한 구조적 강도도 필요합니다. 텅스텐 구리 합금은 고유한 특성 조합을 통해 이 분야에서 중요한 역할을 수행하며, 핵심 소자와 외부 회로를 연결하고 방열 문제를 해결하는 핵심 소재로 자리 잡았습니다.

### 6.2.2.1 마이크로 전자소자용 재료의 정밀도 및 안정성에 대한 요구사항

마이크로전자 소자의 재료에 대한 정밀성과 안정성 요구는 높은 집적도와 초소형화에 기인하며, 이는 소자의 성능과 신뢰성에 직접적인 영향을 미칩니다. 정밀성을 위해서는 재료의 치수 정확도와 표면 평탄도가 매우 높아야 합니다. 칩이나 센서와 같은 마이크로전자 소자는 일반적으로 미크론 또는 나노미터 단위의 크기를 가집니다. 재료는 전기적 연결과 열 전도의 균일성을 보장하기 위해 정밀 가공을 통해 낮은 거칠기와 균일성을 달성해야 합니다. 전기 전도도는 핵심 지표입니다. 재료는 고속 신호 전송을 지원하고 신호 감쇠나 간섭을 방지하기 위해 낮은 저항 경로를 제공해야 합니다. 열 전도도 또한 중요합니다. 효율적인 방열은 칩의 작동 온도를 낮추고 과열로 인한 성능 저하 또는 고장을 방지할 수 있습니다.

안정성은 재료가 장기 작동 시 일관된 성능을 유지해야 하며, 그 핵심은 고온 내성입니다. 칩의 작동 온도는 150°C 이상에 달할 수 있으며, 재료는 고온에서 형태가 변형되거나 산화되지 않아야 합니다. 피로 저항성과 기계적 안정성은 잦은 열 사이클과 기계적 응력을 견뎌내 미세 균열이나 층간 박리를 방지합니다. 낮은 열팽창 계수는 실리콘 기반 재료(예: 칩 기판)의 열팽창 계수와 일치하여 열 응력으로 인한 휘어짐이나 파손을 줄이는 중요한 요건입니다. 내식성과 화학적 안정성은 재료 열화가 소자 수명에 영향을 미치지 않도록 습하거나 산성 환경에서 특히 중요합니다. JEDEC JESD22 및 IPC-6012 와 같은 국제 표준은 열 사이클 시험 및 신뢰성 평가를 포함한 마이크로 전자 재료의 성능 기준을 확립했습니다.

### 6.2.2.2 마이크로 전자 패키징에 텅스텐 구리 합금의 적용

텅스텐 구리 합금은 패키지 유형 및 열 관리 요구 사항에 따라 다양한 형태를 갖습니다. 일반적인 형태 중 하나는 텅스텐 구리 합금을 칩 패키징에 직접 사용되는 방열판

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기관으로 만드는 것입니다. WCu 85/15 또는 WCu 90/10 비율은 분말 야금 공정으로 제조되며 두께는 일반적으로 0.5mm 에서 2mm 사이이며 열 접촉을 최적화하기 위해 표면이 연마됩니다. 또 다른 형태는 텅스텐 구리 합금을 방열판 층으로 사용하고 세라믹(예: AlN ) 또는 금속(예: Cu-Mo) 기관과 결합한 후 확산 용접 또는 프레스 피팅으로 통합하여 열 팽창과 열 전도도의 균형을 맞추는 복합 구조입니다. 응용 분야에서 합금은 고밀도 패키징 요구 사항을 충족하기 위해 마이크로채널이 있는 방열판과 같은 복잡한 모양으로 가공될 수도 있습니다.

설치 형태는 칩 또는 패키지 셀과의 밀착성을 보장하기 위해 대부분 본딩이나 볼트 체결로 고정됩니다. 니켈 도금이나 금 도금과 같은 표면 처리는 내식성과 용접성을 향상시키고 다양한 패키징 공정에 적응할 수 있습니다. 일부 고성능 애플리케이션에서는 텅스텐 구리 합금이 기능성 경사 재료로 설계되며, 텅스텐 함량은 기관에서 표면으로 갈수록 감소하여 칩과의 열적 정합 및 전도성을 최적화합니다. 패키징에서 이 합금은 리드 프레임이나 인터넥트에도 사용되며, WCu 70/30 비율은 신호 전달 및 방열을 지원합니다. 이 애플리케이션 형태는 텅스텐 구리 합금의 낮은 열팽창 및 열전도도를 최대한 활용하여 마이크로전자 패키징의 높은 정밀도 및 신뢰성 요구 사항을 충족합니다. 향후 3D 프린팅 기술을 통해 더욱 복잡한 애플리케이션 형태를 개발할 수 있습니다.

#### 6.2.2.3 마이크로 전자소자의 방열 효율 및 수명 향상을 위한 메커니즘

텅스텐 구리 합금은 뛰어난 열 관리 및 구조적 안정성을 바탕으로 마이크로 전자 소자의 방열 효율과 수명을 향상시킵니다. 첫째, 이 합금의 높은 열전도도는 칩에서 발생하는 열을 방열 표면으로 빠르게 전달하여 작동 온도를 낮추고 열응력 축적으로 인한 성능 저하를 방지합니다. 낮은 열팽창 계수는 실리콘 기반 소재와 일치하여 열 사이클 중 휘어짐이나 균열을 줄이고 패키징 구조의 기계적 안정성을 향상시킵니다. 텅스텐 상의 높은 용점과 고온 저항성은 150°C 이상의 작동 환경에서 칩을 지지하고 재료 열화를 방지합니다.

미세 구조 최적화는 기공과 결함을 줄이고 열 전도 경로의 연속성을 향상시키며, WCu 85/15 비율은 탁월한 방열 효율을 제공합니다. 균일한 상 분포는 열 저항을 줄이고, 구리 상은 효율적인 열 확산을 제공하며, 텅스텐 상은 구조적 무결성을 유지합니다. 내식성과 내산화성은 합금을 습기나 화학 물질로부터 보호하여 수명을 연장합니다. 텅스텐 구리 합금의 방열 효율은 열 국부화를 줄이고 칩 노화를 늦추며, 특히 고성능 컴퓨팅 및 5G 기기에서 기존 소재의 수천 시간에서 10,000 시간 이상으로 수명을 연장합니다.

#### 6.2.2.4 칩 패키징 모듈의 장착 구조 설계

칩 패키징 모듈의 실장 구조 설계는 열 관리 및 전기적 연결을 최적화하기 위해 텅스텐 구리 합금의 성능을 최대한 활용해야 합니다. 텅스텐 구리 합금은 칩 아래에 배치되는 방열 기관으로 자주 사용되며, 효율적인 열 전도를 위해 열 인터페이스 재료(예: 서멀 그리스)를 통해 칩 바닥과 접촉합니다. 설치 형태는 대부분 볼트 또는 본딩 방식으로 이루어집니다. 기관의 두께는 칩 전력에 따라 선택되며, 일반적으로 0.5mm 에서 1.5mm

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사이입니다. 또한, 방열 면적을 늘리기 위해 마이크로채널 또는 핀 구조가 사용됩니다. WCu 90/10 비율은 고전력 칩을 지원하며, 표면 코팅은 용접성을 향상시킵니다.

전기 연결 설계는 리드 프레임 또는 인터커넥트에 텅스텐 구리 합금을 사용합니다. WCu 70/30 비율은 압입 또는 용접으로 통합되며, 칩 패드와 도킹되어 저저항 경로를 보장합니다. 구조 설계는 열팽창 매칭을 고려하며, 텅스텐 구리 합금과 세라믹 또는 실리콘 기판의 저열 응력 설계는 패키지 뒤틀림을 방지합니다. 설치 위치에는 보조 방열층이 포함되며, 공랭식 또는 수랭식 시스템과 결합하여 열 흐름 경로를 최적화합니다. 설계는 유한 요소 해석을 통해 열 응력과 기계적 안정성을 검증해야 하며, JEDEC JESD51 과 같은 국제 표준에서 열 관리 지침을 제공합니다.

#### 6.2.2.5 마이크로 전자 분야에서 텅스텐 구리 합금의 순도 및 미세 구조에 대한 요구 사항

마이크로전자 분야에서 텅스텐 구리 합금의 순도 및 미세 구조에 대한 요구는 높은 정밀도와 신뢰성의 필요성에서 비롯됩니다. 무엇보다도 순도 요구 조건이 매우 높아, 텅스텐과 구리의 불순물 함량은 전도도 감소 또는 열전도 방해를 방지하기 위해 0.1% 미만이어야 합니다. 미세 구조에 영향을 미치는 산화물 형성을 방지하기 위해 산소 함량을 낮게 제어해야 합니다. 순도는 미량 원소의 제어도 포함합니다. 예를 들어, 철이나 실리콘의 도핑은 결정립계 약화를 유발할 수 있으며, 이는 고순도 원료와 진공 공정을 통해 보장되어야 합니다. ASTM B702 와 같은 국제 표준은 고순도 텅스텐 구리 합금의 조성 요건을 명시하고 있습니다. 미세 구조는 균일한 상 분포를 요구합니다. 텅스텐과 구리의 입자 크기는 5~20 마이크로미터 범위여야 합니다. 미세 입자는 기계적 강도와 열전도도를 향상시킵니다. 열전도 연속성과 전기적 특성을 보장하기 위해 기공률은 1% 미만이어야 합니다. 계면 접합은 박리 위험을 줄이기 위해 견고해야 합니다. WCu 85/15 비율의 미세 구조 최적화는 수요가 높은 시나리오에서 자주 사용됩니다. 균열이나 비습윤 영역과 같은 미세 결함은 주사 전자 현미경으로 확인해야 합니다. 열간 등방성 성형(HIP)과 같은 제조 공정은 구조적 균일성을 향상시킬 수 있습니다. 향후 나노기술이나 위상 배열 공정을 통해 순도와 미세 품질을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

#### 6.2.3 센서 분야의 응용

환경 정보를 수집하는 핵심 장치인 센서는 고온의 산업 현장, 습한 실외 환경, 진동 및 충격이 발생하는 기계 시스템과 같은 복잡한 환경에서 작동하는 경우가 많습니다. 이러한 환경에서는 센서 소재의 안정성, 적응성 및 기능성에 대한 많은 요구 사항이 제기됩니다. 텅스텐-구리 합금은 고온 내성, 내진동성, 우수한 열전도도 및 구조적 안정성을 갖추고 있어 센서 분야에서 점차 그 활용 가치를 인정받고 있으며, 센서 신뢰성 향상을 위한 중요한 소재로 자리매김하고 있습니다.

##### 6.2.3.1 센서 작업 환경에 대한 재료 성능 요구 사항

센서 작동 환경에서 재료의 성능 요건은 다양한 적용 시나리오로 인해 달라지며, 이는 센서의 정확도와 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. 무엇보다도 고온 내성은 핵심

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

요건입니다. 고온 압력 센서나 열전대와 같은 많은 센서는 200°C 에서 1000°C 이상의 환경에서 작동해야 합니다. 재료는 열 변형이나 산화로 인한 성능 저하를 방지하기 위해 구조적 안정성과 전도성을 유지해야 합니다. 내부식성 또한 핵심 요건입니다. 센서는 화학 또는 해양 응용 분야와 같이 산성, 알칼리성 또는 습한 환경에 자주 노출됩니다. 표면 열화가 측정 정확도에 영향을 미치지 않도록 재료는 화학적 침식에 강해야 합니다. 기계적 강도와 내마모성은 진동이나 기계적 응력 하에서 센서의 장기간 사용을 지원하여 특히 산업 장비에서 부품의 마모나 파손을 방지합니다.

전기 전도도는 전기 신호 센서(저항식 또는 정전용량식 센서 등)에 매우 중요합니다. 신호 전송의 정확성과 안정성을 보장하기 위해 재료는 낮은 저항 경로를 제공해야 합니다. 열 전도도는 고온 또는 고전력 센서에서 중요합니다. 효율적인 방열은 작동 온도를 낮추고 민감한 부품을 보호합니다. 낮은 열팽창 계수는 기관과 일치하고, 열 사이클 동안 응력 집중을 줄이며, 구조적 무결성을 향상시킵니다. 고전압 센서에는 스파크 손상을 방지하기 위해 아크 침식 저항성이 필수적입니다. 가공성과 치수 정확도는 마이크로 센서(예: MEMS)의 미크론 수준 구조 요구 사항을 충족하기 위해 재료를 정밀하게 절단하기 쉽게 해야 합니다. IEC 60751 및 ASTM E1137 과 같은 국제 표준은 내열성 테스트 및 신뢰성 평가를 포함한 센서 재료의 성능 기준을 확립했습니다. 텅스텐 구리 합금은 이러한 요구 사항을 충족하는 포괄적인 성능으로 인해 센서 분야에서 선호되는 재료가 되었습니다.

#### 6.2.3.2 센서 감지 소자에서 텅스텐-구리 합금의 잠재적 응용 분야

텅스텐 -구리 합금은 센서 유형 및 기능적 요구 사항에 따라 다양합니다. 한 가지 잠재적인 형태는 텅스텐-구리 합금을 저항 온도 센서의 감응 소자로 만드는 것입니다. WCu 70/30 비율은 분말 야금으로 제조되고 박막 또는 필라멘트 구조로 가공되어 구리 상의 높은 전도성과 텅스텐 상의 안정성을 활용하여 온도 변화를 정확하게 측정합니다. 또 다른 형태는 압력 센서의 다이어프램 또는 접점에 사용하는 것입니다. WCu 85/15 비율은 진공 침투 공정으로 최적화되었으며, 두께는 0.1mm 에서 0.5mm 사이입니다. 표면 연마는 높은 접착성을 보장하여 고압 환경에서 변형 감지를 지원합니다.

변위 또는 가속도 센서에서 텅스텐 구리 합금은 전극이나 커넥터로 사용될 수 있습니다. WCu 60/40 비율은 프레스 또는 용접으로 결합되어 높은 전도성과 기계적 강도를 결합하여 동적 측정 요구를 충족합니다. 가스 센서용 발열체에도 잠재적으로 적용될 수 있습니다. 이 합금은 마이크로 가열판으로 가공됩니다. WCu 80/20 비율은 고온 안정성을 지원하고 표면 코팅은 내식성을 향상시킵니다. 설치 형태는 주로 센서 기관과 긴밀하게 통합되는 접합 또는 마이크로 용접을 채택합니다. 설계는 내구성 향상을 위한 내부 고텅스텐층과 전도성 최적화를 위한 외부 고구리층을 갖는 다층 구조를 채택할 수 있습니다.

#### 6.2.3.3 높은 열전도도를 기반으로 한 센서 방열 부품의 응용 설계

높은 열전도도에 기반한 센서 방열 부품의 응용 설계는 텅스텐 구리 합금의 열 관리 기능을 활용하여 고온 환경에서 센서의 성능과 수명을 향상시키는 것을 목표로 합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



이 설계에서는 텅스텐 구리 합금을 방열 기관으로 사용하여 센서 감지 소자 아래에 배치하는 경우가 많습니다. WCu 85/15 또는 WCu 90/10 비율은 분말 야금 공정으로 제작되며, 두께는 1mm 에서 3mm 사이이고 표면 평탄도는 5 $\mu$ m 이상으로 감지 소자와의 밀착성을 보장합니다. 또한, 이 설계에는 마이크로채널 또는 핀 구조가 포함되어 방열 면적을 넓히고, 열을 외부 라디에이터 또는 주변 공기로 빠르게 전달하며, 감지 소자의 온도를 낮춥니다.

장착 방식은 볼트 고정 또는 열전도 접합으로, 센서 하우징 또는 공랭 시스템과 통합되며, 열 인터페이스 재료(예: 열전도 패드)는 접촉 열 저항을 최적화합니다. 낮은 열팽창 계수(약 7ppm/°C)는 실리콘 또는 세라믹 기관과 일치하도록 설계되어 열 사이클링 중 응력을 줄이고 패키지의 균열을 방지합니다. 방열 부품은 능동 냉각 시스템(예: 마이크로 팬)과 결합될 수 있습니다. WCu 70/30 비율은 경량화에 유리하며, 표면 니켈 도금은 내식성을 향상시킵니다. 응용 분야에서 방열 효율은 민감한 부품의 작동 온도를 크게 낮추고 특히 고온 압력 센서 또는 적외선 센서의 수명을 연장합니다. 설계는 열 시뮬레이션을 통해 열 흐름 분포를 검증해야 하며, JEDEC JESD51 과 같은 국제 표준은 열 관리 지침을 제공합니다. 향후 기능적 경사 설계를 사용하여 방열 및 구조적 균형을 최적화할 수 있습니다.

### 6.3 항공우주 분야에서의 텅스텐 구리 합금의 응용

항공우주 분야는 재료의 내구성에 대한 요구 사항이 매우 엄격합니다. 극한의 고온, 고압, 고속 기류의 충격에 대처하는 동시에 구조적 안정성과 신뢰성 있는 기능을 보장해야 합니다. 텅스텐-구리 합금은 텅스텐의 높은 용융점과 강도, 구리의 높은 열전도도 및 열충격 저항성 덕분에 이 분야의 여러 핵심 부품의 핵심 소재로 자리 잡았습니다. 고체 로켓, 우주선 방열, 위성 부품 등에서 "고온 저항성과 열전도도의 균형", "강도와 내충격성의 조화"라는 텅스텐-구리 합금의 특성이 효과적으로 활용됩니다. 그중에서도 고체 로켓 노즐 스로트 라이너는 가장 대표적인 응용 분야 중 하나입니다.

#### 6.3.1 고체 로켓 노즐 스로트 라이닝의 적용

고체 로켓 노즐의 스로트 라이너는 로켓 엔진 노즐의 "스로트" 부분으로, 고온 가스를 고속으로 분출시켜 추력을 발생시키는 역할을 합니다. 이 라이너의 성능은 로켓의 추진 효율과 발사 안전성에 직접적인 영향을 미칩니다. 매우 복잡한 작업 환경으로 인해 이 소재에 대한 종합적인 성능 요건은 매우 높습니다. 텅스텐-구리 합금은 성능 최적화 및 공정 조정을 통해 이 부품에 이상적인 소재로 선택되었습니다 .

##### 6.3.1.1 고체 로켓 노즐 스로트 라이너의 작업 환경

고체 로켓 노즐의 스로트 라이너 작동 환경은 "재료 연옥"이라고 할 수 있으며, 동시에 여러 극한 조건이 중첩된 환경에서 견뎌야 합니다. 로켓이 점화되면 고체 추진체의 연소로 생성된 고온 연소 가스가 스로트 라이너를 초음속으로 통과합니다. 이 가스의 온도는 수천 도에 달할 수 있으며, 이는 대부분의 금속을 즉시 녹일 수 있는 온도입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고속 기류에 의해 운반되는 고체 입자는 매우 빠른 속도로 스로트 라이너 표면에 충돌하여 지속적인 "샌드블라스팅" 효과를 발생시켜 재료 표면을 지속적으로 마모시킵니다. 연소 가스에 포함된 산화성 기체와 부식성 입자는 스로트 라이너 표면과 화학적으로 반응하여 재료 손실을 더욱 악화시킵니다. 더 심각한 것은 점화부터 엔진 정지까지 짧은 시간 동안 스로트 라이너의 온도가 상온에서 고온으로 급격히 상승한 후 급격히 냉각된다는 것입니다. 극심한 온도 변화는 강한 열응력을 발생시켜 재료에 균열이 쉽게 발생할 수 있습니다. "고온 연소 + 고속 연마 + 화학적 부식 + 열충격"의 복합적인 환경은 재료의 내구성에 극심한 어려움을 야기합니다 .

#### 6.3.1.2 노즐 스로트 라이닝의 재료 특성에 대한 요구 사항

노즐 스로트 라이너의 작업 환경은 재료에 대한 성능 요구 사항이 포괄적이고 엄격해야 함을 결정합니다. 첫째, 재료는 매우 높은 내열성을 가져야 하며, 수천 섭씨 온도의 고온에서도 녹거나 변형되지 않아야 하며, 구조적 무결성을 유지할 수 있어야 합니다. 둘째, 우수한 내식성 및 내마모성을 가져야 하며, 고속 기류 및 입자의 지속적인 충격을 견뎌내고 표면 손실을 줄여야 합니다. 셋째, 열전도도가 우수해야 하며, 표면에 흡수된 열을 빠르게 방출하여 국부적인 과열 및 용해를 방지해야 합니다. 동시에 열충격 저항성은 필수적입니다. 온도가 급격히 상승하거나 하강할 때 열응력 발생을 줄이고 균열 발생을 방지할 수 있습니다. 마지막으로, 재료는 충분한 구조적 강도를 가져야 하며 고압 가스의 작용으로 파손되거나 붕괴되지 않아야 합니다. 이러한 요구 사항을 동시에 충족해야만 로켓 작동 중 스로트 라이너의 안정적인 기능을 보장할 수 있습니다.

#### 6.3.1.3 노즐 스로트 라이닝 요구 사항을 충족하는 텅스텐 구리 합금의 성능

텅스텐-구리 합금은 노즐 스로트 라이닝의 요구 사항을 정확히 충족하며, 핵심적인 장점은 "텅스텐과 구리의 시너지적 상보성"입니다. 텅스텐의 높은 용점은 고온 가스에서 합금의 안정성을 유지합니다. 표면이 매우 높은 온도에 노출되더라도 텅스텐 상으로 형성된 골격은 녹지 않아 "고온 연소"에 직접적으로 저항합니다. 텅스텐의 높은 강도와 경도는 합금에 탁월한 내식성을 부여하여 고속 입자의 충격을 견뎌내고 표면 마모를 줄이며 "고속 침식"에 대처할 수 있습니다. 구리의 높은 열전도도는 스로트 라이닝 표면의 열을 내부 또는 냉각 시스템으로 빠르게 전달하여 국부적인 열 축적으로 인한 용해를 방지하고 "열 축적" 문제를 해결하는 데 중요한 역할을 합니다. 동시에 구리의 가소성은 급격한 온도 변화로 인한 열응력을 완화하고, 텅스텐 골격의 취성 균열 위험을 줄이며, 열충격 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 또한 텅스텐-구리 합금은 고밀도화 공정을 거쳐 가공되므로 구조적 강도가 고압 가스의 충격을 견뎌내고 이후 라이닝 형상의 안정성을 확보할 수 있습니다.

#### 6.3.1.4 노즐 스로트 라이닝의 텅스텐 구리 합금 성형 공정 및 구조 설계

노즐 스로트 라이닝에 사용되는 텅스텐 구리 합금은 성능 극대화를 위해 정밀한 성형 공정과 구조 설계가 필요합니다. 성형 공정은 분말 야금법을 기반으로 합니다. 먼저 텅스텐 분말과 구리 분말을 특정 비율로 혼합하여 금형을 통해 스로트 라이닝(그린

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

빌릿)의 초기 형상으로 압착합니다. 그런 다음 텅스텐 입자를 고온 소결하여 결합시켜 연속적인 골격을 형성합니다. 그런 다음 구리를 용침 공정을 통해 골격의 기공을 채워 재료의 밀도를 높입니다. 마지막으로 정밀 가공을 통해 곡면 형상을 다듬어 노즐의 다른 부품과의 조립 정확도를 보장합니다.

구조 설계는 "기능적 적응"에 중점을 둡니다. 스포트 라이너 표면은 가스 흐름 궤적에 맞춰 호 모양의 곡면 디자인을 채택하여 공기 흐름 충격으로 인한 국부적인 마모를 줄였습니다. 일부 스포트 라이너는 내부에 미세한 냉각 채널을 예비 배치하고 구리의 높은 열전도율과 결합하여 냉각 매체를 통해 열을 빠르게 제거할 수 있습니다. 노즐의 다른 부분과의 연결부에는 고온 가스 누출을 방지하기 위해 계단형 밀봉 구조를 채택했습니다. 동시에, 스포트 라이너의 두께는 힘 분포에 따라 조정됩니다. 가스 충격이 가장 심한 부분은 적절한 두께로 두껍게 처리하여 강도를 확보하고 재료 낭비를 줄였습니다. "밀도 확보 공정 + 힘과 열 방출 최적화를 위한 구조"라는 이러한 설계는 텅스텐 구리 합금의 성능을 최대한 활용할 수 있도록 합니다.

#### 6.3.1.5 텅스텐 구리 합금 사용 후 노즐 스포트 라이닝 수명 향상

순수 텅스텐, 세라믹 등 기존 소재와 비교했을 때, 텅스텐 구리 합금은 노즐 스포트 라이너의 수명을 크게 연장하여 "일회용"에서 "다중 충격에 견딜 수 있는" 수준으로 향상시킵니다. 기존 순수 텅스텐은 고온에 강하지만 취성이 강하고 열충격 저항성이 낮습니다. 급격한 온도 변화에 따라 균열이 발생하기 쉽고, 한 번 점화하면 균열로 인해 파손되는 경우가 많습니다. 세라믹 소재는 내마모성이 우수하지만 열전도율이 낮고 열축적으로 인해 표면이 국부적으로 깎이기 쉬우며 수명이 매우 짧습니다.

텅스텐-구리 합금은 시너지 효과를 통해 이러한 문제점을 해결합니다. 텅스텐상은 고온 및 침식에 강하여 표면 마모율을 감소시키고, 구리상은 열을 효율적으로 전달하여 국부적인 과열 및 삭마를 방지합니다. 열충격 저항성이 향상되어 균열 발생 가능성이 줄어듭니다. 또한, 치밀한 성형 공정과 최적화된 구조 설계를 통해 노즐 스포트 라이너는 여러 차례의 점화-정지 사이클의 충격을 견딜 수 있습니다. 실제 적용 시, 텅스텐-구리 합금으로 제작된 노즐 스포트 라이너는 단일 발사 임무를 완료할 수 있을 뿐만 아니라, 일부 모델은 여러 차례의 시험 또는 재사용 로켓에도 사용할 수 있어 교체 빈도와 고장 위험을 크게 줄이는 동시에 로켓 발사의 경제성과 신뢰성을 향상시킵니다.

#### 6.3.2 항공기 엔진 구성 요소의 잠재적 응용 분야

항공기 엔진은 항공기의 "심장"이며, 그 성능은 항공기의 출력, 효율, 그리고 안전성을 직접적으로 좌우합니다. 항공 산업의 엔진 추력대중량비와 연비에 대한 요구가 높아짐에 따라 핵심 부품의 작업 환경은 점점 더 가혹해지고 있으며, 이는 소재의 종합적인 성능에 더 큰 과제를 안겨주고 있습니다. 고온 저항성, 열전도도, 그리고 구조적 강도의 균형 잡힌 특성을 지닌 텅스텐 구리 합금은 항공기 엔진의 고온부 부품과 같은 핵심 부품에 큰 잠재적 적용 가치를 보여주었으며, 극한 작업 조건에서 기존 소재의 성능 병목 현상을 해결할 것으로 기대됩니다 .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.3.2.1 항공기 엔진 주요 부품의 작업 환경 특성

항공기 엔진의 핵심 부품(특히 연소실, 터빈 블레이드, 노즐 등과 같은 고온부 부품)의 작동 환경은 "고온, 고압, 고주파 진동, 부식"이라는 네 가지 핵심 특성을 가지고 있습니다. 연소실 내부의 연료 연소 온도는 수천 섭씨(°C)에 달할 수 있으며, 터빈 블레이드는 고온 연소 가스의 플러싱(flushing) 하에서 고속(분당 수천 회전)으로 회전해야 하며, 엄청난 원심력과 열응력을 견뎌야 합니다. 고압 압축기와 터빈 사이의 틈새 부품은 고압 가스 환경에서 밀폐 상태를 유지하면서 공기 흐름 마찰로 인해 발생하는 국부적인 고온을 견뎌야 합니다. 또한, 연소 가스에 포함된 황화물, 질소 산화물 등의 성분은 부품 표면에 지속적인 부식을 유발합니다. 엔진 시동, 가속 및 감속 과정 중 발생하는 온도 및 압력 변동은 부품의 고주파 열 피로 및 기계적 진동을 유발합니다. "지속적인 고온 + 교번 응력 + 부식 침식 + 진동 충격"의 복합적인 환경은 재료의 안정성과 내구성에 심각한 시험을 제기합니다.

### 6.3.2.2 항공기 엔진 부품의 재료 특성에 대한 요구 사항

극한의 작업 환경으로 인해 항공 엔진 부품의 재료 성능 요건은 "전방위"적인 특성을 지녀야 합니다. 첫째, 소재는 우수한 고온 저항성을 가져야 하며, 연화로 인한 변형이나 파괴를 방지하기 위해 장기간 고온 환경에서도 기계적 특성(강도, 경도)이 크게 감소하지 않고 유지되어야 합니다. 둘째, 열전도도가 뛰어나야 하며, 부품 표면에서 열을 빠르게 방출하여 국부적인 핫스팟 발생을 줄이고 열 피로 위험을 줄여야 합니다. 셋째, 온도 및 압력 변화 시 균열 발생을 줄이고 진동 충격에 견딜 수 있도록 우수한 열충격 저항성과 기계적 인성을 가져야 합니다. 동시에, 내부식성은 필수적이며, 가스 중 부식성 부품의 침식을 방지하여 표면 박리 또는 구조적 약화를 방지할 수 있어야 합니다. 마지막으로, 소재는 일정 수준의 가공성을 가져야 하며, 성형 공정을 통해 복잡한 구조(예: 블레이드의 곡면, 냉각 채널 등)를 구현하여 부품의 정밀 설계 요건을 충족해야 합니다. 이러한 성과는 조율된 방식으로 이루어져야 하며, 어느 하나라도 빠지면 안 됩니다.

### 6.3.2.3 항공기 엔진의 열간단부에서의 텅스텐 구리 합금의 적용

항공기 엔진의 고온부 부품에 사용되는 텅스텐 구리 합금은 "열전도와 고온 저항을 모두 고려해야 한다"는 핵심 원칙에 중점을 두고 있으며, 부품의 다양한 기능에 따라 적용 분야가 조정됩니다. 연소실 라이너 분야에서는 텅스텐 함량이 높은 텅스텐 구리 합금을 사용하여 얇은 라이너를 제작할 수 있습니다. 텅스텐의 고온 저항성을 활용하여 직접 화염 연소를 방지하고, 구리의 열전도도는 열을 냉각 시스템으로 빠르게 전달하여 라이너의 국부적인 과열을 방지합니다. 터빈 블레이드의 앳지 또는 팁 밀봉부에서 텅스텐 구리 합금은 내마모성 열전도 인서트로 사용되어 블레이드 매트릭스에 매립될 수 있습니다. 높은 경도는 케이싱과의 마찰 및 마모를 방지하고, 열전도도는 블레이드의 열 발산을 돕고 열응력 집중을 줄여줍니다. 연료 노즐이나 점화 장치 부품에서 텅스텐 구리 합금은 노즐 코어로 제작될 수 있으며, 고온 저항성을 활용하여 연료 미립화의 안정성을 보장하고, 열전도도를 통해 탄소 침전물로 인한 과열로 인한 노즐 막힘을 방지합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



또한, 엔진의 열 보호 개스킷이나 고온 센서 하우징과 같은 보조 부품에서도 텅스텐 구리 합금은 맞춤형 구조(예: 냉각 채널이 있는 복합 구조)를 통해 역할을 수행할 수 있습니다.

#### 6.3.2.4 항공 엔진용 텅스텐 구리 합금의 성능 최적화 방향

항공기 엔진의 요구에 더 잘 대응하기 위해 텅스텐-구리 합금의 성능 최적화는 "단점 개선"과 "장점 강화"에 중점을 두어야 합니다. 고온 저항성 측면에서는 소량의 고용점 합금 원소(예: 몰리브덴, 니오븀)를 첨가하여 텅스텐 입자를 미세화하고, 텅스텐 골격의 고온 안정성을 향상시키며, 장기 고온에서의 연화 현상을 줄일 수 있습니다. 내식성 측면에서는 표면 개질 기술(예: 플라즈마 투과층, 산화 방지 코팅)을 사용하여 합금 표면에 치밀한 보호층을 형성하여 열전도도에 영향을 미치지 않으면서 가스 부식을 방지할 수 있습니다. 기계적 인성 측면에서는 텅스텐-구리 비율 조정(예: 구리 함량 적정 증가)이나 소결 공정 최적화를 통해 텅스텐-구리 계면의 접합 강도를 향상시켜 취성 파괴 위험을 줄일 수 있습니다. 가공성을 위해 분말 사출 성형과 같은 정밀 공정을 개발하여 복잡한 구조(예: 미세 냉각 채널 및 특수 형상 표면)의 순도에 가까운 성형을 달성함으로써 후속 가공의 어려움을 줄일 수 있습니다. 또한, "구배 구조 텅스텐-구리 합금"도 개발할 수 있습니다. 부품 표면에 텅스텐 함량을 높여 고온 저항성과 내마모성을 향상시키고, 내부 층에 구리 함량을 높여 열전도도와 인성을 향상시키며, 성능 구역화를 통해 부품의 다양한 위치 요구 사항에 적응할 수 있습니다. 이러한 최적화 방향은 텅스텐-구리 합금을 "잠재적 적용"에서 "실제 적용"으로 전환하여 항공기 엔진의 엄격한 기준을 충족하는 것을 목표로 합니다.

#### 6.3.3 우주선 전기 시스템의 응용

우주선 전기 시스템은 우주선의 정상적인 작동을 유지하는 "중추"입니다. 전력 전송, 명령 제어, 장비 전력 공급을 담당합니다. 전기 시스템의 신뢰성은 임무의 성공 여부와 직결됩니다. 우주에서 전기 시스템은 극한의 환경 시험에 직면하며, 텅스텐 구리 합금은 "뛰어난 전기 및 열 전도성과 강한 아크 부식 저항성" 덕분에 접촉기 및 회로 차단기와 같은 핵심 부품에 이상적인 소재로 자리 잡았습니다. 이는 전기 시스템의 안정적인 작동을 위한 핵심적인 지원을 제공합니다.

##### 6.3.3.1 우주선 전기 시스템의 작업 환경 및 신뢰성 요구 사항

우주선 전기 시스템의 작동 환경은 "극한"과 "유지보수 불가"라는 두 가지 주요 특징을 가지고 있습니다. 궤도에서 작동할 때 시스템은 진공, 고온 및 저온 교대 환경을 견뎌야 합니다. 진공 상태에서는 공기 중 열 발산이 없어 부품에 열이 쉽게 축적됩니다. 급격한 온도 변화는 재료의 팽창과 수축을 유발하여 응력 피로를 초래합니다. 동시에 우주에는 고에너지 입자 방사선이 존재하여 전기 신호 전송을 방해할 수 있으며, 발사 단계에서 발생하는 심한 진동과 충격은 부품의 구조적 무결성을 시험합니다.

이러한 환경적 특성을 바탕으로 시스템의 신뢰성 요건은 "무고장"에 가깝습니다. 핵심 부품은 며칠에서 몇 년까지의 임무 주기 동안 접촉 불량이나 아크 부식과 같은 문제 없이

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

안정적으로 작동해야 합니다. 전기 연결은 극한의 온도와 진동 환경에서도 전도성을 유지해야 하며, 아크 소호 부품은 전류를 안정적으로 차단해야 합니다. 입자 방사선이나 미세 운석 충돌 시에도 갑작스러운 고장은 방지해야 합니다. 일단 고장이 발생하면 궤도상에서 수리할 수 없기 때문에 임무 실패로 직결될 수 있습니다.

### 6.3.3.2 우주선 전기 시스템 핵심 구성품의 재료 특성에 대한 요구 사항

우주선 전기 시스템 핵심 부품(접촉기 접점 및 회로 차단기 아크 소호실 등)에 사용되는 재료의 성능 요건은 "전기적 안정성"과 "환경 적응성"에 크게 중점을 두고 있습니다. 첫째, 재료는 효율적인 전류 전달을 보장하고 접촉 저항으로 인한 열을 줄이기 위해 우수한 전도성을 가져야 합니다. 둘째, 아크 침식 저항성이 핵심입니다. 접점의 개폐 시 발생하는 아크는 표면을 태우므로, 재료는 고온 아크의 용융 및 비산을 견뎌야 합니다. 동시에 열전도도가 뛰어나야 하며, 아크에서 발생하는 열을 신속하게 방출하여 부품의 과열을 방지할 수 있어야 합니다. 또한, 재료는 우수한 열충격 저항성과 기계적 강도를 가져야 하며, 고온 및 저온 교대 및 진동 충격에도 균열이나 변형이 발생하지 않아야 합니다. 마지막으로, 진공 환경에서 재료는 휘발성 물질을 방출하지 않아야 하며(광학 장비 오염 방지), 화학적 안정성이 뛰어나고 주변 환경과 반응하지 않아야 합니다.

### 6.3.3.3 우주선 접촉기 접점에서의 텅스텐 구리 합금의 적용

접촉기는 우주선 전기 시스템에서 회로의 켜짐과 꺼짐을 제어하는 "스위치"입니다. 접촉기는 핵심 구동 부품이며, 접촉기에 적용된 텅스텐-구리 합금은 기능적 요구 사항을 정확하게 충족합니다. 접촉기 접점은 켜짐과 꺼짐 시 짧은 아크를 발생시킵니다. 텅스텐-구리 합금의 텅스텐 상은 아크의 고온을 견뎌내고 접점의 용융 및 변형을 방지할 수 있습니다. 구리 상은 우수한 전도성을 보장하고 접촉 저항을 줄이며 전도 중 발열을 감소시킵니다. 구조 설계 측면에서 접점은 종종 "텅스텐-구리 복합층" 형태를 채택합니다. 표면의 높은 텅스텐 함량은 아크 저항성을 향상시키고, 바닥층의 약간 높은 구리 함량은 바닥과의 용접성을 향상시킵니다.

### 6.3.3.4 우주선 회로 차단기의 아크 소호 부품에 텅스텐 구리 합금의 적용

회로 차단기는 우주선 전기 시스템의 "안전 장치"입니다. 회로에 과부하가 걸리거나 단락되면 전류를 신속하게 차단하고 아크를 소멸시켜야 합니다. 텅스텐-구리 합금은 아크 소호 부품 (예 : 아크 소호실 벽 및 아크 접점)에서 핵심적인 역할을 합니다. 아크 소호 시, 아크로 인해 발생하는 고온은 부품 표면을 쉽게 녹이며, 텅스텐-구리 합금의 텅스텐 상은 고온을 견뎌내고 표면 용해를 줄일 수 있습니다. 구리 상의 높은 열전도도는 아크 열을 냉각 구조로 빠르게 전달하여 아크 소호를 가속화합니다. 진공 아크 소호 환경에서 텅스텐-구리 합금은 휘발성 성분을 방출하지 않아 아크 내 불순물 가스의 혼입을 방지하고 아크 소호 효율을 보장합니다. 동시에, 열충격 저항성은 고온에서 저온 진공으로의 급격한 변화 시 부품의 균열을 방지하여 구조적 무결성을 유지합니다. 이러한 성능으로 인해 회로 차단기는 비상 상황에서 전류를 안정적으로 차단하고 회로 안전을 보호할 수 있습니다 .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.3.3.5 우주선 전기 시스템의 작동 안정성과 수명 보장에 있어서 텅스텐 구리 합금의 역할

텅스텐 구리 합금은 핵심 부품의 신뢰성을 향상시켜 우주선 전기 시스템의 작동 안정성과 수명을 직접적으로 보장합니다. 접촉기에서는 아크 침식 저항성이 점점 마모를 줄이고, 개폐 횟수를 수천에서 수만 회로 늘리며, 부품 교체 주기를 연장합니다. 안정적인 전도도는 점점 가열로 인한 국부 과열을 방지하고 회로 고장 위험을 줄입니다. 회로 차단기에서는 텅스텐 구리 합금의 효율적인 아크 소호 및 절삭 저항성이 과부하 시 전류를 신속하게 차단하여 고장 확산을 방지합니다. 동시에, 이 소재의 열충격 저항성과 기계적 강도는 장기적인 고온 및 저온, 진동 환경에서 부품이 고장 나는 것을 방지하여 수년에 달하는 우주선의 임무 주기에 적응합니다. 또한, 텅스텐 구리 합금의 낮은 휘발성은 다른 장비의 오염을 방지하고, 전체 전기 시스템의 원활한 작동을 간접적으로 보장하며, 재료 문제로 인한 체인 고장을 줄입니다.

### 6.3.3. 6 우주선 응용 분야에서 텅스텐 구리 합금에 대한 재료 선택 기준 및 품질 관리 요구 사항

우주선에 사용되는 텅스텐 구리 합금은 신뢰성 확보를 위해 엄격한 재료 선정 및 품질 관리를 거쳐야 합니다. 재료 선정 기준과 관련하여, 먼저 구성 비율을 명확히 해야 합니다. 접촉기 접점은 전도성과 아크 저항을 모두 고려해야 하며, 일반적으로 W70-Cu30 에서 W80-Cu20 계열을 선택합니다. 아크 소호 부품은 고온 내성을 향상시키기 위해 더 높은 텅스텐 함량(W85-Cu15 이상)이 필요합니다. 동시에, 내부 기공이 아크 침식의 취약 지점이 되는 것을 방지하기 위해 재료 밀도는 98% 이상이어야 하며, 전류 전달 효율을 보장하기 위해 전도성은 IACS(International Annealed Copper Standard) 기준 40% 이상이어야 합니다.

품질 관리는 전체 공정에 걸쳐 이루어집니다. 불순물이 전도성에 영향을 미치지 않도록 원자재의 순도를 검사해야 합니다. 성형 공정에서는 진공 소결 + 침투법을 사용하여 산화와 기공을 줄입니다. 완제품은 고온 및 저온 사이클, 진동 및 충격과 같은 환경 시험을 통과하여 성능 안정성을 검증해야 합니다. 마지막으로, 수천 번의 온/오프 사이클 후에도 기능이 유지되는지 확인하기 위해 아크 침식 시뮬레이션 시험이 필요합니다. 텅스텐 구리 합금은 풀 체인 제어를 통해서만 우주선의 "무결함" 적용 요건을 충족할 수 있습니다.

## 6.4 다른 분야에서의 응용

텅스텐- 구리 합금은 항공우주와 같은 첨단 분야에만 국한 되지 않습니다. "고온 저항성 및 전기 및 열 전도도 균형"과 "밀도 및 강도 제어 가능"이라는 특성은 야금, 스포츠, 의료, 원자력 및 기타 분야에서도 독보적인 가치를 발휘합니다. 다양한 시나리오의 요구에 따라 조성과 공정을 최적화함으로써 텅스텐-구리 합금은 "특수 소재"에서 벗어나 민간 및 산업 분야로 점차 확장되어 기존 소재의 성능 병목 현상을 해결하는 핵심 소재로 자리매김했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 6.4.1 야금 산업의 응용 시나리오

야금 산업의 고온 제련, 주조 및 가공 링크는 재료의 고온 저항성, 내마모성 및 열전도도에 대한 뛰어난 요구 사항을 가지고 있습니다. 텅스텐-구리 합금은 여러 핵심 시나리오에서 역할을 합니다. 진공 제련용 전극 재료 중 텅스텐-구리 합금은 높은 전도성과 고온 저항성으로 인해 아크 용해용 전극으로 사용될 수 있습니다. 텅스텐 상은 제련 중 고온 아크 침식을 방지하고 구리 상은 안정적인 전류 전달을 보장하는 동시에 아크 열을 빠르게 소산시켜 전극 과열을 방지합니다. 연속 주조 결정기의 내마모성 부품에서 텅스텐 함량이 높은 텅스텐-구리 합금은 결정기의 내벽 인서트로 만들어질 수 있습니다. 내마모성이 뛰어나 고온 용강의 침식을 방지하고, 열전도도가 뛰어나 용강의 빠른 냉각 및 성형을 도와 강 고착 현상을 줄입니다. 금속 다이캐스팅 금형의 국부 인서트(예: 금형 게이트, 코어 및 기타 마모되기 쉬운 부품)에서 텅스텐-구리 합금의 높은 강도와 내열충격성은 금형의 수명을 연장하고 반복적인 가열 및 냉각으로 인한 균열을 방지합니다. 또한, 야금 검출 장비의 고온 센서 하우징에서 높은 내열성과 밀봉성을 통해 검출 정확도를 보장합니다.

#### 6.4.2 스포츠 장비의 사용 사례

스포츠 장비 분야에서 텅스텐 구리 합금은 "고밀도와 충격 흡수의 결합"이라는 핵심 수요에 초점을 맞추고 있으며, 특히 정밀 스포츠 장비에 주로 사용됩니다. 양궁 장비의 밸런스 웨이트에서 고텅스텐 함량의 텅스텐 구리 합금은 높은 밀도 덕분에 적은 부피에도 충분한 무게를 제공하여 화살촉의 무게 중심을 조절하고 사격 안정성을 향상시킵니다. 또한, 구리 상은 웨이트 블록에 일정한 강도를 부여하여 충돌 시 파손을 방지합니다. 당구 큐의 웨이트 코어에서 텅스텐 구리 합금은 기존 납 블록을 대체할 수 있습니다. 텅스텐-구리 비율을 조절하여 무게 분포를 제어함으로써, 타격 시 동력 전달 요건을 충족할 뿐만 아니라 납의 유해 오염도 방지합니다. 고급 낚싯대의 핸들 웨이트 부품에서는 밀도와 내식성이 결합되어 무게를 통해 그립감을 향상시킬 뿐만 아니라 수중 환경에서의 녹 발생을 방지하고 장비의 수명을 연장합니다. 이러한 사용 사례는 모두 텅스텐 구리 합금의 "제어 가능한 밀도 + 무독성 + 우수한 성형성"이라는 장점을 활용하여 기존의 중금속 재료를 대체합니다.

#### 6.4.3 의료기기 분야 탐색

의료기기 분야는 재료의 생물학적 안전성, 정밀성 및 기능성에 대한 엄격한 요구를 요구합니다. 텅스텐-구리 합금의 연구 및 적용은 "고밀도와 방사선 차폐의 조합"이 필요한 시나리오에 중점을 둡니다. 방사선 치료용 선량 교정 장비에서 고텅스텐 함량의 텅스텐-구리 합금은 방사선 감쇠기로 사용될 수 있습니다. 텅스텐은 X 선과 감마선에 대한 강력한 차폐 기능을 가지고 있으며, 방사선 투과 선량을 정확하게 제어할 수 있습니다. 구리는 재료의 가공 정확도를 향상시키고, 교정 정확도를 보장하기 위해 복잡한 감쇠 채널로 제작될 수 있습니다. 동시에 무독성 및 화학적 안정성으로 장비 오염을 방지합니다. 중재적 의료기기의 위치 결정 요소(예: 혈관 스텐트의 개발 마크)에서 텅스텐-구리 합금의 고밀도 특성은 X 선 촬영 시 의사가 스텐트의 위치를 명확하게 파악할 수

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



있도록 도와줍니다. 또한, 구리 상의 가공성 덕분에 스텐트의 유연성에 영향을 주지 않고 마크를 미세 구조로 만들 수 있습니다. 현재 이러한 응용 분야는 아직 탐색 단계에 있습니다. 핵심은 표면 부동태화 처리를 통해 생체적합성을 더욱 향상시켜 임상 적용의 기반을 마련하는 것입니다.

#### 6.4.4 원자력 분야의 응용 전망

원자력 에너지 분야의 극한 환경(고온, 방사선, 고압)은 재료에 대한 매우 높은 내구성을 요구합니다. 텅스텐-구리 합금은 "고온 방사선 저항성 + 안정적인 열전도도"라는 특성으로 광범위한 적용 가능성을 보여주었습니다. 원자로의 제어봉 가이드 부품에서 텅스텐-구리 합금은 가이드 튜브로 사용될 수 있습니다. 텅스텐은 강력한 방사선 저항성을 가지고 있어 중성자 방사선 환경에서 구조적 안정성을 유지할 수 있습니다. 구리의 열전도도는 원자로 외부로 열을 전달하여 가이드 튜브가 과열로 인해 변형되는 것을 방지하고 제어봉의 원활한 이동을 보장합니다. 동시에, 구리의 내식성은 원자로 냉각수의 침식을 방지합니다. 핵폐기물 처리 장비의 차폐 부품에서 고텅스텐 함량의 텅스텐-구리 합금은 차폐 용기로 제작될 수 있으며, 텅스텐의 방사선 차폐 능력을 활용하여 핵폐기물을 격리합니다. 구리는 용기의 밀봉 및 가공성을 향상시켜 복잡한 밀봉 구조의 제작을 용이하게 합니다. 앞으로 방사선 저항 코팅 기술과 분말 야금 공정의 최적화를 통해 텅스텐-구리 합금은 소형 모듈형 원자로의 열교환 구성 요소 및 방사선 검출기 하우징 등의 시나리오에서 획기적인 발전을 이루어 핵 에너지의 안전한 운영을 위한 핵심 소재 중 하나가 될 것으로 기대됩니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

#### 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

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

| Product Name         | Chemical Composition (%) |                    |         | Physical and Mechanical Properties |               |                     |                        |
|----------------------|--------------------------|--------------------|---------|------------------------------------|---------------|---------------------|------------------------|
|                      | Cu                       | Total Impurities ≤ | W       | Density (g/cm³)                    | Hardness (HB) | Resistivity (MΩ·cm) | Tensile Strength (MPa) |
| Tungsten Copper (50) | 50±2.0                   | 0.5                | Balance | 11.85                              | 115           | 3.2                 | —                      |
| Tungsten Copper (60) | 40±2.0                   | 0.5                | Balance | 12.75                              | 140           | 3.7                 | —                      |
| Tungsten Copper (70) | 30±2.0                   | 0.5                | Balance | 13.8                               | 175           | 4.1                 | 790                    |
| Tungsten Copper (80) | 20±2.0                   | 0.5                | Balance | 15.15                              | 220           | 5                   | 980                    |
| Tungsten Copper (90) | 10±2.0                   | 0.5                | Balance | 16.75                              | 260           | 6.5                 | 1160                   |

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.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 구리 합금의 미래 발전 동향

텅스텐 구리 합금은 고성능 응용 분야에서 지속적인 최적화와 혁신에 집중하며, 신기술을 결합하여 성능 향상 및 응용 분야 확장을 촉진합니다. 향후 개발은 전기, 항공우주 및 신에너지 분야의 증가하는 요구를 충족하기 위해 새로운 제조 기술, 성능 향상 전략 및 지속 가능한 설계에 집중할 것입니다.

### 7.1 텅스텐 구리 합금의 새로운 제조 기술 탐색

텅스텐-구리 합금은 기존 공정의 한계를 극복하고 미세 구조 제어 및 성능을 향상시키는 첨단 제조 기술을 도입하는 것을 목표로 합니다. 이러한 기술은 혁신적인 소재 가공 및 성형 방법을 통해 텅스텐과 구리의 분포를 최적화하고, 결합을 줄이며, 기능성을 향상시킵니다. 새로운 제조 기술의 개발은 복잡한 형상, 고정밀 부품 및 맞춤형 응용 분야에서 합금의 광범위한 사용을 촉진할 것입니다.

#### 7.1.1 적층 제조 기술의 잠재적 응용 분야

합금 제조의 잠재적 응용 분야로서, 적층 제조 기술은 재료를 층층이 증착하여 복잡한 구조를 구현할 수 있는 가능성을 제공합니다. 컴퓨터 지원 설계(CAD)를 기반으로 하는 이 기술은 분말 베드 융합(PBF) 또는 방향성 에너지 증착(DED) 방식을 사용하여 텅스텐과 구리 분말을 층층이 용융 및 응고시켜 맞춤형 미세 구조를 가진 합금 부품을 형성합니다. 이 기술은 텅스텐과 구리의 국부적인 분포를 정밀하게 제어하고, 기능성 그래디언트 재료를 생성하며, 부품의 여러 영역에서 전도성과 고온 저항 간의 동적 균형을 달성할 수 있다는 점에서 잠재적 응용 분야가 있습니다. 이 공정을 통해 내부 냉각 채널이나 경량 구조와 같은 복잡한 형상을 설계하여 항공우주 및 전자 장비의 높은 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

적층 제조 기술은 재료 낭비를 줄이고 생산 주기를 단축하며, 디지털 모델을 통해 직접 성형하여 소량 생산 또는 맞춤형 생산 요구를 충족하는 것을 포함합니다. 텅스텐-구리 합금에서 이 기술은 결정립 형태와 상 분포를 최적화하고, 계면 결합을 향상시키며, 기존 공정에서 발생하는 기공과 비습윤 영역을 줄일 수 있습니다. 잠재적인 응용 분야로는 고성능 방열판, 정밀 전기 접점, 맞춤형 용접 전극 등이 있으며, 특히 복잡한 내부 구조가 필요한 부품에 적합합니다. 향후 개발에서는 분말 혼합 균일성, 열 응력 제어, 후처리 최적화와 같은 문제를 해결하여 부품의 신뢰성과 일관성을 향상시켜야 합니다.

#### 7.1.2 기타 첨단 제조 기술의 전망

적층 제조 기술 외에도 다른 최첨단 제조 기술의 전망은 텅스텐-구리 합금의 미래 개발을 위한 다양한 길을 제공합니다. 이러한 기술에는 나노기술, 플라즈마 용사, 자가 조립법이 포함되며, 혁신적인 재료 설계 및 가공 방법을 통해 합금의 성능을 향상시키는 것을 목표로 합니다. 나노기술은 초미립 텅스텐 및 구리 분말을 사용하여 미세 구조의 균일성과 밀도를 향상시켜 전도성과 기계적 강도를 잠재적으로 향상시킵니다. 플라즈마

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

용사 기술은 고속 플라즈마를 통해 텅스텐 및 구리 입자를 용융 및 증착하는데, 이는 코팅이나 복잡한 표면의 신속한 제조에 적합하며 내마모성 및 내부식성 응용 분야에 적합합니다. 자가 조립법은 재료 자체의 화학적 또는 물리적 특성을 이용하여 분자 수준에서 상 분포를 조절하고 새로운 복합 구조를 탐색합니다.

이러한 최첨단 기술의 전망은 기존 분말 야금이나 용융 침투법의 한계를 극복하고 더 큰 유연성과 기능성을 제공할 수 있다는 데 있습니다. 예를 들어, 나노기술은 더 미세한 입자 크기를 구현하고 아크 침식에 대한 저항성을 향상시킬 수 있으며, 플라즈마 용사는 부품 표면을 신속하게 수리하거나 강화할 수 있습니다. 또한, 자가 조립 방식은 지능형 소재 설계의 새로운 영역을 열어줄 수 있습니다. 향후 개발 방향에는 나노분말 과 적층 제조의 결합, 또는 플라즈마 용사와 표면 처리의 시너지 효과를 통해 미세 구조와 성능을 최적화하는 등 여러 기술을 통합하는 것이 포함됩니다. 과제는 공정 복잡성, 비용 관리, 그리고 대규모 적용 가능성입니다. 이러한 기술의 발전은 텅스텐-구리 합금의 새로운 응용 분야를 열어줄 것입니다.

## 7.2 텅스텐 구리 합금 성능 최적화 연구 방향

텅스텐 -구리 합금은 점점 더 복잡해지는 응용 분야 요건을 충족하기 위해 재료 설계 및 공정 개선에 대한 심층적인 연구를 통해 전기 전도도, 열 전도도, 기계적 강도 및 내구성을 종합적으로 향상시키는 것을 목표로 합니다. 성능 최적화의 핵심은 텅스텐과 구리의 특성 균형, 미세 구조 미세 조정, 그리고 특정 시나리오에 맞는 맞춤형 솔루션 개발에 있습니다. 연구 방향은 종합적인 성능 향상과 특정 응용 시나리오 강화를 포괄하며, 합금 개발 촉진에 있어 혁신적인 방법의 역할을 강조합니다.

### 7.2.1 종합 성과 개선을 위한 연구 방향

종합적인 성능 향상을 위한 연구 방향은 텅스텐-구리 합금 의 전기 전도성, 열 전도성, 기계적 강도, 내식성을 포함한 다양한 특성을 동시에 향상시켜 전반적인 성능 최적화를 달성하는 데 중점을 두고 있습니다. 연구의 핵심은 미세 구조의 미세 제어, 결합 감소, 그리고 입자 크기, 상 분포 및 계면 결합 최적화를 통한 재료 밀도 향상에 있습니다. 텅스텐과 구리의 균일한 분포를 보장하고, 구리 상의 연속성을 향상시켜 전기 및 열 전도성을 개선하는 동시에, 텅스텐 상의 안정적인 구조를 유지하여 기계적 강도를 유지하는 새로운 분말 혼합 기술을 개발하는 것이 잠재적인 방법입니다. 중간상 도입이나 표면 개질과 같은 계면 향상 기술은 텅스텐과 구리 사이의 접착력을 향상시키고 결합 분리 위험을 줄일 수 있습니다.

또 다른 연구 방향은 강도와 인성의 균형을 맞추기 위해 미세 구조를 조정하기 위해 미량 첨가제 또는 2 상 재료를 도입하는 다상 복합재 설계를 탐구하는 것입니다. 첨가제를 선택할 때는 텅스텐 및 구리와 화학적 호환성을 고려하여 새로운 약점을 방지해야 합니다. 또한, 단계적 소결이나 가압 처리와 같은 공정 혁신을 통해 기공률을 더욱 줄이고 재료의 전반적인 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 표면 처리 또는 코팅 기술을 통해 텅스텐의 고온 내성을 유지하면서 구리 상을 환경 부식으로부터 보호하여 내식성과

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

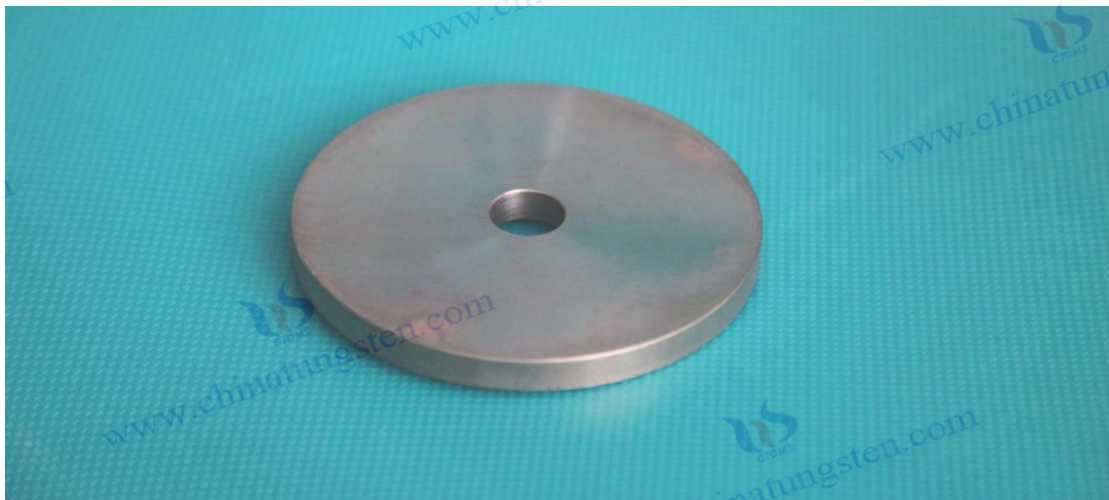


내산화성을 향상시킬 수 있습니다. 향후 연구에서는 시뮬레이션 기술과 인공지능을 결합하여 미세 구조와 성능 간의 관계를 예측하고 제조 매개변수를 동적으로 최적화할 수 있습니다. 이러한 연구 방향의 발전은 다양한 고성능 응용 분야에서 텅스텐-구리 합금의 종합적인 성능을 향상시킬 것입니다.

### 7.2.2 특정 애플리케이션 시나리오에서의 성능 향상

특정 응용 분야에서 성능 향상을 위한 연구 방향은 전기 접점, 용접 전극, 항공우주 부품과 같은 특정 분야에서 텅스텐-구리 합금의 성능을 맞춤화하고 최적화하는 것을 목표로 합니다. 전기 접점 응용 분야에서는 전도성과 아크 침식 저항성을 향상시키는 데 중점을 둡니다. 구리 상의 네트워크 구조를 최적화하여 전자 전달 효율을 높이고, 고온 내성 코팅이나 표면 개질을 통해 아크로 인한 표면 손상을 줄일 수 있습니다. 연구를 통해 텅스텐 함량을 동적으로 조절하여 고전류 환경에서 더 나은 내마모성과 안정성을 제공하는 방법을 모색할 수 있습니다.

용접 전극 응용 분야의 성능 향상 방향은 고온 내성과 접착 방지 성능을 향상시키는 것입니다. 텅스텐 상의 비율을 높이고, 소결 공정을 최적화하고, 기공률을 줄여 열전도도를 향상시킴으로써 골격의 용융 방지 성능을 향상시킬 수 있습니다. 계면 결합 강화 또한 고온에서 구리 상이 공작물에 접착되는 것을 방지하는 데 중요합니다. 연구를 통해 습윤 개선제나 다층 구조 설계를 도입할 수 있습니다. 방열판과 같은 항공우주 부품의 요구는 열전도도와 경량화에 중점을 둡니다. 기능성 경사 설계를 사용하여 표면에 구리 상의 높은 열전도도 분포를 달성할 수 있으며, 텅스텐 상은 내부에 구조적 지지력을 제공합니다. 연구 방향에는 내부 기공 분포를 최적화하기 위한 새로운 성형 기술 개발이 포함됩니다. 이러한 특정 강화 연구는 온도, 기계적 응력, 사용 주기와 같은 실제 적용 시나리오 조건과 결합하여 목표 시험 및 검증 방법을 개발해야 합니다. 향후 개발에서는 환경 변화에 따라 합금의 성능을 동적으로 조정할 수 있는 적응형 소재 설계를 모색하거나, 스마트 제조 기술을 사용하여 성능을 실시간으로 모니터링하고 최적화할 수 있습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

#### 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

Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

| Product Name         | Chemical Composition (%) |                    |         | Physical and Mechanical Properties |               |                     |                        |
|----------------------|--------------------------|--------------------|---------|------------------------------------|---------------|---------------------|------------------------|
|                      | Cu                       | Total Impurities ≤ | W       | Density (g/cm³)                    | Hardness (HB) | Resistivity (MΩ·cm) | Tensile Strength (MPa) |
| Tungsten Copper (50) | 50±2.0                   | 0.5                | Balance | 11.85                              | 115           | 3.2                 | —                      |
| Tungsten Copper (60) | 40±2.0                   | 0.5                | Balance | 12.75                              | 140           | 3.7                 | —                      |
| Tungsten Copper (70) | 30±2.0                   | 0.5                | Balance | 13.8                               | 175           | 4.1                 | 790                    |
| Tungsten Copper (80) | 20±2.0                   | 0.5                | Balance | 15.15                              | 220           | 5                   | 980                    |
| Tungsten Copper (90) | 10±2.0                   | 0.5                | Balance | 16.75                              | 260           | 6.5                 | 1160                   |

3. Applications of Tungsten Copper Alloys

**Power Equipment:** Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

**Electronics and Semiconductor Industry:** Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

**Electrical Discharge Machining (EDM):** Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

**Aerospace and Defense:** High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten-copper.com](http://www.tungsten-copper.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 부록

### 부록 A 텅스텐 구리 합금에 대한 중국 국가 표준

텅스텐 구리 합금 국가 표준은 중국 표준화 관리국(SAC)에서 제정하여 텅스텐 구리 합금의 제조, 성능 및 적용을 규제하고 제품 품질과 산업 일관성을 보장합니다. 이러한 표준은 주로 텅스텐 구리 합금 분말, 완제품 및 관련 시험 방법을 다룹니다. 텅스텐 구리 합금에 대한 단일 국가 표준은 없지만 관련 표준은 텅스텐 및 구리 합금의 일반 규격에서 파생될 수 있습니다. 중국의 국가 표준 시스템에는 GB/T 시리즈가 포함되며, GB/T 26055-2022(재구성 텅스텐 카바이드 분말)와 같은 일부 표준은 텅스텐 기반 재료의 제조 요건을 포함하며 참고 자료로 사용할 수 있습니다. GB/T 38470-2023 과 GB/T 38471-2023 은 각각 2 차 구리 합금과 구리 원료에 대한 품질 기준을 명시하며, 텅스텐 구리 합금의 구리상 품질 관리에 간접적으로 적용됩니다. 또한, GB/T 5242-2006 과 GB/T 5243-2006 은 초경합금 제품에 대한 검사 규칙과 포장 및 운송 사양을 제공하며, 이 중 일부는 텅스텐 구리 합금의 검사 및 운송으로 확장 적용될 수 있습니다. 이러한 표준은 화학 분석, 밀도 측정 및 미세 구조 평가를 통해 재료의 균질성과 성능의 일관성을 보장합니다.

중국 표준의 특징은 국내 원자재 및 공정에 대한 적응성, 환경 보호 및 품질 감독에 대한 강조입니다. 최근 몇 년 동안 폐기물 수입 정책이 강화됨에 따라 2023 년 신세관 표준 시행과 같은 구리 원자재의 순도 및 비금속 불순물 함량에 대한 요구 사항이 더욱 높아졌으며, 이는 텅스텐 구리 합금 생산에 간접적인 영향을 미칩니다. 표준의 내용은 일반적으로 재료 구성, 물리적 특성 및 가공 기술에 대한 요구 사항을 포함하며, 전기 접점 및 용접 전극의 적용과 같은 국내 산업 요구를 지원하는 것을 목표로 합니다. 향후 기술 발전 및 국제 경쟁에 적응하기 위해 새로운 제조 기술에 대한 요구 사항을 포함하도록 표준이 더욱 정교해질 수 있습니다.

### 부록 B 국제 텅스텐 구리 합금 표준

국제 텅스텐 구리 합금 표준은 주로 국제 표준화 기구(ISO)와 기타 국가 또는 지역 표준 기관에서 개발하여 글로벌 공급망에 대한 통합된 참조 프레임워크를 제공합니다. 텅스텐 구리 합금에 대한 구체적인 국제 표준은 없지만 텅스텐 합금 및 구리 합금에 대한 일반 표준에서 관련 사양을 얻을 수 있습니다. ISO 18119 는 초경합금 생산에 사용되는 텅스텐 합금 분말을 다루고 분말 준비 및 특성에 대한 기본 요구 사항을 제공하며 텅스텐 구리 합금 원료의 기초로 사용할 수 있습니다. JIS H 3201(일본 공업 규격)과 같은 다른 국제 표준은 텅스텐 합금 분말의 특성을 지정하며 그 중 일부는 텅스텐 구리 복합재에 적용할 수 있습니다. ASTM 국제 표준과 EN 표준은 텅스텐 구리 합금을 직접 대상으로 하지 않지만 금속 재료 시험 방법(예: 밀도 및 경도 시험)을 성능 평가에 사용할 수 있습니다.

국제 표준의 특징은 재료의 일관성과 무역 편의성을 강조하는 초국가적 적용성입니다. 미국, 일본, 유럽과 같은 여러 국가와 지역의 산업 표준(ASTM, JIS, DIN 등)은 상호 지원과 상호 인정을 통해 글로벌 사양 시스템을 형성했습니다. 항공우주 및 전자 패키징과 같은 텅스텐 구리 합금의 국제적 적용으로 인해 이러한 표준은 높은

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전기 전도성, 높은 열 전도성 및 고온 저항에 중점을 두게 되었습니다. 일부 주요 분말 제조업체는 국제 표준의 결점을 보완하고 고품질 공급을 보장하기 위해 내부 사양을 개발하기도 했습니다. 그러나 국제 표준은 아직 적층 제조와 같은 새로운 제조 기술을 완전히 지원하지 못하며 향후 기술 개발에 적응하기 위해 업데이트가 필요할 수 있습니다. 전반적으로 국제 표준은 텅스텐 구리 합금의 글로벌 무역 및 적용에 중요한 지침을 제공 하지만 구체적인 구현은 각국의 실제 조건과 결합되어야 합니다.

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

유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가의 텅스텐 구리 합금 표준은 해당 국가 또는 지역 표준화 기관에서 재료 특성, 제조 공정 및 적용 요건을 표준화하여 세계 무역 및 산업 발전을 지원하기 위해 제정합니다. 텅스텐 구리 합금에 대한 통일된 국제 표준은 없지만, 관련 규격은 일반적으로 텅스텐 합금, 구리 합금 또는 복합 재료의 일반 표준에서 파생됩니다. 다음은 주요 국가 및 지역의 표준 개요입니다.

유럽과 미국에서는 미국의 ASTM 국제 표준과 유럽의 EN 표준이 주요 기준 프레임워크입니다. ASTM B702와 같은 ASTM 표준은 밀도, 전도도 및 경도와 같은 매개변수를 포함하여 텅스텐-구리 전기 접점 재료의 준비 및 성능 요구 사항을 다루지만 모든 유형의 텅스텐-구리 합금에 대한 자세한 사양을 제공하지 않습니다. EN 표준은 주로 구리 및 구리 합금에 초점을 맞추고 텅스텐-구리 합금의 구리 상 품질 관리에 간접적으로 적용됩니다. 이러한 표준은 재료의 일관성과 시험 방법의 반복성을 강조하며 전기 접점 및 방열판 응용 분야에서 널리 사용됩니다. 유럽 및 미국 표준은 높은 전도도와 고온 저항에 대한 높은 요구 사항을 갖습니다. American Elements 및 Plansee와 같은 일부 회사는 일반 표준의 결점을 보완하기 위해 내부 사양을 공식화했습니다.

일본의 JIS 규격(예: JIS H 3201)은 텅스텐 합금 분말의 특성을 규정하며, 이 중 일부는 텅스텐-구리 복합재에 적용 가능하며, 분말 입자 크기와 화학 조성의 균일성에 초점을 맞춥니다. 일본 산업에서 텅스텐-구리 합금의 적용은 대부분 전기 스파크 가공(EDM) 전극과 고전압 스위치 접점에 집중되어 있으며, 이 규격은 아크 침식 저항성과 전기 전도성을 강조합니다. 한국 규격은 한국산업규격(KS)에 의해 제정됩니다. KS D 2101과 같은 규격은 텅스텐 기반 재료를 포함하며 텅스텐-구리 합금의 분말 야금 공정에 적용 가능합니다. 한국은 고정밀 부품 생산에 중점을 두고 있으며, 이 규격은 미세 구조와 열 전도성에 대한 특정 요구 사항을 가지고 있어 전자 패키징 및 항공우주 분야의 요구 사항을 반영합니다.

이들 국가의 표준에는 차이가 있습니다. 유럽과 미국은 다용성과 무역 호환성에 중점을 두는 반면, 일본과 한국은 특정 산업 응용 분야의 기술적 세부 사항에 더 많은 관심을 기울입니다. 다양한 표준에서 텅스텐 구리 합금(예: WCu 70/30, WCu 80/20) 비율에 대한 성능 요구 사항은 다를 수 있지만 일반적으로 높은 밀도, 낮은 열 팽창 및 우수한 전도성을 요구합니다. 현재 표준은 적층 제조와 같은 신기술에 대한 지원이 제한적이며 향후 기술 발전에 적응하기 위해 업데이트해야 할 수도 있습니다. 전반적으로 이러한 표준은 텅스텐 구리 합금의 국제 협력 및 적용에 중요한 지침을 제공하지만, 그 구현은

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



각국의 산업적 특성 및 시장 요구와 결합되어야 합니다.

#### 부록 D 텅스텐 구리 합금 용어집

| 용어        | 정의                                                          |
|-----------|-------------------------------------------------------------|
| 텅스텐 구리 합금 | 분말 야금이나 침투법을 통해 텅스텐과 구리를 제조하여 높은 녹는점과 전기 전도성을 결합한 제품입니다.    |
| 분말 야금     | 금속 분말을 혼합, 압축, 소결하여 합금을 제조하는 공정은 텅스텐 구리 합금의 균일한 분포에 적합합니다.  |
| 진공 침투     | 진공 환경에서 텅스텐 골격에 액체 구리를 침투시키는 공정을 사용하여 고밀도 텅스텐-구리 합금을 제조합니다. |
| 입자 크기     | 합금 내 텅스텐이나 구리 입자의 평균 크기는 강도와 전도도에 영향을 미칩니다.                 |
| 위상 분포     | 합금 내의 텅스텐과 구리상은 전기 및 열 전도 경로를 결정합니다.                        |
| 다공성       | 합금 내의 채워지지 않은 공극의 비율은 밀도와 기계적 특성에 영향을 미칩니다.                 |
| 인터페이스 본딩  | 텅스텐과 구리상은 하중 전달과 박리 저항성에 영향을 미칩니다.                          |
| 전기 전도도    | 합금의 전류 전달 능력은 주로 구리 상의 연속성에 의해 결정됩니다.                       |
| 열전도도      | 합금의 열 전달 능력은 구리상 분포와 미세구조적 균질성에 따라 달라집니다.                   |
| 아크 침식 저항성 | 합금이 아크 고온 절삭에 저항하는 능력은 텅스텐 상의 안정성과 기공 분포에 영향을 받습니다.         |
| 액상 소결     | 합금의 밀도는 구리 액상 습윤 및 텅스텐 입자 충진을 이용한 고온 소결 공정을 통해 향상됩니다.       |
| 열간 등방압 가압 | 합금은 다공성을 줄이고 미세구조를 개선하기 위해 전방위 압력을 사용하여 고온에서 처리됩니다.         |



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

#### 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)

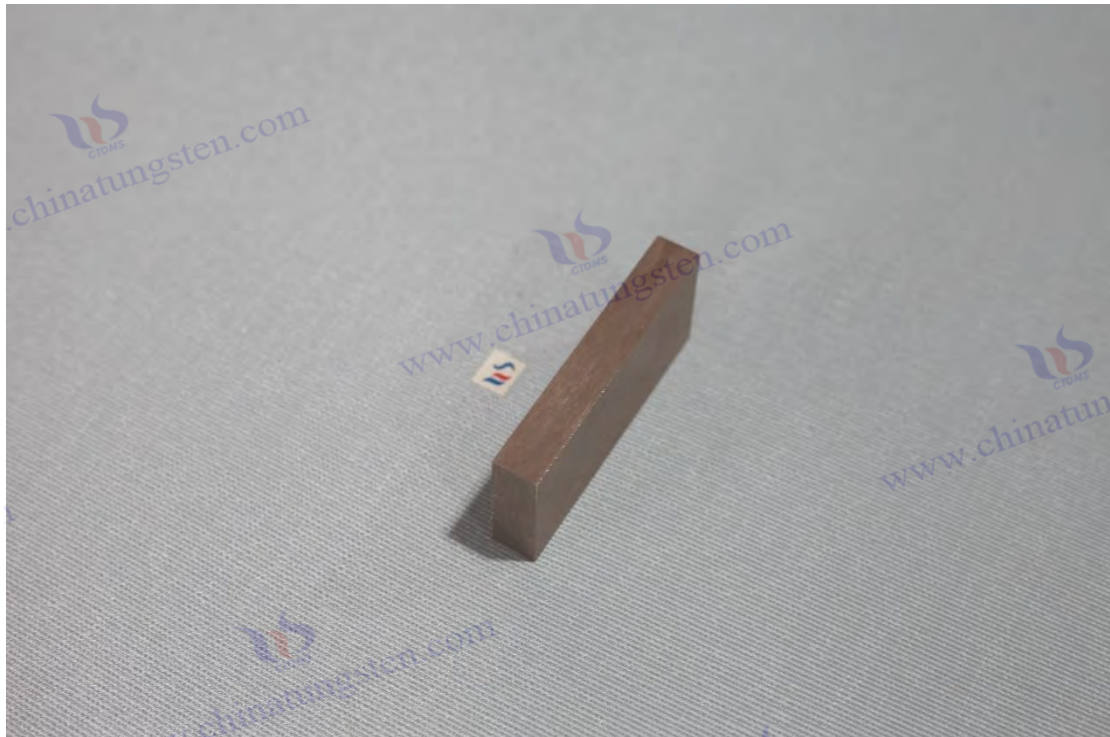
## 참고문헌

### 중국 문학

- [1] 중국표준화협회(2023). GB/T 26055-2022 재구성된 텅스텐 카바이드 분말. 베이징: 중국표준출판사.
- [2] 중국표준화협회(2023). GB/T 38470-2023 2 차 구리 합금. 베이징: 중국표준출판사.
- [3] 중국표준화협회(2023). GB/T 38471-2023 구리 원료에 대한 품질 요구 사항. 베이징: 중국표준출판사.
- [4] 중국표준화협회(2006). GB/T 5242-2006 시멘트 카바이드 제품에 대한 검사 규칙. 베이징: 중국표준출판사.
- [5] 중국표준화협회(2006). GB/T 5243-2006 시멘트 카바이드 제품의 포장 및 운송에 대한 사양. 베이징: 중국표준출판사.

### 영문학

- [1] 국제표준화기구(2020). ISO 18119: 경금속용 텅스텐 합금 분말 . 스위스 : ISO.
- [2] 일본공업규격위원회(2018). JIS H 3201: 텅스텐 합금분말 특성. 도쿄: 일본표준협회.
- [3] ASTM International. (2019). ASTM B702: 텅스텐-구리 전기 접점 재료에 대한 표준 사양. 미국: ASTM.
- [4] 유럽 표준화 위원회(2017). EN 13601: 구리 및 구리 합금 - 막대. 브뤼셀: CEN.
- [5] 국가기술표준원. (2021). KS D 2101: 텅스텐 기반 재료의 분말야금 규격. 서울: KATS.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 구리 합금

#### 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)